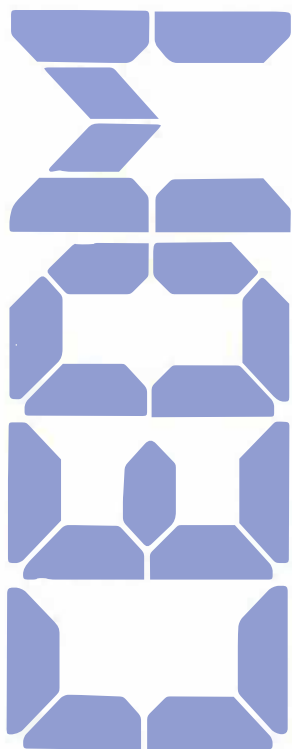

CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES



CURSOS DE APERFEIÇOAMENTO

**E1/E20
ELETRÔNICA BÁSICA**

ELETRÔNICA BÁSICA

3ª EDIÇÃO

**ELABORADO PELO DEPARTAMENTO TÉCNICO
CURSO CEDM**

LONDRINA 01/85

SUMÁRIO

CAPÍTULO E-1	- Natureza da eletricidade.....	E1 - 01
	~ O átomo.....	E1 - 02
	- Corpos carregados eletricamente.....	E1 - 04
	- Condutores e isolantes.....	E1 - 05
	- Processos de eletrização.....	E1 - 06
	- Eletrização por atrito.....	E1 - 06
	- Eletrização por contato.....	E1 - 07
	- Eletrização por indução.....	E1 - 09
	- Eletroscópios.....	E1 - 11
	- O pêndulo elétrico.....	E1 - 11
	- Tabela de elementos químicos.....	E1 - 12
	- Eletroscópio de folha.....	E1 - 14
	- Eletrostática.....	E1 - 15
	- Força eletromotriz.....	E1 - 16
	- Diferença de potencial.....	E1 - 17
	- Corrente elétrica.....	E1 - 17
	- Intensidade da corrente elétrica.....	E1 - 19
	- Corrente contínua e corrente alternada..	E1 - 19
	- Exame da lição E1.....	E1 - 20
CAPÍTULO E-2	- Pilhas e baterias.....	E2 - 01
	- A história da pilha.....	E2 - 03
	- A pilha ou célula voltaica.....	E2 - 04
	- Pilha a seco.....	E2 - 07
	- Pilhas de mercúrio.....	E2 - 08
	- Pilhas alcalinas de bióxido de manganês..	E2 - 10
	- Pilhas de zinco-ar.....	E2 - 10
	- Pilhas de cádmio ou níquel-cádmio.....	E2 - 12
	- Uso das níquel-cádmio.....	E2 - 14
	- Carga Rápida.....	E2 - 15
	- Ciclo de descarga.....	E2 - 15
	- Retenção de carga e armazenamento.....	E2 - 17
	- Tempo de uso.....	E2 - 17
	- Precauções que asseguram um longo período de vida.....	E2 - 18
	- Recicladores carregadores/descarregadores.....	E2 - 18
	- Exame da lição E-2.....	E2 - 23
CAPÍTULO E-3	- Acumuladores.....	E3 - 01

CAPÍTULO E-3 - Funcionamento de uma bateria secundária ou acumulador.....	E3 - 03
- Processo de carga.....	E3 - 03
- Processo de descarga.....	E3 - 04
- Acumuladores alcalinos.....	E3 - 05
- Densidade.....	E3 - 07
- Densímetro.....	E3 - 10
- Voltímetro de alta descarga.....	E3 - 11
- Indicações das condições de uma bateria.....	E3 - 12
- Carregador de baterias.....	E3 - 13
- Exame da lição E-3.....	E3 - 15
 CAPÍTULO E-4 - Magnetismo.....	 E4 - 01
- Ímãs naturais e artificiais.....	E4 - 02
- Os principais processos de imantação.....	E4 - 03
- Ímãs permanentes e temporários.....	E4 - 04
- Bússola.....	E4 - 04
- Regiões polares.....	E4 - 05
- Linhas de força.....	E4 - 06
- Propriedades das linhas de força.....	E4 - 06
- Permeabilidade magnética.....	E4 - 07
- Campo magnético.....	E4 - 07
- Leis de atração e repulsão.....	E4 - 08
- Espectros magnéticos.....	E4 - 09
- Eletricidade através do magnetismo.....	E4 - 10
- Inseparabilidade dos pólos.....	E4 - 12
- Constituição dos ímãs.....	E4 - 13
- Desmagnetização ou perda do magnetismo.....	E4 - 14
- Conservação dos ímãs.....	E4 - 14
- Substâncias magnetizáveis.....	E4 - 15
- Indução magnética.....	E4 - 15
- Domínios magnéticos.....	E4 - 16
- O magnetismo terrestre.....	E4 - 17
- Declinação.....	E4 - 18
- Transparência magnética.....	E4 - 19
- Relutância magnética.....	E4 - 20
- Densidade do campo magnético.....	E4 - 20
- Exame da lição E-4.....	E4 - 21
 CAPÍTULO E-5 - Eletromagnetismo.....	 E5 - 01
- Campos magnéticos produzidos por correntes elétricas.....	E5 - 01
- Regra da mão esquerda.....	E5 - 03

- Solenóide.....	E5 - 05
- Polaridade magnética de uma solenóide...	E5 - 07
- Eletroímãs.....	E5 - 08
- Disjuntor.....	E5 - 10
- Relé.....	E5 - 12
- Campanha elétrica.....	E5 - 13
- Telegrafo elétrico.....	E5 - 14
- Microfone.....	E5 - 16
- Receptor telefônico(fone).....	E5 - 17
- Campo magnético no interior de uma ma- triz de núcleo de ferrite.....	E5 - 18
- Exame da lição E-5.....	E5 - 21

CAPÍTULO E-6 - Indução eletromagnética.....	E6 - 01
- Exemplos de indução eletromagnética.....	E6 - 03
- Indução em uma bobina por meio de um ímã.....	E6 - 04
- Indução em uma bobina por meio de ou- tra bobina.....	E6 - 04
- Leis fundamentais da indução eletromag- nética.....	E6 - 06
- Auto-indução.....	E6 - 08
- Unidade da indutância.....	E6 - 10
- Correntes de foucault.....	E6 - 12
- Histerese.....	E6 - 13
- Efeito cortical (skin effect).....	E6 - 13
- Perdas no cobre e no ferro.....	E6 - 14
- Indutância aplicada em um circuito de C.A.....	E6 - 15
- Efeito da frequência sobre a reatância indutiva.....	E6 - 17
- Efeito da corrente alternada sobre uma bobina de núcleo de ar.....	E6 - 18
- Bobinas de indução.....	E6 - 19
- Exame da lição E6.....	E6 - 21

CAPÍTULO E-7 - Fundamentos sobre semicondutores I.....	E7 - 01
- Introdução.....	E7 - 01
- Constituição da matéria.....	E7 - 02
- Estrutura do átomo.....	E7 - 03
- Íons positivos e negativos.....	E7 - 06
- Ligações químicas.....	E7 - 07
- Condutores, isolantes e semicondutores.....	E7 - 10
- Germânio (Ge) e silício (Si).....	E7 - 11

- Estrutura cristalina dos semicondutores.	E7 - 13
- Elétrons e lacunas.....	E7 - 14
- Deslocamentos de elétrons e lacunas.....	E7 - 16
- Processo de dopagem.....	E7 - 17
- Impurezas doadoras.....	E7 - 18
- Impurezas aceitadoras.....	E7 - 19
- Portadores majoritários e minoritários..	E7 - 21
- Movimento dos elétrons e das lacunas nos semicondutores dopados.....	E7 - 22
- Efeito da temperatura nos semiconduto- res dopados.....	E7 - 22
- Combinação das impurezas doadoras e a- ceitadoras.....	E7 - 23
- Alguns equipamentos modernos empregado na fabricação dos dispositivos semicon- dutores.....	E7 - 24
- Exame da lição E-7.....	E7 - 26

CAPÍTULO E-8	- Fundamentos sobre semicondutores II.....	E8 - 01
	- Introdução.....	E8 - 01
	- A junção PN.....	E8 - 02
	- Região de depleção.....	E8 - 03
	- Barreira de potencial.....	E8 - 05
	- Polarização da junção "PN".....	E8 - 05
	- Junção "PN" diretamente polarizada.....	E8 - 05
	- Junção "PN" reversamente polarizada.....	E8 - 07
	- Capacitância da junção "PN".....	E8 - 09
	- Curva característica de uma junção "PN".	E8 - 10
	- Efeito zener.....	E8 - 15
	- Influência da temperatura na corrente de fuga de uma junção "PN" comum.....	E8 - 17
	- Diodo de junção.....	E8 - 18
	- Transistores.....	E8 - 20
	- Construção do transistor.....	E8 - 22
	- Construção por fusão (ou tipo liga).....	E8 - 22
	- Construção por difusão.....	E8 - 23
	- Funcionamento do transistor bipolar.....	E8 - 24
	- Exame da lição E-8.....	E8 - 29

CAPÍTULO E-9	- Dispositivos semicondutores I.....	E9 - 01
	- Generalidades.....	E9 - 01
	- Representação ou simbologia.....	E9 - 02
	- Sentido de condução.....	E9 - 03

- O transistor como amplificador.....	E9 - 04
- Tipos de ligações do transistor.....	E9 - 04
- Montagem emissor-comum(EC).....	E9 - 05
- Frequência de corte BETA (fase).....	E9 - 07
- Montagem base-comum (BC).....	E9 - 07
- Montagem coletor comum(CC).....	E9 - 09
- Polarização e estabilização de um trans sistor.....	E9 - 10
- Relações entre os parâmetros ALFA (α) e BETA (β) de um transistor bipolar.....	E9 - 14
- Estabilização do ponto de funcionamento de um transistor.....	E9 - 15
- Correntes I_{ebo} , I_{ceo} e I_{cbo}	E9 - 16
- Curvas características dos transistores bipolares.....	E9 - 18
- Região ativa, região de corte e região de saturação.....	E9 - 22
- Reta de carga e ponto de operação.....	E9 - 25
- Limitações dos transistores bipolares...	E9 - 28
- Características dos amplificadores.....	E9 - 30
- Exame da lição E-9.....	E9 - 34

CAPÍTULO E-10- Dispositivos semicondutores II.....	E10 - 01
- Introdução.....	E10 - 01
- Diodo de contato pontual ou de contato de ponta.....	E10 - 02
- Diodo varicap ou varactor (DV).....	E10 - 04
- Diodo zener.....	E10 - 07
- Aplicação do diodo zener.....	E10 - 10
- Limitações do diodo zener.....	E10 - 12
- Diodo túnel.....	E10 - 12
- Diodo Gunn.....	E10 - 14
- Diodo emissor de luz (LED).....	E10 - 16
- Dispositivos sensíveis à luz.....	E10 - 18
- Fotodiodo (FD).....	E10 - 20
- Fototransistor.....	E10 - 22
- Fotorresistor (LDR).....	E10 - 24
- Células fotovoltaicas.....	E10 - 26
- Exame da lição E-10.....	E10 - 27

CAPÍTULO E-11- Dispositivos semicondutores III.....	E11 - 01
- Introdução.....	E11 - 01
- Tiristores.....	E11 - 01

- SCR (retificadores controlados de Si) ..	E11 - 02
- Princípio físico de operação.....	E11 - 03
- Característica tensão-corrente.....	E11 - 05
- Aplicações práticas do SCR.....	E11 - 08
- TRIAC (Triodo tiristor bidirecional)...	E11 - 12
- DIAC (Diodo de disparo bidirecional)...	E11 - 15
- Exame da lição E-11.....	E11 - 19

CAPÍTULO E-12- Dispositivos semicondutores IV.....	E12 - 01
- Introdução.....	E12 - 01
- Transistores unijunção.....	E12 - 01
- Operação de um UJT.....	E12 - 04
- UJT programável (PUT).....	E12 - 09
- MOSFET e JFET (transistores de efeito de campo).....	E12 - 11
- JFET (Transistor de efeito de campo de junção).....	E12 - 11
- O JFET como amplificador.....	E12 - 16
- MOSFET (Transistor a efeito de campo com metal-óxido-semicondutor).....	E12 - 18
- Mosfet de crescimento.....	E12 - 20
- Mosfet de depleção.....	E12 - 21
- Exame da lição E-12.....	E12 - 23

CAPÍTULO E-13- Dispositivos semicondutores V.....	E13 - 01
- Introdução.....	E13 - 01
- Amplificador operacional (A.O).....	E13 - 01
- Inversor de ganho unitário.....	E13 - 05
- Amplificador "não inversor".....	E13 - 06
- Circuito seguidor ou abaixador de impedância.....	E13 - 07
- Circuito somador inversor.....	E13 - 07
- Circuito subtrator.....	E13 - 08
- Circuito integrador.....	E13 - 09
- Circuito diferenciador.....	E13 - 11
- Comparadores.....	E13 - 12
- Circuitos integrados (CIs).....	E13 - 13
- CI. monolítico.....	E13 - 15
- Formação dos transistores integrados...E13 - 24	
- Formação dos diodos integrados.....E13 - 26	
- Formação dos resistores integrados....E13 - 28	
- Formação dos capacitores integrados....E13 - 30	
- Exame da lição E-13.....	E13 - 31

CAPÍTULO E-14-	Dispositivos semicondutores VI.....	E14 - 01
-	Introdução.....	E14 - 01
-	Processo planar/epitaxial.....	E14 - 01
-	Circuitos integrados MOS.....	E14 - 10
-	C.I. de película fina (ou filme fino) ..	E14 - 16
-	C.I. de película espessa (ou filme - grosso).....	E14 - 17
-	C.I. Híbrido.....	E14 - 18
-	Técnica locos-isoplanar.....	E14 - 20
-	Diodo SCHOTTKY (técnica STL).....	E14 - 21
-	I ² L (ou IIL).....	E14 - 23
-	I ³ L (ou IIIL).....	E14 - 23
-	FAST (Fairchild Advanced Schottky TTL) ..	E14 - 23
-	CIs digitais e CIs lineares.....	E14 - 25
-	Exame da lição E-14.....	E14 - 27
 CAPÍTULO E-15-	 Máquinas elétricas.....	 E15 - 01
-	Introdução.....	E15 - 01
-	Geradores de eletricidade.....	E15 - 01
-	Rotor.....	E15 - 04
-	Detalhes e funcionamento de um gerador de corrente contínua.....	E15 - 06
-	Tipos de geradores de corrente conti- nua.....	E15 - 08
-	Geradores de corrente alternada.....	E15 - 09
-	Determinação da polaridade da tensão gerada.....	E15 - 14
-	Sistema de corrente alternada monofá- sica.....	E15 - 19
-	Sistema de corrente alternada trifá- sica.....	E15 - 21
-	Geradores síncronos.....	E15 - 21
-	Tabela que relaciona velocidade-freqüên- cia para vários números de pólos de má- quinas síncronas.....	E15 - 23
-	Funcionamento básico de um gerador sín- crons.....	E15 - 24
-	Máquina de indução.....	E15 - 24
-	Motores elétricos.....	E15 - 24
-	Motores de indução.....	E15 - 25
-	Rotor gaiola de esquilo.....	E15 - 25
-	Rotor bobinado.....	E15 - 25

- Princípio básico de funcionamento do motor de indução.....	E15 - 27
- Vida útil do motor.....	E15 - 27
- Motores síncronos.....	E15 - 28
- Detalhes e funcionamento do motor síncrono.....	E15 - 28
- Motores de corrente contínua.....	E15 - 30
- Motores série.....	E15 - 32
- Motor stepper.....	E15 - 33
- Fundamentos básicos.....	E15 - 33
- Motor stepper de magneto permanente....	E15 - 34
- Motor stepper bifilar.....	E15 - 36
- Motor stepper de relutância variável...	E15 - 39
- Exame da lição E-15.....	E15 - 40

CAPÍTULO E-16-	Transformadores.....	E16 - 01
-	Efeito da corrente no secundário(trans- formador ideal).....	E16 - 03
-	Aplicação.....	E16 - 06
-	Transformadores de múltiplos enrolamen- tos.....	E16 - 08
-	Transformador real.....	E16 - 10
-	Perdas no cobre.....	E16 - 11
-	Perdas no ferro.....	E16 - 12
-	Relutância no núcleo.....	E16 - 12
-	Histerese.....	E16 - 12
-	Correntes parasitas.....	E16 - 16
-	Saturação do núcleo.....	E16 - 16
-	Circuitos magnéticos práticos.....	E16 - 17
-	Autotransformador.....	E16 - 18
-	Classes de transformadores.....	E16 - 22
-	Transformadores de núcleo de ar.....	E16 - 23
-	Transformadores de pulso.....	E16 - 24
-	Transformadores de audiofrequência.....	E16 - 25
-	Formatos de núcleos.....	E16 - 26
-	Defasamento.....	E16 - 29
-	Divisão de fase.....	E16 - 29
-	Distribuição de energia elétrica.....	E16 - 30
-	Exame da lição E-16.....	E16 - 33

CAPÍTULO E-17-	Símbolos e diagramas, capacitores.....	E17 - 01
-	Capacitores variáveis.....	E17 - 02
-	Resistores, baterias, indutância.....	E17 - 03

-	Audíofonos, antenas, fusíveis.....	E17 - 04
-	Interruptores, plugues e tomadas.....	E17 - 05
-	Potenciômetros.....	E17 - 06
-	Reostatos, microfone, altofalantes.....	E17 - 07
-	Divisores de tensão, geradores de ele- tricidade e motores.....	E17 - 08
-	Lâmpadas piloto, transformadores de A.F. e R.F.....	E17 - 09
-	Transformadores de força, instrumentos de medição, ligação à terra.....	E17 - 10
-	Reprodutores fonográficos, transistor bipolar, reed-switch, amplificador ope- racional.....	E17 - 11
-	Amplificador operacional de isolamento, SCR.....	E17 - 12
-	TRIAC, DIAC, LED.....	E17 - 13
-	UJT, JFET.....	E17 - 14
-	Circuitos integrados, dispositivos fo- tossensíveis, fotorresistores.....	E17 - 15
-	Fotodiodos, fototransistores.....	E17 - 16
-	Termistores.....	E17 - 17
-	Circuitos digitais.....	E17 - 18
-	Porta E, porta OU.....	E17 - 19
-	Porta NÃO, porta NÃO-E, porta NÃO-OU, porta OU EXCLUSIVA.....	E17 - 20
-	Porta NÃO-OU-EXCLUSIVA, Schmitt trig- ger, flip-flops, flip-flops RS.....	E17 - 21
-	Multivibrador monoestável, display, re- gistros de deslocamento, memórias de se- micondutor.....	E17 - 22
-	Exame da Lição E-17.....	E17 - 23

CAPÍTULO E-18-	Retificadores e estabilizadores.....	E18 - 01
-	A junção "PN".....	E18 - 01
-	Circuitos retificadores com diodos se- micondutores de junção.....	E18 - 03
-	Circuito retificador monofásico de meia onda.....	E18 - 04
-	Circuito retificador monofásico de on- da completa.....	E18 - 06
-	Circuito retificador em ponte.....	E18 - 09
-	Pontes retificadores de onda completa..	E18 - 12
-	Circuitos para filtragem.....	E18 - 13

- Filtragem por capacitor.....	E18 - 13
- Filtro RC.....	E18 - 15
- Filtragem por bobina.....	E18 - 17
- Filtro em L.....	E18 - 18
- Filtro π	E18 - 19
- Metodo prático para o cálculo de retificadores.....	E18 - 21
- Cálculo do transformador.....	E18 - 32
- Filtros adicionais.....	E18 - 41
- Reguladores de tensão.....	E18 - 44
- Exame da lição E-18.....	E18 - 52

CAPÍTULO E-19- Dobradores de tensão, multiplicadores

de tensão e conversores.....	E19 - 01
- Multiplicadores de meia onda.....	E19 - 01
- Multiplicadores de onda completa.....	E19 - 03
- Triplicador.....	E19 - 04
- Tensões maiores.....	E19 - 05
- Diodos retificadores ligados em série..	E19 - 06
- Cálculo dos capacitores.....	E19 - 08
- Determinação da tensão e regulação de saída.....	E19 - 08
- Dobrador de tensão 12 V - 24 V	E19 - 17
- Conversor CC/CC ± 15 V a partir de ± 5 V ..	E19 - 20
- Um conversor CC/CC formado por um temporizador integrado e um dobrador de tensão.....	E19 - 22
- Conversor CC/CC de +12 V para -10 V ...	E19 - 24
- Conversor CC/CA.....	E19 - 26
- Conversores tensão/frequência.....	E19 - 28
- Conversão analógica digital.....	E19 - 30
- Circuito prático conversor CC/CC.....	E19 - 32
- Exame da lição E-19.....	E19 - 34

CAPÍTULO E-20- Amplificadores(Buffers e drivers)

Generalidades.....	E20 - 01
- Sinais lógicos e analógicos.....	E20 - 01
- Técnicas analógicas.....	E20 - 02
- Técnicas digitais.....	E20 - 03
- Níveis lógicos.....	E20 - 04
- Lógica positiva.....	E20 - 05
- Lógica negativa.....	E20 - 06
- Fan-in e fan-out.....	E20 - 06

- Amplificadores (buffers e drivers).....	E20 - 13
- Drivers.....	E20 - 15
- Vantagens do TTL.....	E20 - 17
- Análise dos parâmetros dos circuitos in tegrados.....	E20 - 18
- Margem DC de ruído.....	E20 - 21
- Margem AC de ruído.....	E20 - 22
- Alguns tipos de ruído.....	E20 - 22
- Alguns métodos de controle aos ruídos...	E20 - 23
- Portas com coletor aberto.....	E20 - 26
- Cálculo de t_{rext} máximo.....	E20 - 29
- Tabela de símbolos empregados na eletrô nica digital.....	E20 - 32
- Exame da lição E20.....	E20 - 33



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

LIÇÃO E-1

NATUREZA DA ELETRICIDADE

Hoje nos defrontamos com fenômenos elétricos em toda parte de nossas atividades, máquinas de escrever elétricas, carros elétricos, maquinários industriais e aparelhos eletrodomésticos, são alguns dos exemplos de aplicações de quanto a eletricidade é importante para a nossa vida atual.

Observando estas aplicações atuais, não damos conta de que já na antiguidade os gregos conheciam este fenômeno, pois segundo os historiadores, o sábio grego Tales de Mileto, (640 - 546 a.c.) observou que atritando-se substâncias resinosas denominada Âmbar com lã, esta ficava com propriedade de atrair corpos pequenos, como penas, pedaços de palhas etc. Foi também do grego que se originou o termo eletricidade, pois o bastão de Âmbar em grego significa "Elektron".

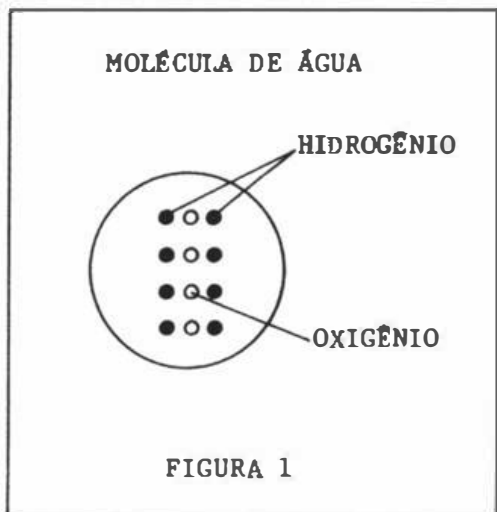
Desta observação até hoje, muitos séculos se passaram e muitos estudos rigorosos foram efetuados no campo da eletricidade, e atualmente ela é baseada na teoria atômica.

Essa teoria diz que toda matéria é constituída de grupos de moléculas que formam as substâncias. Estas moléculas, por outro lado, são constituídas de átomos que formam os elementos da natureza.

Conhecemos estes elementos da natureza que são em número de 92, cujos números atômicos vão desde 1, para o Hidro-

gênio, até 92 para o Urânio. Além deste, existem outros, criados pelos cientistas em "Laboratórios" que vão de 93 até 105 que constam da "Tabela dos Elementos", nesta lição.

Um exemplo destes elementos é encontrado na água. Ela é constituída de moléculas e cada molécula de água tem todas as propriedades desta substância. Ela é formada por dois átomos de Hidrogênio e um de Oxigênio que são seus elementos. A maneira como estes átomos se organizam é que define que esta molécula seja de água e não de outra substância. Estas substâncias podem ser encontradas na natureza, nos estados sólidos, líquidos e gasosos. No caso da água, é encontrada no estado sólido (gelo), líquido (água) e gasoso (vapor de água). Outros elementos são encontrados somente no estado sólido, como: o "Ferro", "Cobre", "Ouro" e "Prata" etc. Mas no entanto, estas poderão passar de um estado para outro pelo aquecimento ou congelamento.



O ÁTOMO

Os átomos são partículas infinitamente pequenas e, para formar uma gota de água, são necessários bilhões de átomos de "Hidrogênio" e "Oxigênio".

O átomo, segundo um modelo criado pelo físico Niels Bohr, é constituído por três partículas fundamentais, "Prótons", "Elétrons" e "Nêutrons", sendo que o "Próton"

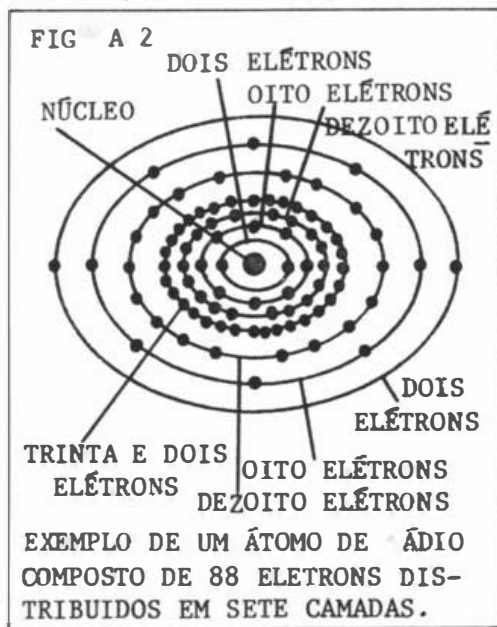
e o "Nêutron" formam o núcleo do átomo. Estas duas partículas são maciças em comparação com o "Elétron", são 1.840 vezes mais pesadas e são agregadas por uma grande força de atração. Os "Elétrons" são atraídos para o núcleo e giram em volta dele, de modo semelhante ao nosso sistema solar onde os planetas giram em torno do Sol. Estas três partículas se combinam, formando o átomo constituído de núcleo e elétrons, criando as coisas que vemos e sentimos.

Verificações experimentais demonstraram que os "Prótons" e os "Elétrons" apresentam comportamentos elétricos e estes

comportamentos elétricos são diferentes entre os "Prótons" e os "Elétrons", onde os "Prótons" apresentam um comportamento elétrico positivo ou uma carga elétrica positiva e os "Elétrons", por outro lado, apresentam um comportamento elétrico negativo ou uma carga elétrica negativa.

Este comportamento elétrico apresentado pelos "Prótons" e "Elétrons" estão intimamente relacionados entre si. Sabemos que um átomo no estado natural é eletricamente neutro por conter um número de "Prótons" igual ao de "Elétrons".

Os "Elétrons", nos 105 tipos de átomos existentes atualmente, são muito leves e giram ao redor do núcleo atômico, distribuídos em camadas ou órbitas de acordo com seu número atômico ou grau de energia. O átomo de "Hélio", por exemplo, tem o número atômico 2, possuindo 2 "Prótons" no núcleo e 2 "Elétrons" numa única órbita, girando em torno do núcleo. O átomo de Ouro, cujo número atômico é 79, possui 79 "Prótons" no núcleo e 79 "Elétrons", onde os Elétrons estão distribuídos em 6 órbitas, sendo que na 1a. órbita ou camada "K", gravitam 2 "Elétrons", na 2a. órbita ou camada "L", gravitam 8 "Elétrons", na 3a. órbita ou camada "M", gravitam 18 "Elétrons", na 4a. órbita ou camada "N", gravitam 32 "Elétrons", na 5a. órbita ou camada "O", gravitam 17 "Elétrons" e na 6a. órbita ou camada "P", gravitam 2 "Elétrons".



Estas propriedades químicas e elétricas dependem quase inteiramente dos "Elétrons" da última camada, que são chamados de "Elétrons de Valência". O número de "Elétrons" existentes nestas órbitas exteriores ou periféricas determinam se este átomo é "Monovalente", "Bivalente", "Trivalente", "Tetravalente", etc.

Na formação de moléculas, estes átomos unem-se ligados por dois princípios: "Ligação Iônica", onde um átomo cede "Elétrons" a outro e a "Ligação Covalente", onde existe compartilhamento de

"Elétrons" entre dois ou mais átomos.

Os elementos que possuem na órbita periférica 7, 6 ou 5 "Elétrons" têm a capacidade de capturar os "Elétrons" que lhes fazem falta e, quando estes átomos recebem "Elétrons", ficam com EXCESSO DE CARGA NEGATIVA e nestes casos eles recebem os nomes de ÍON NEGATIVO ou ANION.

Os elementos que possuem na órbita periférica 1, 2 ou 3 "Elétrons" têm a capacidade de ceder estes "Elétrons" e quando estes átomos cedem "Elétrons", eles ficam com FALTA DE CARGA NEGATIVA e, neste caso, recebem os nomes de ÍON POSITIVO ou CATION.

OBS.: Quando temos um elemento com o número de "Prótons" maior que o número de "Elétrons", dizemos que este se trata de um CATION. E, quando temos um elemento com o número de "Prótons" menor que o número de "Elétrons", dizemos que este se trata de um ANION.

CORPOS CARREGADOS ELETRICAMENTE

Se você entendeu o tópico anterior, não encontrará dificuldades para entender os corpos carregados eletricamente, on de eles são classificados em eletricamente neutros, carregados positivamente e carregados negativamente.

Quando dizemos que um corpo está eletricamente neutro, isto significa que este corpo está em equilíbrio, ou seja, o número de "Prótons" é igual ao número de "Elétrons". Porém isto não quer dizer que este corpo não tenha carga elétrica, pois sabemos que, se retirarmos "Elétrons" destes átomos, este corpo ficará com um número de "Prótons" superior ao de "Elétrons", ou seja, ele ficará carregado positivamente. Observamos que este fenômeno só ocorre, quando houver transferência de energia, pois não é espontâneo. Pelo contrário, se fornecermos "Elétrons" a este corpo, ele ficará com excesso de carga negativa, tornando-se um corpo carregado negativamente. Você poderá entender melhor este processo observando a figura 3.

FIGURA 3

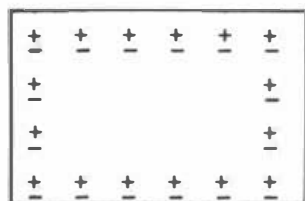


FIGURA 3a

CORPOS NEUTROS

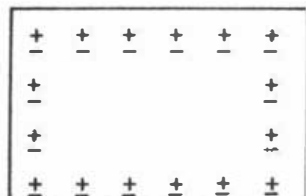
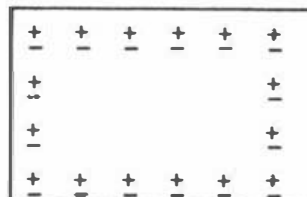


FIGURA 3b

RETIRANDO
ELÉTRONS

CORPO NEUTRO

CORPO CAR. POSITIVAMENTE

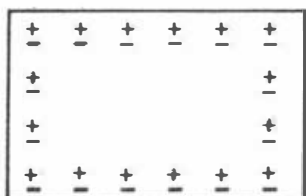


FIGURA 3c

FORNECENDO
ELÉTRONS

CORPO NEUTRO

CORPO CARREGADO
NEGATIVAMENTECONDUTORES E ISOLANTES

Como vimos nos tópicos anteriores, os elementos, que possuem 1, 2 e 3 "Elétrons" na camada ou órbita periférica, têm a propriedade de ceder "Elétrons" facilmente por estarem fracamente presos ao núcleo. Assim, quando receberem qualquer quantidade de energia, mesmo por menores que sejam, estes "Elétrons" se libertam e deslocam-se entre os átomos vizinhos. Estes elementos são chamados de bons condutores de eletricidade. Se você observar a tabela periódica dos elementos, encontraremos os seguintes elementos entre outros, "Ouro", "Prata", "Cobre", "Zinco", "Alumínio" e os metais em geral.

O inverso ocorre com materiais isolantes ou dielétricos que são constituídos de átomos com vários "elétrons" na camada ou órbita periférica, dificultando o seu desprendimento, por estarem mais coesos ao núcleo, mantendo sua configuração eletrônica estável. Como exemplo desses materiais temos a "borracha", o "plástico", a "madeira" e a "porcelana" etc.

Porém a determinação desses materiais isolantes e condutores não é assim tão simples como parece à primeira vista, pois outros fatores estão implícitos na determinação, como a temperatura, onde encontramos materiais bons condutores e que, aumentando a temperatura, tornam-se maus condutores ou vice-versa.

PROCESSOS DE ELETRIZAÇÃO

Vimos que corpos eletricamente neutros são aqueles que possuem um número de carga negativa igual ao de carga positiva. E para que um corpo fique eletricamente carregado positivamente ou negativamente, é preciso que se quebre esse equilíbrio, retirando ou fornecendo-lhe "Elétrons".

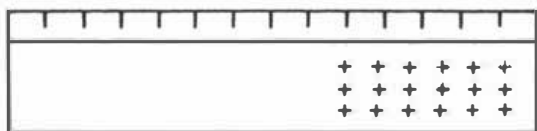
Há varios processos para retirar e fornecer "Elétrons" em um corpo, porém existem três processos que são fundamentais: eletrização por atrito, eletrização por contato e eletrização por indução.

ELETRIZAÇÃO POR ATRITO

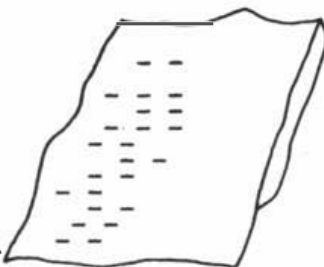
A eletrização por atrito é exatamente aquela observada na antiguidade pelo grego Tales de Mileto, onde ao atritarmos uma régua de plástico com um pano de seda, a régua fica eletrizada e atrai pedaços pequenos de papel. Isto ocorre porque, ao atritarmos o plástico com a seda, a seda, no atrito, retira os "Elétrons" do plástico e consequentemente ela fica com excesso de "Elétrons" ou eletricamente negativa. Por outro lado, a régua de plástico ficará com falta de "Elétrons" ou eletricamente positiva, ficando com uma carga de módulo igual, isto é, o excesso de Elétrons na seda é igual ao número de "Elétrons" que falta na régua.

Então podemos definir que na eletrização por atrito, os corpos atritados ficam carregados com a mesma quantidade de cargas ou mesmo módulo, porém com sinais contrários, ao se se pararem.

FIGURA 4



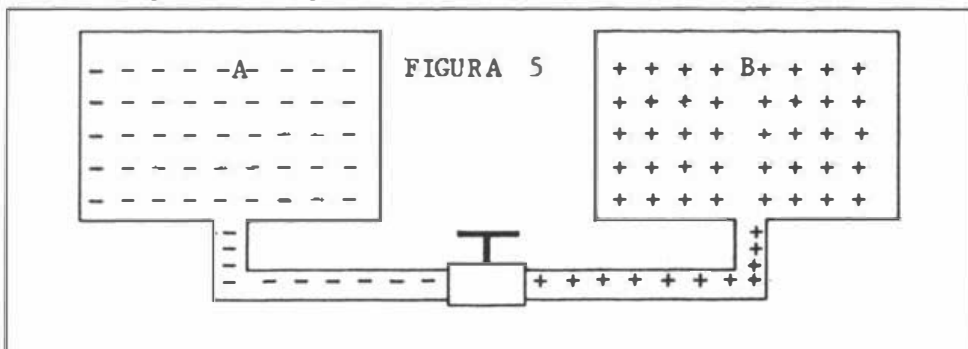
COM O ATRITO A RÉGUA FICA CARREGADA
POSITIVAMENTE E A SEDA FICA CARREGADA
NEGATIVAMENTE.



Observação: Isto só ocorre quando os materiais forem de natureza diferente, pois se forem da mesma natureza, não haverá eletrização.

ELETRIZAÇÃO POR CONTATO

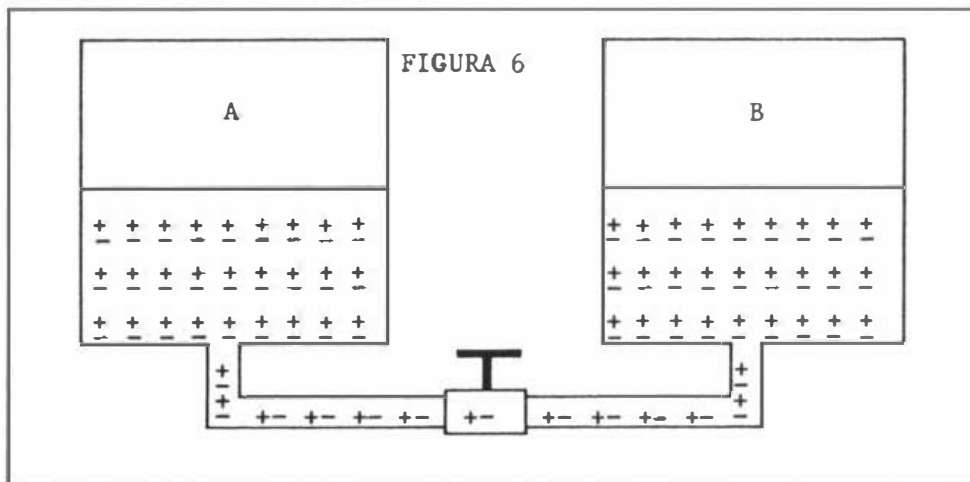
Para explicar a eletrização por contato, vamos recorrer ao "Princípio de Hidráulica", este nos ajudará a compreender melhor o processo, por estarmos familiarizados com ele.



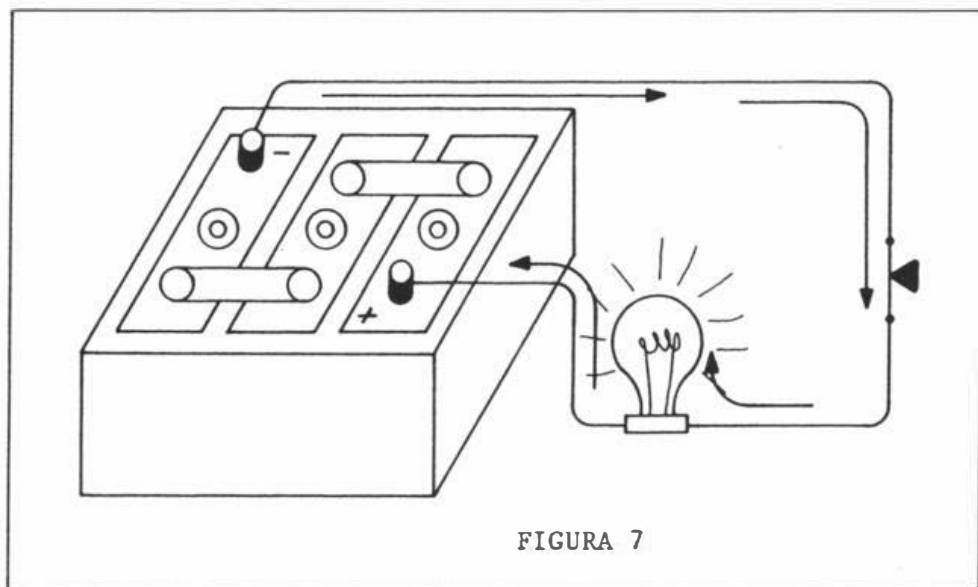
A figura 5 mostra duas caixas ligadas por um cano, onde existe um registro que controla a vazão. A caixa está cheia de água (o sinal "-" são os "Elétrons" que também representam a água) e a caixa B está vazia (o sinal "+" são os "Prótons" ou falta de "Elétrons" e também representam a falta de água).

Quando abrirmos o registro, a água ou "Elétrons" se deslocam pelo cano para a caixa B, até atingirem o mesmo nível de água, ou seja, até que o número de "Elétrons" e "Prótons"

sejam iguais em ambas as caixas, estabelecendo o equilíbrio conforme vemos na figura 6.



Fenômeno semelhante ocorre, por exemplo, nas baterias. Quando ela estiver carregada, irá sempre existir um pólo ou eletrodo negativo e outro positivo, semelhante ao caso ilustrado nas figuras 5 e 6, com a diferença de que agora estamos demonstrando a eletricidade gerada pela bateria, como mostra a figura 7. Maiores detalhes sobre baterias serão dadas na lição E-2.

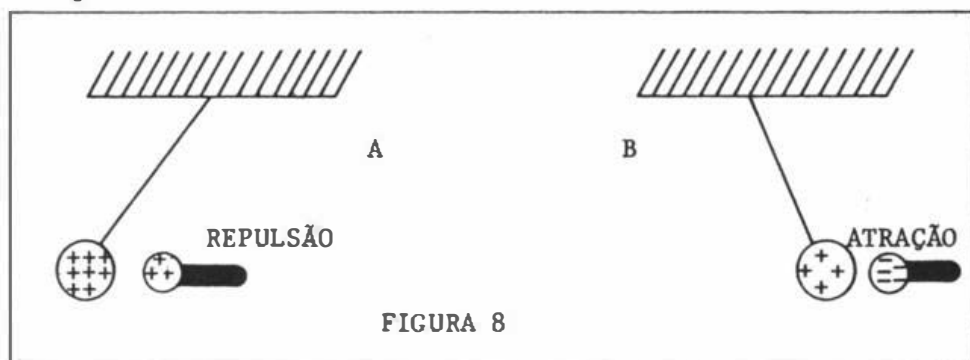


A figura 7 mostra uma bateria provida de dois eletrodos ou pólos com polaridades opostas, ligados por meio de um fio e uma chave liga-desliga e uma lâmpada incandescente. Quando ligarmos ou fecharmos a chave, os "Elétrons" que se encontram no pólo negativo, são atraídos para o pólo positivo e tendem a circular através do fio e da chave, logicamente através do filamento da lâmpada. O filamento desta é constituído de um fio muito fino e de um material muito resistente às altas temperaturas, como o "Tungstênio". Como já vimos, quando fecharmos a chave haverá uma grande quantidade, milhares ou milhões de "Elétrons" passando pelo filamento, e isto é chamado de corrente elétrica ou de "Elétrons", que produzirão uma grande quantidade de calor pela fricção, tornando o filamento incandescente.

Quando o equilíbrio entre os "Elétrons" e "Prótons" dos dois pólos da bateria estiverem restabelecidos, a corrente elétrica ou corrente de "Elétrons" cessar de fluir, então dizemos que a bateria está descarregada.

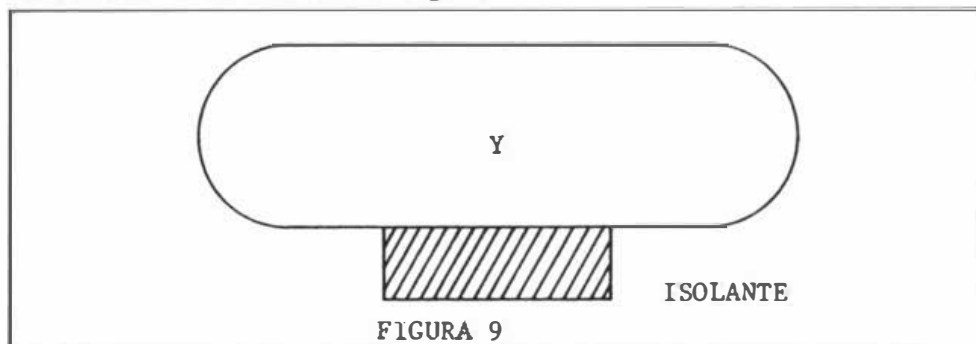
ELETRIZAÇÃO POR INDUÇÃO

O processo de eletrização por indução é baseado na interação entre cargas. Constatou-se experimentalmente que a interação entre cargas apresenta um comportamento de repulsão e atração.

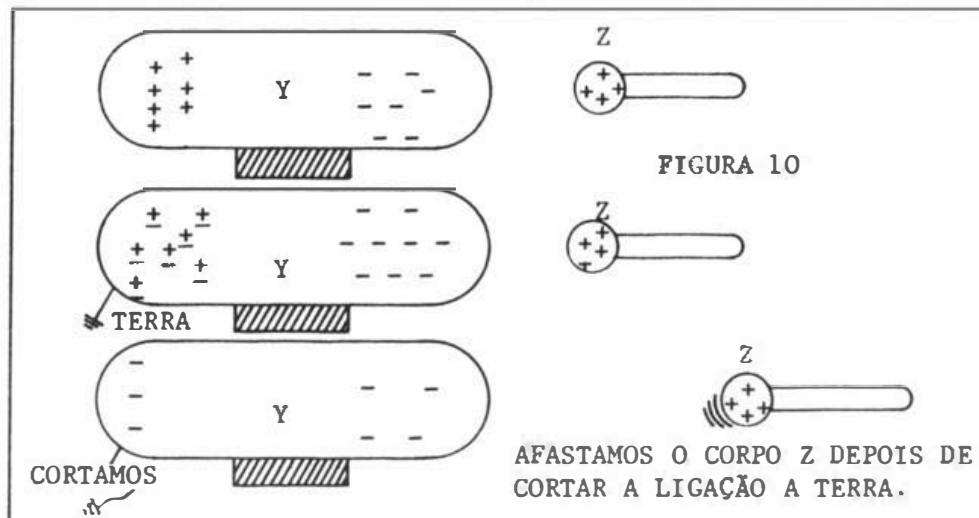


Na figura 8A, temos dois corpos carregados positivamente, e portanto eles se repelem, pois CORPOS DE MESMO SINAL SE REPELEM. E na fig. 8B, temos dois corpos com cargas contrárias e portanto eles se atraem, pois CORPOS DE SINAIS CONTRÁRIOS SE ATRAEM.

Como eletrizar por indução um corpo eletricamente neutro? Tomamos um condutor Y qualquer, sustentado por uma base isolante, como mostra a fig. 9



Aproximamos de um dos lados do corpo Y um outro corpo Z, carregado positivamente e ligamos por meio de um fio à terra o outro lado do corpo Y, ocorrendo as seguintes situações: Quando aproximamos o corpo Z carregado positivamente, os "Elétrons" serão atraídos para o lado próximo do corpo Z, ficando o outro lado com falta de "Elétrons" ou carregado positivamente. Porém este está ligado à terra por meio de um bom condutor, mas como a terra é um corpo imensamente grande, tem um número muito grande de "Elétrons", cede-os ao corpo Y e antes de tirarmos o corpo Z das proximidades de Y, cortamos o fio que liga à terra e assim o corpo Y ficará carregado negativamente, pois os "Elétrons" que subiram da terra não poderão re tornar. A figura 10 mostra este processo detalhadamente.



ELETROSCÓPIOS

O Eletroscópio é um aparelho simples que determina se um corpo está com presença de eletricidade estática.

Existem vários tipos de "Eletroscópios", mas veremos somente o "Pêndulo Elétrico" e o "Eletroscópio de Folha".

O PÊNDULO ELÉTRICO

É o tipo mais simples de Eletroscópio que consiste em uma pequena bola de resina ou bola recoberta de material condutor (papel laminado) bem leve, suspensa por um fio de seda ou um outro fio isolante, como mostra a figura 11.



Quando aproximamos do pêndulo, um corpo neutro, o pêndulo não se moverá, pois não existe interação entre as cargas.

Se por outro lado, aproximarmos do pêndulo um corpo carregado positivamente ou negativamente, haverá uma consequente polarização de atração entre os dois.

Se por outro lado, também a bola estiver carregada eletricamente, como por exemplo, por contato onde a bola adquire a mesma carga, haverá imediatamente repulsão entre os dois. A figura 12 mostra

claramente estes passos.

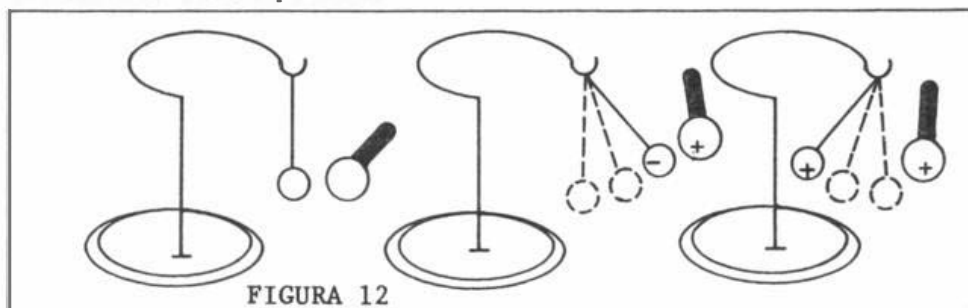


TABELA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS

Nº ATÔ- MICO	ELEMENTO	SÍM- BOLO	Nº DE ÓRBI- TAS	NÚMERO DE ELÉTRONS POR CAMADA						MASSA ATÔMICA	
				K	L	M	N	O	P		Q
1	Hidrogênio	H	1	1							1,008
2	Hélio	He	1	2							4,003
3	Lítio	Li	2	2	1						6,940
4	Berílio	Be	2	2	2						9,013
5	Boro	B	2	2	3						10,82
6	Carbono	C	2	2	4						12,011
7	Nitrogênio	N	2	2	5						14,008
8	Oxigênio	O	2	2	6						16,0
9	Fluor	F	2	2	7						19,0
10	Neônio	Ne	2	2	8						20,183
11	Sódio	Na	3	2	8	1					22,991
12	Magnésio	Mg	3	2	8	2					24,32
13	Alumínio	Al	3	2	8	3					26,98
14	Silício	Si	3	2	8	4					28,09
15	Fósforo	P	3	2	8	5					30,935
16	Enxofre	S	3	2	8	6					32,066
17	Cloro	Cl	3	2	8	7					35,457
18	Argônio	Ar	3	2	8	8					38,944
19	Potássio	K	4	2	8	8	1				39,100
20	Cálcio	Ca	4	2	8	8	2				40,08
21	Escândio	Sc	4	2	8	9	2				44,96
22	Titânio	Ti	4	2	8	10	2				47,90
23	Vanádio	V	4	2	8	11	2				50,95
24	Cromo	Cr	4	2	8	12	2				52,01
25	Manganês	Mn	4	2	8	13	2				54,95
26	Ferro	Fe	4	2	8	14	2				55,85
27	Cobalto	Co	4	2	8	15	2				58,94
28	Níquel	Ni	4	2	8	16	2				58,71
29	Cobre	Cu	4	2	8	18	1				63,54
30	Zinco	Zn	4	2	8	18	2				65,38
31	Gálio	Ga	4	2	8	18	3				69,72
32	Germanio	Ge	4	2	8	18	4				72,60
33	Arsênio	As	4	2	8	18	5				74,91
34	Selênio	Se	4	2	8	18	6				78,96
35	Bromo	Br	4	2	8	18	7				79,916
36	Criptônio	Kr	4	2	8	18	8				83,80
37	Rubídio	Rb	5	2	8	18	8	1			85,48
38	Estrôncio	Sr	5	2	8	18	8	2			87,63
39	Ítrio	Y	5	2	8	18	9	2			99,92
40	Zircônio	Zr	5	2	8	18	10	2			91,22
41	Nióbio	Nb	5	2	8	18	12	1			92,91
42	Molibdênio	Mo	5	2	8	18	13	1			95,95
43	Tecnício	Tec	5	2	8	18	14	1			99,0
44	Rutênio	Ru	5	2	8	18	15	1			101,1
45	Ródio	Rh	5	2	8	18	16	1			102,91
46	Paládio	Pd	5	2	8	18	17	1			106,4
47	Prata	Ag	5	2	8	18	18	1			107,880
48	Cádmio	Cd	5	2	8	18	18	2			112,41
49	Índio	In	5	2	8	18	18	3			114,82
50	Estanho	Sn	5	2	8	18	18	4			118,70
51	Antimônio	Sb	5	2	8	18	18	5			121,76
52	Telúrio	Te	5	2	8	18	18	6			127,61

TABELA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS

Nº ATO- MICO	ELEMENTO	SÍM- BOLO	Nº DE ÓRBI- TAS	NÚMERO DE ELÉTRONS POR CAMADA						MASSA ATÔMICA	
				K	L	M	N	O	P		Q
53	Iodo	I	5	2	8	18	18	7			126,91
54	Xenônio	Xe	5	2	8	18	18	8			131,30
55	Césio	Cs	6	2	8	18	18	8	1		132,91
56	Bário	Ba	6	2	8	18	18	8	2		137,36
57	Lantânio	La	6	2	8	18	18	9	2		138,92
58	Cério	Ce	6	2	8	18	20	8	2		140,13
59	Praseodímio	Pr	6	2	8	18	21	8	2		140,92
60	Neodímio	Nd	6	2	8	18	22	8	2		144,27
61	Promécio	Pm	6	2	8	18	23	8	2		145
62	Samário	Sm	6	2	8	18	24	8	2		150,35
63	Európio	Eu	6	2	8	18	25	8	2		152
64	Gadolínio	Gd	6	2	8	18	26	8	2		157,26
65	Terbio	Tb	6	2	8	18	27	8	2		158,93
66	Disprósio	Dy	6	2	8	18	28	8	2		162,51
67	Hólmio	Ho	6	2	8	18	29	8	2		164,94
68	Erbio	Er	6	2	8	18	30	8	2		167,26
69	Túlio	Tm	6	2	8	18	31	8	2		168,94
70	Íterbio	Yb	6	2	8	18	32	8	2		173,04
71	Lutécio	Lu	6	2	8	18	32	9	2		174,99
72	Háfnio	Hf	6	2	8	18	32	10	2		178,50
73	Tântalo	Ta	6	2	8	18	32	11	2		180,95
74	Tungstênio	W	6	2	8	18	32	12	2		183,86
75	Rênio	Re	6	2	8	18	32	13	2		186,22
76	Osmio	Os	6	2	8	18	32	14	2		190,2
77	Írídio	Ir	6	2	8	18	32	15	2		192,2
78	Platina	Pt	6	2	8	18	32	16	2		195,09
79	Ouro	Au	6	2	8	18	32	17	2		197,00
80	Merúrio	Hg	6	2	8	18	32	18	2		200,61
81	Tálio	Tl	6	2	8	18	32	18	3		204,39
82	Chumbo	Pb	6	2	8	18	32	18	4		207,21
83	Bismuto	Bi	6	2	8	18	32	18	5		209,00
84	Polônio	Po	6	2	8	18	32	18	6		210
85	Astátio	At	6	2	8	18	32	18	7		211
86	Radônio	Rn	6	2	8	18	32	18	8		222
87	Frâncio	Fr	7	2	8	18	32	18	8	1	223
88	Rádio	Ra	7	2	8	18	32	18	8	2	226
89	Actínio	Ac	7	2	8	18	32	18	9	2	227
90	Ório	Th	7	2	8	18	32	18	10	2	232,05
91	Protactínio	Pa	7	2	8	18	32	20	9	2	231
92	Urânio	U	7	2	8	18	32	21	9	2	238,07
93	Netúnio	Np	7	2	8	18	32	22	9	2	237
94	Plutônio	Pu	7	2	8	18	32	23	9	2	242
95	Americio	Am	7	2	8	18	32	24	9	2	243
96	Cúrio	Cm	7	2	8	18	32	25	9	2	245
97	Berquélio	Bk	7	2	8	18	32	26	9	2	249
98	Califórnio	Cf	7	2	8	18	32	27	9	2	249
99	Eínatênio	Es	7	2	8	18	32	28	9	2	254
100	Férmio	Fm	7	2	8	18	32	29	9	2	255
101	Mendelevio	Md	7	2	8	18	32	30	9	2	256
102	Nobélio	No	7	2	8	18	32	32	8	2	254
103	Laurêncio	Lw	7	2	8	18	32	32	9	2	257
104	Kurchatônio	Ku	7	2	8	18	32	32	10	2	260
105	Hahnio	Ha	7	2	8	18	32	32	11	2	262

ELETROSCÓPIO DE FOLHA

O "Eletroscópio de Folha" é muito simples, o qual consiste em duas lâminas finas de ouro ou alumínio, suspensas por um condutor metálico que termina na parte superior numa bola de cobre, isolada do corpo do aparelho, como vemos na figura 13.

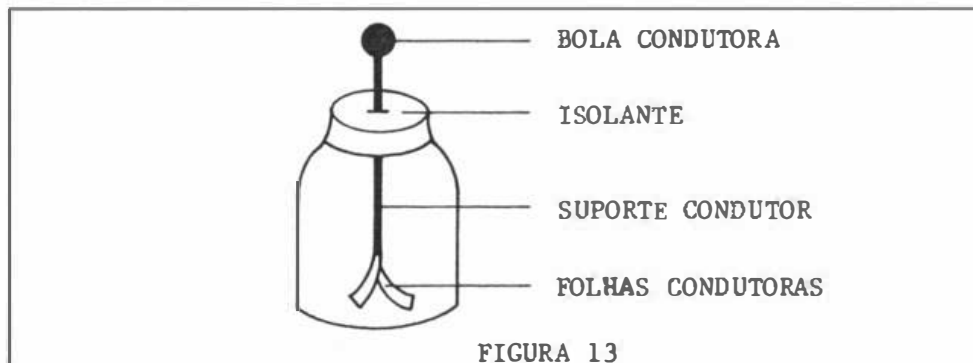


FIGURA 13

Se aproximarmos do topo de um "Eletroscópio de Folha" um bastão eletricamente neutro, as folhas não se moverão.

Se aproximarmos do topo de um "Eletroscópio de Folha" um bastão carregado negativamente, haverá uma polarização das cargas do Eletroscópio, o topo ficará com cargas positivas ao passo que as folhas ficarão com cargas negativas. Isto provocará uma repulsão entre as folhas, pois cargas de sinais iguais se repelem.

Se no entanto aproximarmos do topo de um "Eletroscópio de Folha" um bastão carregado positivamente, haverá uma polarização das cargas do Eletroscópio, o topo ficará com cargas negativas, ao passo que as folhas ficarão com cargas positivas, e também provocará uma repulsão entre as folhas por terem cargas de sinais iguais.

Por outro lado, se o bastão estiver carregado e ao aproximar ocorrer o contato, o Eletroscópio ficará com a mesma

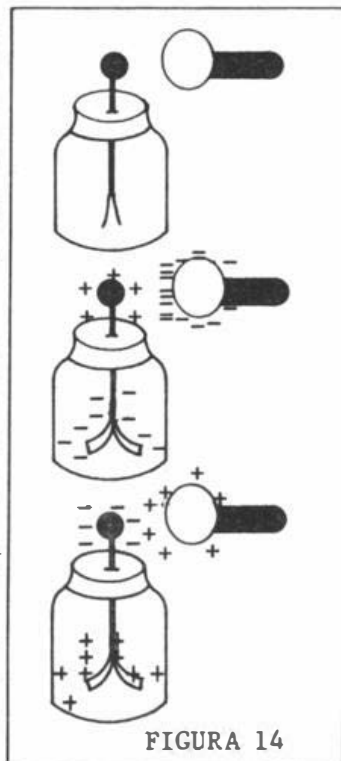


FIGURA 14

carga do bastão e as folhas ficarão permanentemente carregadas e consequentemente se repelindo. A figura 14 mostra detalhadamente estes processos.



FIGURA 14

ELETROSTÁTICA

A Eletrostática ou eletricidade estática é o resultado do desequilíbrio entre "Prótons" e "Elétrons" existentes em dois corpos, sem se estabelecer uma corrente, a não ser a provocada por alguns agentes intermediários.

A "Eletricidade Estática" se manifesta entre nós de várias maneiras, mas mais comumente pela fricção, depois ela fica estática até que se estabeleça uma ação.

Quem já não teve a oportunidade de ver pentes que atraem pedaços de papéis, depois de se ter passado o pente no cabelo? Faíscas saltarem de blusas de lã, quando as tiramos do corpo no escuro, e até mesmo levar choque, quando estamos num quarto seco, com tapete, no momento em que tocamos na maçaneta?

O curioso de tudo isso, é que a maioria das manifestações eletrostáticas, que foram as primeiras a serem observadas pelos homens, ainda até hoje continuam quase totalmente desconhecidas.

Por exemplo, bem poucos sabem que passamos a maior parte de nossa vida envoltos por um campo elétrico. A atmosfera terrestre tem um campo elétrico suprido por cargas positivas que se elevam de 100 a 500 volts por metro num dia claro. Chegando a haver 1000 volts entre o chão e um ponto de dois metros acima em lugares bem abertos. Então você perguntaria, como nós não levamos choques? Pois possuímos em média um metro e setenta de altura. Porém nosso corpo é bom condutor e estamos aterrados, portanto desviamos o campo elétrico da atmosfera.

Outro processo eletrostático natural são as descargas elétricas da atmosfera, que são chamadas popularmente de raio. Através de pesquisas feitas na área da física tornou-se possível verificar este fenômeno. Estes pesquisadores fotografaram estas descargas usando uma câmera especial (câmera de neblina). Observaram que as nuvens, se carregam positivamente, por processos desconhecidos. A terra ou tudo que nela estiver em contato e for condutor, possui grandes quantidades de elétrons. Assim, quando estas nuvens passar sobre construções ou vegetações elevadas, haverá o rompimento da rigidez dielétrica do ar e os elétrons saltarão para as nuvens, sucedendo o fenômeno raio.

No momento em que uma dessas faíscas atinge as nuvens, geralmente a partir dos pontos mais elevados, como árvores, torres, prédios, etc., uma elevadíssima corrente se estabelece entre terra e nuvem, corrente essa que chega a atingir 200.000 ampères, numa duração de alguns centésimos de segundos. Esta corrente gera uma temperatura de milhares de graus, causando o brilho do relâmpago e o som de trovão.

Para evitar os danos causados por essas descargas, Benjamin Franklin inventou o pára-raio, que é simplesmente constituído de um fio grosso de cobre que termina numa ponta de aço, permitindo uma fácil passagem de "Elétrons" entre terra e nuvem.

FORÇA ELETROMOTRIZ

Sabemos que os geradores (pilhas, baterias etc.) são dispositivos que mantêm uma d.d.p. (diferença de potencial) entre dois pontos de um circuito, criando uma força ou pressão necessária para fazer passar os "Elétrons" de um pólo a outro numa bateria através de um fio ou circuito. Damos o nome a esse processo, de força eletromotriz.

Essa força ou pressão exercida entre dois pólos de um circuito exige um trabalho do gerador, e esse trabalho aparece sob a forma de energia elétrica.

Então dizemos que esses geradores são dispositivos que fornecem energia elétrica, as cargas, mas para isso é preciso consumir um outro tipo de energia, que no interior do gerador (bateria é a transformação química em eletricidade) se transforma em energia elétrica.

Existem muitos processos de gerar energia, por exemplo, geradores acionados por quedas de água, pelo vento, etc. Em quedas d'água usam-se grandes rodas com várias canecas que ao se encherem, provocam o desequilíbrio e conseqüentemente colocam as rodas a girar. Esse movimento é transmitido a um dínamo (gerador). Esse dínamo transforma a energia mecânica - da água em energia elétrica.

Sabendo que existe uma d.d.p., trabalho e cargas, podemos então relacioná-las matematicamente por meio da fórmula $E = \frac{W}{q}$ onde:

"E" é a força eletromotriz (f.e.m)

"W" é o trabalho

"q" é a carga.

Considerando as grandezas que aparecem na expressão, a unidade será o Joule para o trabalho e o Coulomb para a carga e o J/C para a f.e.m que você conhece como volt.

DIFERENÇA DE POTENCIAL

O desequilíbrio entre o número de "Elétrons" e "Prótons" existentes entre dois pólos ou dois corpos provoca a mobilidade das cargas negativas nos sólidos, e a esse fenômeno chamamos de (d.d.p.) diferença de potencial.

Essa diferença de potencial expressa a magnitude desse desequilíbrio. Por exemplo, quando dizemos que a d.d.p. (diferença de potencial) entre os pólos de uma bateria é de 12V equivale a dizer que o trabalho realizado por 1C (um Coulomb) de um pólo a outro, é igual a 12J (doze Joules).

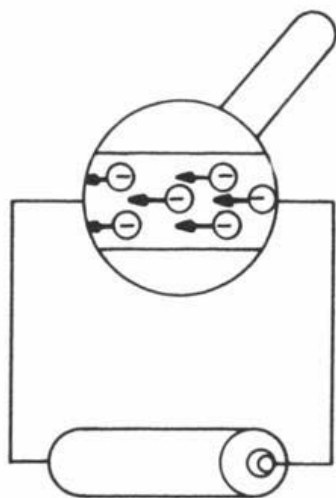
Quando nos referimos à d.d.p. entre dois pólos é o mesmo que dizermos tensão ou voltagem, pois o significado é o mesmo.

CORRENTE ELÉTRICA

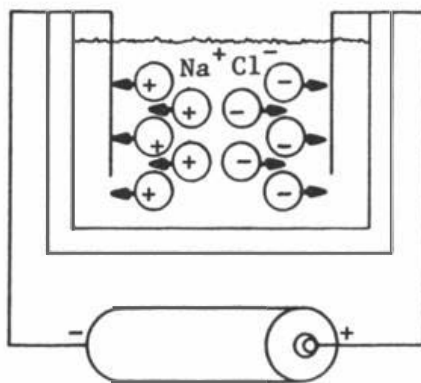
Vimos em tópicos anteriores desta lição, que os materiais bons condutores são aqueles constituídos de átomos que têm na última camada poucos "Elétrons", como o "Cobre", onde esses "Elétrons" se desprendem mais facilmente desta camada por estarem fracamente presos ao núcleo.

Os movimentos desses elétrons são desordenados no interior dos condutores, mas se estes sofrerem a ação de uma diferença de potencial (d.d.p.), estes "Elétrons" livres serão forçados a mover-se ordenadamente no condutor. Portanto a este movimento ordenado de "Elétrons" ou cargas elétricas, damos o nome de corrente elétrica.

Como vimos, a corrente elétrica nos sólidos são os movimentos ordenados de "Elétrons", do pólo negativo para o pólo positivo e os "Prótons" estão firmemente presos no núcleo. No entanto, existem corrente de cargas positivas também, como ocorre nos líquidos. Se colocarmos em um recipiente com água um pouco de sal de cozinha (NaCl), teremos uma solução com íons positivos (Na^+) e íons negativos (Cl^-). Se colocarmos dentro desta solução duas placas condutoras ligadas a uma pilha, estabelecendo uma d.d.p., ocorrerá uma corrente onde os cátions (Na^+) se dirigirão para a placa onde está ligado o pólo negativo da pilha e os ânions (Cl^-) ao contrário se dirigirão a outra placa que está ligada ao pólo positivo da pilha.



MOVIMENTO ORDENADO
DE ELÉTRONS.



MOVIMENTO DE IONS POSITIVOS
(Na^+) OU CÁTIOS E DE IONS NEGA-
TIVOS (Cl^-) OU ÂNIOS.

INTENSIDADE DA CORRENTE ELÉTRICA

A intensidade da corrente elétrica (I) num condutor sólido é a proporção entre a quantidade de cargas ΔQ (Delta Q), que passa pela secção reta de um fio condutor e a duração de tempo decorrido nessa passagem Δt (Delta t).

$$I = \Delta Q / \Delta t$$

Onde: " I " é a corrente elétrica

" ΔQ " é a quantidade de cargas

" Δt " é a variação do tempo

E a sua unidade é o ampères ou coulomb por segundos.

$$1 \text{ ampère} = 1 \text{ coulomb} / 1 \text{ segundo}$$

ou

$$1A = 1C/1s$$

CORRENTE CONTÍNUA E CORRENTE ALTERNADA

A corrente pode ter sentido constante ou alternar-se periodicamente.

As baterias e pilhas, por exemplo, têm a corrente orientada sempre num único sentido e por este motivo chamamos de corrente contínua (C.C.). Por outro lado, quando esta corrente se altera periodicamente, como as que possuímos nas tomadas em nosso lares, chamamo-la de corrente alternada (C.A.).



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

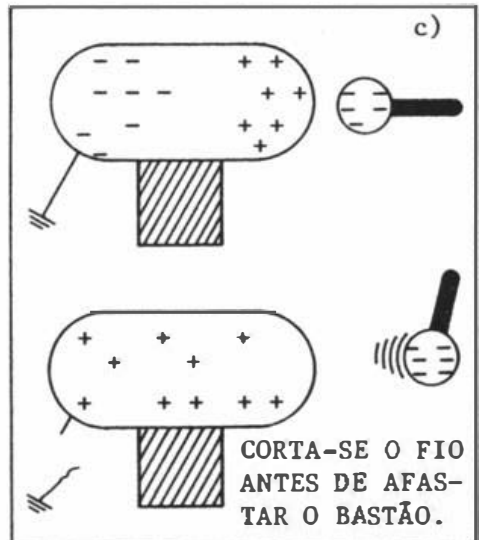
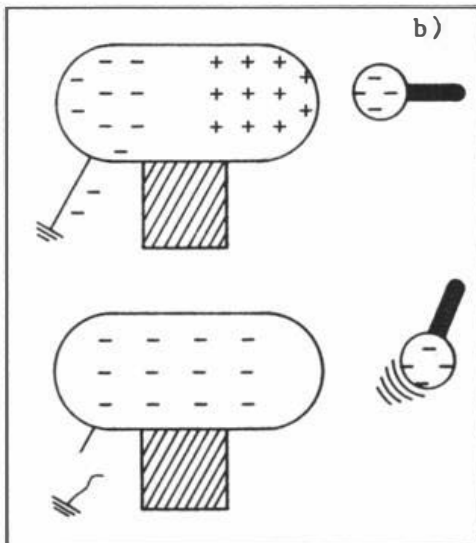
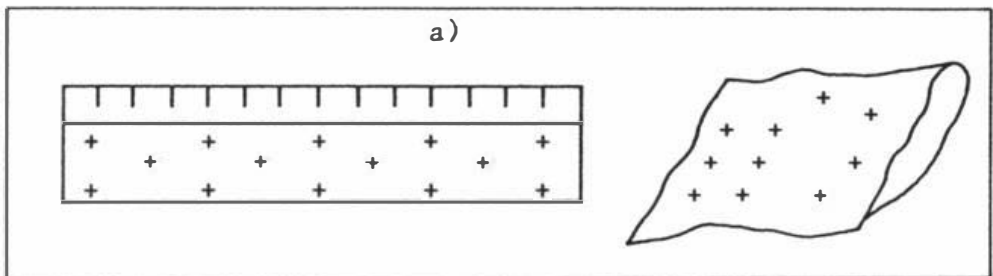
EXAME DA LIÇÃO E-1

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Quais são as três partículas fundamentais do átomo?
 - a) substâncias, prótons e núcleos;
 - b) elétrons, prótons e nêutrons;
 - c) elementos, nêutrons e prótons.
- 2) Verificações experimentais mostram que certas partículas do átomo apresentam comportamentos elétricos como:
 - a) os elétrons apresentam comportamento elétrico negativo;
 - b) os prótons não apresentam comportamento elétrico;
 - c) os nêutrons apresentam comportamento elétrico positivo.

- 3) O número de elétrons por camada, existente no elemento Índio é a seguinte:
- Na 1ª camada 4, na 2ª camada 8, na 3ª camada 18, na 4ª camada 30;
 - Na 1ª camada 2, na 2ª camada 8, na 3ª camada 12, na 4ª camada 18, na 5ª camada 3;
 - Na 1ª camada 2, na 2ª camada 32, na 3ª camada 32, na 4ª camada 18.
- 4) Entre os materiais abaixo relacionados são bons condutores:
- carbono, selênio, estanho;
 - cobre, estanho, silício;
 - cobre, ouro, mercúrio.
- 5) Existem várias maneiras de eletrizar um corpo de acordo com os desenhos. Indique qual é o correto:



- 6) Os filamentos das lâmpadas ficam incandescentes somente nas seguintes condições:
- a) ligando-se uma lâmpada a uma bateria por meio de um fio, ela acenderá motivada pelo deslocamento de prótons;
 - b) ligando-se uma lâmpada a uma bateria por meio de um fio, ela acenderá motivada pelo deslocamento de elétrons;
 - c) ligando-se uma lâmpada a uma bateria por meio de um fio, ela acenderá motivada pelo deslocamento de elétrons e prótons.
- 7) Eletricidade estática é:
- a) eletricidade que possuímos nas tomadas de nossos lares;
 - b) eletricidade formada entre as nuvens e a terra, antes de ocorrer a descarga;
 - c) todos os tipos de eletricidade que conhecemos.
- 8) Força eletromotriz é a d.d.p. mantida pelos geradores. Quais dos dispositivos abaixo são geradores?
- a) pilhas, dínamos, baterias;
 - b) pilhas, motores, baterias;
 - c) baterias, motores, dínamos.
- 9) Chamamos de corrente elétrica ao:
- a) movimento ordenado de cargas negativas e positivas;
 - b) movimento ordenado de cargas positivas;
 - c) movimento ordenado de cargas negativas.

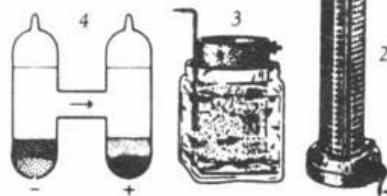
- 10) Quantos elementos naturais e criados em Laboratórios existem.
- a) 92 naturais e 10 criados em laboratório;
 - b) 93 naturais e 11 criados em laboratório;
 - c) 92 naturais e 13 criados em laboratório.

LIÇÃO E-2

PILHAS E BATERIAS



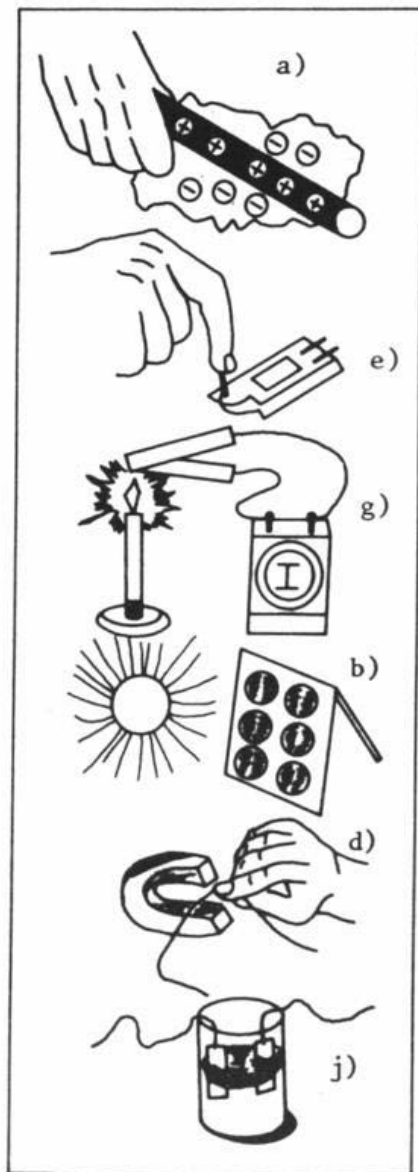
- 1 - Alessandro Volta
- 2 - pilha de Volta
- 3 - de Fery
- 4 - pilha de Weston



Na lição E-1, vimos que para produzir eletricidade é preciso provocar ou produzir um desequilíbrio elétrico entre dois corpos. E para obter este desequilíbrio é preciso utilizar outro tipo de energia, tal como a energia hidráulica ou mecânica da queda d'água, de que se necessita para fazer mover um dínamo para produzir a energia elétrica. No entanto, existem outras classes de energia como a energia do calor, do magnetismo, da luz solar e da reação química, etc. Esta última é

adotada em pilhas e em baterias, sendo atualmente construídas com as mais variadas técnicas como veremos nesta e na próxima lição.

Como vimos, existem várias maneiras de produzir eletricidade, mas as mais usadas são:



- a - Pela fricção de dois materiais de constituição diferente, obtém-se a eletricidade estática.
- b - Pela ação da luz sobre certos elementos, como os das células solares ou células fotovoltaicas.
- c - Por meio da ação do calor, produzido: pelo sol, através de caldeiras solares (Usinas Térmicas Solares); pelas reações nucleares controladas (Usinas Termoeletricas).
- d - Por meio do magnetismo e força mecânica como nas quedas d'água (Hidroelétricas) e ação dos ventos (Eólicas).
- e - Por meio da pressão sobre certos materiais como cristais de Rochelle.
- f - Por meio de reação química a que são submetidos dois corpos distintos.
- g - Pela ação do calor sobre dois materiais diferentes postos em contato (Termopar).

Desta forma, podemos observar que existem vários meios de produzir eletricidade, mas, comercialmente, são utilizados: os meios magnéticos associados à força mecânica, a reação nuclear controlada

e os meios químicos (como pilhas e baterias).

Veremos aqui como é possível produzir um desequilíbrio de elétrons por meios químicos. O aluno que tiver entendido os princípios vistos na Lição E-1, não encontrará dificuldade em compreender também as razões pelas quais a química produz eletricidade.

A HISTÓRIA DA PILHA

A pilha teve início em 1800, quando o físico italiano, Alessandro Volta construiu uma coluna de discos de prata, de zinco e de flanela embebida em salmoura e arrumados em ordem especial. Mas não era apenas a pilha elétrica que ele havia inventado. Alessandro Volta havia proporcionado aos seus contemporâneos as bases sólidas para os fundamentos da eletricidade, preparando-os para o surgimento de estudos modernos desse importante ramo da física.

O interesse de Volta pela pilha começou por discordar da afirmação feita por Galvani, onde este admitia existir uma espécie de "eletricidade animal", por ter observado uma intensa convulsão em uma rã, na qual ele havia amarrado um fio de cobre no nervo espinhal.

Volta refutou esta afirmação, explicando que esta eletricidade não era um atributo do animal, mas sim gerada pelo contato de dois metais diferentes, no caso, o cobre e o ferro. Depois fez uma série de experiências para provar a veracidade de sua teoria, onde surgiu a primeira pilha.

Mais tarde, o físico inglês, Daniell, construiu a "verdadeira" pilha, ou seja, pôs em prática o princípio pelo qual uma reação de óxido-redução pode produzir corrente elétrica. Esta pilha era constituída de duas placas metálicas, uma de zinco e outra de cobre, imersas em duas soluções separadas por uma parede porosa, uma das soluções era o sulfato de zinco e a outra o sulfato de cobre. E quando se efetuava o contato dessas placas por meio de um fio, ocorria uma corrente elétrica.

Outro tipo de pilha é a de Leclanché que fez surgir a atual pilha a seco, que consiste de um envoltório de zinco, contendo, no centro, uma barra de grafita recoberta por uma

pasta umedecida em dióxido de manganês, cloreto de zinco e cloreto de amônio (pilha zinco-carbono).

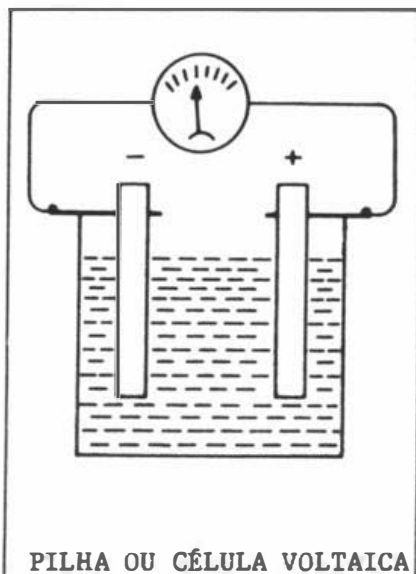
No fim do século XIX, sentiu-se a necessidade de criar uma pilha-padrão, mas esta teria que ter uma força eletromotriz constante durante muito tempo. E isso aconteceu em 1872, quando Clarck propôs um tipo de pilha que satisfazia estas exigências com um certo rigor. Esta constava de um anodo de zinco amalgamado que penetrava em uma solução saturada de sulfato de zinco; o catodo era uma barra de mercúrio coberta por uma pasta de sulfato mercurioso.

Vinte anos depois (1892), surgiria, com Weston, outra pilha-padrão: a pilha de Weston. O eletrodo positivo é constituído por mercúrio coberto por uma pasta de sulfato mercurioso; e o anodo, uma barra de cádmio ou de amálgama de cádmio; e o eletrólito, uma solução de sulfato de cádmio, substituindo a pilha de Clarck com muita vantagem, sendo, portanto, a atual pilha padrão.

Atualmente já temos pilhas com as mais variadas características e composições como: pilha de mercúrio, pilha de combustível, pilhas alcalinas e pilhas de zinco-ar, etc. Todos estes tipos resultam de pesquisas feitas por homens notáveis como: Volta, Leclanché, Clarck, Féry, Daniell, Edward, Weston, Ruben Mallory, Seebeck, etc.

A PILHA OU CÉLULA VOLTAICA

Antes de entrarmos no assunto do funcionamento da pilha, vamos esclarecer algumas confusões cometidas por alguns técnicos que empregam indistintamente os nomes de pilhas e baterias ao se referirem a qualquer dispositivo que produz eletricidade por meios químicos. Existe, pois, diferença entre os dois termos, onde bateria se refere a um grupo de pilhas ou células ligadas em conjunto com o fito de se obter uma maior tensão.



Os termos: pilha e célula são usados de modo genérico, - pois, como sabemos, a pilha é realmente uma célula e esta é parte fundamental para se gerar eletricidade, usando a química.

Quando estudamos a lição E-1, vimos que existem elementos que têm a propriedade de ceder elétrons com facilidade e outros aceitam estes mais facilmente. Este processo é ainda mais acentuado, quando os elementos estão diluídos em água ou na forma líquida.

Um exemplo disso é o que ocorre com o ácido clorídrico, que é constituído da combinação de átomos de hidrogênio (H) e átomos de cloro (Cl), que misturados à água, uma grande parte desta combinação se romperá, onde cada átomo de hidrogênio irá soltar um elétron e o átomo de cloro irá adquiri-lo, com isso a solução fica **ionizada**, ou seja, a solução com falta de elétrons (hidrogênio) fica com carga positiva, identificada como **íons positivos**. E a solução com excesso de elétrons (cloro) fica com carga negativa, identificada como **íons negativos**. Este processo poderá ser observado na fig. 3

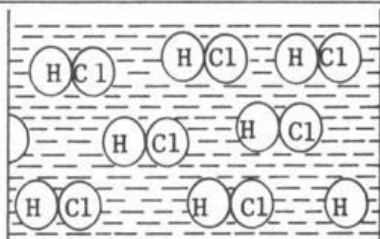


FIGURA 3A

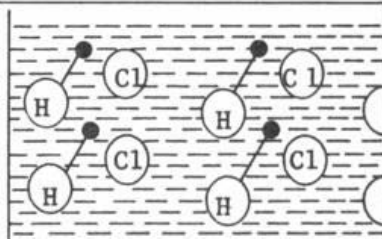


FIGURA 3B

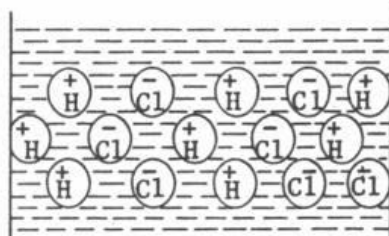


FIGURA 3C

A fig. 3a. mostra o ácido clorídrico puro. A fig. 3b. mostra o rompimento da molécula, ficando separados os átomos de H dos de Cl. E a fig. 3c. mostra a ionização, onde o cloro fica negativo e o hidrogênio fica positivo.

Nas condições expostas, esta solução não manifesta polaridade, pois o número de anions é igual ao número de cations. Mas quando introduzimos nesta solução duas barras: uma de zinco e outra de carbono e como o zinco é constituído de átomos que contêm, na última camada, 2 elétrons e com tendência a cedê-los, é exatamente o que ocorre, pois no momento em que o ácido ataca a barra de zinco, uma imensa quantidade de átomos é desprendida, juntando-se à solução. No instante em que ocorre o desprendimento do átomo, dois de seus elétrons - são cedidos à barra de zinco. Este átomo fica positivo, representado pelo sinal (++) ou com falta de dois elétrons, ficando a barra com excesso de elétrons ou negativa e conseqüentemente a solução ficará positiva ou com íons positivos.

O outro eletrodo, a barra de carbono, é constituído de 6 elétrons, sendo que a última camada é composta de 4 elétrons. Por outro lado, a solução é composta de hidrogênio, o qual é constituído de 1 elétron ou falta um elétron na última camada, portanto, no instante em que se mergulha a barra de carbono - nesta solução, cada átomo de hidrogênio irá roubar um elétron da barra de carbono, conseqüentemente esta barra se tornará - positiva e com isso ocorre um desequilíbrio entre as duas barras, onde a de zinco ficará polarizada negativamente e a de carbono ficará polarizada positivamente. Este processo é mostrado em detalhes na figura 4.

Podemos observar ainda que conforme os átomos de hidrogênio vão adquirindo o elétron que lhes faltava, vão se transformando em hidrogênio comum, ou num gás que é a sua forma natural e evaporando da solução em forma de bolhas.

E por outro lado, aqueles átomos de zinco, que perderam dois elétrons ao se desprenderem desta barra, são atraídos pelos átomos de cloro, onde cada átomo de zinco combina com 2 átomos de cloro formando o cloreto de zinco. (ZnCl_2) e sedimentando no fundo da pilha em forma de um pó branco, como mostra a figura 4c.

Se não houver nenhuma ligação entre as duas barras de carbono e de zinco, o processo descrito continuará até que a polarização atinja um grau de cargas opostas que produzam uma diferença de potencial (d.d.p.) da ordem de 1,5 volts e nessas condições a pilha estará com a carga máxima.

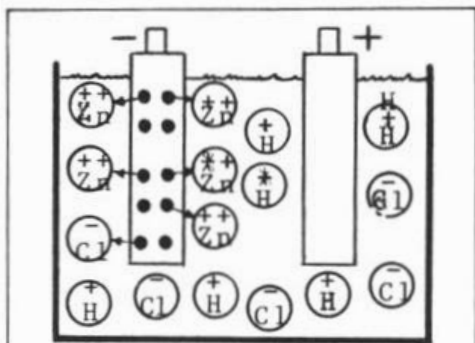


Fig. 4a

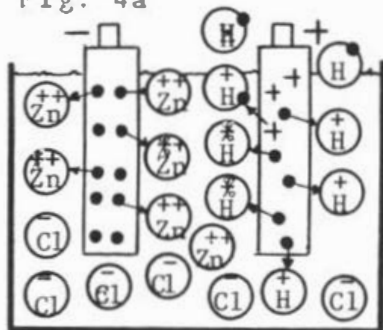


Fig. 4b

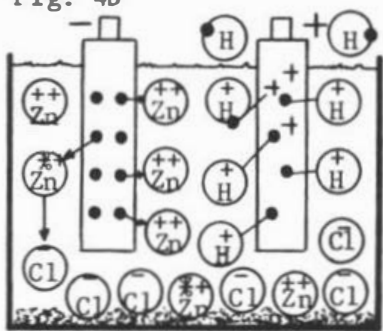


Fig. 4c

A fig. 4a mostra que cada átomo de zinco ao se desprender da barra deixa dois elétrons. A fig. 4b mostra que cada íon de hidrogênio retira um elétron da barra de carbono. A fig. 4c mostra a formação do cloreto de zinco pela combinação do cloro com íons de zinco.

Esta pilha que mostramos foi o resultado de uma série de pesquisas desenvolvidas por Daniell e posteriormente por Leclanché que possibilitaram o desenvolvimento das pilhas secas comercializadas atualmente.

PILHA A SECO

A pilha descrita no tópico anterior tem uma grande desvantagem que você já deve ter notado que é a de usar uma solução líquida, portanto só podendo ser usada em uma única posição. Mas este problema foi contornado como vimos com desenvolvimento da pilha de Leclanché, que é constituída de um envoltório de zinco, contendo no centro uma barra de grafita (carbono), recoberta de uma pasta umedecida de dióxido de manganês, cloreto de zinco e cloreto de amônio. No anodo (o envoltório de zinco), o Zn é oxidado; no catodo (barra de grafita ou carbono), o MnO_2 é reduzido:



A soma dessas semi-reações resulta em:



Uma versão da pilha de Leclanché é a moderna pilha

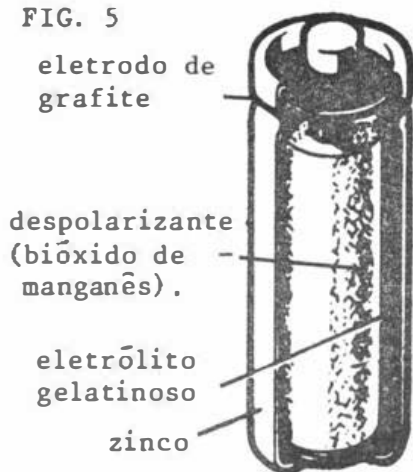
a seco, nome um tanto impróprio, pois o seu funcionamento exige um elevado grau de umidade interna.

É interessante observar que o pó de bióxido de manganês misturado com o pó de carbono, que recobre o eletrodo positivo de grafita, tem a finalidade de absorver as bolhas de hidrogênio, formadas em volta deste eletrodo, evitando que estas criem uma isolação, impedindo o funcionamento da pilha, pois, como sabemos, esta é totalmente lacrada, não tendo onde evaporar o gás hidrogênio.

O funcionamento da pilha seca é igual ao da pilha voltaica, onde os átomos de zinco perdem elétrons, convertendo-se em íons positivos e doando elétrons ao pólo negativo. E ainda os átomos de hidrogênio, surgidos do sal amoníaco, com falta de elétrons, recuperam estes na barra de grafita (carbono), se transformando em gás hidrogênio. E os íons ou átomos positivos de zinco que fazem parte da solução pastosa, combinam-se com os íons de cloro, formando o cloreto de zinco, que está sempre presente no interior de uma pilha descarregada em forma de pó branco.

Estas pilhas, em vários formatos, adequadas aos diferentes aparelhos, são largamente comercializadas. Suas tensões são até hoje iguais a 1,5V, diferindo apenas na corrente. Pilhas maiores fornecem, é claro, maior corrente. Uma pilha pequena fornece, em média 0,25 ampère e uma grande, usada em telefonia, pode fornecer até 1 ampère.

FIG. 5



A fig. 5 mostra o aspecto de uma pilha seca, onde vemos: o eletrodo positivo de grafita, despolarizante (bióxido de manganês), o eletrodo negativo envoltório de zinco e o eletrólito gelatinoso.

PILHAS DE MERCÚRIO

As pilhas de mercúrio foram desenvolvidas pela equipe dirigida pelo Dr. Samuel Ruben Mallory, durante a 2a. guerra mundial, com o objetivo de se conseguir pilhas que conservassem suas propriedades du-

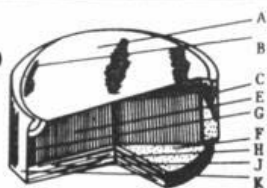
rante um longo período de armazenamento e em condições críticas de temperatura e umidade.

Estas pilhas são fabricadas em dois modelos: a pilha cilíndrica (pilha para lanterna) e a de tipo chato, semelhante a um botão, utilizada em relógios de pulso, quimicamente e eletricamente iguais. Contêm elas um eletrodo de zinco amalgamado, em forma de um pó muito duro, obtido por compressão (sinterização) e outro de uma combinação de grafita e óxido de mercúrio, separados por uma barreira iônica permeável.

O eletrólito é uma solução aquosa de hidróxido de potássio, misturada com HgO e Zn(OH)_2 sólidos. Quando em funcionamento cria-se uma película neutra de mercúrio que não se opõe à passagem da corrente, portanto, não polariza a pilha: permanecendo, assim uma tensão constante que é aproximadamente de 1,3V. E também não sendo necessário o desligamento periódico desta pilha da carga, por não apresentar o fenômeno da polarização.

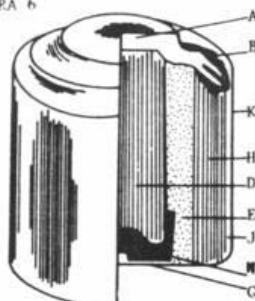
Estas pilhas têm a vantagem de poderem ser utilizadas depois de terem ficado dois ou três anos armazenadas, sem perderem as suas características e ainda elas se conservam em uma faixa muito ampla de temperatura ($+120^\circ\text{C}$ a -20°C). Por este motivo, esta pilha foi adotada no sistema de detecção sísmica lunar, na missão Apollo. A título demonstrativo de sua longa durabilidade, podemos citar a sua utilização em estimuladores cardíacos, onde uma pilha do tamanho de um dedal assegurou dois anos de perfeito funcionamento. A figura 6 mostra o aspecto interno desta pilha.

TIPO CHATO
(COMPRIMIDO)



-Constituição das pilhas de mercúrio:
(A) cobertura dupla; (B) junta plástica isolante; (C) anodo de zinco cor rugado; (D) anodo de zinco plano; (E) eletrólito em absorção; (F) separador; (G) invólucro interno; (H) despolarizante; (J) calço amortecedor; (K) invólucro externo; (L) despolarizante; (P) isolante.

FIGURA 6



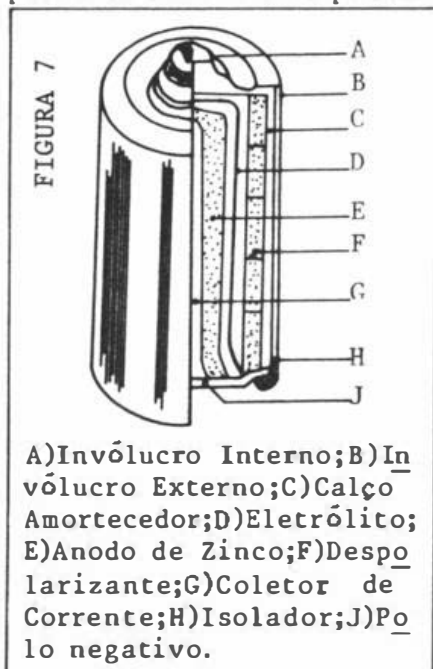
TIPO CILINDRICO

PILHAS ALCALINAS DE BIÓXIDO DE MANGANÊS

As pilhas alcalinas são de construção semelhante à das pilhas de mercúrio. São empregadas quando ou onde não se exige uma estabilidade de tensão muito severa, mesmo assim são muito mais estáveis que as pilhas comuns.

Estas pilhas têm o formato semelhante ao das pilhas comuns, onde um dos bornes é o botão da extremidade do cilindro. Este borne está em contato com o despolarizante através do invólucro de aço. Este despolarizante é um aglomerado de gráfito e bióxido de manganês, em forma de cilindros encaixados em volta do anodo. E o eletrólito é uma solução de hidróxido de potássio contido em um material poroso.

Estas pilhas fornecem correntes elevadas durante períodos bastante prolongados e, de conformidade com as pilhas de mercúrio, podem ser armazenadas durante muito tempo, e em uma faixa de temperatura bastante ampla. A figura 7 mostra o aspecto interno desta pilha.



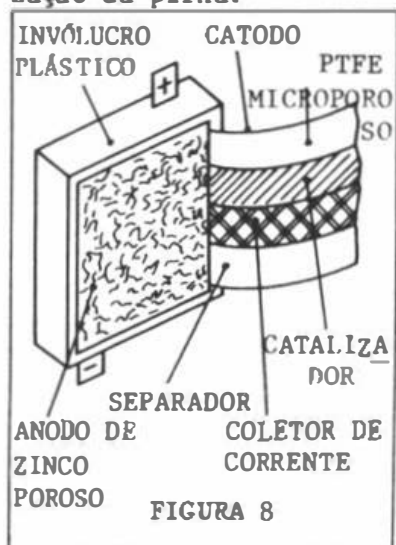
PILHAS DE ZINCO-AR

Estas pilhas são constituídas de um anodo de zinco e de um catodo poroso que consome o oxigênio do ar, daí seu nome zinco-ar. Elas foram desenvolvidas pela Leeson - Moos Laboratory dos E.U.A., através das pesquisas realizadas em torno do uso de eletrodos porosos em pilhas de combustível.

Graças ao alto desempenho em relação capacidade/peso dessas pilhas, elas estão sendo aplicadas para fins militares, sendo inclusive fabricadas mecanicamente recarregáveis (com substituição dos anodos de zinco utilizados por anodos de zinco novos).

Atualmente a Leeson já concedeu seus direitos de patentes à: Crompton Parkinson, Hitachi, Gould e outras.

A figura 8 mostra os principais elementos que constituem uma pilha zinco-ar retangular: uma embalagem de plástico rígido contendo um anodo de pó de zinco amalgamado e o outro pólo negativo da pilha. O anodo encontra-se em contato com o eletrólito, composto de uma solução concentrada de hidróxido de potássio. Esta simetria estrutural permite o fornecimento de altas intensidades de correntes, sem uma excessiva polarização da pilha.



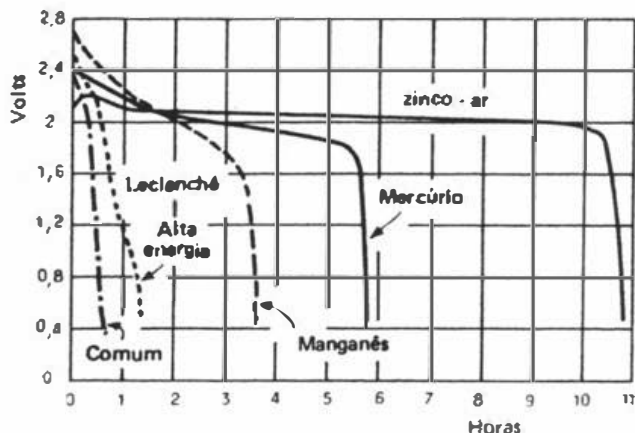
Por outro lado, o catodo é constituído de várias camadas, onde a camada externa é uma película microporosa de PTFE (Politetrafluoretileno), composto que tem propriedades aparentemente antagônicas: porosa ao oxigênio do ar difundido na pilha e impermeável à água e ao eletrólito. Essa película contém o eletrólito e devido à sua propriedade, permite o funcionamento desta pilha em qualquer posição, desde que não seja colocada em lugares lacrados, pois ela precisa do acesso do ar para poder retirar o oxigênio.

No PTFE encontra-se uma camada de um produto catalítico, o qual, em contato com eletrólito, transforma o oxigênio do ar em íon hidroxila, sem modificações no curso da reação. Nele são utilizados catalizadores baratos e eficientes que produzem correntes elevadas.

Mais internamente, encontra-se outra camada, permeavelmente separada, que permite a passagem dos íons, impedindo, por outro lado, qualquer contato direto entre anodo e catodo.

E finalmente, uma última camada interna, constituída de uma espécie de tela metálica que coleta a corrente, canalizando-a ao borne de saída.

Conforme notaremos no gráfico a seguir, as pilhas de zinco-ar fornecem uma tensão notavelmente constante, durante toda sua vida útil e a corrente fornecida por esta pilha chega a valores seis a oito vezes superiores ao de uma pilha comum ou Leclanché.



— Curvas de descarga contínua de diversas pilhas de igual dimensão; Leclanché convencional, Leclanché de potência, alcalino-mangânico, de mercúrio e de zinco-ar.

mAh = mili-ampère hora.

Ah = ampère hora.

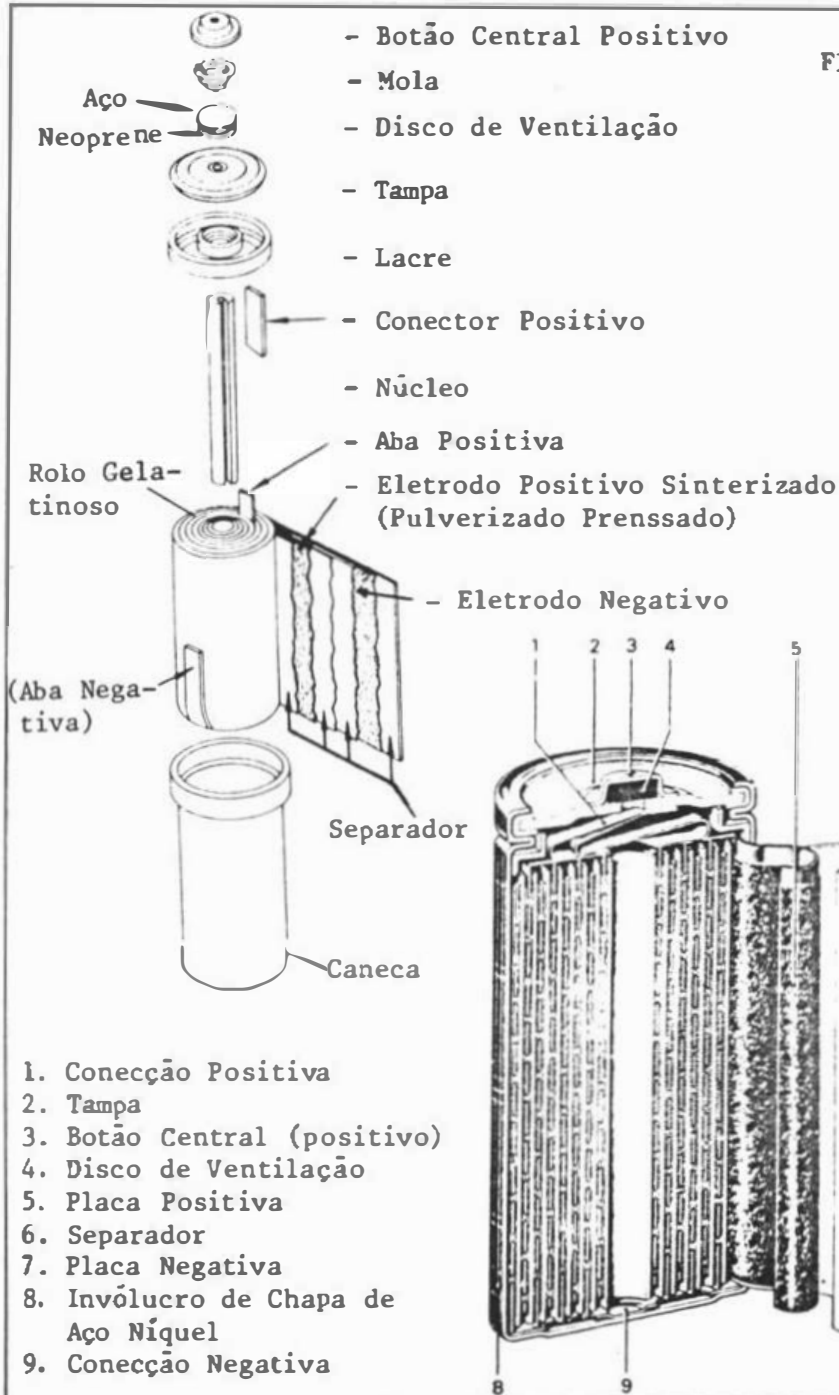
Fornecer uma tensão sem carga de 2,8V e com carga, 2,8 a 2,2V, dependendo da carga; e em descarga, 1,8V, fornecendo um débito contínuo de corrente máxima 250 mA e em picos de curta duração de 500mA, com uma capacidade de 2,5 Ah, após 3 meses de conservação em temperatura média. Um dos inconvenientes é a sua dimensão 50 x 28 x 14mm, que só permite a substituição direta de 2 pilhas cilíndricas comuns, lado a lado, ligadas em série. Mas, por outro lado, tem a vantagem de pesar só 32g.

PILHAS DE CÁDMIO OU NÍQUEL-CÁDMIO

A níquel-cádmio tem como elementos de base: o níquel e o cádmio trabalhando junto a um eletrólito de substância gelatinosa (Gell) de hidróxido de potássio. Em lugar de placas, os eletrodos são atualmente alternados em camadas de pó metálico, prensado ou sinterizado ("sinte"), embalado de maneira tal, que forma um pacote enrolado como gaze. Veja figura 9.

Cada célula fornece uma tensão média de 1,25V, o que é desvantajoso, pois, em uma ligação em série de quatro células, que é comumente usado, teremos uma tensão equivalente a 5,0V, tendo uma diferença para menos de 20% com relação às pilhas comuns, embora sendo indispensáveis para alguns equipamentos. Quanto à capacidade de corrente, difere de fabricante para fabricante. Encontramos, por exemplo, células "AA" com 450 mAh a 600 mAh.

FIGURA 9



USO DAS NÍQUEL-CÁDMIO

As níquel-cádmio são normalmente carregadas com correntes constantes, numa relação de 1/10 de sua capacidade normal por célula. Isto é muito importante, uma vez que a célula de níquel-cádmio tem uma resistência interna muito baixa. A tensão deve ser constante, caso contrário ela poderá se sobreaquecer e, com isto, se danificar por excesso de calor. A célula não recebe toda a corrente que o carregador lhe entrega no período de carga. No início e fim do período de carga toda a energia do carregador é usada para a reconstituição dos eletrodos e na produção de gás. Por esta razão, a constante de corrente exigida para a carga deverá ser um pouco maior que a especificada. Exemplo: uma célula de 1,25 volts e 450 mAh carrega-se sobre uma tensão aproximada de 1,35 volts e 450 mAh por 14 horas. Se o tempo é estendido a um período muito longo, a célula não aceita mais carga e começa a aquecer. Para prevenir isto, alguns fabricantes produzem células com válvulas ou pequenos orifícios junto aos terminais de ligação externa para ventilação. Dependendo do fabricante e do tipo de células, a temperatura de carga normal é de 0 a 10°C e no máximo entre 40 a 60°C.

A "performance" ótima é obtida entre 10 a 25°C. Nesta relação é possível obter uma carga de 100%. Em temperaturas baixas, a capacidade da célula começa a falhar, ou seja, demora a carregar ou se sobrecarrega muito.

Em temperaturas altas, a célula não aceita carga completa. Ao redor de 55°C, ela perde 30% de sua capacidade de carga e isto pode inclusive danificar permanentemente a célula. É importante verificar as especificações do fabricante quanto à sobrecarga, usando-se corrente normal e o tempo de sobrecarga permitido. A maioria dos fabricantes, por exemplo, especificam que cada célula aceita no mínimo mil recargas.

Outras recomendações importantes, com respeito às pilhas de níquel-cádmio, referem-se ao aquecimento e ao período de carga. Não deve haver aquecimento excessivo ou sobrecarga. Cargas com correntes pequenas (inferiores às especificadas pelo fabricante) ou cargas com tempos curtos (com corrente normal) causam alguns problemas. Por exemplo: o fator de carga é $C/14$ (C é a carga nominal de 450 mAh e 14 é o tempo em horas). As-

sim a carga correta seria fornecermos uma corrente de 32 mili ampêres por hora em um tempo de 14 horas. Desta forma, se utilizarmos um carregador com estas especificações em um tempo - de 3 horas, por exemplo, é lógico que a pilha não se carregará totalmente e, se isso acontecer várias vezes, a pilha criará uma "memória", não aceitando mais uma carga completa, mesmo - que as futuras cargas sejam dentro das 14 horas.

Em células completamente descarregadas, não se deve ser usada carga com fator baixo.

O efeito memória é a perda de parte da capacidade de aceite de carga. O efeito memória pode ser corrigido, efetuando-se várias cargas, a toda força, por 14 a 16 horas e descargas completas o mais rápido possível. Este efeito memória também pode ser causado por cargas feitas sob altas temperaturas.

CARGA RÁPIDA

A carga rápida usa corrente acima da prescrita na carga normal. Isto é possível em muitos tipos de níquel-cádmios, mas as opiniões diferem-se entre os fabricantes. Geralmente isto é possível em células completamente descarregadas em 2 ou 3 vezes a mais que a corrente normal, por períodos mais curtos, com temperaturas entre 20 a 40°C. Com temperaturas mais baixas, a corrente normal especificada não deve ser excedida. Por segurança sempre é recomendável usar um carregador automático ou com sensor de temperatura que baixe a corrente de carga a um valor baixo. O uso de um "timer" requer obviamente o conhecimento prévio de que a célula esteja completamente descarregada. Por exemplo: níquel-cádmio normal, carga rápida com duas células, 90 mA por 6 horas, temperatura acima de 20°C.

CICLO DE DESCARGA

Novamente, dependendo do fabricante, as níquel-cádmios podem ser descarregadas a temperaturas entre 40 a 20 graus centígrados negativos e 45 a 60 graus positivos, sendo que a capacidade normal fica na temperatura de 20°C.

A resistência interna da célula exibe um coeficiente de temperatura negativa:

Maior resistência interna com temperatura alta = carga;
Menor resistência interna com temperatura baixa = descarga.

A relação entre a capacidade e a descarga é determinada pela resistência interna da célula e também pelo tamanho físico da célula, devendo ser feita uma diferença entre as níquel-cádmio "SINTE" e não "SINTE".

As células "SINTE" são as mais usadas, mas existem baterias de 9 volts que não são "SINTE". A resistência interna das células "SINTE" são mais baixas em 1/3 ou 1/4 das "NÃO - SINTE", mas são mais constantes, mesmo totalmente descarregadas. A resistência interna das níquel-cádmios "NÃO SINTE" cai a 3 ou 5 vezes do seu valor original, quando descarregadas.

As células não sinterizadas descarregam mais lentamente. Por outro lado, quanto maior o tamanho, menor é a resistência interna. Porém essas resistências variam de fabricante para fabricante. Encontramos as seguintes resistências internas médias:

Tamanho "AA" - 15 a 30 miliohms - pilha pequena
Tamanho "C" - 10 a 20 miliohms - pilha média
Tamanho "D" - 5 a 15 miliohms - pilha grande

O ciclo de descarga total de células de níquel-cádmio em uma ligação série merece uma atenção especial, pois pode acontecer que uma célula descarregue antes das outras. Sendo assim possível que sua polaridade inverta e seja recarregada ao contrário. Isto provoca excesso de gás, aumenta a pressão interna, provocando a perda do eletrólito gelatinoso, resultando na total deteriorização da célula. O risco de células invertidas e suas conseqüências é devido a altas correntes drenadas ou a curtos, quando as células estão em série. Além disso, põe em risco a saúde do técnico, por ficar exposto a gases tóxicos.

Nunca se esqueça de que numa níquel-cádmio o revestimento é o eletrodo (-) e de sempre usar fusíveis de acordo com o consumo do equipamento.

O termo sinte ou sinterizado significa que o material empregado na fabricação é moído e prensado.

RETENÇÃO DE CARGA E ARMAZENAMENTO

As células de níquel-cádmio podem ser armazenadas indefinidamente em quaisquer condições de carga e em temperaturas ambientes entre - 40°C a 50°C. Porém estas células, totalmente ou parcialmente carregadas, gradualmente perdem sua capacidade.

As células sinterizadas descarregam-se mais facilmente, sendo que a relação de descarga varia com a temperatura. Por outro lado, a retenção de carga maior se dá com temperaturas mais baixa. A 40°C as níquel-cádmios se descarregam em poucas semanas. Em temperaturas mais ou menos de 25°C, uma célula completamente carregada dura, com 60 a 80% de capacidade, mais de 3 meses. E com temperatura perto de 0°C sua capacidade fica entre 80 a 90% e dura muitos meses.

TEMPO DE USO

Sem tratamentos abusivos, as células de níquel-cádmio duram acima de 1000 ciclos. Um ciclo é igual a uma carga e descarga completa. Com o aumento do número de ciclos, há uma perda gradual da capacidade. Considera-se, então, célula morta, quando sua capacidade cai para 70 a 80%, nunca se esquecendo de que temperaturas elevadas encurtam a vida útil das níquel-cádmios, bem como drenos de altas correntes. Por outro lado, descargas incompletas aumentam o número de ciclos e não afetam sua capacidade, se não houver sobrecarga. Na prática, com um pouco de sorte, chega-se a 1500 e até 2000 ciclos, isto se a célula não atingir 50% de sua capacidade em cada descarga.

Já se observou em calculadoras que se as níquel-cádmios forem carregadas com regularidade, isto é, uma carga por toda a noite, uma vez por semana e sempre com 50% de sua capacidade, ainda ativa, elas poderiam durar de 7 a 10 anos. Contudo, sua durabilidade poderá ser elevada ainda para até 12 anos, se for usado um ciclo de carga entre 14 a 16 horas. Pois, como sabemos, a maioria das calculadoras usam um ciclo de carga de 4 horas, o qual aquece bastante as células e conseqüentemente reduz a vida útil. Um exemplo prático é o que ocorre com os modelistas de rádio controle, que usam as níquel-cádmios em altas correntes de descargas e as carregam rapidamente, direto, na bateria do carro, mas não conseguem mais de 100 ciclos.

Em outras palavras, a vida útil de uma níquel-cádmio varia consideravelmente com as condições de operação e de recarga.

PRECAUÇÕES QUE ASSEGURAM UM LONGO PERÍODO DE VIDA

- 1- Nunca solde diretamente nos eletrodos de uma níquel-cádmio. Se for necessário solda, não use solda de estanho e sim solda a ponto, micro pontos.
- 2- Tome cuidado quando carregar células a temperaturas baixas. Células usadas em locais frios devem ser deixadas em temperaturas de mais ou menos 21°C, antes de serem recarregadas. Evite a carga e descarga a temperaturas altas e em nenhuma circunstância, exceda as especificações de temperatura.
- 3- A todo custo evite curtos e descargas rápidas ou drenos de altas correntes. Evite descarregar completamente as células.
- 4- Nunca deixe sobrecarregar uma níquel-cádmio, mesmo sendo com 1/10 de sua capacidade.
- 5- Carregue as células antes do primeiro uso.
- 6- Quando for carregar um grande número de células, coloque-as em série, nunca em paralelo.
- 7- Evite conectar as células invertidas mesmo momentaneamente ou durante a recarga.
- 8- Nunca abra uma níquel-cádmio ou a exponha ao fogo. Cuidado com células oxidadas, estufadas ou abertas, o cádmio é tóxico e o eletrólito é altamente corrosivo.
- 9- Sempre preste atenção às recomendações dos fabricantes.
- 10- Nunca ligue células em paralelo. Se necessário for, deverá ser feita em série paralelo ou ligar somente baterias em paralelo.

RECICLADORES CARREGADORES/DESCARREGADORES

Existem recicladores que automaticamente descarregam as baterias de níquel-cádmio até o nível de 4,4V (bateria formada pela ligação em série de 4 células), usando marcadores de tempo de descarga e indicadores de estados da bateria no início e no final de carga. Na figura 10, a título de ilustração fornecemos dois diagramas esquemáticos de carregadores e des-

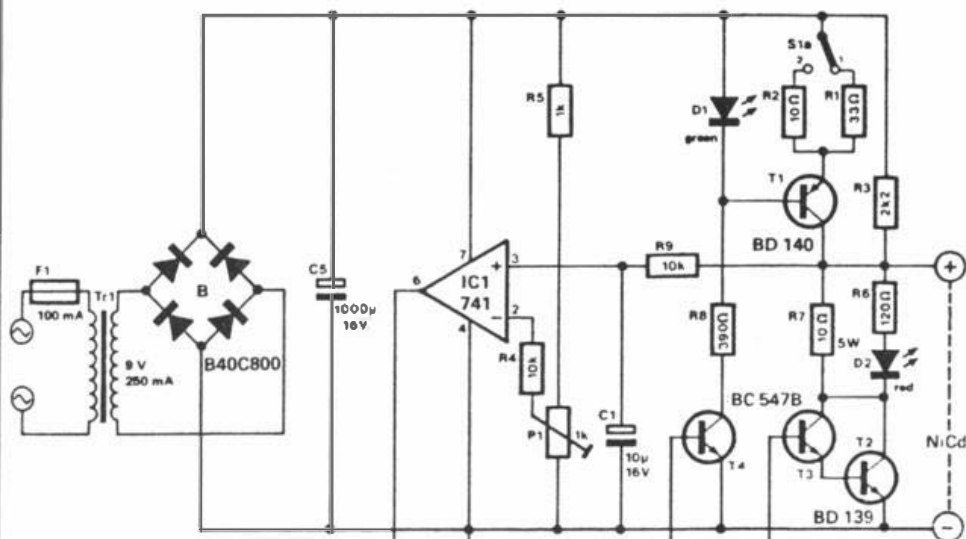
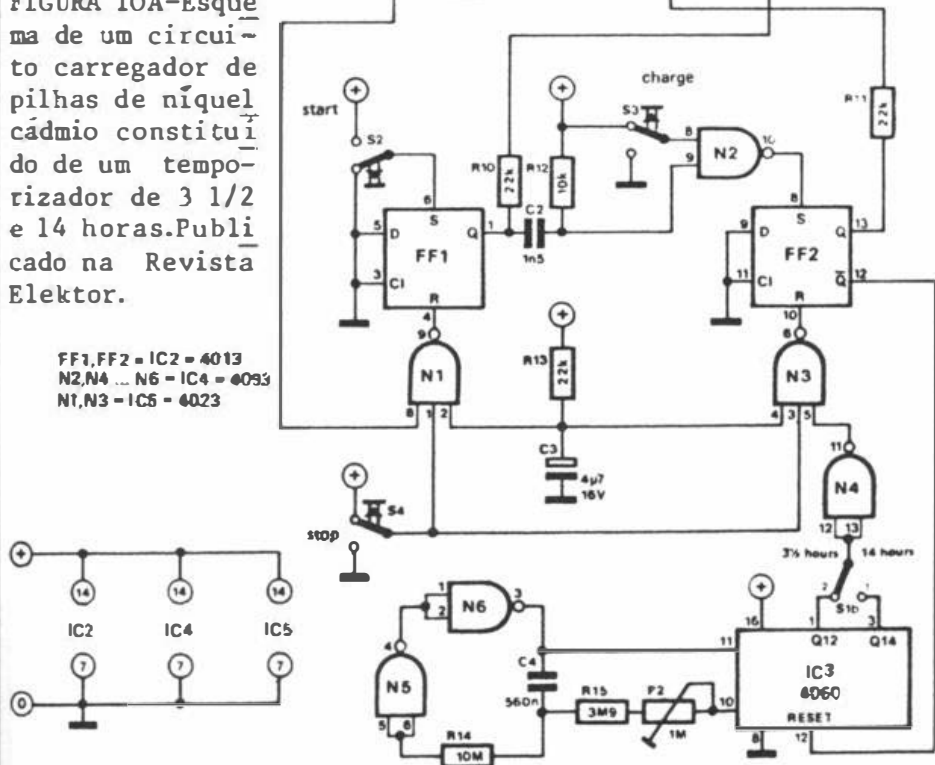


FIGURA 10A-Esquema de um circuito carregador de pilhas de níquel cádmio constituído de um temporizador de 3 1/2 e 14 horas. Publicado na Revista Elektor.

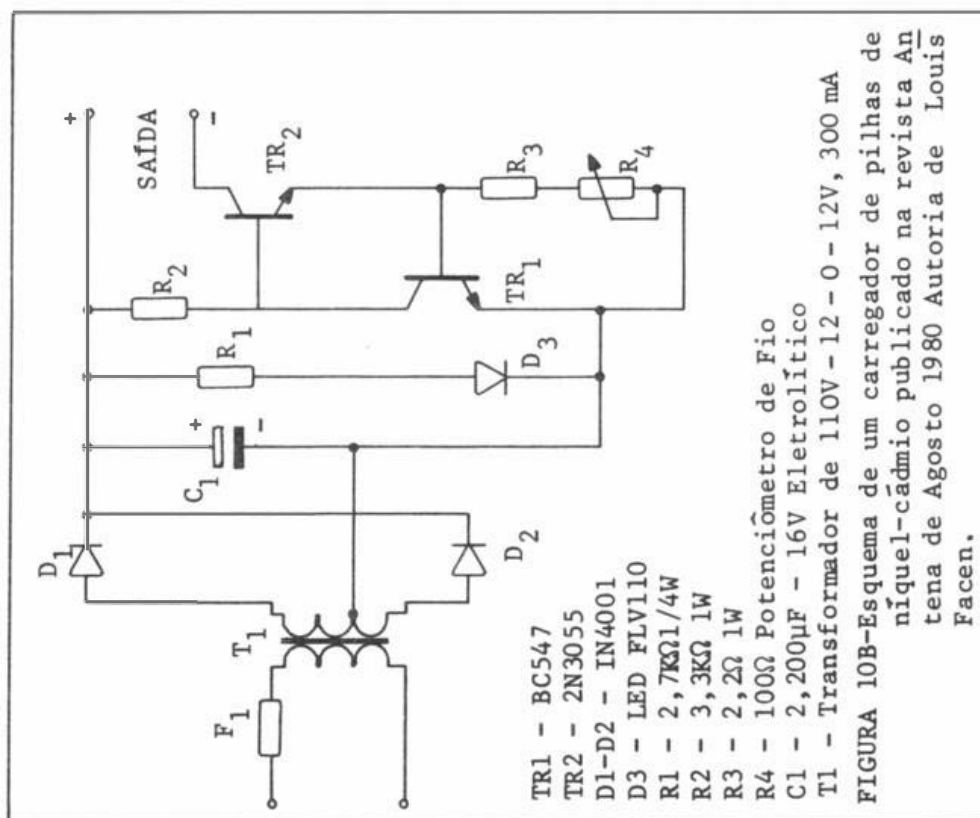
FF1, FF2 = IC2 = 4013
N2, N4 ... N6 = IC4 = 4093
N1, N3 = IC5 = 4023

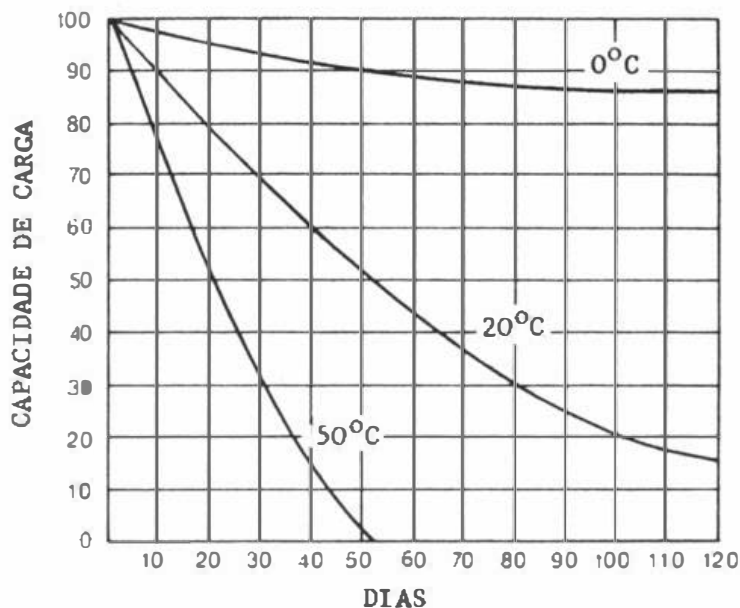


carregadores automáticos e, na figura 11, o gráfico da influência da temperatura em uma célula níquel-cádmio e ainda na figura 12, o diagrama esquemático para se efetuar um teste de uma célula. Neste último caso, deve-se usar um medidor de 1,5V de fundo de escala, devendo indicar quando em medida no mínimo 1,1V, por 2 horas. Caso contrário, a célula deverá ser reciclada e repetido o teste. Se não conseguir 1,1V por 2 horas, isso indica que a célula está irrecuperável.

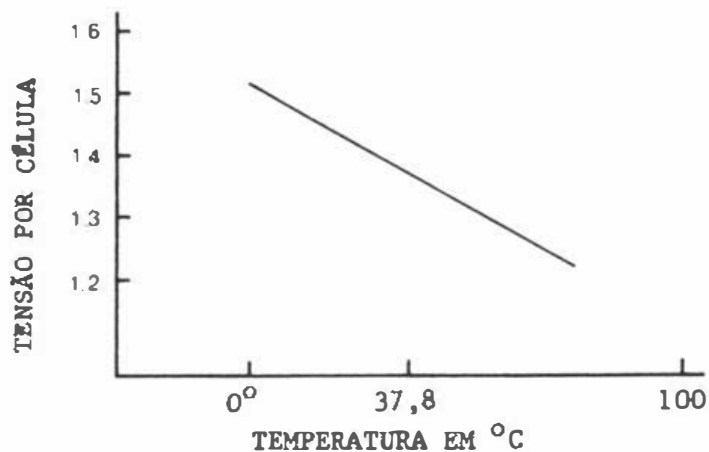
Além dos tipos de pilhas mencionadas aqui, existem outras, como: pilhas isotópicas, pilhas de combustíveis etc. Porém, as citadas são as mais difundidas.

Informamos aos alunos que não possuem um bom conhecimento de eletrônica, que não se preocupem se não tiverem entendido os circuitos recicladores fornecidos nesta lição. Assim que estudarmos as lições sobre transistores e circuitos lógicos, essas dúvidas serão sanadas.





O gráfico mostra a capacidade de retenção de carga em porcentagem pelo número de dias de acordo com a temperatura.



O gráfico mostra a tensão em relação à temperatura.

FIGURA 11

TIPO	TENSÃO NOMINAL	TEMPO DE CONSERVAÇÃO	CAPACIDADE POR PESO	CAPACIDADE POR VOLUME
MERCÚRIO	1,35 a 1,4V	30 meses	100Wh/Kg	0,95Wh/cm ³
MANGANÊS	1,5V	30 meses	75Wh/Kg	0,55Wh/cm ³
LECLANCHE	1,5V	6a12 "	50Wh/Kg	0,30Wh/cm ³
ZINCO-AR	2,8V	-	-	-
NÍQUEL-CÁDMIO	1,25V	+ 26 meses	-	-

Wh/Kg = watt-hora por kilograma.

Wh/cm³ = watt-hora por centímetro cúbico

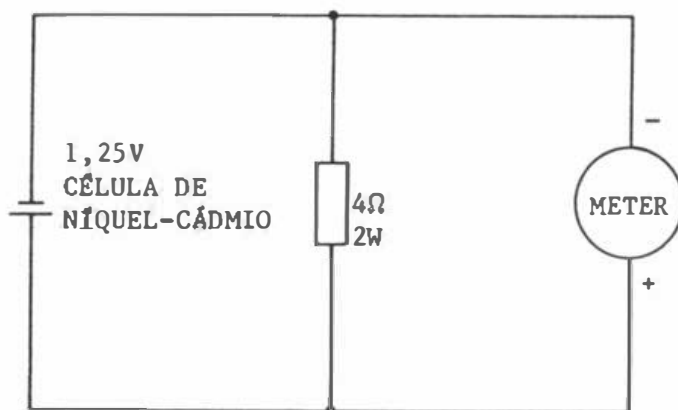


Fig. 12 mostra um circuito para efetuar medidas em pilhas de níquel-cádmio usando multímetros comuns.



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-2

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

1) Assinale a alternativa correta:

- a) a eletricidade produzida pelo calor do sol depende da ação dos ventos;
- b) a eletricidade produzida pelo magnetismo esta associada a força mecânica;
- c) a eletricidade produzida pela reação química depende da ação dos cristais de Rochelle.

2) Qual o nome do cientista que pôs em prática o princípio pelo qual uma reação de óxido-redução pode produzir corrente elétrica?

- a) Volta b) Daniell c) Weston d) Leclanché.

3) A pilha utilizada atualmente como padrão é a:

- a) Pilha de Clarck; b) Pilha de níquel-cádmio;
- c) Pilha de Weston; d) As respostas B e C estão corretas.

4) O princípio químico básico para produzir eletricidade é:

- a) que os elementos possuidores de muitos elétrons doem-nos facilmente;
- b) que os elementos possuidores de poucos elétrons na última camada doem-nos facilmente;
- c) aquele que usa a desintegração do átomo;
- d) que os elementos possuidores de poucos elétrons doem-nos facilmente.

- 5) Ocorre o seguinte processo com a barra de zinco;
- a) ela doa uma grande parte de seus átomos para a solução, mas fica com dois elétrons desses átomos doados;
 - b) fica com excesso de elétrons;
 - c) as respostas A e B estão corretas;
 - d) fica com falta de átomos.
- 6) A grande vantagem da pilha a seco é:
- a) poder ser utilizada em qualquer posição;
 - b) poder ser utilizada em uma única posição;
 - c) não vaziar o eletrólito;
 - d) ser lacrada.
- 7) O eletrólito da pilha de mercúrio é:
- a) uma solução aquosa de óxido de cloro;
 - b) uma solução aquosa de óxido de potássio;
 - c) uma solução aquosa de hidróxido de potássio;
 - d) as respostas B e C estão corretas.
- 8) A grande desvantagem das pilhas de níquel-cádmio é:
- a) porque sua tensão é de 1,25V por célula;
 - b) porque sua tensão é de 2,8V por célula;
 - c) porque sua tensão série de quatro células é igual a 4,8V;
 - d) as respostas A e C estão corretas.
- 9) Os tamanhos das células são identificados por códigos, onde o código:
- a) "AA" = pilha pequena e "D" = pilha grande;
 - b) "C" = pilha pequena e "D" = pilha grande;
 - c) "C" = pilha média e "AA" = pilha grande;
 - d) as respostas A e B estão corretas.
- 10) Precauções que asseguram um longo período de vida para as pilhas de níquel-cádmio são:
- a) nunca soldar com estanho, evitar curtos e fazer cargas rápidas;
 - b) fazer cargas rápidas, nunca ligar células em paralelo e nunca abrir seu invólucro;
 - c) sempre usar carga lenta, nunca ligar células em paralelo e evitar curto.
 - d) todas as respostas estão corretas.

LIÇÃO E-3

ACUMULADORES

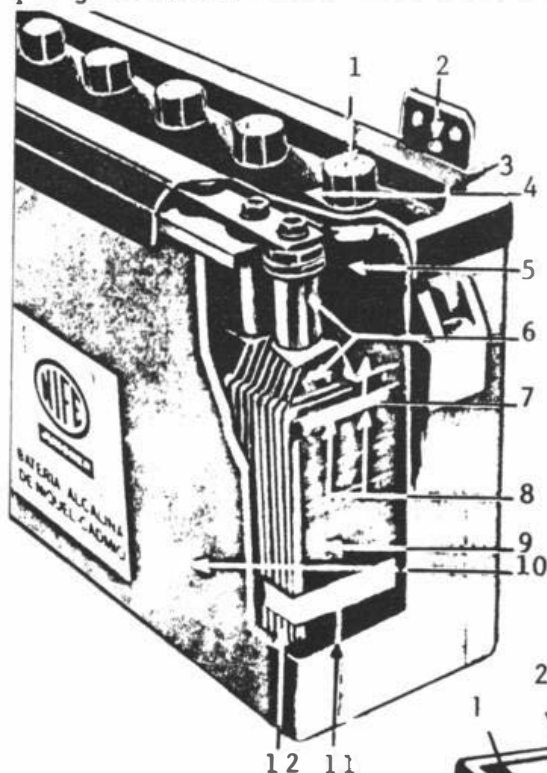
Na Lição E-2 estudamos a pilha elétrica ou célula voltaica que é um gerador, pois ela mantém entre seus bornes ou eletrodos uma d.d.p. ou uma tensão como resultado da reação química que ocorre internamente nesta. Vimos também que elas são chamadas de células primárias e que podem ser agrupadas em uma ligação série ou paralela, formando um conjunto denominado de bateria.

As baterias de ácido chumbo são de processos semelhantes, com a vantagem de poderem inverter o processo. Inicialmente há uma reação química provocada pelo fornecimento de energia elétrica (estágio de carga), formando substâncias, que reagem espontaneamente entre si, produzindo eletricidade (estágio de descarga). Essas baterias são constituídas por vários estágios de pilhas ou células eletrolíticas e, por isto, são denominadas de pilhas secundárias ou acumuladores.

Os primeiros estudos sobre acumuladores são devidos ao físico francês Gaston Plate nos anos de 1860. Alguns anos mais tarde, também Edison se dedicou à pesquisa do mesmo.

Desde as primeiras pesquisas até hoje, houve muito aperfeiçoamento e, nestes últimos anos com o agravamento da produ

ção energética mundial, elas estão na ordem do dia. Sabemos que já existem carros elétricos com autonomia de até 800km. A



BATERIA ALCALINA DE NÍQUEL-CÁDMIO

- 1 - Válvula (EXPLOSION PROOF) tipo baioneta.
- 2 - Terminal externo e com identificação de polaridade, para a correta interligação.
- 3 - Tampa de proteção do monobloco.
- 4 - Área máxima de contato com as extremidades dos polos.
- 5 - Grande reservatório para eletrólito.
- 6 - Barra coletora e polos extremamente reforçados.
- 7 - Tela de proteção contra curto circuitos provocados por corpos estranhos.
- 8 - Bastões isoladores.
- 9 - Placas tipo holas, com fitas de aço perfuradas, contendo material ativo.
- 10 - Recipiente de polipropileno expandido de grande resistência mecânica.
- 11 - Cinta.
- 12 - Isoladores laterais.

BATERIA DE ÁCIDO CHUMBO

- 1 - Pasta de vedação.
- 2 - Ponte de ligação entre 2 células.
- 3 - Ponte de ligação.
- 4 - Orifício de ventilação.
- 5 - Bornes de ligação.
- 6 - Tampas de cada célula.
- 7 - Placas negativas (chumbo puro).
- 8 - Separadores de material isolante.
- 9 - Placas positivas de peróxido de chumbo.
- 10 - Depósito para o sedimento de sulfato de chumbo.
- 11 - Sustentador das placas.
- 12 - Recipiente de borracha endurecida.

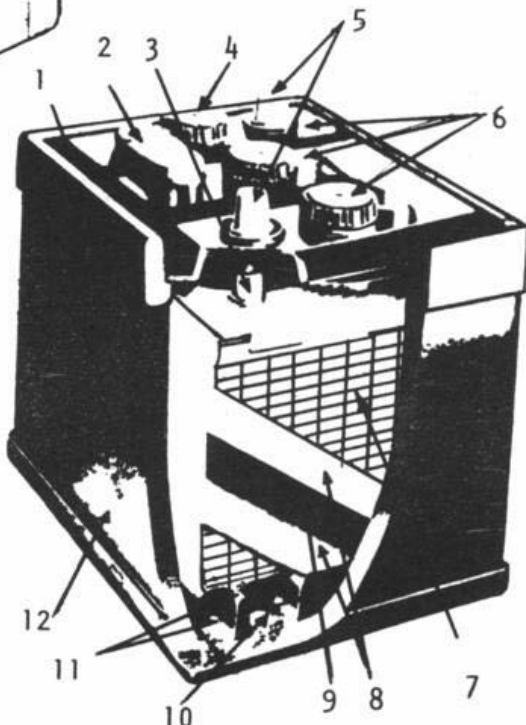


FIGURA 1

grande vantagem do carro elétrico em relação ao à gasolina es-
tã no aproveitamento da energia produzida pelo motor, onde os
motores à gasolina têm um aproveitamento de 30%, ao passo que
nos motores elétricos é de 56%, bem acima daqueles.

A utilidade dos acumuladores não se restringe somente ao
uso em carros elétricos, mas são utilizados em carros movi-
dos à gasolina ou álcool, aviões, barcos, na indústria e até
mesmo em computadores.

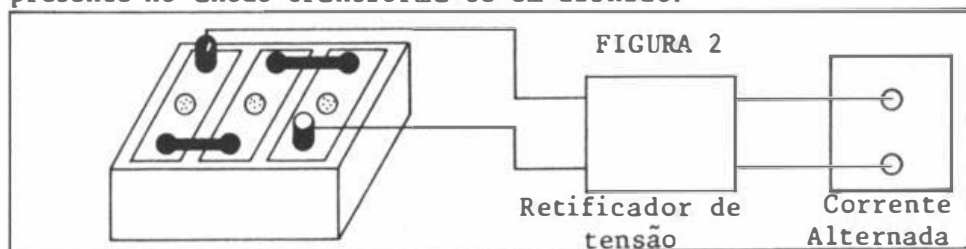
FUNCIONAMENTO DE UMA BATERIA SECUNDÁRIA OU ACUNULADOR

Do acumulador criado por Gaston Platé originaram-se as
baterias secundárias (acumuladores) de ácido-chumbo, sendo nor-
malmente fabricadas com 3, 6 e 12 células eletrolíticas, forne-
cendo, desta forma, 6, 12 e 24 volts. Cada célula é constituída
por placas de chumbo, ligadas ao eletrodo negativo e por pla-
cas de dióxido de chumbo, ligadas ao eletrodo positivo. Estas
placas positivas e negativas ficam separadas entre si por
meio de isolantes e ligadas em série, conforme mostra a figu-
ra.1. Estas placas estão mergulhadas em uma solução eletrolí-
tica de ácido sulfúrico (H_2SO_4), dissolvido em água (H_2O), em
proporções de 40 partes de ácido sulfúrico para 60 partes de
água destilada. A densidade desse eletrólito oscila em 1,0 e
1,835.

PROCESSO DE CARGA

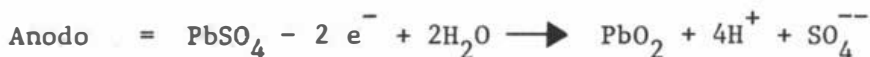
Quando a bateria está descarregada, a maior parte do áci-
do sulfúrico encontra-se combinado com o eletrodo de chumbo,
depositando nestes uma camada branca de sulfato de chumbo. Po-
demos dizer que a produção da energia é o resultado da reação
química entre o chumbo e o ácido do eletrólito.

Ao aplicarmos uma corrente elétrica nos eletrodos do
acumulador, o sulfato de chumbo depositado no catodo transfor-
ma-se em uma massa esponjosa de chumbo metálico, e o que está
presente no anodo transforma-se em dióxido.

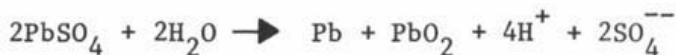


A figura 2 mostra o método usado para carregar uma bateria a partir da rede de 110 ou 220 volts, sendo preciso empregar um dispositivo que reduza a tensão de conformidade com a tensão da bateria a ser carregada e que também retifique-a, pois, sabemos que a rede é provida de corrente alternada.

Quando ligamos este aparelho denominado carregador de baterias ao eletrodo positivo e negativo da bateria a ser carregada, ocorre o seguinte processo: Há deposição de Pb no catodo e de PbO₂ no anodo.



A adição dessas duas semi-reações resulta na reação global que descreve o processo de carga.

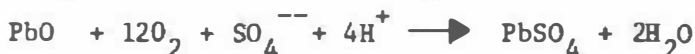
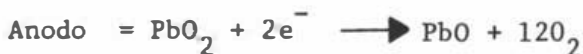


Desta forma, na passagem da corrente elétrica, o sulfato de chumbo presente no catodo transforma-se em uma massa esponjosa de chumbo metálico e o que se encontra no anodo converte-se em dióxido.

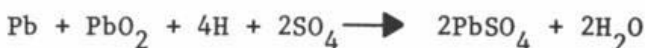
Quando esse processo de transformação chega a seu termo, o acumulador fica completamente carregado. Essa situação é indicada pela decomposição da água que libera hidrogênio junto ao catodo e oxigênio nas proximidades do anodo. A explicação deste fato, é que, quando terminado o ataque ao PbSO₄, inicia-se a eletrólise da água.

PROCESSO DE DESCARGA

Se um acumulador estiver carregado e o ligarmos por meio de um fio condutor, os elétrons que estão em excesso nas placas de chumbo (eletrodo negativo) mover-se-ão para a placa de dióxido de chumbo (eletrodo positivo) que está com deficiência de elétrons. Ocorre, nesta última, a redução do chumbo, que passa de tetravalente a bivalente, formando-se sulfato insolúvel, como resultado da combinação dos íons Pb⁺⁺ com os íons SO₄⁻⁻.



A soma das duas reações reproduz a reação inversa da de carga:



Durante a descarga do acumulador, a concentração de ácido sulfúrico decresce gradativamente, devido ao consumo de íons H^+ e SO_4^{--} . Consequentemente, o grau de descarga do acumulador pode ser avaliado, medindo-se a densidade do eletrólito.

Um acumulador de chumbo, para manter uma força eletromotriz, depende também da concentração de H_2SO_4 , sendo, a 25°C , fornecido por meio da relação.

$$E = 1,84 + 0,92 (d-1) \quad \text{onde:} \quad \begin{cases} 1,84 & \text{densidade do ácido sulfúrico} \\ 0,92 & \text{constante} \\ 1 & \text{constante} \end{cases}$$

Onde E representa a força eletromotriz e d , a densidade da solução eletrolítica. Quando estivermos descarregando o acumulador, a força eletromotriz não deve ser reduzida abaixo do potencial em que a sulfatização (deposição de PbSO_4 sobre os eletrodos) esteja atingido o limite máximo. Se esse cuidado não for tomado, será bem difícil de ocorrer uma nova operação de recarga.

Uma bateria deste tipo é capaz de fornecer uma corrente entre 10 e 15 ampères e uma corrente instantânea de até 300 ampères, como ocorre, quando damos partida no motor de um automóvel.

ACUMULADORES ALCALINOS

Os acumuladores de chumbo apresentam um grande inconveniente, o fato de serem muito pesados. Por esse motivo, em certos casos, prefere-se o acumulador alcalino de ferro-níquel, também, chamado de acumulador de Edison. É constituído de dois

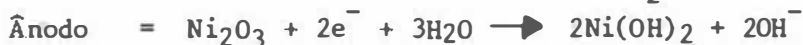
eletrodos: um catodo de pó de ferro prensado e um anodo de sesquióxido de níquel Ni_2O_3 hidratado, misturados com limalha de ferro; o eletrólito é uma solução de hidróxido de potássio a 30%.

O funcionamento do acumulador alcalino é idêntico ao do de chumbo, onde o ferro equivale ao desempenho do chumbo e o sesquióxido de níquel, ao do PbO_2 .

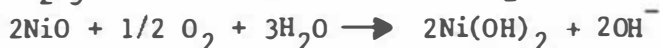
Na descarga do acumulador, os átomos de ferro perdem elétrons, transformando-se em íons Fe^{++} , que quando combinados com os íons hidroxilas da solução, formam o hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Os elétrons libertados pelo ferro são conduzidos por intermédio do circuito externo, atingindo o sesquióxido de níquel, reduzindo-o a $\text{Ni}(\text{OH})_2$.



Somando-se as duas reações, obter-se-á a reação que o corre nos eletrodos negativo e positivo.



É também a soma de duas reações:



Que resulta finalmente na reação de descarga:



No processo de carga ocorre o mesmo, porém, em sentido contrário: no catodo, o $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ganha elétrons e forma ferro metálico; no anodo, o $\text{Ni}(\text{OH})_2$ libera elétrons e reconstitui o Ni_2O_3 .

O acumulador de ferro-níquel apresenta uma vantagem sobre o de chumbo devido ao íon OH^- , produzido no anodo, ser consumido no catodo, não havendo portanto variação na concentração do eletrólito, e não havendo enfraquecimento e nem variação do rendimento. Além do mais, ele é constituído de materiais

menos densos e mais resistentes aos esforços mecânicos, tendo porém a desvantagem de que os componentes químicos são mais caros, sendo, por esta razão, menos difundidos.

Ultimamente, o cádmio está substituindo o ferro; em outros, os materiais básicos são a prata e o zinco. Apesar destes terem preço bastante alto, vêm impondo sua superioridade, por serem extremamente leves e apresentarem poderosa força eletromotriz.

DENSIDADE

Sabemos que a água não se mistura com o óleo. Quando colocamos uma gota de óleo em um copo de água, a gota de óleo ficará na superfície formando uma mancha circular. Isto acontece pelo motivo de que o óleo tem menor densidade do que a água, ou massa específica (às vezes, também, peso específico).

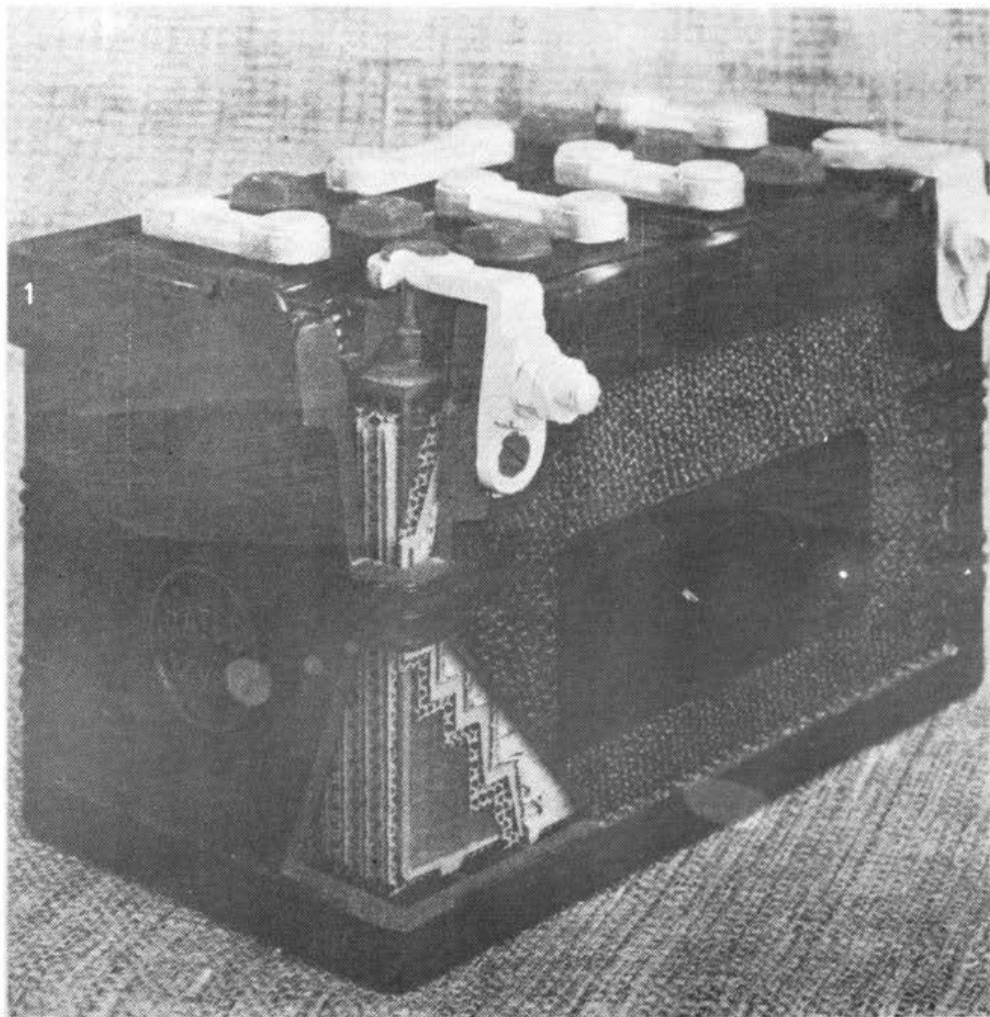
Mas o termo "mais denso" ou "menos denso" é uma noção bastante vaga. Então adotou-se um sistema de medida universalmente válida, tanto para substâncias líquidas como para sólidas. Adotou-se a água pura como unidade padrão da densidade, onde um centímetro cúbico de água destilada pesa um grama.

Atualmente existem vários aparelhos para determinar a densidade, como: a balança hidrostática, balança de Mohr e de Westphal, picnômetro e o densímetro.

A tabela abaixo mostra a densidade de algumas substâncias:

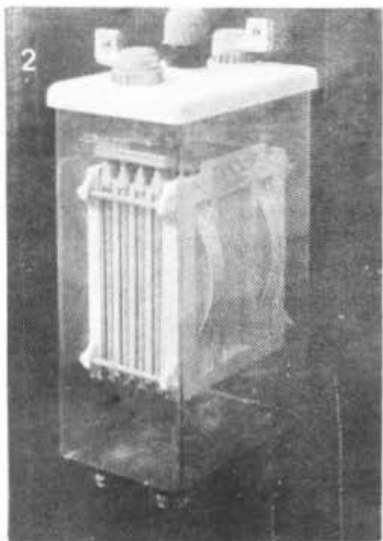
<u>Substâncias</u>	<u>Densidade</u>
Água destilada	1
Ácido sulfúrico	1,835
Ácido clorídrico	0,83
Alcool etílico	0,80
Alumínio	2,7
Cobre	8,89
Mercúrio	13,6

Observação: Esta densidade é dada em g/cm^3

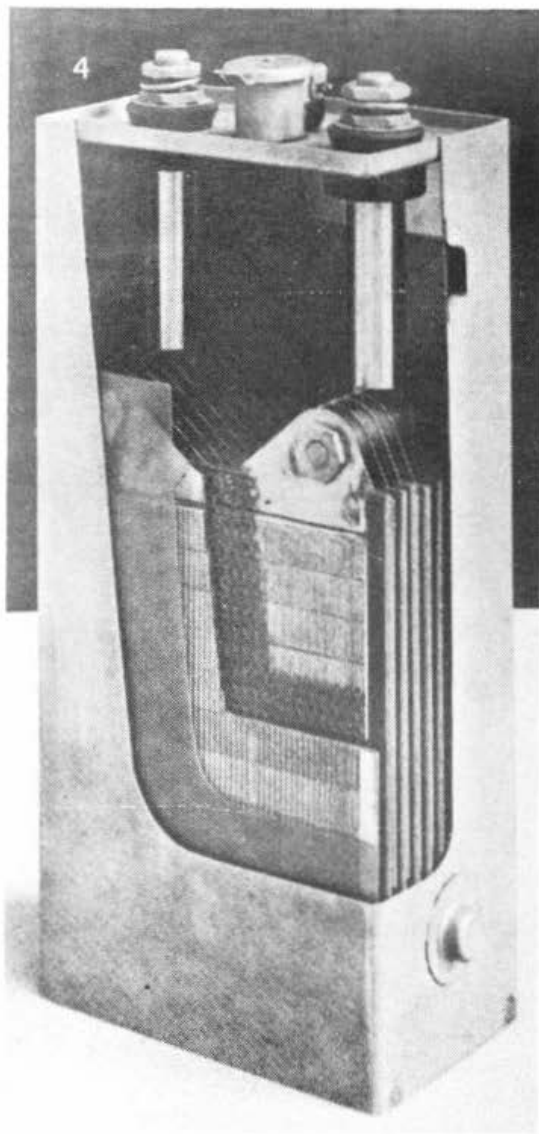
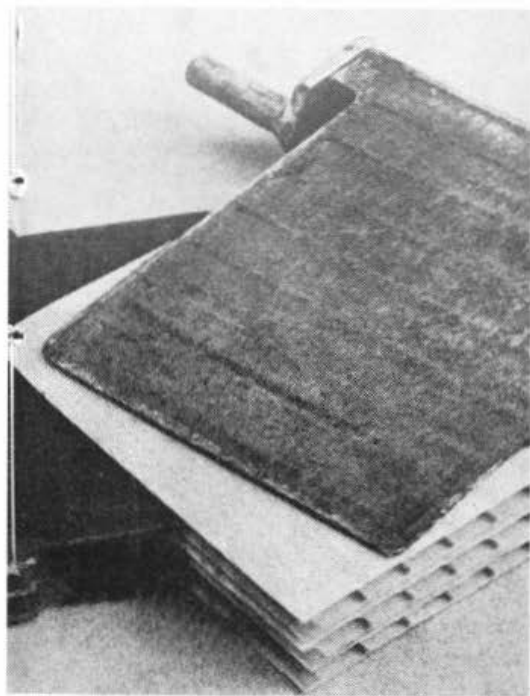


A foto 1 mostra uma Bateria de automóvel. O termo bateria e acumulador são usados indistintamente, sendo que o mais correto é chamar de acumulador quando se tratar de uma célula eletrolítica simples e reserva-se a palavra bateria para uma associação em paralelo ou série de acumuladores.

A foto 3 mostra um conjunto de placas ligadas em série.



A foto 2 mostra um acumulador onde podemos observar as placas de chumbo e de chumbo mis turado com PbO_2 .

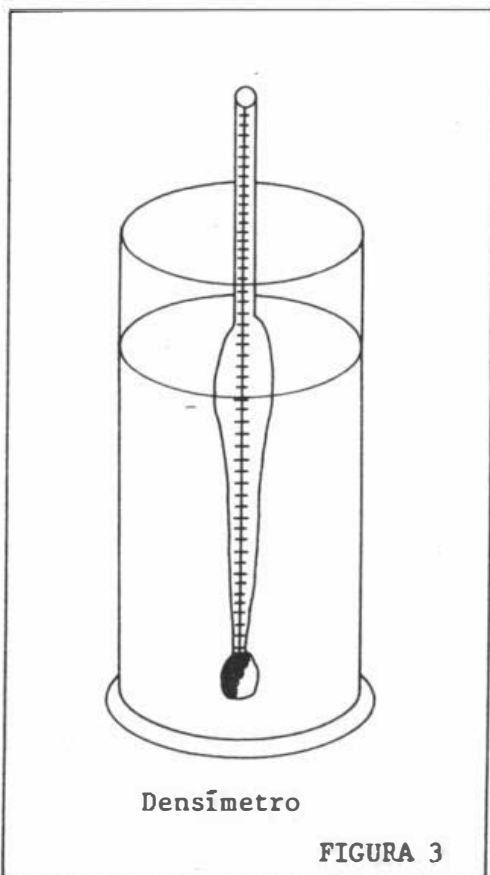


A foto 4 mostra um acumulador alcalino de ferro-níquel usado como substituto dos acumuladores de ácido de chumbo.

DENSÍMETRO

O densímetro é o instrumento mais simples, barato e prático, pois pode determinar a densidade de uma substância com muita rapidez, embora sacrificando um pouco a precisão. O seu princípio de funcionamento é baseado no empuxo de Arquimedes.

O densímetro é constituído de um único corpo de vidro lastreado com chumbo, no formato de um bulbo arredondado, suspenso a um tubo longo e delgado.



O densímetro é muito empregado para verificar a densidade do eletrólito de uma bateria. Quando efetuamos medidas em uma bateria, dependendo do seu estado, encontraremos uma leitura do densímetro entre 1,0 e 1,835.

Sabemos que quando a bateria está carregada ou quando o eletrólito contiver 40% de ácido sulfúrico misturado em 60% de água destilada, o densímetro marcará, em sua escala, 1,280 ou mais.

Quando verificarmos a densidade do eletrólito de uma bateria e encontrarmos uma densidade menor que 1,2, sabemos que a bateria está descarregada, pois grande parte do ácido sulfúrico está combinado com o chumbo nas placas, formando uma crosta branca de sulfato de chumbo. Porém isto não quer dizer que a bateria

esteja danificada, pois bastará uma recarga para fazer voltar ao seu estado inicial, ou seja, transformar o sulfato de chumbo em chumbo que retorna às placas e, o SO_4 em ácido que retorna à solução.

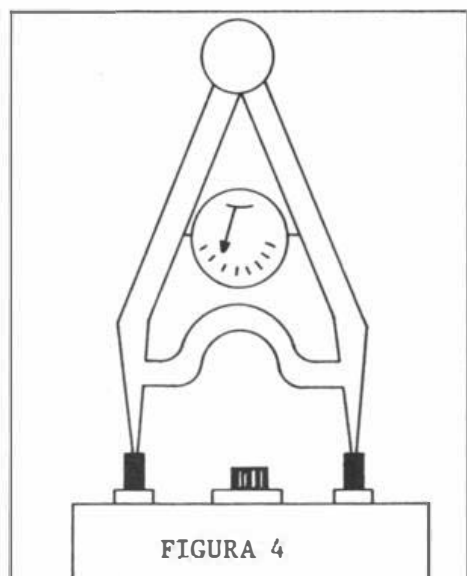
Um caso bastante comum que ocorre com usuários de carro, é verificar se a bateria está cheia de eletrólito. Se não estiver, usa-se completar com água comum, porém esta não é a maneira mais recomendável, pois como se verificou, o eletrólito é constituído de 40% de ácido sulfúrico, misturado com 60% de água destilada. Então ao se colocar água de torneira, está alterando a concentração e, portanto, a vida útil da bateria, sendo que o correto seria completar com água destilada.

VOLTÍMETRO DE ALTA DESCARGA

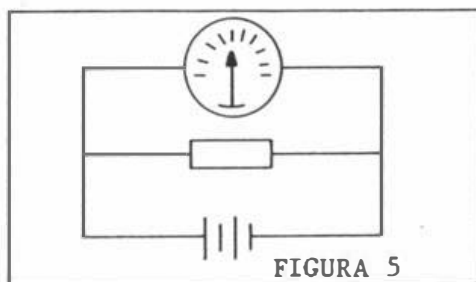
Este voltímetro é empregado para verificar a tensão em cada célula. É constituído de um voltímetro com uma escala de 3 volts e com uma resistência de alta descarga em forma de uma ponta metálica.

Não se emprega um voltímetro comum para verificar a tensão de uma célula pelo fato de que este poderia efetuar uma leitura errada. Usa-se um voltímetro de alta descarga, pois ao ser ligado aos eletrodos da célula, ocorrerá uma forte descarga, fazendo com que a leitura fique em condições reais de funcionamento.

Na figura 4, temos a ilustração de um voltímetro de descarga rápida.



Como vimos, não se deve efetuar medidas com um voltímetro comum. Existe, porém, uma maneira de transformar este em um voltímetro de alta descarga, ligando-se uma resistência de valor baixo e de alta wattagem, em paralelo, com o voltímetro, como mostra a figura 5.



INDICAÇÕES DAS CONDIÇÕES DE UMA BATERIA

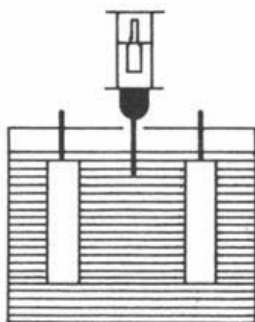
Quando uma bateria estiver carregada, cada célula indicará uma tensão entre 2 e 2,2 volts num voltímetro de alta descarga e uma densidade entre 1,280 e 1,300. Estas indicações deverão ser iguais em todas as células. Se uma destas estiver com indicações inferiores será aconselhável ministrar-lhe certa atenção.

Quando uma bateria estiver com meia carga, cada célula indicará uma tensão de 1,9 volt em um voltímetro de alta descarga, e uma densidade de 1,220. Neste caso, a bateria requer uma recarga até adquirir as condições descritas no tópico anterior.

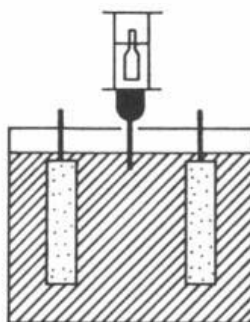
Quando uma bateria estiver descarregada, cada célula indicará uma tensão menor que 1,8 volt em um voltímetro de alta descarga, e uma densidade menor que 1,190. Neste caso, também deverá ser submetido a uma recarga.

Observação: Caso o aluno venha a manusear o eletrólito, deverá tomar um certo cuidado, pois este, em contato com a pele, pode provocar sérias queimaduras e também danificar roupas.

Indica uma densidade de 1,280
BATERIA TOTALMENTE CARREGADA



Indica uma densidade de 1,220
BATERIA COM MEIA CARGA



Indica uma densidade de 1,190
BATERIA TOTALMENTE DESCARREGADA

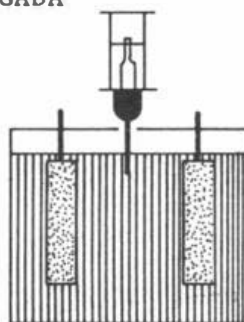


FIGURA 6

CARREGADOR DE BATERIAS

O carregador de bateria é um aparelho utilizado para controlar a corrente de carga da bateria, dentro da norma exigida para uma carga eficiente, sem danificá-la e tirar um maior proveito de sua vida útil.

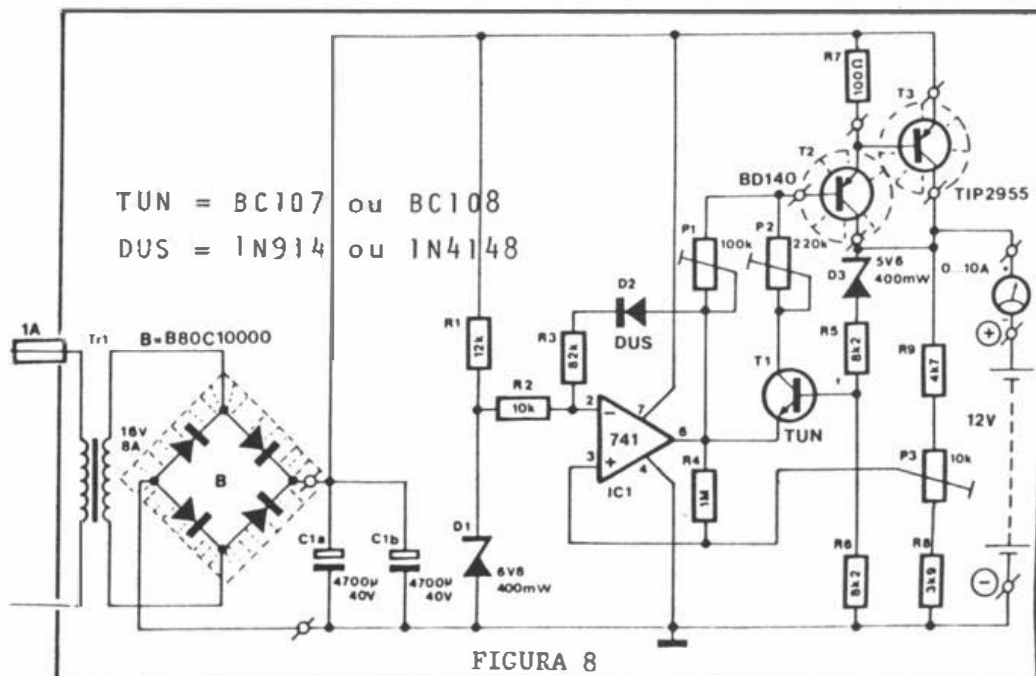
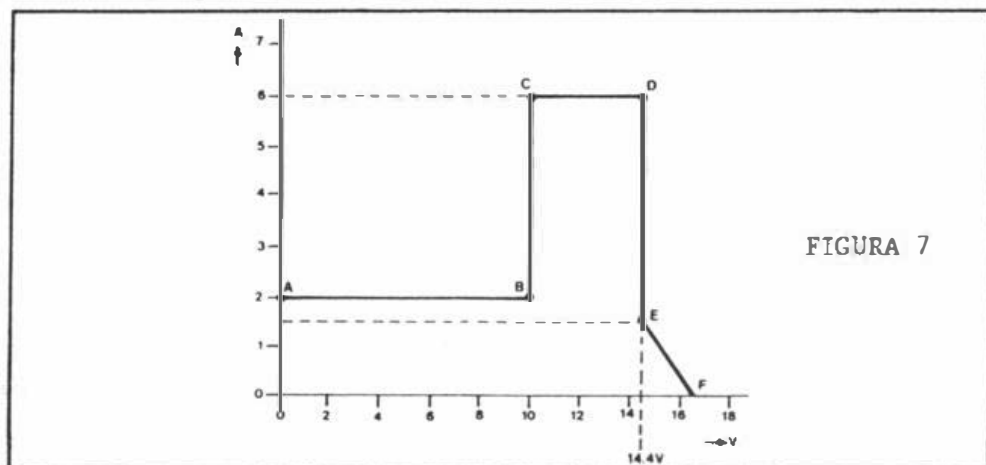
A figura 7 mostra um gráfico com as características ideais da corrente de carga em função da tensão para uma bateria de ácido-chumbo normal de 12 volts, como vemos quando a bateria estiver completamente descarregada. Durante a fase (A-B) é usado um limite de carga, até que a bateria alcance aproximadamente 10V. Este cuidado na corrente de carga inicial é necessário para garantir uma carga sem sobrecarregar (isto é, sem provocar uma excessiva dissipação). Na fase seguinte (C-D), a bateria é carregada com uma corrente de carga em 5 horas, até atingir 14,4 volts. A capacidade dessa corrente é determinada pela divisão da capacidade nominal desta bateria em ampêres-horas (Ah) e pelo tempo (H) que neste caso é 5. E finalmente a fase (E-F), que ultrapassa o topo de trabalho da corrente de carga, onde a corrente decresce até zero e a tensão atinge 16,5V.

O circuito mostrado na figura 8 é de um carregador de bateria automático, provido de um ciclo de carga que obedece ao descrito acima. Quando a bateria estiver completamente descarregada ou com uma tensão menor que 10 volts, irá haver um fluxo de corrente muito pequeno sobre D_3 que, conseqüentemente colocará T_1 no corte, forçando a saída do CI_1 a ficar baixa, a qual estará ligada à base de T_2 e T_3 , fazendo com que a corrente de carga seja determinada somente pela posição de P_1 .

E quando a bateria estiver com uma tensão entre 10 e 14 volts, D_3 é ativado, colocando T_1 em condução. Todavia a saída do CI_1 continua baixa, determinando que a corrente de carga depende do ajuste dos potenciômetros P_1 , e P_2 . Quando o regulador de tensão P_3 ultrapassar a tensão do diodo zener D_1 que está sendo comparada pelo CI_1 , provocará uma realimentação via R_4 , forçando a saída do CI_1 a ficar com uma tensão maior do que a do diodo zener D_1 e colocando D_2 em condução e T_1 no corte, ficando a corrente de carga novamente determinada pela posição do potenciômetro P_1 .

Para calibrar o circuito, ajusta-se P_3 de modo que a saída do CI_1 fique alta, logo que a bateria atingir uma tensão de 14,4 volts.

Em relação a P_1 a corrente de carga é ajustada ao valor de 20 horas (capacidade da bateria em Ah dividido por 20) para tensão entre 14,5 e 15V. Finalmente, com uma tensão entre 11 e 14V, P_2 é ajustado a corrente nominal de carga (5 horas)





CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-3

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Qual a diferença básica das pilhas em relação à bateria?
 - a) as pilhas são iguais às baterias, sendo que esta última é constituída de um eletrólito pastoso;
 - b) as pilhas são iguais às baterias, sendo que esta última é constituída de ácido nítrico e chumbo;
 - c) as pilhas são iguais às baterias, sendo que esta última é constituída de várias pilhas (células).
- 2) O eletrólito das células secundárias de ácido-chumbo contém:
 - a) H_2SO_4
 - b) H_3SO_4
 - c) H_3SO_2
- 3) As baterias secundárias
 - a) fornecem 2,0V em cada célula, ligadas em série;
 - b) fornecem 2,0V em cada célula, ligadas em paralelo;
 - c) fornecem 12,0V em cada célula, ligadas em série.
- 4) Assinale a alternativa correta:
 - a) o densímetro é um instrumento utilizado para se determinar o grau de ionização de uma substância;
 - b) quando a densidade do eletrólito de uma bateria for menor que 1,2, a bateria está descarregada;
 - c) o voltímetro de alta descarga não é utilizado para se fazer medições em baterias.

- 5) Qual a grande vantagem das baterias alcalinas?
- a) serem mais pesadas;
 - b) devido ao ion OH , produzido no anodo, serem consumidos no catodo, não havendo variação do rendimento;
 - c) ter materiais menos densos e mais baratos.
- 6) As baterias secundárias contêm:
- a) 3 células de 3V cada e fornecem uma corrente de 10 a 15 ampères;
 - b) 6 células de 3V cada e fornecem uma corrente de 08 a 15 ampères;
 - c) 6 células de 2V cada e fornecem uma corrente de 10 a 15 ampères.
- 7) Quando uma bateria secundária está carregada o eletrólito contém:
- a) uma densidade de 1,300 e 40% de ácido sulfúrico misturado com 60% de água destilada;
 - b) uma densidade de 1,180 e 40% de ácido sulfúrico mistu-rado com 60% de água destilada;
 - c) uma densidade de 1,300 e 45% de ácido sulfúrico misturado com 55% de água destilada.
- 8) Quando verificamos as características de um acumulador e encontramos uma densidade de 1,1 e uma tensão de 1,8V em cada célula, indica que:
- a) a bateria está com meia carga;
 - b) a bateria está descarregada;
 - c) a bateria está carregada.
- 9) Quando uma bateria secundária estiver com o eletrólito baixo ou em falta, devemos completar com:
- a) água destilada;
 - b) água comum ou eletrólito;
 - c) água comum ou destilada.
- 10) Efetuando-se medidas em uma bateria com voltímetro comum, encontraremos uma medida:
- a) correta;
 - b) correta, porém devemos transformar a escala;
 - c) incorreta, pois poderá existir um defeito na célula sem ter sido verificado por este voltímetro.

LIÇÃO E-4

MAGNETISMO

O estudo do magnetismo, neste curso, é de grande importância, visto que está diretamente ligado à eletrônica digital. Para isto é indispensável o estudo de seus fenômenos, leis e as consequências de seu estabelecimento em determinadas ações.

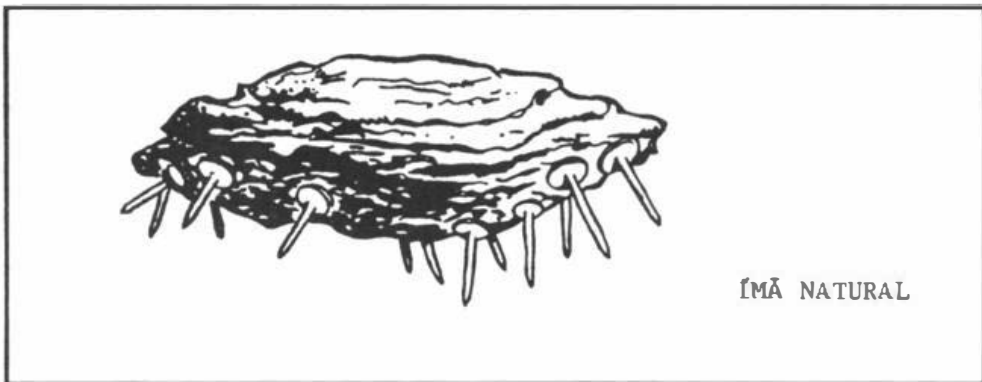
Além do estudo do magnetismo, é interessante também analisar tudo que se relacione com os fenômenos eletromagnéticos, principalmente as diferentes maneiras de manifestação magnética como: a eletricidade manifestada através da corrente elétrica, a indução magnética e o magnetismo por atrito que se constitui no primeiro processo conhecido de magnetização.

O conceito de magnetismo está diretamente ligado a seus efeitos e manifestações, devido ao fato de não se conhecer a sua natureza.

O conhecimento do magnetismo tem procedência na Ásia Menor, onde os gregos, na remota antiguidade, perto da cidade de Magnésia, encontraram uma pedra composta de ferro e oxigênio (óxido de ferro $Fe_3 O_4$) com a propriedade de atrair o ferro, daí o nome de magnetita. E magnetismo é a denominação dada ao seu poder de atrair. Mais tarde, os mesmos gregos estudaram suas propriedades e a batizaram de pedra ímã.

Os ímãs naturais, ou seja, a magnetita foram poucos usa-

dos, até que os chineses, por volta dos anos 2000, descobriram que a pedra imantada (magnetita), montada com liberdade, faria um movimento girante, de tal maneira que um dos seus extremos apontaria sempre para o norte. Tal propriedade foi pos



ta em prática, colocando-se a pedra livremente sobre duas varretas. Este conjunto atuando como "Pedra Guias", nome assim batizado pelos chineses, posteriormente, chamado de Bússola, serviu-se de orientação para as primeiras viagens por terra e por mar.

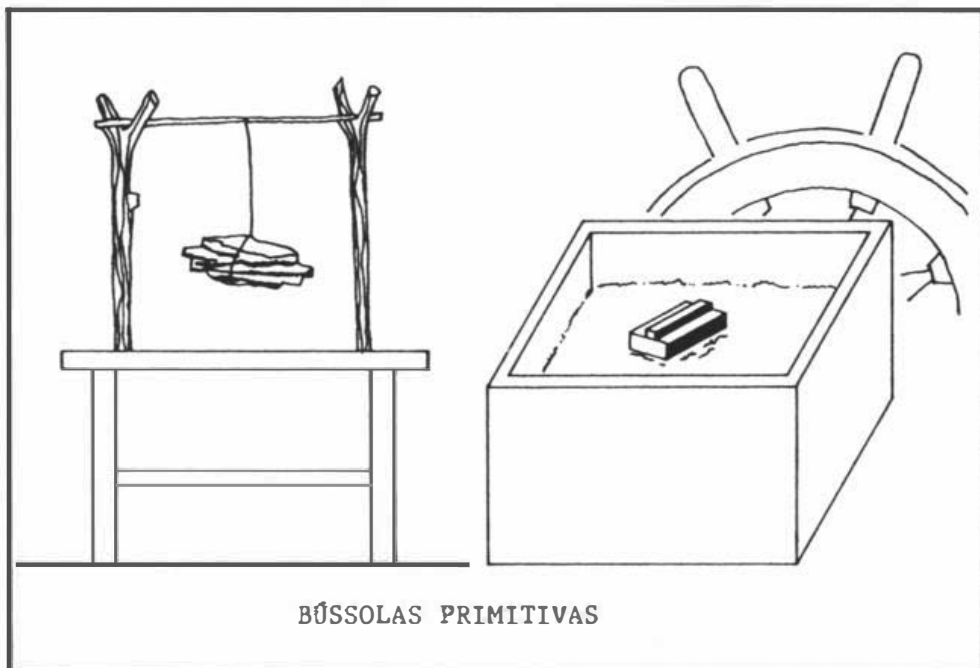
Outra forma primitiva de se obter a direção norte-sul magnético, é mediante a colocação de um ímã natural sobre um suporte flutuante sobre qualquer substância líquida num recipiente.

O ímã natural, como foi mencionado acima, é o minério de ferro (magnetita) que se encontra em grandes massas na Suécia, nos Montes Urais e na América do Norte.

A própria terra é um ímã natural e a orientação dos ímãs na direção norte-sul é causada pelo magnetismo da terra.

ÍMÃS NATURAIS E ARTIFICIAIS

A magnetita, denominada de ímã natural, minério composto de óxido de ferro, tem a propriedade de atrair ferro, níquel e outros metais. Mas também podemos fazer com que os corpos que, normalmente, não são ímãs, se tornem ímãs, os quais chamaremos de ímãs artificiais.



O processo que faz um corpo neutro adquirir propriedades magnéticas, isto é, se torne um corpo imantado, chamaremos de imantação. A maioria dos corpos podem ser imantados, mas alguns oferecem grande resistência à imantação. Os corpos, que se imantam com certa facilidade, são o ferro e certas ligas de ferro, usados na fabricação de ímãs permanentes. Uma destas ligas é o alnico, composto de ferro, alumínio, níquel, cobre e cobalto.

OS PRINCIPAIS PROCESSOS DE IMANTAÇÃO

a) Por indução magnética - processo pelo qual uma barra de ferro se imanta, quando fica perto de ímã.

b) Por atrito (fricção) - quando uma barra de ferro neutra é atritada com um ímã, esta se imanta, processo que deve ser orientado num só sentido, pois caso haja fricção nos dois sentidos, não haverá imantação.

O magnetismo, produzido pelo atrito, é considerado muito superficial, porque não penetra no corpo do elemento atritado. Para se obter ímãs possantes por este processo, atritam

-se placas estreitas ou largas, tornando-as magnetizadas e de pois juntam-se todas, formando um sô ímã.

c) Por corrente elétrica - obtida através de corrente elétrica, percorrendo um condutor enrolado numa barra de ferro, fazendo com que, esta se imante.

Este último processo de imantação de uma barra de ferro neutra é um dos mais usados atualmente, visto que, através de le, podem-se obter ímãs muito possantes e controlados. Quanto mais alta for a corrente elétrica no condutor, mais possante será o ímã. Quanto menor for a corrente elétrica, menos possante será o ímã.

ÍMÃS PERMANENTES E TEMPORÁRIOS

O ferro se magnetiza com mais facilidade que as outras substâncias, mas perde suas características rapidamente.

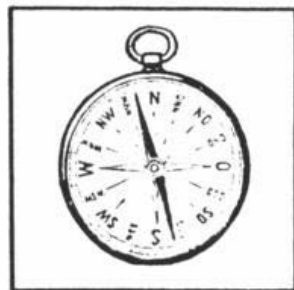
As substâncias que mantêm as características de corpo imantado por longo tempo são denominadas de ímãs permanentes e o ferro de ímãs temporários ou transitórios.

O aço temperado é um ótimo material para a fabricação de ímãs permanentes, especialmente quando o aço está em liga com outros elementos, como tungstênio, níquel, cromo, etc. O ferro e estas ligas especiais levam o nome de materiais ferromagnéticos.

Um ímã é considerado bom, quando consegue sustentar uma barra de ferro neutra de peso igual ao seu.

BÚSSOLA

A bússola possui um ímã em forma de losango comprido, com um ponto de suspensão no centro, tornando-o livre para assumir qualquer posição. Este ímã especial é conhecido pelo nome de agulha magnética.



Para diminuir o mais possível o atrito, a agulha tem no centro uma concavidade, cujo fundo é de vidro ou de ágata.

A agulha magnética das bússolas desloca-se sobre uma rosa dos ventos que indica as direções cardeais, ou seja, norte, sul, leste, oeste e demais direções.

A bússola constitui-se num instrumento de incalculável valor, visto que sua aplicação na navegação, topografia e geologia são indispensáveis.

REGIÕES POLARES

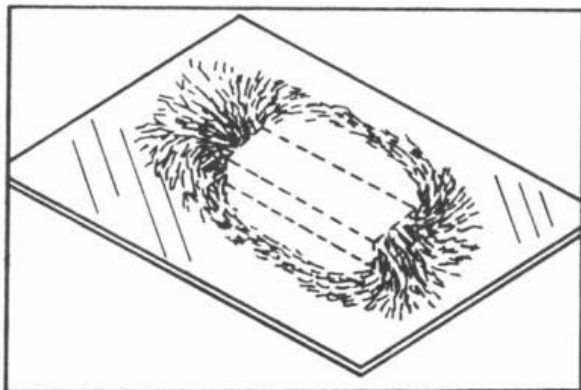
O magnetismo de um ímã parece se concentrar em dois pontos normalmente situados nas suas extremidades, as quais chamaremos de regiões polares.

Quando um ímã tem o formato de uma barra, entre as regiões polares, há uma região que não possui magnetismo, região esta denominada neutra.

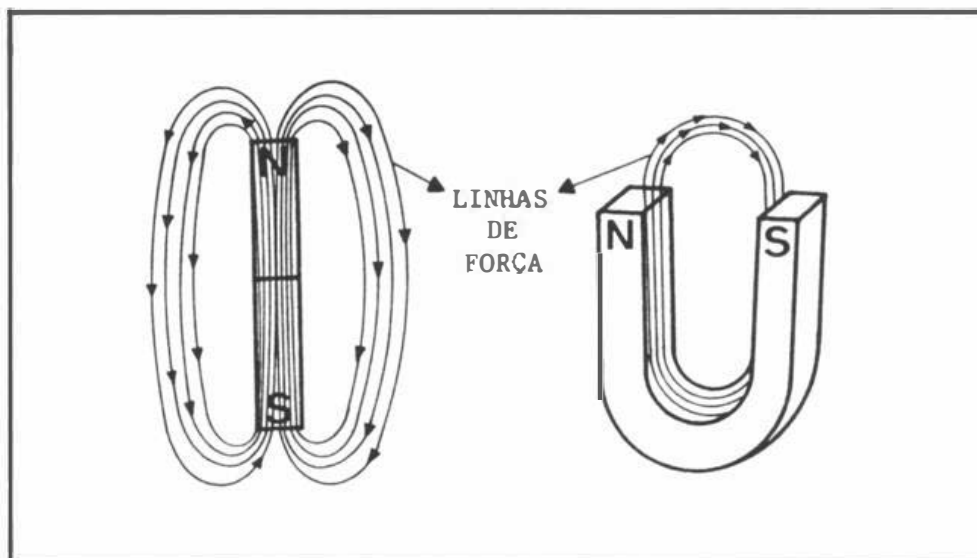
Quando colocamos um ímã suspenso pelo seu centro de gravidade, este entra em oscilação e se move até uma certa posição de equilíbrio e as regiões polares ficam voltadas para os pólos geográficos da terra. Assim, chamaremos de região polar norte do ímã aquela que é voltada para o norte geográfico da terra; e de região polar sul aquela que é voltada para o sul geográfico da terra.

É possível, através de uma experiência, visualizar bem a polaridade dos ímãs, bem como, formar uma idéia mais clara do magnetismo e suas manifestações.

Consiste o experimento em colocar limalha de ferro sobre uma folha de papel e, debaixo desta folha, colocar uma barra de ferro imantada. Notaremos que haverá uma formação geométrica das limalhas, formando assim linhas bem definidas, agrupadas com mais intensidade nos pólos dos ímãs e tornando-se menos intensa à medida que se afastam dos pólos. Esta formação dá-se de-



vido ao fluxo magnético entre o pólo norte e pólo sul. As linhas, para as quais as limalhas estão direcionadas, são denominadas linhas de força.



LINHAS DE FORÇA

Todas as linhas de força magnética têm uma direção determinada, ou seja, o pólo norte, indicado por uma agulha imantada.

A direção das linhas de força magnética denomina-se direção do campo magnético.

PROPRIEDADES DAS LINHAS DE FORÇA

a) As linhas de força magnética se repelem e não se cruzam. Caso colocamos dois campos magnéticos lado a lado, estes não se cruzam nem se misturam, mas se compõem, formando um campo deformado.

b) Não existem isolantes para as linhas de força magnética, visto que as linhas de força passam através de quaisquer substâncias. Há, no entanto, mais facilidade em estabelecerem linhas de força em determinadas substâncias do que em outras. Este fator possibilita a concentração de linhas de força, onde se deseja utilizá-las ou seu desvio de uma área de um instrumento.

c) As linhas de força magnética se concentram nos pólos, com isto, podemos obter uma maior força magnética nas imediações deles.

d) As linhas de força são linhas imaginárias que saem do pólo norte e entram no pólo sul, são linhas fechadas.

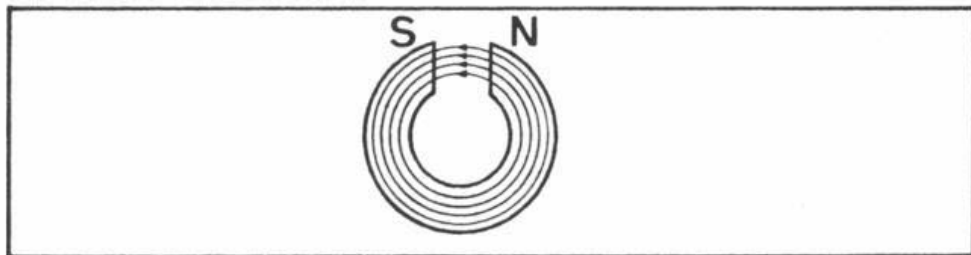
PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

A facilidade das linhas de força em percorrer diferentes substâncias, é conhecida como permeabilidade magnética.

O ferro tem a propriedade de atrair e aumentar o número de linhas de força que passam através de uma secção dada. Cada linha de campo que passa pelo ar, corresponde a " μ " linhas de campo que passam pelo ferro. " μ " é o coeficiente de permeabilidade característico para cada espécie particular de material.

No ar e nos gases a permeabilidade magnética (μ) vale 1, porém nos materiais magnéticos a permeabilidade alcança valores bem elevados.

Somente um número limitado de linhas magnéticas pode existir em um pedaço de material. Esta característica varia de substância para substância, de acordo com a permeabilidade magnética de cada material. Porém todas elas, depois de atingido o número máximo admissível de linhas, tornam-se "saturadas". Este fenômeno é muito utilizado em diversos equipamentos eletro-eletrônicos.



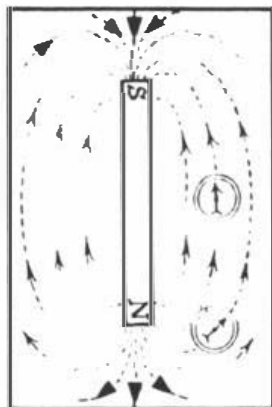
CAMPO MAGNÉTICO

A partir dos fenômenos que acabamos de expor, podemos ver que existe um espaço que circunda um corpo magnetizado. A este espaço particular de forças, que age sobre os corpos magnetizados, chamamos de campo magnético que pode ser verificado através de várias formas:

a) pelas linhas de força magnética como já foi visto anteriormente.

b) com o auxílio de uma bússola. Colocamos esta sob a ação do campo magnético de uma barra de ferro imantada, a partir do momento em que modificamos a posição da bússola, sua indicação também irá mudar, acompanhando a direção das linhas de força, orientadas pelo campo magnético que tem origem no pólo norte e entra no pólo sul, fechando assim o círculo magnético.

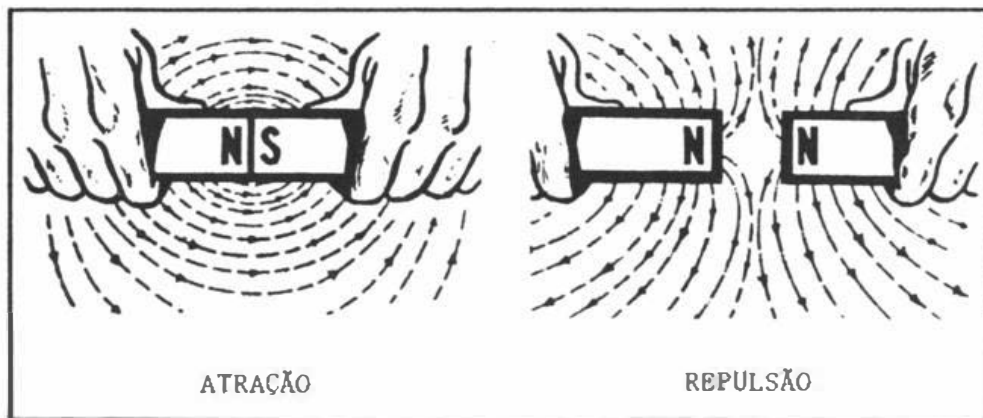
A direção das linhas de força magnética denomina-se direção do campo magnético.



LEIS DE ATRAÇÃO E REPULSÃO

Para certificar que pólos de nomes contrários se atraem, e só aproximar a região polar norte de uma barra imantada com a região polar sul de uma outra barra imantada, percebe-se que as barras imantadas (ou ímãs) não só se aproximam, como também se atraem fortemente, demonstrando, assim, que pólos de nomes contrários se atraem.

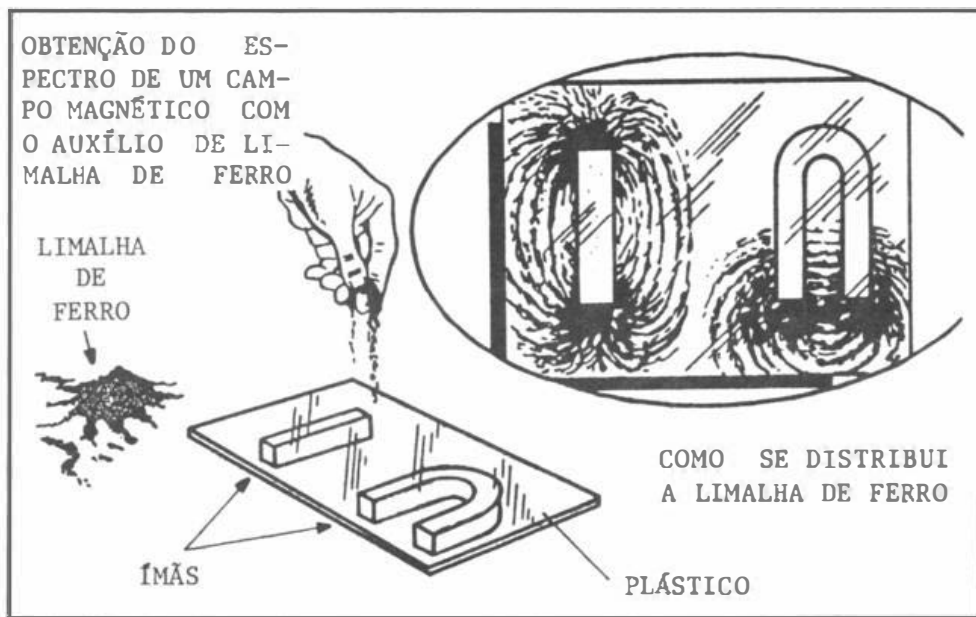
Se, ao contrário, colocarmos um ímã com a região polar norte junto com outro ímã com a mesma região, será muito difícil uní-los, devido a grande força de repulsão existente entre ambos. Com isto, tiramos a seguinte conclusão: os pólos de mesmo nome se repelem.



ESPECTROS MAGNÉTICOS

Podemos conhecer, na prática, o aspecto das linhas de força do campo magnético de um ímã.

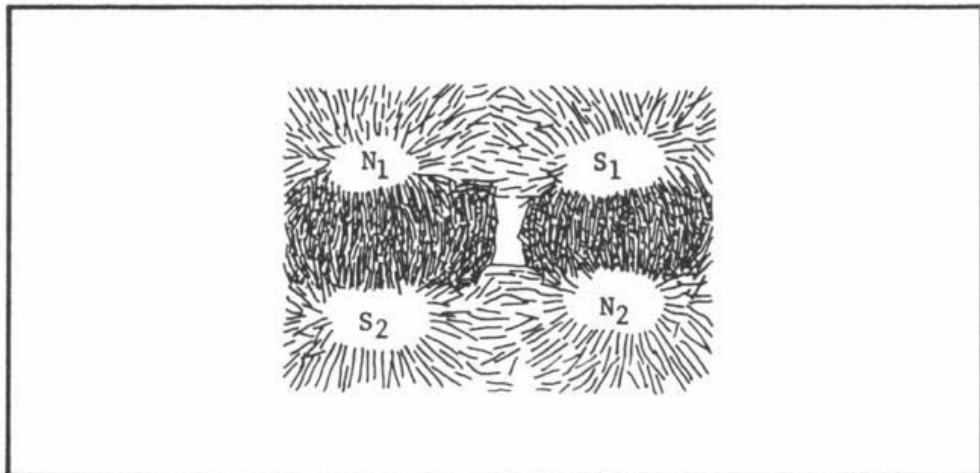
Tomamos um ímã em barra e outro em ferradura, cobrimo-los com uma placa de plástico e em seguida colocamos limalha de ferro sobre a placa de plástico. Observaremos que os pequenos pedacinhos de ferro se imantam; cada um deles se torna um ímã. O pólo norte de cada um desses pequenos ímãs é atraído pelo pólo vizinho, de maneira que se formam verdadeiras cadeias de ímãs. Essas cadeias se dispõem sobre a placa de plástico exatamente ao longo das linhas de força magnética, tanto na barra como na ferradura. Chama-se espectro magnético a figura obtida com a limalha de ferro, assim disposta ao longo das linhas de força magnética.



Após estas considerações, torna-se clara a definição dos espectros magnéticos, podemos considerar dois ímãs prismáticos, iguais, paralelos, porém em sentidos contrários, como indica a figura a seguir, pelo seu espectro.

Verificando a figura, vemos que as extremidades de nomes contrários, ou seja, N1 com S2 e S1 com N2 ficam atraídas por

linhas de força de grande intensidade, onde o campo magnético é bem elevado e que vai diminuindo no sentido da zona central, onde as limalhas de ferro quase não têm orientação definida. Nesta zona central temos um ponto, onde a intensidade de campo magnético é nula, devido aos efeitos dos quatro polos magnéticos de dois ímãs que se anulam entre si. A figura mostra claramente que as linhas de força saem divergentes das



extremidades norte (N1 e N2) e convergem para extremidades - sul (S1 e S2). As linhas de força são mais densas onde o caminho percorrido por elas é menor, onde o campo magnético é mais intenso.

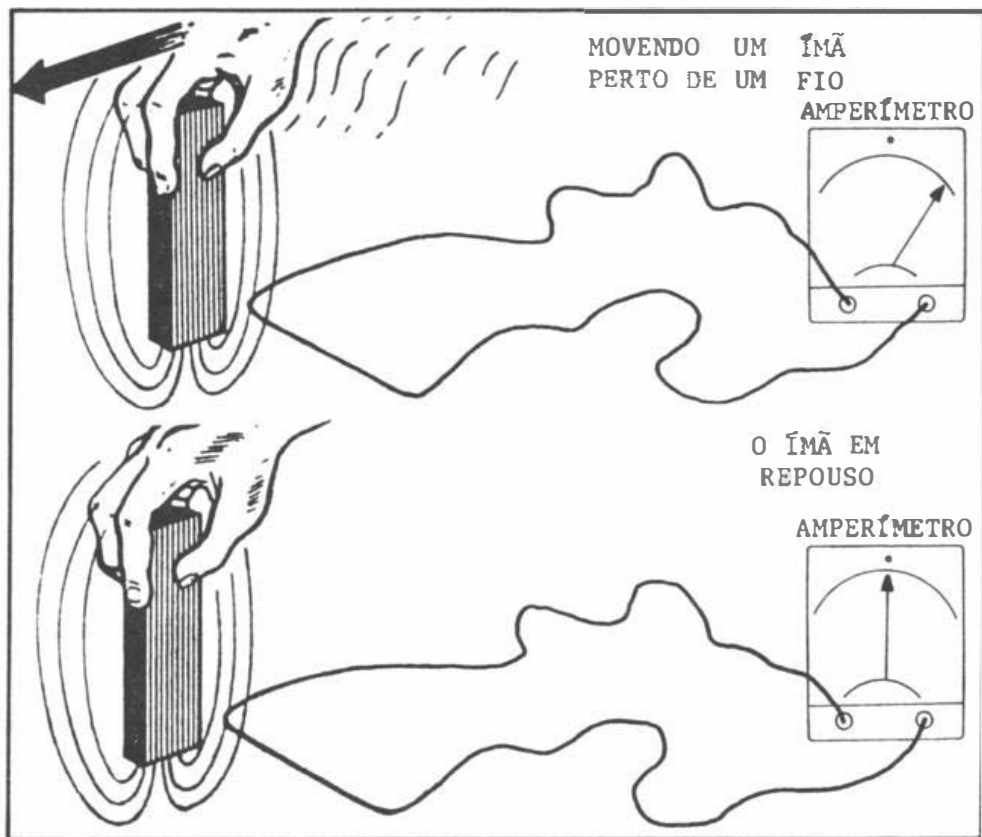
ELETRICIDADE ATRAVÉS DO MAGNETISMO

Um dos métodos, pelos quais o magnetismo produz eletricidade, é pelo movimento de um ímã nas proximidades de um condutor, ligado a um amperímetro. Notaremos que, ao deslocar o ímã, ocorrerá um leve movimento do ponteiro no amperímetro e, caso continue o movimento no ímã perto do condutor, esta deflexão do ponteiro continuará.

Colocando o ímã perto do condutor, sem movimentá-lo, não haverá deflexão do ponteiro. Deslocando-se, entretanto, o ímã, o ponteiro do amperímetro se movimentará.

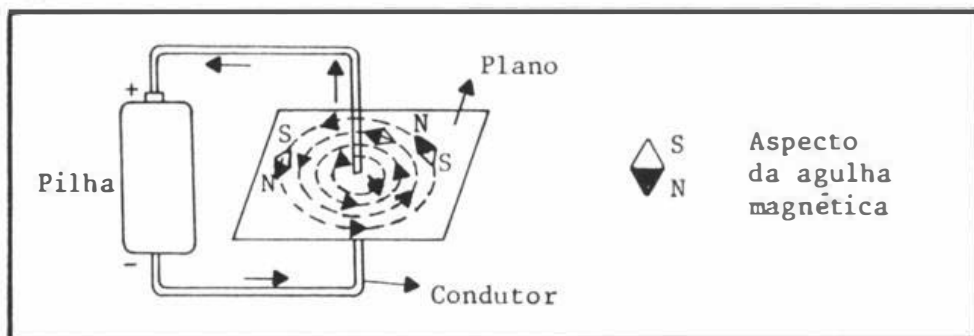
Com isto, concluímos que o ímã e o condutor, não são capazes de produzir eletricidade, sem movimento do ímã, nem tampouco, deslocar o ponteiro é necessário, portanto, movimentar o ímã.

O movimento do ímã, perto do condutor, faz-se necessário, dada as características do campo magnético que só produz corrente elétrica caso "corte" o condutor com o campo magnético. Quando o ímã e seu campo magnético estiverem fixos, o campo magnético não "cortará" o condutor e não provocará nenhum movimento de elétrons e não haverá, conseqüentemente, produção de eletricidade.



Podemos ainda observar o sentido do campo magnético em relação ao sentido da corrente (movimento de elétrons). A figura abaixo ilustra um plano perpendicular a um condutor ligado a uma pilha, sobre o plano estão dispostas várias agulhas magnéticas.

As agulhas magnéticas adquirem direção perpendicular à linha imaginária de ligação com o condutor. Devido a este fato, somos forçados a supor que as linhas de força do campo magnéti



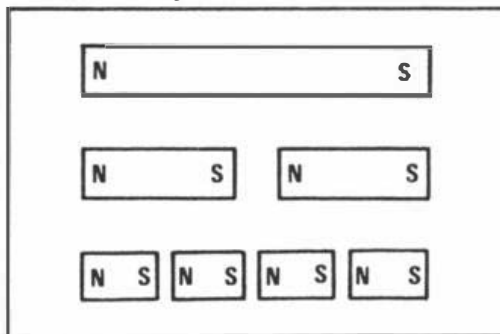
co, gerado pela corrente que circula pelo condutor, sejam circular. Esta hipótese é confirmada, jogando-se limalha de ferro sobre o plano. O sentido das linhas de força é definido pela extremidade norte da agulha magnética, como se pode observar pela figura acima.

INSEPARABILIDADE DOS PÓLOS

As ações magnéticas de um ímã são exercidas pelos pólos norte e sul do mesmo, separados por uma zona neutra. É possível que um corpo magnetizado apresente mais de duas zonas com propriedades magnéticas, porém é impossível um corpo magnetizado apresentar uma só extremidade magnética, ou seja, um só pólo.

Se tomarmos, por exemplo, um ímã de grandes dimensões, em forma de barra e o separarmos em duas partes com um corte transversal, obteremos dois novos ímãs, com dois pólos cada um. Se novos cortes forem efetuados outros ímãs resultarão daí, isto é, chegaremos sempre ao mesmo resultado. Concluímos, então, que subdividindo um corpo magnetizado, obtêm-se sempre novos corpos, apresentando no mínimo duas extremidades magnéticas opostas. Se reunirmos os corpos subdivididos, obteremos novamente um ímã com pólo norte e pólo sul.

Podemos, a partir do exposto, representar um corpo magnetizado como um conjunto de vários ímãs infinitamente pequenos e orientados da mesma maneira, com as extremidades opostas ligadas entre si. A figura a seguir ilustra este aspecto.



N	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	S
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S	

CONSTITUIÇÃO DOS ÍMÃS

Podemos supor que a divisão de um ímã indefinidamente - possa chegar ao extremo de obtermos fragmentos, moléculas, cuja característica de magnetização ainda é conservada. Com isto podemos chegar à seguinte conclusão:

Um ímã consiste num conjunto de moléculas imantadas, dispostas ordenadamente com todos os pólos nortes voltados para a mesma direção, ou seja, para o pólo norte do ímã.

Esta conclusão pode ser bem visualizada, caso tomarmos - um tubo de vidro e dentro dele colocarmos limalha de ferro. Quando o submetemos a um campo magnético, as limalhas tomarão uma certa posição dentro do tubo, ou seja, estarão polarizadas no sentido sul-norte, caracterizando claramente a constituição dos ímãs.

Outro exemplo, que pode confirmar esta teoria, é a imantação de uma barra de ferro ou de aço desmagnetizada. Quando a barra de ferro for colocada sob a ação de um campo magnético, as moléculas desta barra de ferro tomarão uma disposição bem definida, adquirindo propriedades magnéticas facilmente. Mas as perdem também, facilmente, devido ao fato de que o ferro, quando imantado, tornar-se um ímã temporário. Já o aço, quando sujeito à magnetização, oferece certa resistência a obtê-la, mas, quando imantado, torna-se um ímã de características magnéticas permanentes.

Isto ocorre devido ao fato de que o ferro apresenta uma solidez em menor escala que o aço, pois as moléculas do ferro estão mais bem agrupadas que as moléculas do aço, oferecendo assim, certa facilidade na movimentação destas moléculas. Por esta razão, o ferro perde mais facilmente o magnetismo. Ao contrário do aço que apresenta suas moléculas separadas. Por isso, quando imantado, torna-se um ímã permanente, só perdendo esta característica, quando sujeito a altas temperaturas, ou a uma forte pancada. Isto levaria a uma desordenação das moléculas e conseqüentemente à perda das propriedades magnéticas.

Para a fabricação de ímãs comerciais, ou seja, ímãs para alto-falantes, por exemplo, utiliza-se um processo que define bem esta teoria.

Consiste na utilização de uma liga de alumínio, níquel, cobalto, cobre e ferro (alnico). Quando ainda no estado líquido, ou seja, em alta temperatura, colocamos esta liga sob o efeito de um campo magnético, fazendo com que suas moléculas se ordenem, adquirindo assim as propriedades magnéticas. Podendo esta liga ser moldada da maneira que se desejar.

Após o resfriamento, as linhas de força são mantidas da mesma forma como no estado líquido, razão pela qual as propriedades magnéticas se mantêm constantes em estado sólido. Os ímãs desta natureza são de grande utilidade para as aplicações da eletro-eletrônica nos dias de hoje.



DESMAGNETIZAÇÃO OU PERDA DO MAGNETISMO

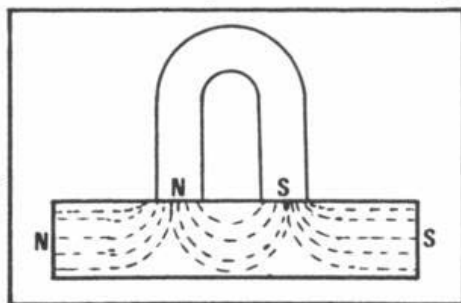
Uma barra imantada pode perder total ou parcialmente suas propriedades magnéticas:

- a) Quando submetida a vibrações, a choques de alta intensidade ou ainda a choques repetidos;
- b) Por efeito do calor, ou seja, quando sujeita a altas temperaturas.

A 900°C, aproximadamente, os ímãs perdem completamente a sua atração magnética. Isto pode ser comprovado com a colocação de uma agulha imantada num bico de bunsen, até a incandescência.

CONSERVAÇÃO DOS ÍMÃS

Para conservar as propriedades magnéticas iniciais de um ímã, não permitindo que, com o tempo, o fluxo magnético se disperse pelo ar, coloca-se em con-



tato com uma armadura de ferro que conduz as linhas de força magnética em uma única direção, mantendo assim um circuito fechado.

SUBSTÂNCIAS MAGNETIZÁVEIS

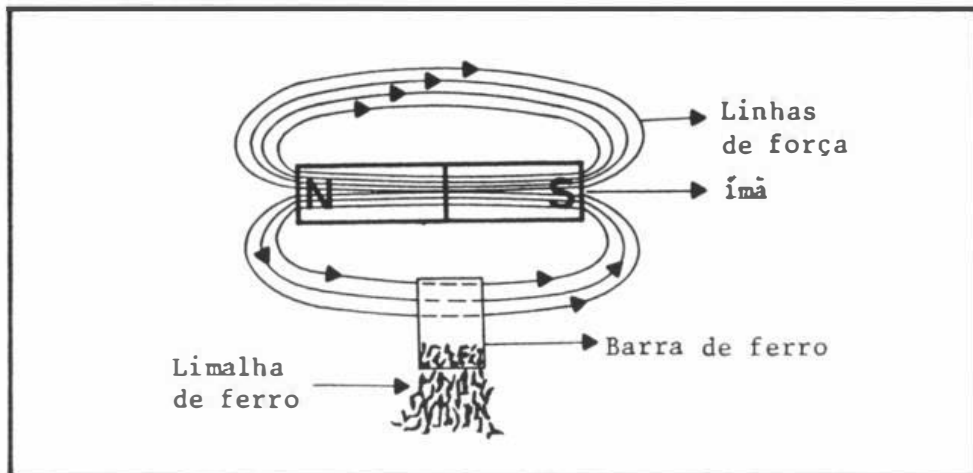
Das substâncias existentes, só algumas têm condições de adquirir as propriedades magnéticas com grande intensidade, ou seja: ferro, aço e o óxido de ferro (magnetita). As demais - substâncias, como o cobre, prata, zinco, ouro, enxofre, alumínio, oxigênio, etc. adquirem propriedades magnéticas, porém de pequena intensidade, onde são conseguimos perceber com equipamentos sensíveis e de precisão. Por esta razão, são considerados materiais antimagnéticos, isto é, que não são magnetizáveis.

INDUÇÃO MAGNÉTICA

A influência que um ímã exerce sobre objetos de ferro ou de aço, colocados ao seu redor, denomina-se: indução magnética.

Ao colocarmos sobre uma porção de limalha de ferro, uma barra de ferro sem imantação alguma, isto é, desprovida de propriedades magnéticas, notamos que a posição da limalha não se altera, devido à inexistência de magnetismo na barra de ferro. Se aproximarmos da barra um ímã, esta estará sob a ação das linhas de forças magnéticas do ímã, conseqüentemente haverá atração das limalhas para a barra de ferro. A este processo damos o nome de indução magnética. Porém ao retirarmos o ímã das proximidades da barra, esta perderá suas características magnéticas e as limalhas voltarão à sua posição inicial. Entretanto algumas limalhas poderão continuar sob a atração da barra de ferro, característica conhecida como magnetismo - remanescente, isto é, a barra de ferro, apesar de não estar sob a ação das linhas de forças magnéticas do ímã, ainda conserva alguma propriedade magnética, mas em pequena escala e por tempo limitado.

A figura a seguir ilustra este experimento.

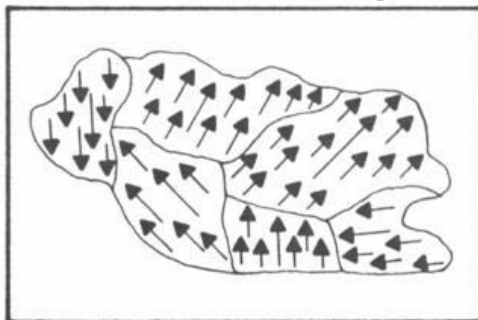


DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

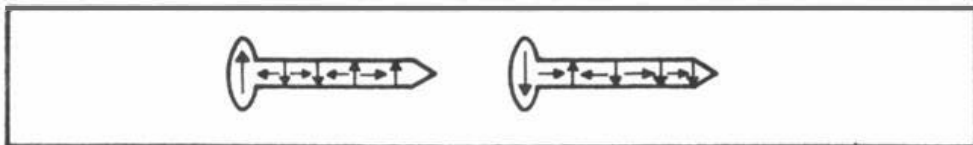
Já vimos que é impossível separarmos os pólos de um ímã.

Podemos representarmos um corpo magnetizado como um conjunto de vários ímãs infinitamente pequenos, denominados dipolos magnéticos. Cada dipolo fica cercado por um campo magnético, devido à presença de outros dipolos. Cada um procura alinhar-se com os dipolos vizinhos, formando grupos.

Cada um desses grupos recebe o nome de domínio magnético e em cada domínio magnético os dipolos se orientam para determinada direção. A figura ao lado o ilustra claramente.

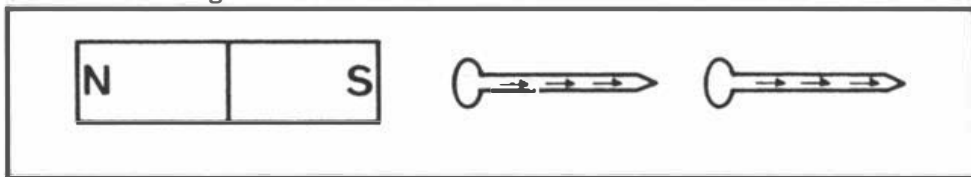


Se os domínios de uma substância forem alinhados em um único sentido, por qualquer processo de magnetização, este corpo se transformará em um ímã. Por outro lado, se aproximarmos dois alfinetes um do outro, verificaremos que eles não se atraem, uma vez que seus domínios não estão alinhados.



Porém, ao colocarmos um ímã nas proximidades do primeiro alfinete, este passará a funcionar como um ímã, atraindo o

alfinete 2. Isto ocorre porque a presença do ímã orienta os domínios magnéticos do alfinete 1, transformando-o em um corpo magnetizado. Com isso, fica demonstrado que o ferro é uma substância magnética.



Pelo que vimos até o momento sobre magnetismo, podemos classificar as substâncias em três grupos:

a) Substâncias ferromagnéticas - são aquelas cujos dipolos se orientam facilmente, sob a ação de um campo magnético externo. Por exemplo: o ferro, o níquel, as ligas de ferro níquel e o aço, etc.

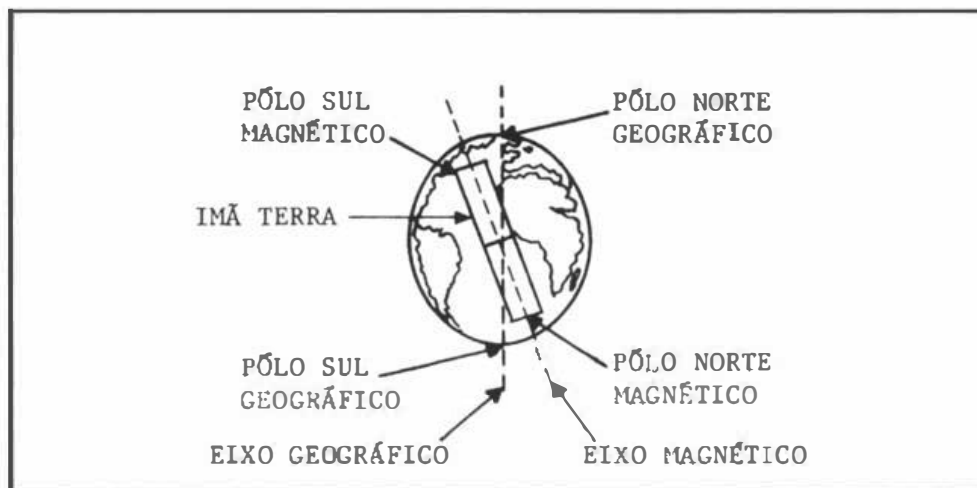
b) Substâncias paramagnéticas - são aquelas cujos dipolos se orientam fracamente, sob a ação de um campo magnético externo. A maioria das substâncias pertence a esta categoria, como por exemplo, o potássio, o óleo, a madeira, etc.

c) Substâncias diamagnéticas - são muito raras e apresentam um comportamento bem diferente das demais, sob a ação de um campo magnético externo. Seus dipolos se orientam em sentido contrário ao do campo externo, aplicado. Temos, como exemplo, o bismuto.

O MAGNETISMO TERRESTRE

Já vimos, em tópicos anteriores, que uma agulha imantada, colocada livremente sobre um ponto de apoio, aponta sempre para o pólo norte geográfico. Foi o médico e físico inglês, William Gilbert, (1540-1603), que levantou a hipótese de que a Terra sendo um grande ímã, atraía a agulha magnética. Pela lei de interação entre os pólos magnéticos, sabemos que pólos de nomes contrários se atraem.

A agulha da bússola está sempre voltada para o pólo norte geográfico. Conclui-se, então, que o pólo norte geográfico corresponde ao pólo sul magnético e, o pólo sul geográfico ao pólo norte magnético.



DECLINAÇÃO

Cristovão Colombo, em sua viagem para a América, em 1492, observou que a agulha magnética não apontava exatamente para o norte. E sim para perto deste com um ligeiro declínio.

Denomina-se declinação magnética o ângulo que faz a agulha com a direção norte-sul geográfica.

A direção tomada pela agulha imantada denomina-se meridiana magnética. Meridiana geográfica é a verdadeira direção norte-sul.

O desvio provocado na agulha imantada de uma bússola é uma consequência da atração exercida pelos polos da terra. Isto leva a crer que a terra se comporta como uma grande barra composta de ferro-níquel (formação do centro da terra) magnetizada.

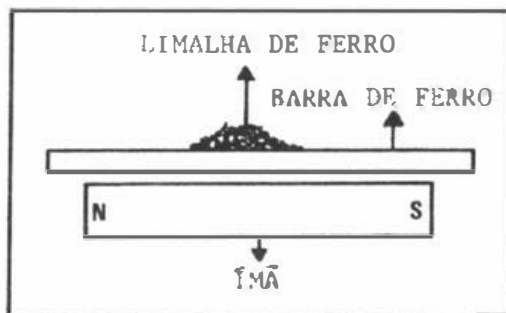
É possível que este magnetismo tenha origem semelhante - ao calor e à luz solar ou às ondas eletromagnéticas procedentes do sol.

TRANSPARÊNCIA MAGNÉTICA

Notamos, em capítulos anteriores, que ao colocarmos uma placa de vidro sobre um ímã e sobre esta placa, limalhas de ferro, ocorrerá uma ordenação das limalhas, conforme a indicação das linhas de força magnética. Se tivéssemos optado por uma placa de zinco, ou de madeira, ou outro material qualquer, notaríamos que sempre ocorreria o mesmo efeito. Com isto, fica bem claro que os materiais não isolam o magnetismo. Por esta razão, dizemos que os materiais possuem transparências magnéticas.

Em vista disto, podemos afirmar que não existe substância capaz de impedir a passagem das linhas de força magnética.

Se colocarmos por exemplo, uma placa de ferro sobre um ímã e sobre esta placa, limalhas de ferro, notaremos que as limalhas não sofrerão nenhuma força de ação, devido ao campo magnético do ímã. Isto não quer dizer que a placa de ferro se ja isolante, mas sim que as linhas de força magnética procuram um caminho mais fácil. Como a limalha se encontra sobre a placa em contato com o ar e este tem permeabilidade magnética menor que a do ferro, as linhas de força magnética percorrem só a placa de ferro.



Baseado neste fenômeno, são construídos atualmente equipamentos com carcaças, bases, armaduras, etc. que limitam o número de linhas de força que passam pelo ar ou por outro dispositivo qualquer. Sendo este processo de fundamental importância para a eletrônica, onde estas limitações são necessárias e indispensáveis para que se construam transmissores e receptores, sem perturbações magnéticas.

RELUTÂNCIA MAGNÉTICA

Relutância magnética vem a ser a oposição à passagem das linhas de força magnética em um determinado material, ou seja, o oposto da permeabilidade magnética, que determina a facilidade das linhas de força magnéticas em percorrer um material.

A relutância magnética tem comportamento análogo à resistência nos condutores elétricos. Nestes a resistência própria dos condutores se opõe à passagem de corrente elétrica, o mesmo acontecendo com a relutância magnética que dificulta a passagem das linhas de força magnética por um determinado material.

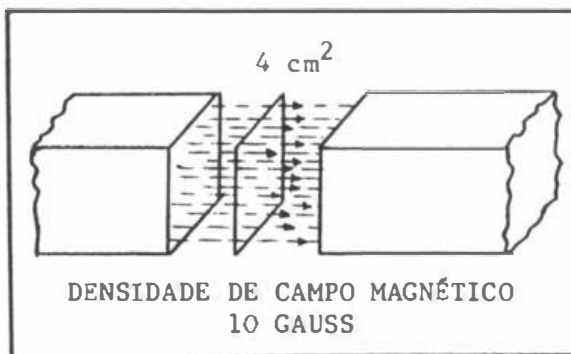
DENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO

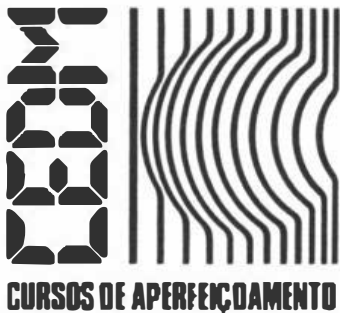
A densidade de um campo magnético está diretamente relacionada com o número de linhas de força magnética pertencentes a este campo, isto é, quanto maior o número de linhas de força magnética, maior será a densidade de campo magnético.

Para melhor expressarmos a densidade de um campo magnético, usaremos como unidade o Gauss que vem a ser a passagem de uma linha de força em um centímetro quadrado de seção.

Logo, a densidade de campo magnético é a relação entre o número de linhas de força magnética, que atravessam uma superfície e a seção transversal da mesma.

Por exemplo: quando temos 40 linhas de força magnética passando por uma seção de 4cm^2 , podemos afirmar que a densidade de campo magnético é igual a 10 gauss.





CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

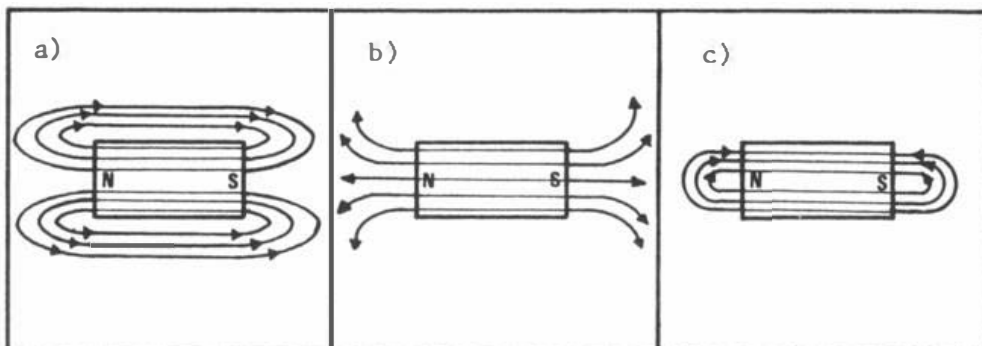
EXAME DA LIÇÃO E-4

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Dado um ímã, como podemos saber qual é o seu pólo norte?
 - a) pólo onde se concentram as linhas de força magnética;
 - b) pólo de onde partem as linhas de força magnética;
 - c) pólo por onde entram as linhas de força magnética.
- 2) Uma das características das linhas de força magnética de um ímã é:
 - a) as linhas de força magnética se atraem;
 - b) as linhas de força magnética não se cruzam;
 - c) as linhas de força magnética saem pelo pólo sul e entram pelo pólo norte.

- 3) Podemos representar um corpo magnetizado como um conjunto de vários ímãs infinitamente pequenos, que são denominados:
- a) campos magnéticos;
 - b) domínios não magnéticos;
 - c) dipolos magnéticos.
- 4) O processo, pelo qual podemos imantar um material, é:
- a) por corrente elétrica;
 - b) por aquecimento;
 - c) por vibração.
- 5) O processo capaz de diminuir a imantação de um ímã, é:
- a) a indução magnética;
 - b) a fricção;
 - c) a vibração.
- 6) A facilidade com que as linhas de força passam através de um material é caracterizada pela:
- a) indução magnética;
 - b) relutância magnética;
 - c) permeabilidade magnética.
- 7) Quanto à polaridade de um ímã podemos afirmar:
- a) pólos magnéticos de polaridade igual se atraem;
 - b) pólos magnéticos de polaridade diferente se atraem;
 - c) pólos magnéticos de polaridade diferente se repelem.
- 8) As linhas de força magnética de um ímã se comportam de acordo com o espectro da figura:



- 9) A densidade de um campo magnético no qual passam 32 linhas através de 2cm^2 é:
- a) 32 Gauss;
 - b) 64 Gauss;
 - c) 16 Gauss.
- 10) A posição correta do pólo norte magnético em relação à Terra é:
- a) na direção do pólo norte geográfico;
 - b) na direção do pólo sul geográfico;
 - c) próximo ao pólo sul geográfico.

LIÇÃO E-5

ELETROMAGNETISMO

O eletromagnetismo abrange a eletricidade, o magnetismo, os campos elétricos e magnéticos e as ondas eletromagnéticas.

No estudo dos circuitos elétricos, a ênfase está na tensão aplicada a um par de terminais e na corrente que circula através de um condutor, enquanto que no eletromagnetismo a ênfase está no estudo do espaço entre os condutores e nos campos elétricos e magnéticos deste espaço.

O eletromagnetismo proporciona uma visão básica de operação e das características dos elementos básicos de um circuito, tais como: resistores, indutores e capacitores.

CAMPOS MAGNÉTICOS PRODUZIDOS POR CORRENTES ELÉTRICAS

A existência de ações recíprocas entre forças e fenômenos elétricos foi posta em evidência em 1820, pelo físico dinamarquês Hans Christian Oersted.

Oersted verificou que toda vez que uma corrente elétrica percorre um fio condutor, posto nas proximidades de uma agulha magnética móvel, a agulha é desviada.

No mesmo ano, o famoso sábio francês André Marie Ampère ampliava os resultados do físico dinamarquês, mostrando os primeiros fundamentos lógicos e matemáticos da nova ciência.

A primeira experiência que foi efetuada para confirmar este fenômeno consistiu na colocação de uma agulha imantada ao lado de um condutor retilíneo, em que uma das extremidades se encontrava conectada ao pólo negativo de uma pilha e a outra extremidade conectada em uma chave corta-circuito. Esta, ligada ao pólo positivo da pilha. Quando fechamos a chave, esta faz com que o circuito se feche, fazendo percorrer uma corrente elétrica no condutor. Com isto notamos que a agulha que estava inicialmente indicada para a posição norte-sul, devido ao magnetismo terrestre, encontra-se agora em outra posição ou seja, 90° com relação à posição inicial.

Ao abrirmos a chave do circuito, novamente, notaremos que a agulha imantada voltará a sua posição original. A figura 1 ilustra esta experiência.

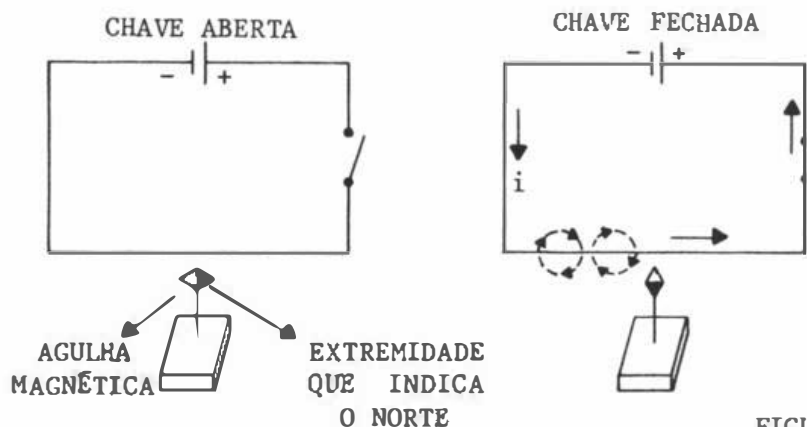


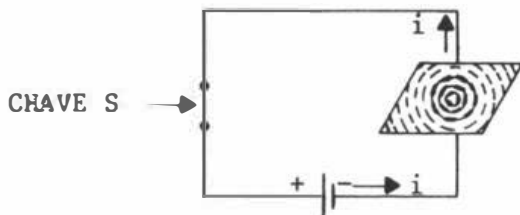
FIGURA 01

Com esta experiência de Oersted deduzimos que, no espaço que circunda o condutor percorrido pela corrente elétrica, existe um campo magnético, verificado pela ação exercida sobre a agulha magnética, suspensa próxima ao condutor. O sentido de orientação desse campo magnético depende do sentido da corrente.

Um método prático para se observar o sentido do campo magnético, produzido pela corrente elétrica através do condutor, seria colocarmos sobre uma placa de papelão limalhas de ferro e passarmos pela placa um condutor elétrico, conforme

ilustra a figura 2. Ao fecharmos a chave S, teremos a circulação de uma corrente elétrica i e notaremos que as limalhas de ferro se ordenarão em círculos concêntricos.

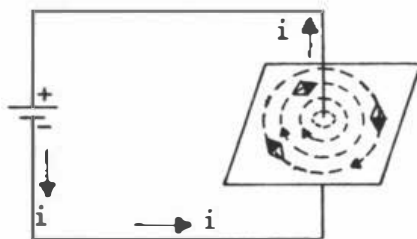
FIGURA 02



Uma outra experiência que poderia ser feita seria a colocação de várias agulhas magnéticas no lugar das limalhas de ferro na placa de papelão.

Notaremos que as agulhas magnéticas mudarão de direção quando submetidas à ação de um campo magnético, produzido pela corrente elétrica i . O sentido das linhas de força é definido pela extremidade norte da agulha e coincide com o deslocamento dos ponteiros do relógio (figura 3).

FIGURA 03



REGRA DA MÃO ESQUERDA

Uma regra prática e de fácil memorização é a da mão esquerda, conforme ilustra a figura 4.

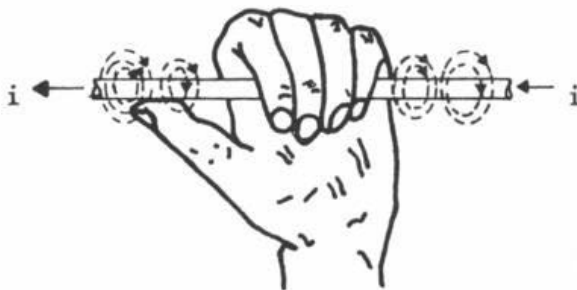


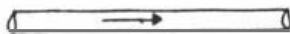
FIGURA 04

O sentido das linhas de força circulares, que envolvem um condutor percorrido por uma corrente elétrica do pólo negativo para o pólo positivo (sentido real), corresponde aos dedos da mão esquerda que enlaçam o condutor, se o polegar estiver apontando no mesmo sentido da corrente.

Alguns autores costumam citar essa regra, utilizando a mão direita. O princípio é o mesmo, só que neste caso o sentido da corrente é convencional.

De acordo com os conceitos estudados, poderemos ter duas possibilidades para o campo magnético gerado por uma corrente elétrica, conforme indicam as figuras 5 e 6.

FIGURA 05



Obs.: A cruz representa uma corrente que se afasta do observador, isto é, está fluindo para dentro da página.

FIGURA 06

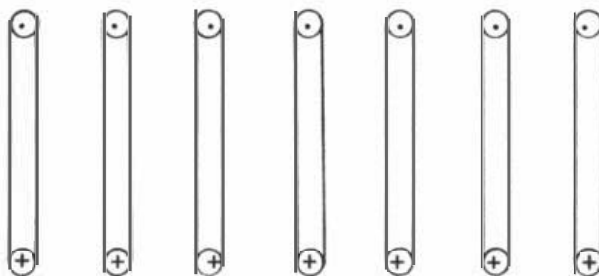


Obs.: O ponto representa a corrente fluindo em direção ao observador, para fora da página.

SOLENÓIDE

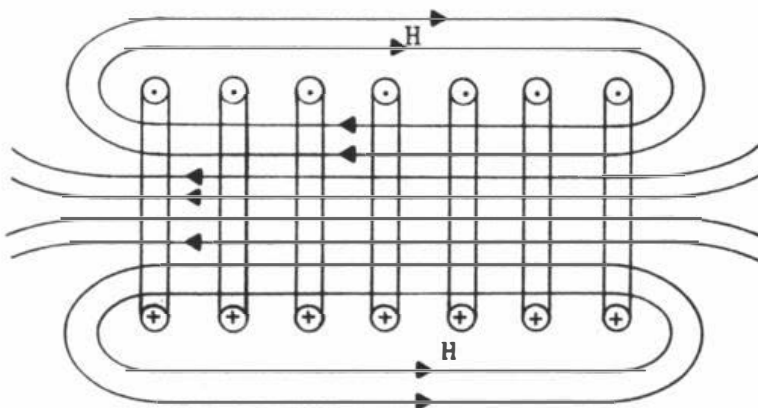
Vamos analisar a distribuição das linhas de força de sistemas mais complexos, como é o caso do solenóide, que é composto de um sistema de circuitos circulares planos, iguais, próximos um do outro, percorridos por correntes da mesma intensidade. Consideremos o solenóide retilíneo, indicado na figura 7.

FIGURA 07



Considerando o sentido das correntes de mesma intensidade que atravessam os circuitos, conforme ilustra a figura 7, a intensidade de campo magnético H será dirigida no sentido indicado pela figura 8, o que pode ser facilmente verificado pela regra da mão esquerda.

FIGURA 08



Aplicando-se a regra da mão esquerda a cada elemento do solenóide, as linhas de força terão o aspecto apresentado na figura 9 e 10. No espaço entre um elemento do solenóide e do seu adjacente, teremos linhas de força atuando em sentido con-

trário, que tendem a se anular.

FIGURA 09

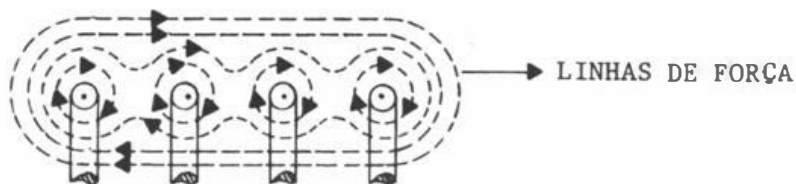
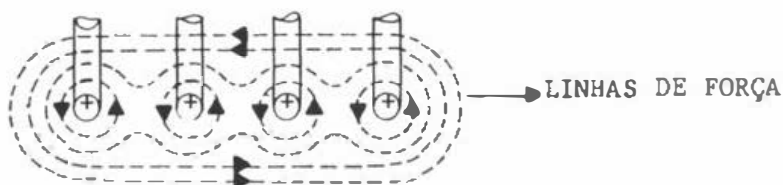
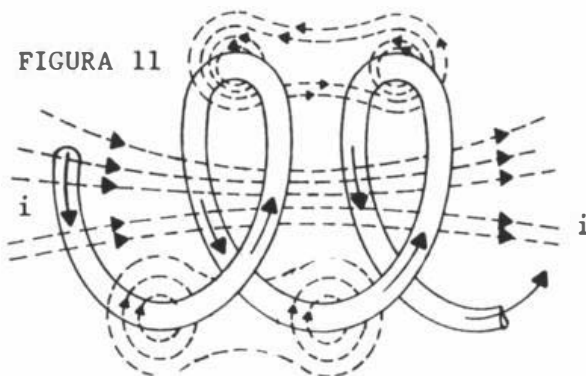


FIGURA 10



Um outro sistema que possui comportamento análogo ao solenóide pode ser facilmente realizado por meio de um condutor enrolado em forma de uma hélice, conforme indica a figura 11.

FIGURA 11



A partir do exposto, entendemos que o solenóide percorrido por corrente elétrica comporta-se como um ímã. Esta analogia pode ser comprovada por meio do espectro magnético, conforme indica a figura 12.

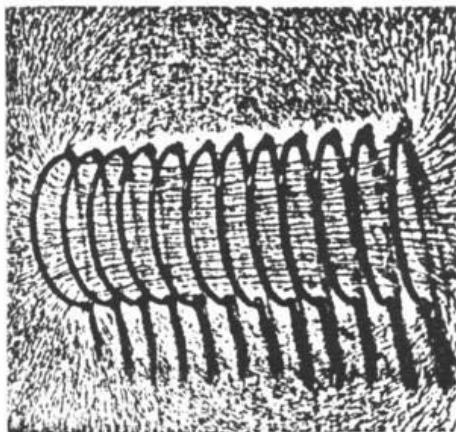


FIGURA 12

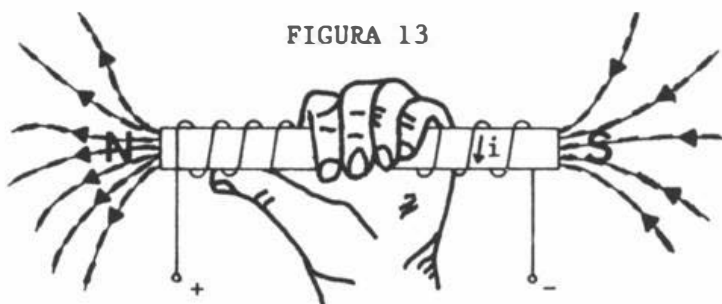
POLARIDADE MAGNÉTICA DE UM SOLENÓIDE

A distribuição das linhas de força gerados por um solenóide é análoga àquela produzida por um ímã de mesma dimensão e formato de um solenóide.

Da mesma forma que o ímã, as linhas de força saem do pólo norte, para entrarem convergindo no pólo sul. Assim se distinguem com os nomes de extremidade sul e norte de um solenóide, a entrada e a saída das linhas de força por ele geradas.

A polaridade de um solenóide também é determinada pela regra da mão esquerda, aplicada a um elemento qualquer de uma das espiras que compõem o solenóide.

A aplicação da regra consiste em segurarmos o solenóide com a mão esquerda. Com os dedos no sentido da corrente, o polegar irá indicar a extremidade norte, conforme ilustra a figura 13.



ELETROÍMÃS

Os eletroímãs são constituídos por um núcleo de ferro doce, no qual é enrolado o condutor e ao circularmos corrente elétrica, teremos a produção de um campo magnético bem forte. As linhas de força, passando pelo interior do núcleo, farão com que o mesmo se imante, comportando-se como um poderoso ímã, que terá a finalidade de exercer uma determinada força de atração. Os núcleos de ferro doce têm a propriedade de só se imantarem enquanto estiver circulando corrente elétrica. Assim quando cessarmos a circulação de corrente, o núcleo se neutralizará automaticamente.

As figuras 14, 15 e 16 mostram as formas indicadas para os vários núcleos dos eletroímãs.

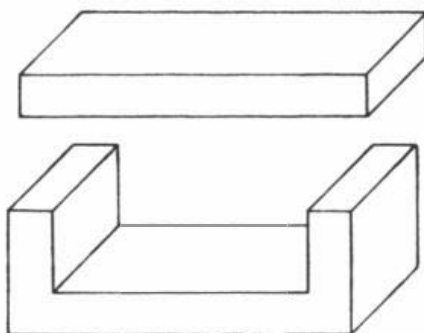
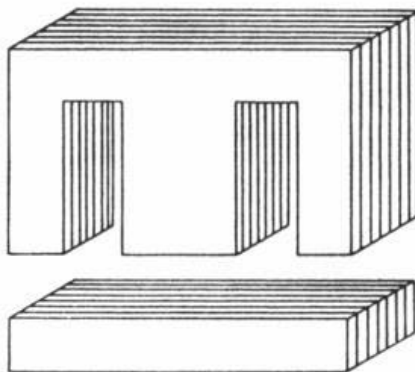
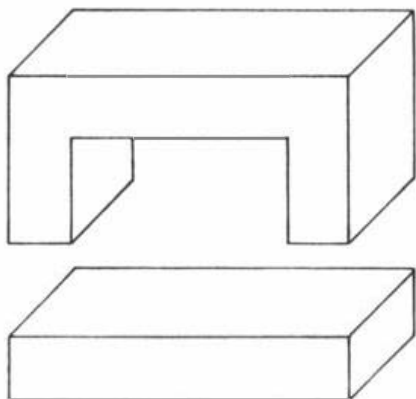


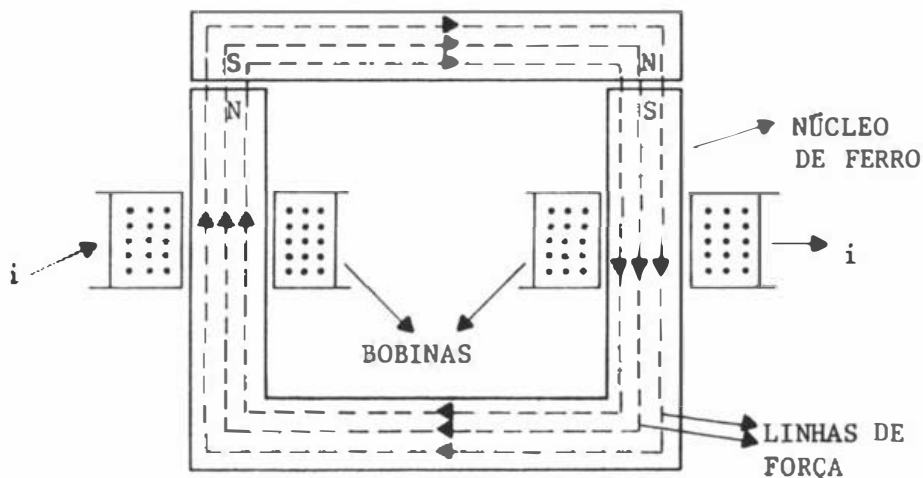
FIGURA 14



Os núcleos magnéticos, dependendo da finalidade a que se destinam, podem ser laminados ou maciços. O núcleo da figura 16, por exemplo, é laminado, sendo construído com as lâminas padronizadas, empregadas na construção dos transformadores.

A figura 17 ilustra um eletroímã com as linhas de força que percorrem o núcleo.

FIGURA 17



A retirada ou o acréscimo do número de espiras na bobina de um eletroímã, sem variarmos a bitola do fio, em nada irá modificar o produto da corrente elétrica em ampères pelo número de espiras da bobina, isto é, o número de ampère-espiras. Isto porque um acréscimo no número de espiras provocará um au

mento na resistência do fio e conseqüentemente uma redução da corrente proporcional, permanecendo constante o produto ampère-espiras. Por sua vez, a retirada de algumas espiras reduzirá a resistência e provocará um aumento de corrente também proporcional e o produto ampère-espira será sempre o mesmo. As figuras 18 e 19 ilustram duas barras de ferro doce, enroladas com um condutor de mesma bitola e com número de espiras diferentes. O produto ampère-espira para ambos os casos permanece constante.

FIGURA 18

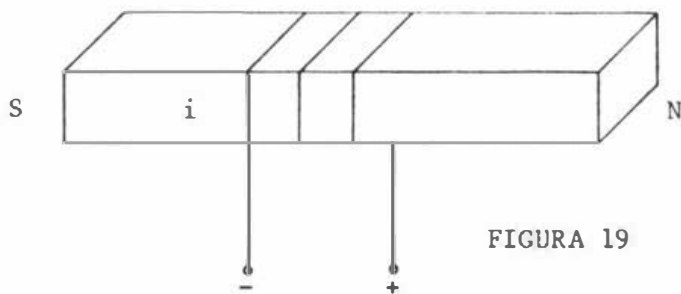
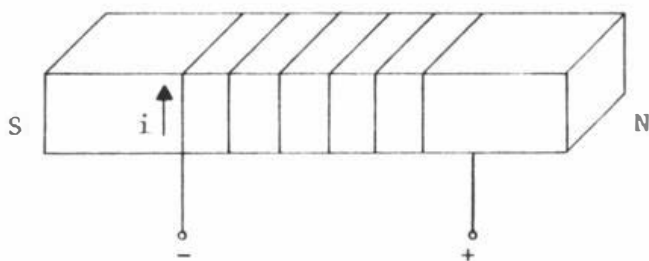


FIGURA 19

As aplicações dos eletroímãs são inúmeras. São utilizados em campainhas elétricas, telefones, telégrafos, etc. Estudaremos a seguir alguns dispositivos cujo funcionamento se baseia nos eletroímãs.

DISJUNTOR

O disjuntor que passaremos a descrever é simples. Funciona de acordo com os princípios do eletroímã. É um dispositivo que se assemelha a um interruptor, ou seja, deixa fluir a corrente, quando o circuito está em condições normais de ser-

viço e a interrompe em condições anormais como, por exemplo, as de curto-circuito. Possui duas posições distintas que correspondem, respectivamente, ao disjuntor fechado e ao disjuntor aberto.

O disjuntor pode apresentar certas propriedades como sensor contra sub-tensão, comando à distância, além de outras aplicações, como limitador de corrente de curto e sensor de falta de fase.

Porém, como estamos enfocando uma explanação básica do assunto, não iremos considerar estes itens que acabamos de citar. Considere a figura 20, logo abaixo.

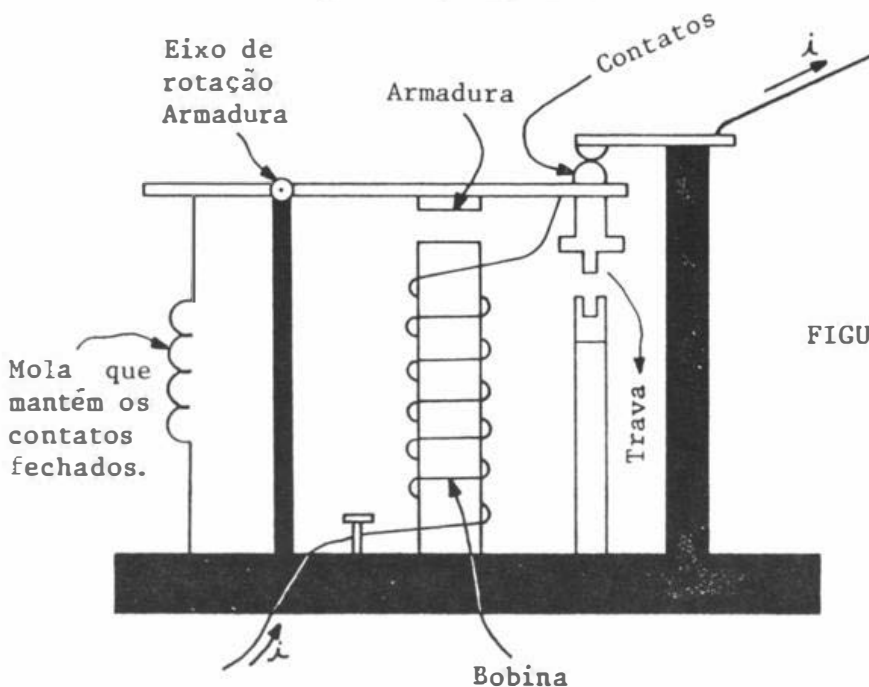
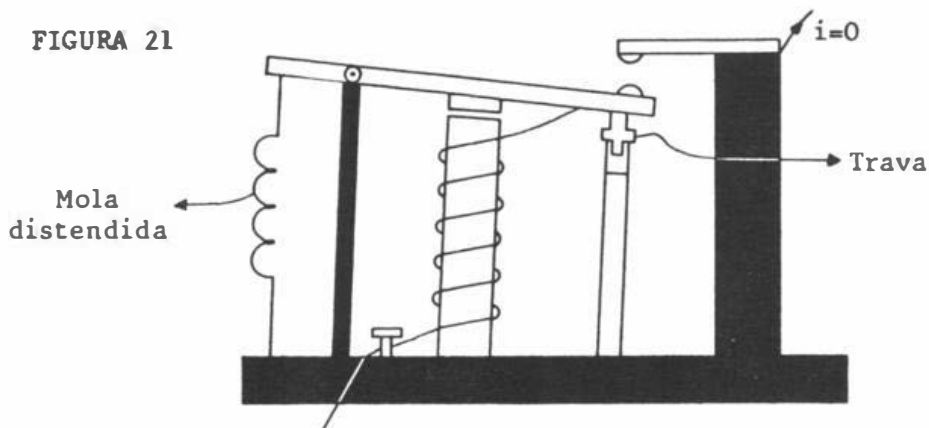


FIGURA 20

Após ligarmos a carga em série com o disjuntor, teremos uma corrente de trabalho, necessária para o bom funcionamento da nossa carga, que pode ser um motor, gerador, etc. Porém se tivermos uma corrente maior do que aquela prevista para o circuito, os contatos do disjuntor irão se abrir, devido ao fato de que a corrente alta, quando passa pela bobina do disjuntor, faz com que apareça um campo magnético maior do que aquele previsto em condições normais de funcionamento. E a força de atração sobre a armadura vence a força da mola, na qual a

armadura está presa. Sendo assim ela desce, trava-se, deixando o circuito em aberto, portanto não há circulação de corrente maior que o valor admissível para carga, protegendo assim o sistema. Após a verificação da causa do desligamento do disjuntor, destrava-se manualmente a armadura e fecham-se os contatos. A figura 21 ilustra o sistema desativado.

FIGURA 21



RELÊ

O relê é um dispositivo usado para interromper ou dar continuidade a circuitos e sua parte principal é um eletroímã que consta de uma bobina, de uma armadura e de um núcleo de ferro.

Quando fazemos passar pela bobina uma corrente elétrica " i " capaz de atrair a armadura, fazemos percorrer uma corrente elétrica I para o circuito ou carga, que queremos alimentar. E quando queremos interromper o circuito, basta retirarmos a corrente i da bobina. Esta fará com que não haja mais atração da armadura, ou seja, a armadura se desprende, seccionando assim o circuito.

Um relê é, portanto, um interruptor controlado por corrente elétrica.

A figura 22 ilustra o aspecto de um relê básico.

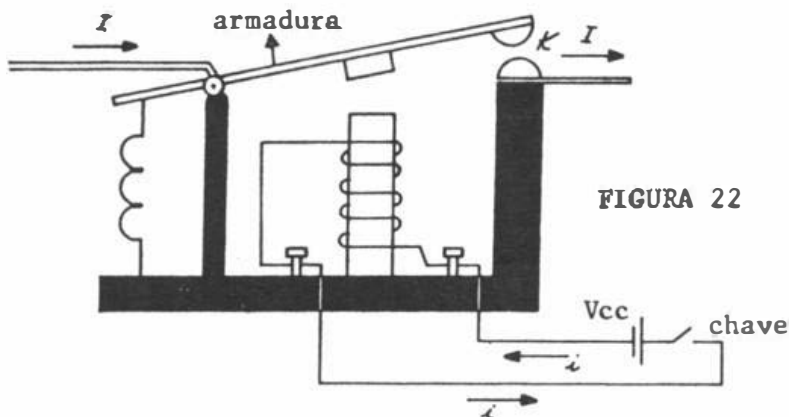
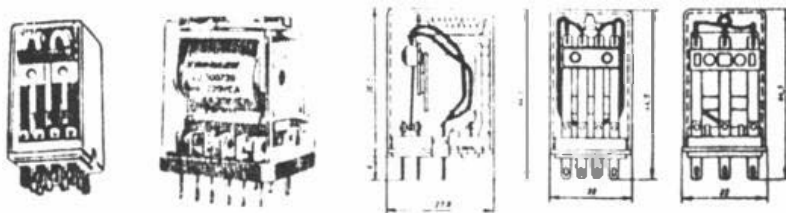


FIGURA 22

A utilização dos relês traz muitas vantagens. A corrente "i", por exemplo, necessária para o funcionamento do relê, pode ser baixa e independente da corrente I a ser controlada.

Os relês podem também controlar a corrente em equipamentos instalados em locais bem afastados da unidade de controle. A figura 23 ilustra alguns tipos de relês comerciais.

FIGURA 23



CAMPAINHA ELÉTRICA

A campainha elétrica consiste fundamentalmente de um eletroímã, cuja armadura encontra-se presa a uma mola de aço flexível. Quando em repouso, apóia-se sobre um parafuso. A figura 24 ilustra o aspecto básico de uma campainha.

Pressionando o botão da campainha C, teremos a circulação da corrente elétrica i que irá percorrer a bobina do eletroímã em direção a uma das extremidades da armadura, onde se acha colocado o martelo, fluindo em direção ao botão C e fechando o circuito.

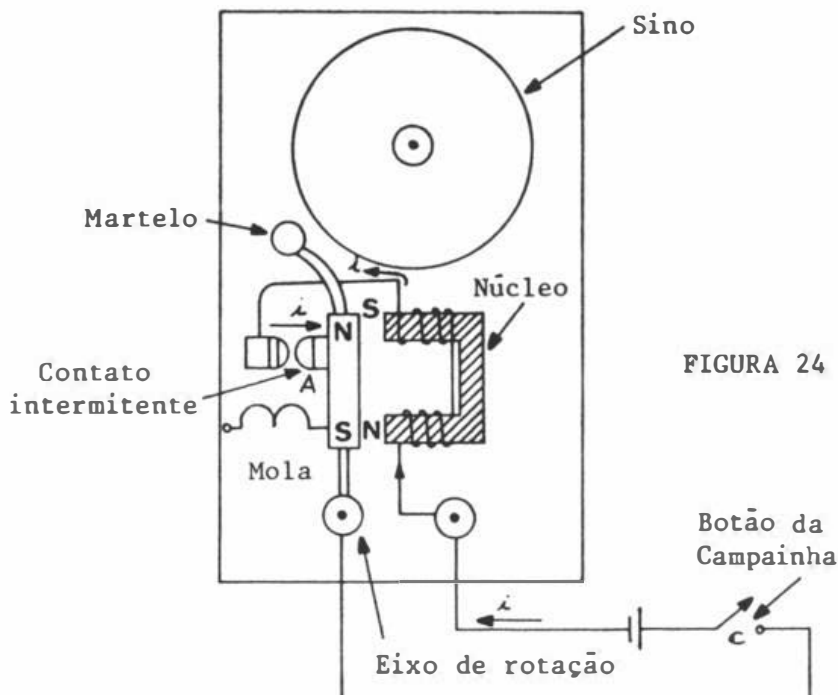


FIGURA 24

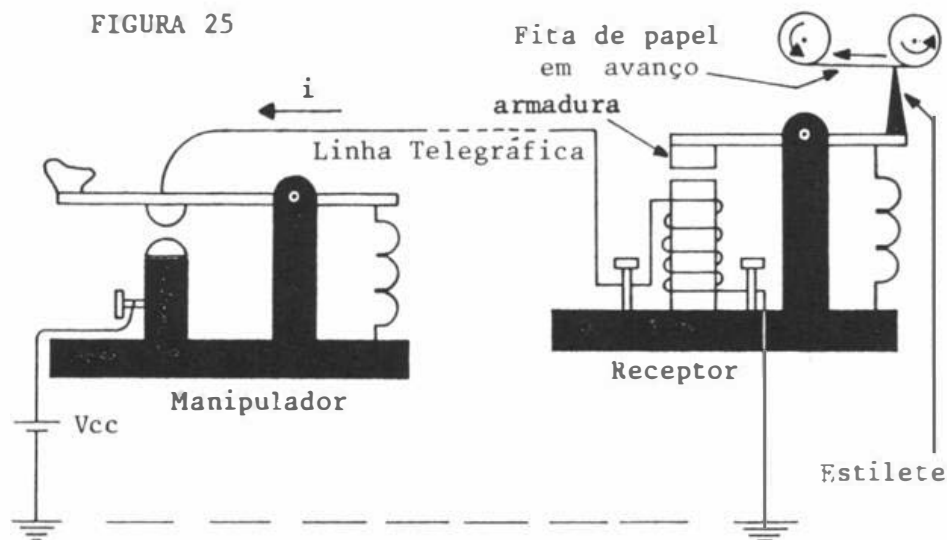
Neste instante o núcleo da bobina se encontrará magnetizado, atraindo o martelo que, por sua vez, irá bater na campainha. Com a atração do martelo, o circuito é interrompido, a bobina se torna desmagnetizada e o martelo volta novamente para a sua posição original, em virtude da mola a ele presa. No entanto, ao entrar em contato novamente com o parafuso, temos um novo fechamento do circuito, dando origem a uma nova magnetização e, conseqüentemente, uma nova martelada na campainha. E assim sucessivamente, enquanto estivermos pressionando o botão da campainha.

TELEGRAFO ELÉTRICO

Em 1838, Morse, um pintor norte americano, criou um aparelho transmissor, cujo alfabeto leva seu nome, Morse. Aparelho este que possibilitou as comunicações telegráficas.

Este aparelho constitui-se de uma alavanca metálica, denominada manipulador, provida de dois contatos, um de repouso e outro de funcionamento, conforme ilustra a figura 25.

FIGURA 25



Ao pressionarmos o manipulador, fechamos o circuito ao qual está ligado o receptor que é o aparelho inscricor morse. O aparelho receptor consiste de um eletroímã cuja armadura está presa a uma mola. Na outra face da armadura temos um estilete que faz o papel de uma ponta escritora.

Ao se fechar o circuito, a passagem de corrente pela bobina produz um fluxo magnético que atrairá a armadura que trabalha como uma alavanca.

A armadura ao ser atraída faz com que o estilete incida sobre uma fita de papel, movida lentamente através de um sistema de relojoaria. De acordo com a duração do fluxo de corrente pela bobina, a ponta escritora executa um traço ou um ponto, que são os elementos básicos do código morse, sobre a tira de papel.

Dois anos mais tarde, por volta de 1840, Steinheil, de Munique, aperfeiçoou um pouco mais o telégrafo elétrico. Descobriu que o retorno da corrente para a bateria, ao invés de ser feito por um condutor, ou seja, através de um fio, poderia ser executado pela própria terra.

A figura 26 ilustra a simbologia do código morse, utilizado na telegrafia.

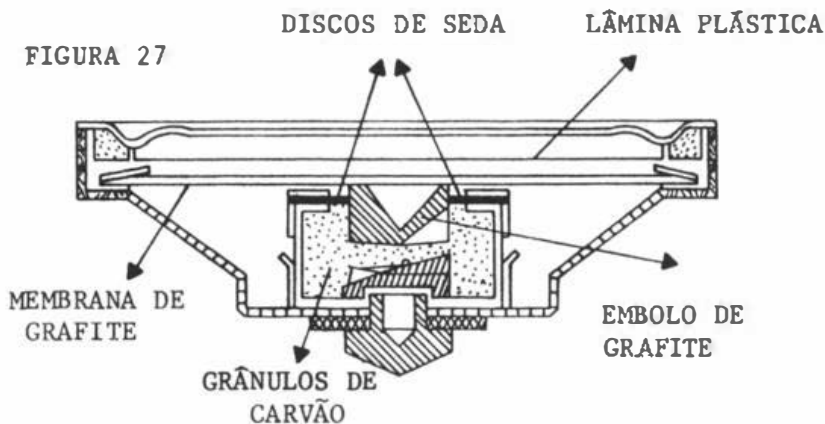
letras	código Morse	nº numeros	código Morse	código de contato para telas	
A	• —	1	— •	• • • •	☐ ausência de pulso (ou contato aberto)
B	— • • •	2	• — • •	• • • •	☐ presença de pulso (ou contato fechado)
C	— • — •	3	• — • —	• • • •	☐ seguem-se letras
D	— • — •	4	• — • —	• • • •	☐ seguem-se numeros ou símbolos diversos
E	•	5	—	• • • •	☐ espaço
F	• • — •	6	— • — •	• • • •	☐ campainha
G	— • • •	7	• — • •	• • • •	☐ volta do carro
H	• • • •	8	— • — •	• • • •	☐ pular uma linha
I	• •	9	— • — •	• • • •	☐ quem é?
J	• — • —	0	—	• • • •	☐ Lembre para ser empregado em redes nacionais e internacionais
K	• — • —	1	— • — •	• • • •	
L	• — • —	2	— • — •	• • • •	
M	— • — •	3	— • — •	• • • •	
N	— • — •	4	— • — •	• • • •	
O	— • — •	5	— • — •	• • • •	
P	— • — •	6	— • — •	• • • •	
Q	— • — •	7	— • — •	• • • •	
R	— • — •	8	— • — •	• • • •	
S	— • — •	9	— • — •	• • • •	
T	— • — •	0	— • — •	• • • •	
U	— • — •	1	— • — •	• • • •	
V	— • — •	2	— • — •	• • • •	
W	— • — •	3	— • — •	• • • •	
X	— • — •	4	— • — •	• • • •	
Y	— • — •	5	— • — •	• • • •	
Z	— • — •	6	— • — •	• • • •	
RC	— • — •	7	— • — •	• • • •	
AL	— • — •	8	— • — •	• • • •	
I	— • — •	9	— • — •	• • • •	
A	— • — •	0	— • — •	• • • •	
Sn	— • — •	1	— • — •	• • • •	
Vd	— • — •	2	— • — •	• • • •	
U	— • — •	3	— • — •	• • • •	
I	— • — •	4	— • — •	• • • •	
V	— • — •	5	— • — •	• • • •	
Ar	— • — •	6	— • — •	• • • •	
Im	— • — •	7	— • — •	• • • •	

FIGURA 26

MICROFONE

Os microfones são transdutores acústicos cuja função é converter energia sonora em energia elétrica.

A figura 27 ilustra uma cápsula transmissora ou microfone de um aparelho telefônico.



De acordo com a figura 27, temos no interior da cápsula uma divisão interna, feita de tal modo que possa ser um recipiente para grânulos de carvão. Temos ainda um êmbolo de grafite que faz parte de uma membrana, também de grafite.

Todo esse conjunto deverá estar ligado a uma bateria, conforme ilustra, de forma bem simplificada, a figura 28.

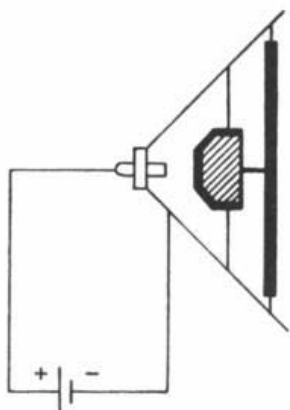


FIGURA 28

A membrana do microfone, ao receber as ondas sonoras, irá vibrar de tal forma que o êmbolo comprima os grânulos de carvão que irão agir como se fossem uma resistência variável.

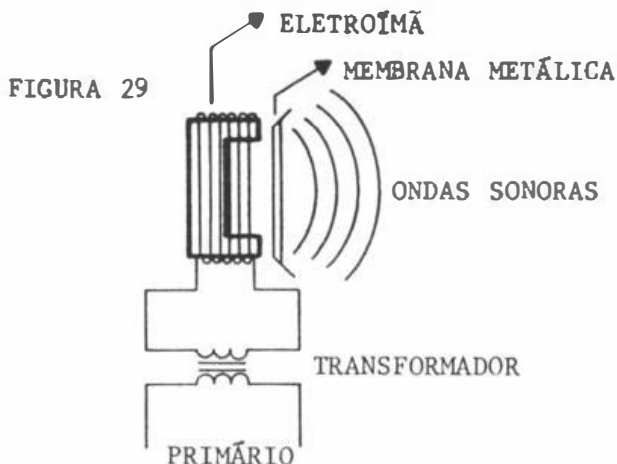
Com a membrana em estado de repouso, sem compressão alguma, os grânulos de carvão estarão dispersos, apresentando uma alta resistência. Quando houver uma compressão, os grânulos estarão mais comprimidos e o fluxo de corrente será maior. Assim, as variações na membrana irão comprimir os grânulos de carvão que, por sua vez, produzirão variações na corrente elétrica.

RECEPTOR TELEFÔNICO (FONE)

O receptor telefônico tem a função de reproduzir as variações de corrente elétrica em variações de frequências audíveis (audiofrequências). Isto se consegue convertendo os sinais elétricos em sinais acústicos (ondas sonoras), processo inverso ao microfone.

Este processo é feito em duas etapas: a primeira delas é a transformação da energia elétrica em mecânica, em seguida, a energia mecânica é convertida em energia acústica.

O funcionamento básico do receptor pode ser compreendido através da figura 29.



O fone constitui-se basicamente de um eletroímã cuja armadura é uma membrana metálica, que se mantém suspensa através de um anel plástico.

As variações de corrente, provocadas pela cápsula transmissora (microfone), são levadas ao primário do transformador. A corrente no secundário, por sua vez, irá variar o campo magnético do eletroímã, provocando a vibração da membrana metálica, resultando na propagação das ondas sonoras.

CAMPO MAGNÉTICO NO INTERIOR DE UMA MATRIZ DE NÚCLEO DE FERRITE

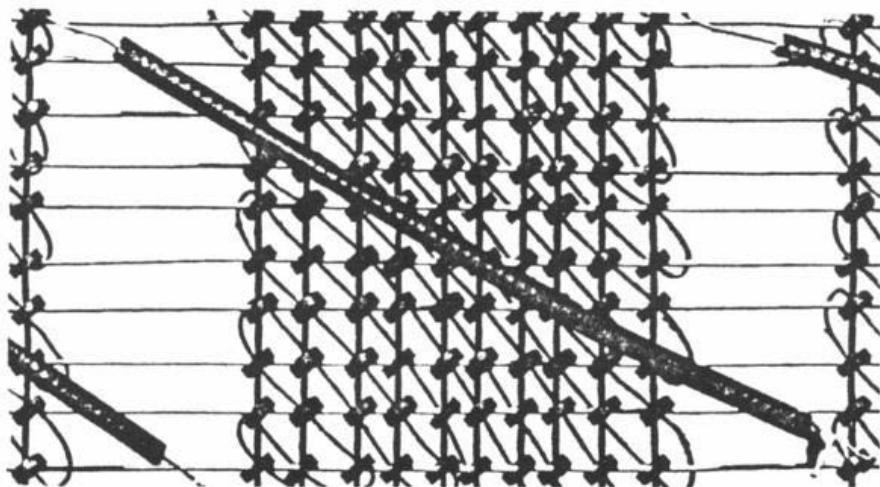
A memória dos computadores se constitui de uma matriz de delgados núcleos anulares de ferrite. O ferrite tem a característica de se magnetizar facilmente, em decorrência da ação de um campo magnético incidindo sobre ele.

De uma forma básica, a matriz de núcleo de ferrite é atravessada por $2n$ fios condutores que correspondem às palavras em uma direção e por x fios condutores, correspondentes aos dígitos, em outra direção. Assim um bit de informação estará contido em cada núcleo, de acordo com a direção de magnetização. Desta forma o núcleo armazenará a direção da corrente

de magnetização que o atravessou por último.

A figura 30 ilustra uma memória de núcleos magnéticos utilizados por volta de 1950. Observe que os núcleos são atravessados por uma rede de fios finos, necessários para a mudança das polaridades magnéticas.

FIGURA 30



Uma memória bem simples de núcleo magnético, conforme ilustra a figura 31, é atravessada por condutores de palavra em uma direção e por condutores de dígito em outra direção.

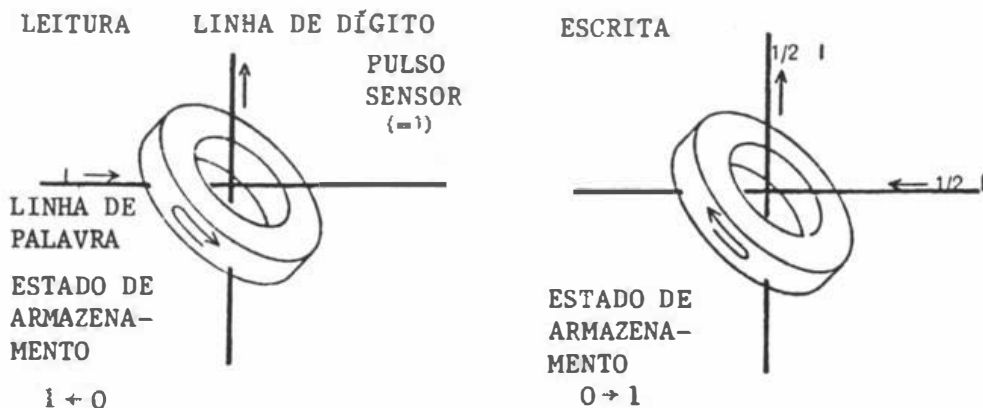


FIGURA 31

Na etapa de leitura, uma corrente I , em uma certa direção, é enviada através da linha de palavra desejada, levando todos

os núcleos desta linha a um mesmo estado de magnetização. Na fase de escrita, a corrente na linha de palavra é invertida e reduzida para $1/2 I$, ao mesmo tempo um pulso de corrente $1/2 I$ é enviado pela linha de dígito. Uma memória estruturada dessa forma é chamada "organizada em palavra."

O fluxo magnético ao redor do núcleo relacionado com a corrente magnetizadora que passa por ele é determinado pelo ciclo de histerese. A figura 32 ilustra o aspecto de um ciclo de histerese para uma memória de núcleo magnético.

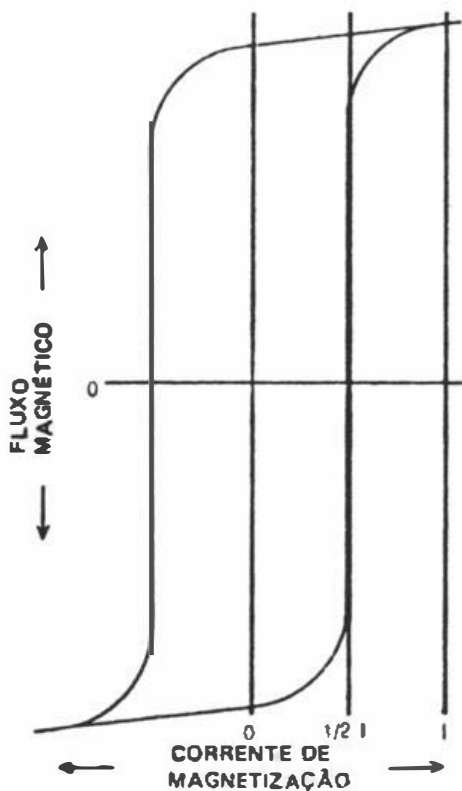


FIGURA 32



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-5

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Quando colocamos limalhas de ferro sobre um papelão e por este passamos um fio condutor percorrido por corrente elétrica:
 - a) as limalhas não se movem;
 - b) as limalhas vão se repelir do condutor elétrico;
 - c) as limalhas formam círculos concêntricos bem definidos;
 - d) as limalhas formam quadrados justapostos entre si.
- 2) Para se determinar a polaridade de um solenóide, devemos proceder da seguinte forma:
 - a) segurar a bobina com a mão direita, com os dedos na direção do campo magnético. Com isto o polegar apontará o pólo norte;
 - b) segurar a bobina com a mão esquerda, com os dedos na direção da corrente. Com isto o polegar apontará o pólo norte;
 - c) segurar a bobina com a mão direita, com o polegar apontado na direção do campo magnético. Com isto os outros dedos apontarão para o pólo sul.
 - d) N.R.A.

3) Uma das vantagens dos eletroímãs é:

- a) se quisermos inverter os pólos, basta aumentarmos a corrente elétrica;
- b) a imantação por corrente elétrica pode nos fornecer ímãs muito potentes;
- c) quando utilizamos uma barra de ferro doce como núcleo, o eletroímã perde suas características de imantação;
- d) não possui linhas de força.

4) O disjuntor é caracterizado pelo seguinte funcionamento:

- a) quando temos, passando pela bobina, uma corrente muito baixa, esta se desmagnetiza, desligando o disjuntor;
- b) quando temos, passando pela bobina, uma corrente muito alta, esta se magnetiza e desliga o disjuntor;
- c) quando temos, passando pela bobina, uma corrente muito alta, esta se magnetiza e liga o disjuntor;
- d) N.R.A.

5) O toque da campainha elétrica é causado pela:

- a) queda de tensão na bobina;
- b) aplicação de uma força na mola para que esta pule o martelo;
- c) passagem de uma corrente elétrica pela bobina, capaz de magnetizá-la;
- d) corrente de magnetização no martelo.

6) Quando temos uma bobina com 10 espiras e aumentamos a corrente que passa por esta, ocorre que:

- a) o campo magnético irá aumentar;
- b) o campo magnético irá diminuir;
- c) o campo magnético permanecerá constante;
- d) o campo magnético irá diminuir e a seguir se manterá constante.

7) O funcionamento do telégrafo consiste:

- a) em fazer passar uma corrente elétrica por uma bobina, corrente esta controlada por um manipulador;
- b) em enviar mensagem telegráfica, através de ondas eletromagnéticas;

- c) em fazer passar uma corrente elétrica por uma bobina e fazer variar sua intensidade;
- d) em cortar as linhas de campo do manipulador.

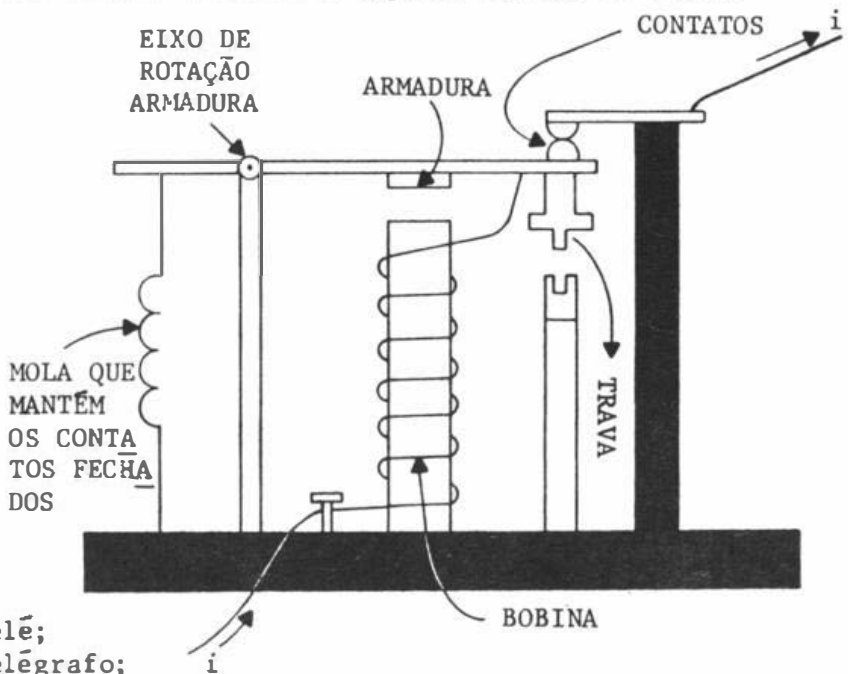
8) Os microfones são transdutores acústicos, cuja função é:

- a) converter energia mecânica em energia acústica;
- b) converter energia sonora em energia mecânica;
- c) converter energia sonora em energia elétrica;
- d) converter energia elétrica em energia mecânica.

9) O receptor telefônico tem a função de reproduzir as variações de corrente elétrica em variações de frequências audíveis. Isto se consegue da seguinte forma:

- a) convertendo energia sonora em energia mecânica;
- b) convertendo os sinais elétricos em sinais acústicos;
- c) polarizando os sinais elétricos;
- d) N.R.A.

10) A figura abaixo ilustra o aspecto básico de um(a):



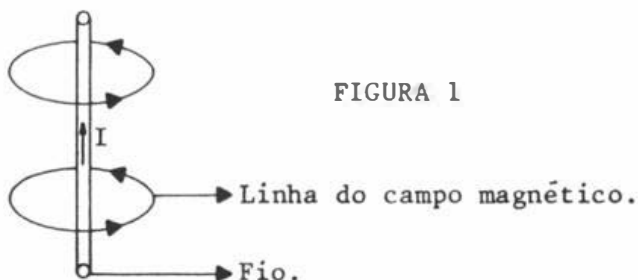
- a) relê;
- b) telégrafo;
- c) disjuntor;
- d) campainha elétrica.

LIÇÃO E-6

INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

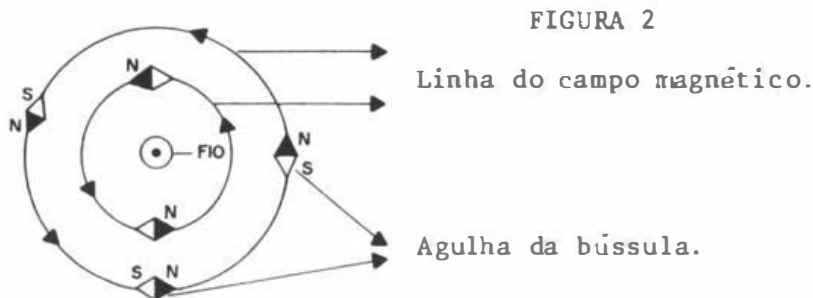
Nas lições E4 e E5 estudamos os princípios dos campos magnéticos e eletromagnéticos, na presente lição, estudaremos um fenômeno importante, chamado INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA. Já vimos muitos conceitos sobre esse assunto na lição E4, todavia recordaremos alguns tópicos fundamentais.

Sabemos que em volta de um fio conduzindo uma corrente - I , aparecerá um campo magnético como mostra a figura 1.



Ao explorar este campo com um ímã articulado ou com uma agulha magnética de uma bússula, veremos que o campo magnético será descrito conforme a figura 2. Se acompanharmos o movimento da agulha, notaremos que o campo magnético forma círculos fechados em torno do fio. A direção do campo é considera

da direção "norte", conforme indica a agulha da bússula. O sentido do campo magnético ou das linhas de força é obtido por meio da regra da mão direita, onde o polegar aponta a direção da corrente e os outros dedos o sentido do referido campo magnético.



OBS.- A corrente está fluindo para fora da página.

Recordamos o seguinte: um condutor, conduzindo uma corrente, produz um campo magnético.

Por volta de 1831, Michael Faraday, em Londres e Joseph Henry, em Albany, descobriram que o efeito inverso também é possível, isto é, um campo magnético pode produzir uma corrente em um circuito fechado. Para isso ocorrer, no entanto, o fluxo magnético, que enlaça o circuito, deverá estar variando.

Vamos considerar uma espira de fio, conforme mostra a figura 3. Um campo magnético com uma densidade de fluxo B é normal ao plano do anel. Se o campo magnético B estiver sendo dirigido para cima, diminuindo, porém com o tempo, uma corrente I irá fluir no fio, no sentido da corrente convencional, ou seja, oposto ao sentido da corrente de elétrons. Dizemos, então, que esta corrente é INDUZIDA pelo campo magnético. Neste caso, em que o campo magnético B está diminuindo de grandeza, a relação entre B e I é dada pela regra da mão direita.

como acabamos de ver. Na prática, essa variação do fluxo pode ser obtida por vários processos.

I - INDUÇÃO EM UMA BOBINA POR MEIO DE UM ÍMÃ:

Considere uma bobina com os seus extremos ligados a um galvanômetro, conforme indica a figura 5. Se aproximarmos um ímã da bobina, esta ficará sob a influência de um campo magnético. Ao movimentarmos o ímã ao longo do eixo da bobina, teremos a circulação de corrente elétrica. Esta cessará, logo que cessar o movimento do ímã.

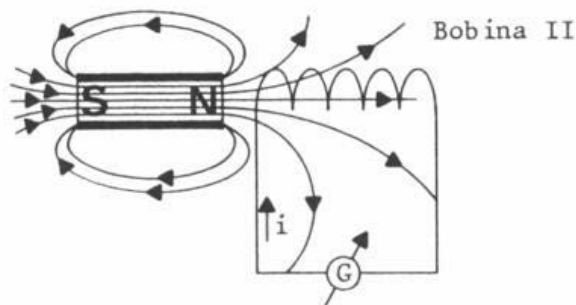


FIGURA 5

A corrente circula em um sentido, quando o ímã é introduzido e no sentido oposto, quando ele é retirado da bobina. Porém, se mantivermos o ímã em repouso e movimentarmos a bobina relativamente ao ímã, o efeito observado será o mesmo. Conclui-se que o importante é a movimentação relativa entre ambos.

II - INDUÇÃO EM UMA BOBINA POR MEIO DE OUTRA BOBINA:

a) Se substituirmos o ímã por uma outra bobina, alimentada por corrente contínua, através de uma fonte de tensão, teremos o aparecimento de uma corrente elétrica I que irá produzir um campo magnético. Se deslocarmos qualquer uma das bobinas, teremos uma variação de fluxo magnético e o galvanômetro acusará a passagem de uma corrente "i" (figura 6).

b) Se colocarmos um interruptor no circuito da bobina eletricamente alimentada e, através dele, abrirmos e fecharmos o circuito, com ambas as bobinas em repouso, o efeito observado será o mesmo, isto é, teremos uma variação do fluxo magnético e o galvanômetro acusará a passagem de uma corren-

te "i" (figura 7).

FIGURA 6

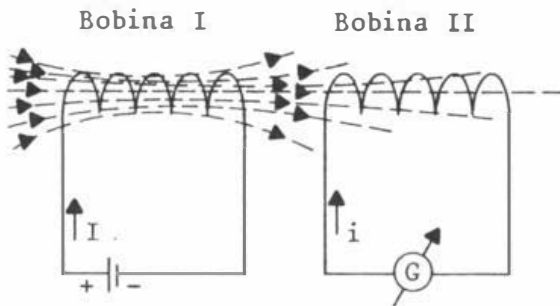
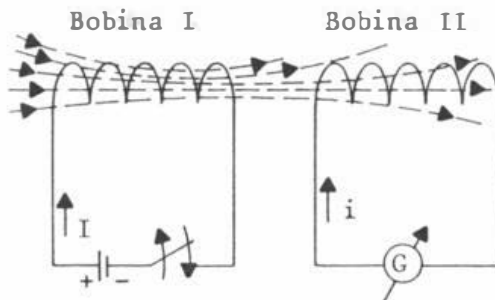
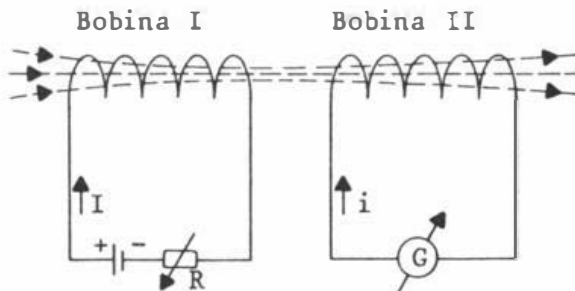


FIGURA 7



c) Podemos ainda introduzir um reostato no circuito da bobina eletricamente alimentada e, através dele, variarmos a corrente nesse circuito, o efeito observado será idêntico aos outros, (figura 8).

FIGURA 8



Em todos os casos apresentados, o fato comum observado foi a variação do fluxo magnético concatenado pela bobina II com o ímã ou com a bobina I. Essa variação, portanto, é que faz surgir na bobina II uma f.e.m. (tensão ou ddp), a qual

obs.: f.e.m. = FORÇA ELETRO MOTRIZ
ddp = DIFERENÇA DE POTENCIAL

ativa a corrente que circula. Assim f.e.m. denomina-se FORÇA ELETRO MOTRIZ INDUZIDA e a corrente, CORRENTE INDUZIDA, como já mencionamos anteriormente.

Quando a f.e.m. é induzida pela variação do fluxo, devido à movimentação relativa entre ímã e bobina ou entre bobinas, é chamada de FORÇA ELETRO MOTRIZ MOTRICIONAL. Podemos citar, como exemplo, os Geradores Eletromecânicos. Quando a f.e.m. é induzida pela variação do fluxo, devido à variação da corrente na bobina I, eletricamente alimentada, é conhecida por FORÇA ELETRO MOTRIZ VARIACIONAL. Como exemplos, temos transformadores, reatores e bobinas de ignição. Assim, o circuito (bobina I) eletricamente alimentado, é chamado de PRIMÁRIO ou INDUTOR e o outro, SECUNDÁRIO ou INDUZIDO.

Convém salientarmos que, se o induzido (bobina II) estiver com seus terminais em aberto, teremos f.e.m. induzida sem circulação de corrente, que voltará a fluir, caso o circuito for fechado novamente.

Importante: "Se houver variação do fluxo magnético, concatenado por um circuito, nele se induzirá uma f.e.m."

LEIS FUNDAMENTAIS DA INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A partir dos experimentos que acabamos de ver, podemos citar as leis que regem a indução eletromagnética.

Lei de Lenz - "A f.e.m. induzida em uma bobina pela variação do fluxo magnético por ela concatenado tende a se opor a essa variação". (o efeito se opõe à causa). Assim, na figura 5, quando aproximamos o ímã da bobina a corrente que se induz nela faz surgir um pólo norte na extremidade superior - da mesma, tentando se opor à aproximação do norte. Quando o ímã é afastado, ocorre o inverso, surge um pólo sul e ocorre a inversão da corrente induzida.

Lei de Faraday - "A f.e.m. induzida em um circuito fechado é igual à taxa de variação em relação ao tempo do fluxo magnético total que enlaça o circuito".

Vamos chamar de "e" a f.e.m. induzida em uma bobina com

N espiras com a taxa de variação do fluxo concatenado, dada por $d\Phi/dt$, de acordo com a lei de Faraday, temos:

$$e = - N \frac{d\Phi}{dt}$$

unidades:

$$\Phi - \text{Weber (Wb)} \quad e = \frac{\text{Wb}}{\text{s}} \quad \text{ou volt(V)}$$

t - segundos (s)

O sinal negativo indica que ambos os sentidos, tanto da f.e.m. como da corrente, são positivos (a regra da mão direita se refere aos sentidos positivos) com relação ao sentido do campo, quando este e, conseqüentemente, o fluxo estiverem diminuindo com o tempo. Esta situação está indicada na figura 3.

Indução mútua

Considere duas bobinas A1 e A2 bem próxima uma da outra, conforme ilustra a figura 9. A bobina A2 está ligada a um galvanômetro e a bobina A1 a uma fonte de tensão que lhe fornece uma corrente i_1 , produzindo, por sua vez, um fluxo Φ_1 e parte deste fluxo enlaça a bobina A2.

Se variarmos a corrente i_1 , o fluxo Φ_1 será variável e o galvanômetro acusará uma corrente i_2 que circulará pela bobina A2.

Os fenômenos da indução mútua verificam-se em circuitos imersos em campos magnéticos gerados por outros circuitos.

Toda vez que, em duas bobinas, variarmos a corrente, em uma delas, verificaremos uma variação do fluxo de indução concatenado com a outra bobina.

Para o nosso caso, na bobina A2, teremos uma f.e.m. induzida a que chamaremos de f.e.m. de mútua indução. Resumindo, podemos dizer que o fenômeno da mútua indução representa a ação que um circuito, percorrido por uma corrente variável, exerce sobre os outros circuitos que se encontram imersos no campo magnético, gerado por ele. Ao circuito que exerce a ação de indução chamaremos de circuito indutor e os outros, de circuitos induzidos.

Este fluxo, que se concatena com o circuito induzido, depende de vários fatores, como: forma, dimensões e sua posição entre os circuitos. Assim sendo, dois circuitos, concatenados por um fluxo de indução, são caracterizados por um fa-

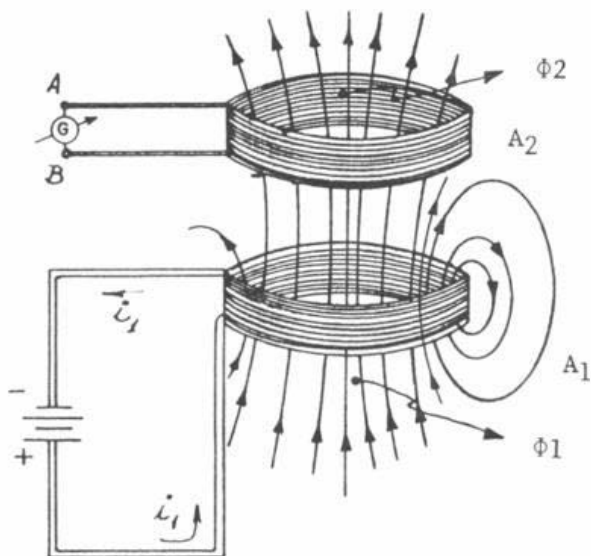


FIGURA 9

tor ou grandeza que determina os fenômenos de mútua indução entre eles, a este fator chamamos de COEFICIENTE DE MÚTUA INDUÇÃO.

AUTO-INDUÇÃO

Consideremos uma bobina com N espiras, na qual circula uma corrente i que cria um campo magnético, determinando um fluxo Φ , o qual é concatenado pela própria bobina (figura 10).

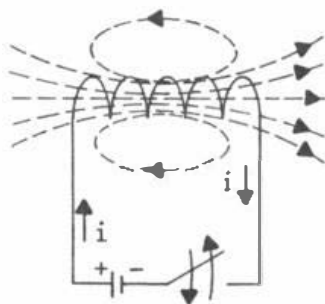


FIGURA 10

O fluxo auto concatenado é proporcional à corrente e um coeficiente, chamado de coeficiente de auto-indução, ou de auto-indutância, ou simplesmente, de indutância, traduz essa proporcionalidade, expressa por:

$$L = \frac{N\Phi}{i}$$

A indutância L de um circuito depende de vários fatores como: o número de espiras da bobina (N), da relutância do circuito magnético, do diâmetro da bobina e do espaçamento entre as espiras, etc.

Se a corrente i for variável com o tempo, o fluxo Φ também será, surgindo então uma f.e.m. induzida na própria bobina. A esse fenômeno damos o nome de "auto-indução" e a f.e.m. de FORÇA ELETRO MOTRIZ AUTO-INDUZIDA".

Vamos então encontrar a expressão de FORÇA ELETRO MOTRIZ AUTO-INDUZIDA".

A indutância é dada por:

$$L = \frac{N\Phi}{i} \rightarrow L \cdot i = N\Phi \quad (I)$$

Como a corrente e o fluxo são variáveis com relação ao tempo, temos que indicar essa variação na expressão I. Assim, podemos expressar a variação da corrente com relação ao tempo, como: di/dt e a variação do fluxo com relação ao tempo, como: $d\Phi/dt$.

Voltando a expressão I anterior, podemos escrever:

$$L \frac{di}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (II)$$

Pela expressão II, temos a variação da corrente e do fluxo com relação ao tempo, mas já vimos que, de acordo com a lei de Faraday, $e = -N d\Phi/dt$ e igualando à expressão II, obtemos:

$$\underbrace{L \frac{di}{dt}}_{\text{expressão II}} = N \frac{d\Phi}{dt} = \underbrace{N \frac{d\Phi}{dt}}_{\text{de acordo com a lei de Faraday}} = -e$$

$$-e = L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt}$$

∴

$$e = -L \frac{di}{dt} \quad \text{III}$$

A expressão final (III) nos mostra que a f.e.m. auto-induzida sempre se opõe a variação da corrente.

Damos o nome de indutor a todo bipolo, onde o efeito de auto-indução é predominante. Considerando um indutor ideal, a f.e.m. auto-induzida será igual à tensão nele aplicada, porém, opostas entre si. Na prática, sempre existem efeitos resistivos e capacitivos a serem considerados, inexistindo, assim, um indutor "IDEAL", isolado.

Se fizermos analogia do indutor com um capacitor (assunto a ser abordado futuramente), veremos que ambos exercem função análoga: o indutor armazena energia magnética e o capacitor, energia elétrica.

UNIDADE DA INDUTÂNCIA

A unidade da indutância é o henry. A indutância pode ser definida, considerando-se um circuito em cujos terminais se induz uma tensão constante e igual a um volt, quando percorrido por uma corrente cuja intensidade varia uniformemente à razão de um ampère por segundo.

Quando utilizamos bobinas muito pequenas, como aquelas usadas na maioria dos rádios atuais, é muito comum o uso de submúltiplos, como: milíhenry e microhenry que equivalem respectivamente à milésima e à milionésima parte de um henry.

Uma bobina X com um número de espiras maior do que uma bobina Y, terá uma indutância mais elevada, visto que as tensões induzidas, produzidas pela bobina X, serão de maior intensidade.

A relutância também está diretamente ligada ao material utilizado no núcleo de uma bobina. Deste modo, quando temos o ferro como núcleo, ao invés de ar, teremos aí um campo

magnético maior, isso porque o ferro tem menor relutância que o ar, conseqüentemente, teremos tensões induzidas maiores do que as das bobinas com núcleo de ar.

É sabido que quanto maior o condutor de uma bobina, maior será sua indutância, ou seja, quanto maior o diâmetro de uma bobina, maior será sua indutância.

Por exemplo, quando temos duas bobinas com 10 espiras cada uma e uma delas com diâmetro de 5cm e outra com diâmetro de 10cm, é evidente que a bobina com diâmetro de 10cm terá o comprimento do condutor maior e conseqüentemente, maior indutância. Veja figura 11.

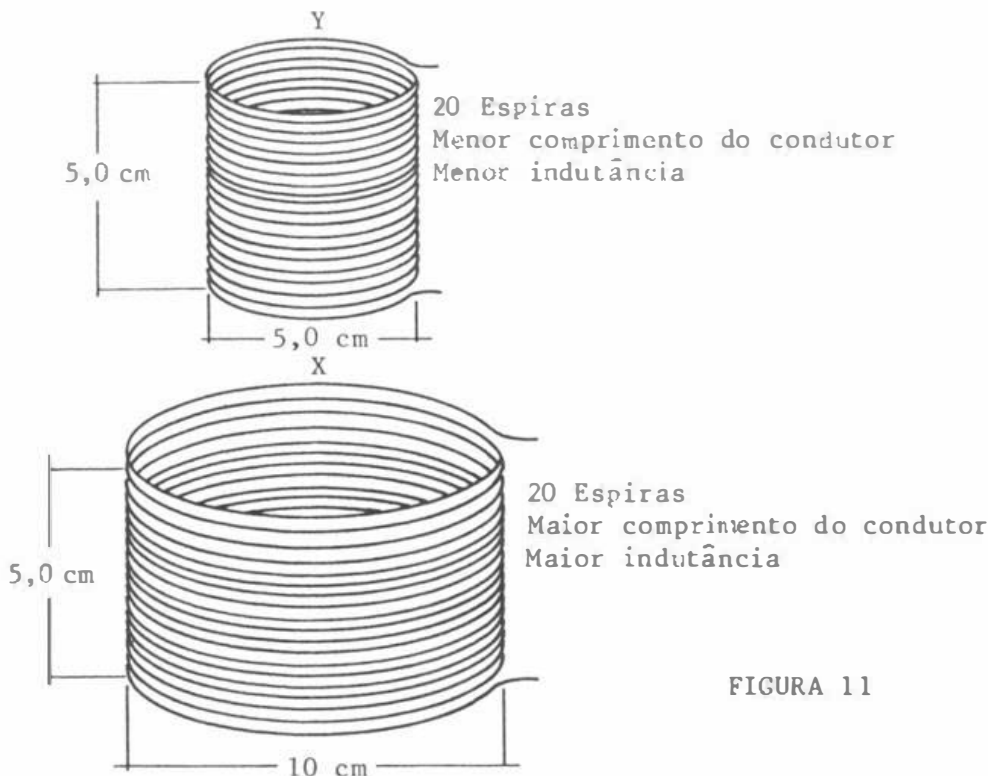


FIGURA 11

Outro fator de que também podemos fazer uso para aumentar a indutância, seria o agrupamento das espiras, COMPACTANDO-AS O MAIS POSSÍVEL. Isso pode ser conseguido através da utilização de fios de secção bem diminuta. Com isso, a indutância será bem maior, porque o campo magnético estará bem mais concentrado, acarretando um aumento da tensão induzida.

CORRENTES DE FOUCAULT

Se um condutor elétrico qualquer sofrer uma variação de fluxo, gera-se no mesmo uma f.e.m.

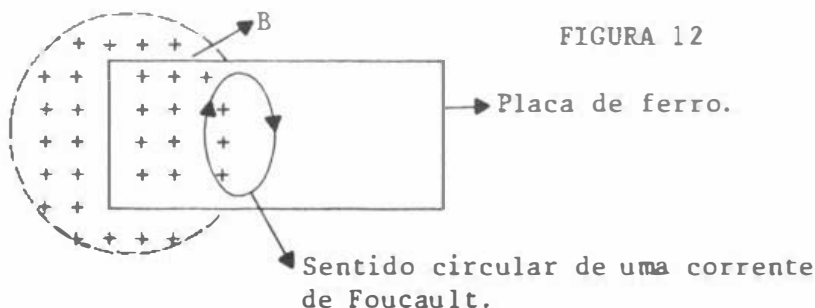
Os geradores elétricos, por exemplo, possuem um circuito induzido, constituído de várias espiras enroladas em forma de bobina, isoladas entre si e isoladas também da estrutura metálica da máquina. À circulação de corrente alternada nesses enrolamentos, cujos núcleos são de material metálico, correspondem as correntes circulantes na massa metálica e a forças eletromotrizes na mesma.

Essas correntes que circulam no interior das massas metálicas, formando caminhos fechados, são chamadas de correntes de Foucault. Manifestam-se sob a forma de calor (efeito Joule) e seu efeito eletromagnético é sempre contrário à causa que as gera (lei de Lenz).

Com o objetivo de reduzir as correntes de Foucault em dispositivos com núcleos de ferro, estes são, geralmente, constituídos de chapas finas ou de lâminas, isoladas eletricamente uma das outras. Com a laminação dos circuitos magnéticos, sujeitos à variação de fluxo, devido a essas correntes, é possível reduzirmos as perdas, a valores toleráveis. A construção de núcleos laminados não prejudica os circuitos magnéticos das máquinas elétricas, visto que o sentido da laminação corresponde ao sentido em que se desenvolve o fluxo magnético. É possível também reduzirmos as correntes de Foucault, aumentando a resistividade do material de que as lâminas são feitas.

Em aplicações eletrônicas, como, por exemplo, em transformadores para uso em radiofrequência, costumam-se empregar núcleos de limalha de ferro.

A explicação do aparecimento dessas correntes pode ser dada, imaginando uma placa de ferro colocada sob a ação de um campo magnético, conforme indica a figura 12.



A variação do fluxo magnético Φ induz, na placa de ferro, uma f.e.m. causando o aparecimento de correntes de Foucault que têm a forma de um círculo. Estas correntes podem apresentar as formas mais variadas possíveis, entretanto sempre implicam numa dissipação de potência elétrica em forma de calor, através do efeito Joule.

HISTERESE

Podemos interpretar a magnetização de uma barra de ferro, como sendo um fenômeno de orientação molecular. A função da corrente magnetizante é criar um campo magnético que, agindo sobre as moléculas de ferro, as orienta contra a ação da agitação térmica que tende a desordená-las. Se o estado de magnetização de um núcleo de ferro variar continuamente, ocorrerá, então, um fenômeno semelhante ao atrito interno entre as moléculas, que ocasionará uma dissipação de energia sob a forma de calor. Esse fenômeno dá-se o nome de histerese.

EFEITO CORTICAL (SKIN EFFECT)

A resistência elétrica que um condutor ou um cabo oferece à circulação de correntes alternadas é maior que a oferecida pelo mesmo condutor à passagem de corrente contínua.

A corrente alternada origina fluxos magnéticos alternados que, por sua vez, induzem f.e.m., também alternadas, no próprio condutor. Essas forças eletromotrizes induzidas (f.e.m.) ocasionam uma distribuição irregular de corrente no condutor, verificando-se uma densidade de corrente maior na periferia do condutor e menor na parte central do mesmo. Nos cabos alimentados por corrente contínua, onde a distribuição de corrente é uniforme, isto não ocorre. A este fenômeno denominamos cortical ou pelicular (SKIN EFFECT). Quanto maior for a seção do condutor e mais elevada a frequência da corrente, maior será sua intensidade, variando ainda com a temperatura do condutor.

Uma maneira de reduzirmos o efeito pelicular, é através do emprego de vários condutores ligados em paralelo, em cabos separados ou no mesmo cabo. Também é possível com o emprego de condutores de cobre ou alumínio torcidos sobre um tubo, formado por uma espiral de aço.

PERDAS NO COBRE E NO FERRO

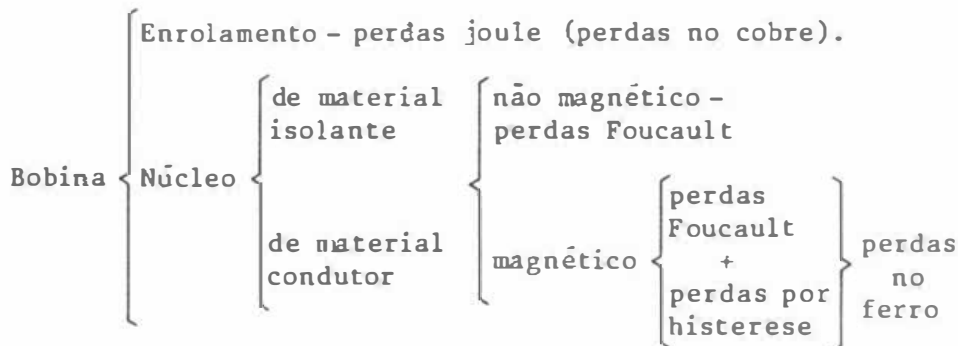
O cobre é o condutor mais utilizado na fabricação de bobinas em geral. Quando percorrido por uma corrente elétrica, verificam-se perdas nesse condutor sob a forma de calor (efeito Joule), as quais são geralmente designadas como perdas no cobre.

Numa bobina, cujo núcleo é constituído de material ferro magnético, quando o condutor for percorrido por uma corrente contínua de intensidade constante, não haverá perdas relevantes. Entretanto, quando a corrente for contínua, porém variável, temos, além das perdas no cobre, perdas no núcleo magnético, que tende a aquecer-se. Esse fenômeno é mais acentuado com correntes alternadas e será tanto maior, quanto mais alta for a frequência destas correntes.

Os núcleos magnéticos, em geral, são construídos a partir de ligas, cujo constituinte principal é o ferro. Devido a esse fato, tais perdas são denominadas de perdas no ferro. Entre elas, podemos distinguir as perdas, devido à circulação de correntes induzidas no interior da massa ferromagnética - (perda Foucault) e as outras devido, ao fenômeno da histerese, chamadas de perdas por histerese.

Em núcleos que possuem uma espessura muito grande, ocorre ainda o aparecimento do efeito pelicular (SKIN EFFECT), que tende a aumentar ainda mais as perdas no ferro e no cobre.

Sintetizando, podemos considerar as seguintes perdas para uma bobina.



INDUTÂNCIA APLICADA EM UM CIRCUITO DE C.A.

Vamos analisar o comportamento da indutância, quando uma bobina estiver sendo percorrida por corrente alternada. Já vimos que só temos indução eletromagnética, quando variamos a corrente. (Isso foi mostrado anteriormente ao fecharmos e abrirmos a chave de um circuito alimentado por corrente contínua).

Como os circuitos alimentados por corrente alternadas são tão sujeitos a variações de intensidade e de direção continuamente, a indutância, então, tem fundamental importância em circuitos de C.A., visto que, na maioria dos casos, a oposição que uma bobina apresenta à passagem de corrente alternada, tem como agente principal a indutância e não a resistência da bobina, como muitos podem imaginar.

A figura 13 ilustra o comportamento de uma bobina, quando percorrida por corrente alternada.

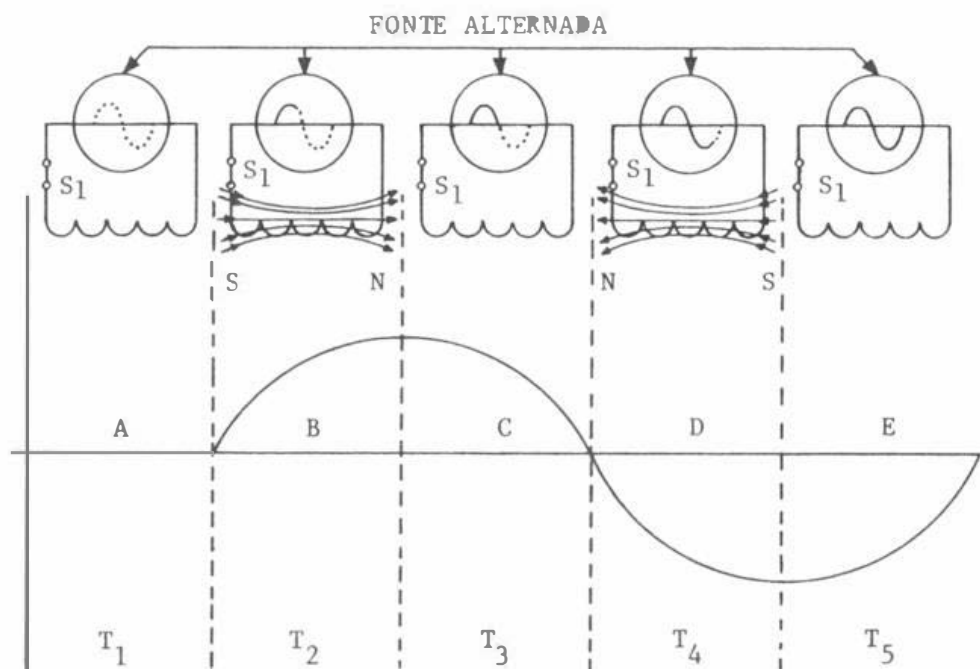


FIGURA 13

De acordo com a figura, podemos visualizar o que ocorre em diversos instantes de um ciclo de C.A.

No primeiro instante do ciclo, não há nenhuma tensão gerada, portanto, não temos passagem de corrente.

Logo no segundo instante, a tensão do gerador já se manifesta, temos uma corrente elétrica através da bobina, acarretando o aparecimento da força contra eletromotriz, que tende a se opor à corrente, inicialmente, produzida pelo gerador. Como a tensão fornecida pelo gerador é bem maior que a f.c.e.m. apresentada, surge um campo magnético, conforme ilustra a figura 13B.

No terceiro instante, a tensão começa a cair, conforme mostra a figura 13C, Conseqüentemente, a corrente diminui, porém a força contra eletromotriz tende a se opor à diminuição da corrente, retornando ao circuito a energia magnética do campo que havia sido criada em forma de tensão induzida. Quando a tensão do gerador chega a zero, a f.c.e.m. também desaparece e não temos campo magnético.

Após se anular, a tensão do gerador começa a se elevar novamente, só que em sentido contrário, fazendo com que a direção da corrente da bobina seja inversa e o campo magnético de polaridade oposto àquele visto anteriormente. Da mesma forma, a tensão do gerador vence a f.c.e.m. e o campo magnético alcança novamente uma intensidade máxima (figura 13D).

Com isso, após um ciclo, os instantes: T1, T2, T3, T4, T5 voltam a se repetir indefinidamente, até que se desligue o gerador.

Em suma, podemos dizer que o campo magnético que surge após o aparecimento da corrente elétrica está variando continuamente de polaridade e de intensidade. Isto quer dizer que existe, em todos instantes de um ciclo, uma f.c.e.m. que se opõe à tensão aplicada e que tem, como função, evitar que a corrente, que circula na bobina, varie de intensidade.

A oposição à passagem de corrente alternada em um circuito, apresentada por uma bobina, devido às tensões induzidas, se manifesta em todos os instantes.

A esta oposição, que a indutância de uma bobina apresenta à passagem de corrente alternada, denominamos de reatância indutiva, a qual depende da indutância da bobina e da frequência da corrente alternada, aplicada na mesma.

A reatância indutiva pode ser calculada a partir da indução
obs.: f.c.e.m. = FORÇA CONTRA ELETROMOTRIZ

tância da bobina e da frequência da C.A. E é expressa em ohms, como a resistência elétrica de um circuito qualquer.

EFEITO DA FREQUÊNCIA SOBRE A REATÂNCIA INDUTIVA

A reatância indutiva de uma bobina depende da variação - da intensidade da corrente que circula por ela. Quanto maior for a variação da corrente, maior será a f.c.e.m. desenvolvida e mais elevada será a reatância indutiva que a bobina apresenta à passagem de uma corrente alternada.

Vamos considerar um gerador qualquer de C.A. movido por um motor, conforme ilustra a figura 14.

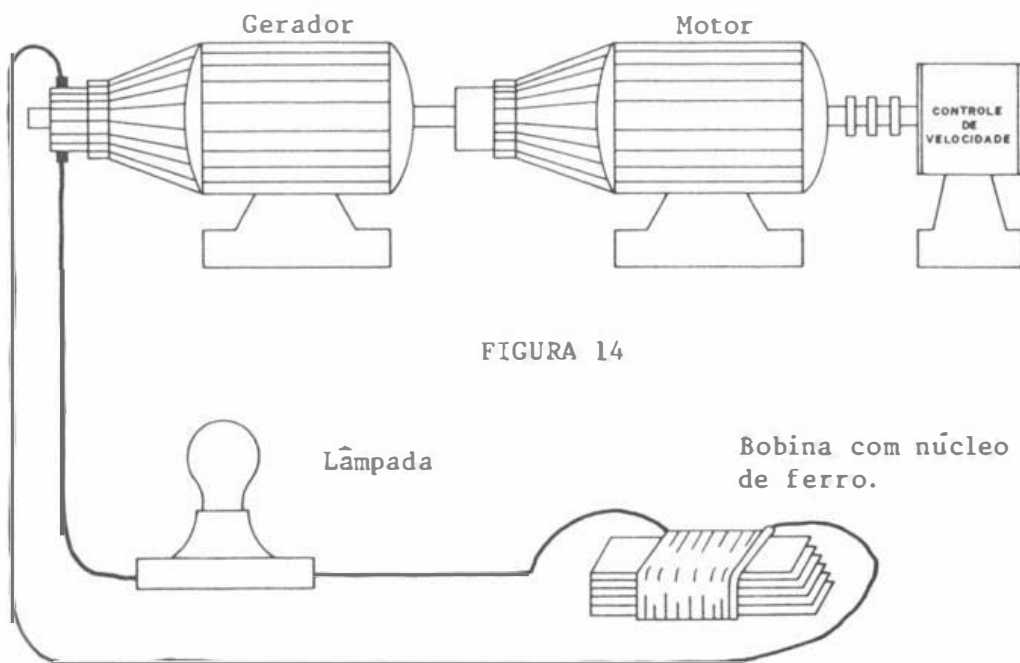


FIGURA 14

A seguir, ajustamos o controle de velocidade do motor de tal forma que a frequência da corrente alternada seja 60Hz. Ligamos ao gerador uma lâmpada em série a uma bobina com núcleo de ferro. Verificaremos então, que a lâmpada se acende fracamente. Se aumentarmos a velocidade do motor de tal forma que se eleve a frequência do gerador para um valor maior que 60Hz, por exemplo, 100Hz, notaremos que a lâmpada estará quase apagada,

praticamente sem luminosidade alguma. Isso ocorre, porque as variações da corrente são muito rápidas e a reatância indutiva da bobina aumentou consideravelmente, reduzindo de tal forma a passagem da corrente a ponto de não ser suficiente para acender o filamento da lâmpada. Concluimos, então, que a reatância indutiva de uma bobina aumenta, quando aumenta também a frequência da C.A.

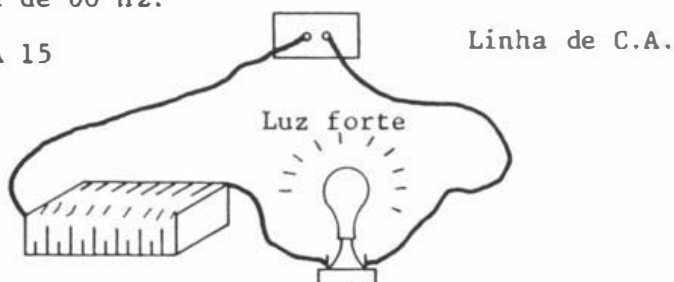
Se diminuirmos a velocidade de rotação do motor, a lâmpada da começará acender novamente, aumentando de intensidade, à medida que diminuimos a frequência da C.A. Isso quer dizer que a f.c.e.m., induzida na bobina, diminui, à medida que diminuimos a frequência e aumenta, à medida que elevamos o valor da frequência da C.A.

Devemos ter sempre em mente que a indutância de uma bobina é fixa, porém a sua reatância indutiva depende sempre da frequência da C.A. aplicada. O cálculo da reatância indutiva será estudado em lições posteriores.

EFEITO DA CORRENTE ALTERNADA SOBRE UMA BOBINA DE NÚCLEO DE AR

Considere a figura 15, onde temos uma bobina com 80 a 120 espiras de fio esmaltado, em série com uma lâmpada elétrica, alimentada pela rede de C.A. de 60 Hz. Como a bobina não tem núcleo de ferro, a lâmpada irá se acender fortemente, porém com um pouco menos de luminosidade que o normal, devido à indutância da bobina não ser suficiente para que a reatância indutiva reduza a intensidade da corrente que circula pela bobina. Isso nos leva a concluir que uma bobina de núcleo de ar possui uma reatância indutiva que não é muito alta para uma frequência de 60 Hz.

FIGURA 15



Bobina com núcleo de ar.

Lâmpada em série.

BOBINAS DE INDUÇÃO

As bobinas de indução possuem ampla aplicação e uso. Empregam-se geralmente nos motores de automóveis e são conhecidas como bobinas de ignição.

A figura 16 ilustra o aspecto de uma dessas bobinas.

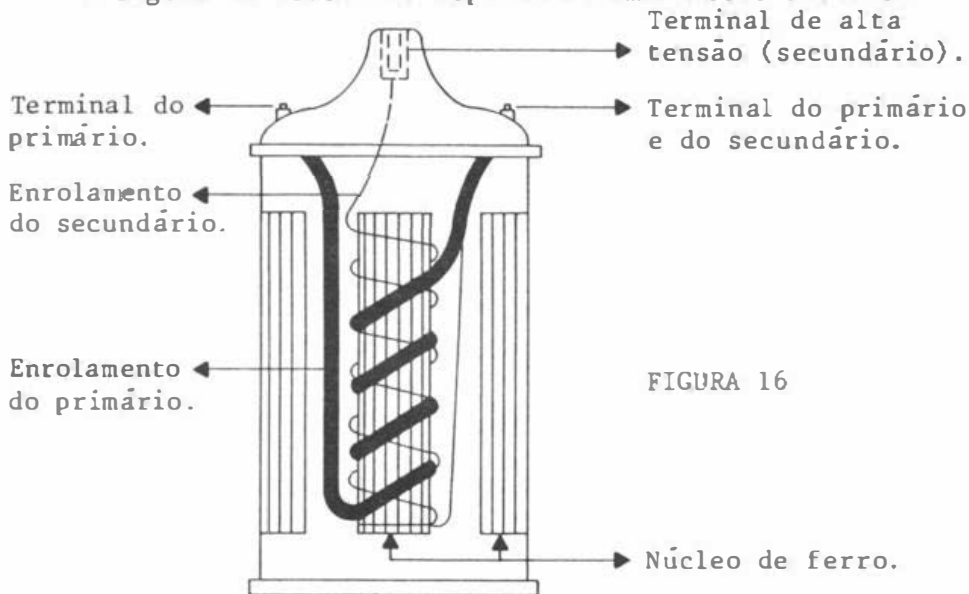


FIGURA 16

Observando a figura anterior, notamos que o enrolamento primário é feito com um fio de bitola maior e com um número de espiras menor que o enrolamento secundário. Com isso, a tensão de saída do secundário será mais elevada que aquela aplicada ao primário.

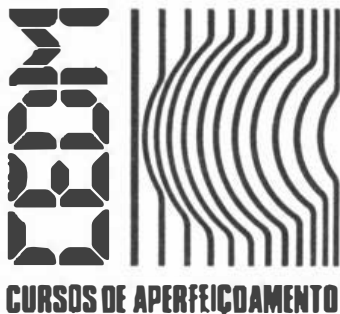
A relação de espiras entre os enrolamentos primário e secundário é proporcional ao aumento de tensão da bobina de indução. Seja, por exemplo, um enrolamento primário com 10 espiras e o enrolamento secundário com 1000 espiras. A proporção do número de espiras será de $10/1000$ (1 para 100). Com isso, a tensão de saída do secundário será 100 vezes maior que a tensão do primário.

Os motores de automóveis, em geral, utilizam esse tipo de bobina, onde o secundário tem um tal número de espiras, comparando-se com o primário, que a tensão do secundário alcança um valor instantâneo de tensão de até 8000 volts, sendo que o primário é alimentado em 6 volts apenas. A relação de espiras nas bobinas de ignição é de fundamental importância.

Acabamos de verificar que a tensão que aparece no secundário da bobina é bem maior que a tensão aplicada no primário. No entanto, a corrente disponível no secundário não passa de alguns miliampêres. Por outro lado, a corrente no primário é bem alta, devido à resistência do fio ser menor. Por isso, a potência de entrada e a de saída serão praticamente iguais se não considerarmos as perdas nos enrolamentos. Por exemplo, vamos supor que o enrolamento primário da nossa bobina seja alimentado por uma tensão de 6 volts, com uma corrente de 12 ampêres. E a potência elétrica em watts, aplicada no enrolamento primário, seja de: $6 \times 12 = 72$ watts ($P = V.I$). E no enrolamento secundário, tenhamos uma tensão induzida de 6000 volts, porém com uma corrente de 12 miliampêres. A potência disponível no secundário será então, de: $6000 \times 12 \times 10^{-3} = 72$ watts ($P = V.I$), igual àquela aplicada no enrolamento primário da bobina.

Devido a esse fato a energia de que dispomos no secundário não é maior que a aplicada ao primário. Embora o aumento da tensão seja elevado, a corrente diminui sensivelmente.

Teoricamente vimos que as potências de entrada e de saída serão iguais, entretanto, na prática, isso não se verifica, pois, no interior do núcleo da bobina, temos perdas Foucault e por histerese, que são as perdas do ferro, além da perda Joule nos enrolamentos das bobinas.



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-6

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Quando falamos em indução eletromagnética, referimo-nos:
 - a) à geração de magnetismo através da eletricidade;
 - b) à produção de eletricidade através de um campo magnético;
 - c) à geração de corrente alternada através da corrente contínua;
 - d) à geração de corrente contínua através da corrente alternada.

- 2) A indução eletromagnética existe todas as vezes em que num condutor:
 - a) temos variação do fluxo magnético;
 - b) temos um fluxo magnético constante;

- c) existe mudança de tensão alternada para tensão contínua;
- d) as alternativas anteriores estão incorretas.

3) A corrente induzida aparece quando:

- a) um condutor é atravessado por um fluxo variável;
- b) um condutor é atravessado por um fluxo constante;
- c) o condutor é colocado em um circuito, alimentado por uma corrente que não varia;
- d) as alternativas a e b estão corretas.

4) Corrente de Foucault vem a ser:

- a) a corrente de magnetização de uma bobina;
- b) a corrente elétrica devido à indução eletromagnética em uma barra de ferro;
- c) a corrente instantânea de uma bobina;
- d) a corrente de magnetização de um material qualquer, devido a sua alta resistividade.

5) Para aumentar a indutância de uma bobina basta:

- a) aumentar o número de espiras;
- b) diminuir o número de espiras;
- c) diminuir o diâmetro da bobina;
- d) aumentar o espaçamento entre as espiras.

6) Quando compactamos uma bobina ocorre:

- a) um aumento da indutância;
- b) uma diminuição da indutância;

- c) a indutância se mantém constante;
- d) as alternativas anteriores estão incorretas.

7) Quando aplicamos C.A. em uma bobina ocorre:

- a) um aumento na indutância;
- b) uma variação contínua no campo magnético, produzido pela bobina;
- c) uma diminuição do campo magnético em relação à aplicação de C.C.;
- d) uma diminuição na reatância indutiva.

8) Quando temos uma bobina com núcleo de ar, ocorre que:

- a) a indutância é muito alta, tendo grande aplicação na eletrônica;
- b) a indutância é muito pequena, sendo utilizada, em grande escala, em rádios receptores;
- c) não tem grande significado, pois a indutância varia;
- d) a indutância se mantém constante por um período de tempo bem pequeno.

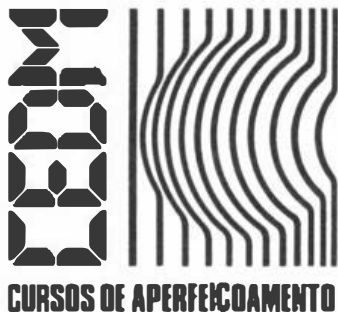
9) O efeito pelicular ou Skin Effect é mais acentuado quando:

- a) a seção do condutor é pequena e a frequência bem elevada;
- b) a seção do condutor e a frequência forem elevados;
- c) os condutores são ligados em paralelo e torcidos entre si;
- d) o condutor é alimentado em corrente contínua.

10) A reatância indutiva de uma bobina depende sempre:

- a) da tensão aplicada aos terminais da bobina;

- b) do valor da indutância, que é sempre variável;
- c) da frequência da corrente alternada, pois quanto mai
or a frequência, maior será a reatância indutiva;
- d) N.R.A.



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

LIÇÃO E-7

FUNDAMENTOS SOBRE SEMICONDUTORES - I

INTRODUÇÃO

O aparecimento do diodo de emissão termoiônica, em 1902, desenvolvido por J. A. Fleming, é tido como o marco inicial da indústria eletrônica.

A partir desta descoberta, muitas mudanças ocorreram: as válvulas evoluíram, surgiram os triodos, os pentodos e outras.

Com o passar do tempo e com o avanço tecnológico, as válvulas sofreram uma redução em seu tamanho físico, porém tornaram-se mais robustas e eficientes. Mas foi em junho de 1948, que dois cientistas americanos, John Bardeen e Walter Brattain, revolucionaram a indústria eletrônica com a descoberta dos transistores. Estes passaram a substituir as válvulas quase que totalmente e com muito mais vantagem.

Surgiram então os "dispositivos de estado sólido", também conhecidos por "dispositivos semicondutores" cujo funcionamento é regido pela física dos semicondutores. Os dispositivos semicondutores mais sofisticados são os "circuitos integrados". Tais dispositivos chegam a substituir não só partes de um circuito eletrônico discreto, como também circuitos completos ou partes inteiras de equipamentos e sistemas.

Todavia existem ainda algumas áreas em que os dispositivos semicondutores não podem substituir as válvulas, como, por exemplo, em circuitos de alta potência e rádio frequências altas, porém, com o avanço tecnológico, essas limitações poderão ser superadas.

Para melhor entendermos o que vem a ser uma substância semicondutora e, posteriormente, compreendermos melhor as características dos dispositivos semicondutores, faremos, inicialmente, uma breve revisão sobre a constituição da matéria, para então passarmos ao estudo das substâncias semicondutoras, mais especificamente do germânio (Ge) e silício (Si), nos quais se assentam, quase que totalmente, as bases da eletrônica moderna.

CONSTITUIÇÃO DA MATÉRIA

Observemos uma gota de água e imaginemos que esta gota se divida em duas partes iguais e estas duas em quatro e assim, sucessivamente. Então perguntamos: Será possível reparti-la infinitas vezes em porções cada vez menores, sem que esta deixe de ser água? A resposta é não! Mas por quê? Porque todas as substâncias, ou seja, os diferentes tipos de matéria apresentam uma porção mínima que ainda retém as suas propriedades, porém, se dividirmos esta mínima porção, iremos obter os átomos dos elementos que a compõem. Esses átomos, por sua vez, não mais conservarão as propriedades do material subdividido. No caso da gota d'água, os átomos de hidrogênio e oxigênio não conservarão as propriedades da substância água. A essa mínima porção da substância que ainda retém as suas propriedades chamamos de MOLÉCULA DA SUBSTÂNCIA.

Se pudéssemos observar uma molécula de água, veríamos que ela é composta de três elementos, sendo dois iguais e um diferente. Estes elementos não estão livres dentro da molécula, mas sim ligados por certas forças que não nos interessam no momento. A estes elementos, chamamos de ÁTOMOS. Na água, por exemplo, são dois átomos de HIDROGÊNIO e um de OXIGÊNIO, conforme vemos na figura 1.

Na figura 2 temos uma outra representação da molécula de água, na qual poderemos observar melhor as ligações entre os dois átomos de hidrogênio com o de oxigênio.

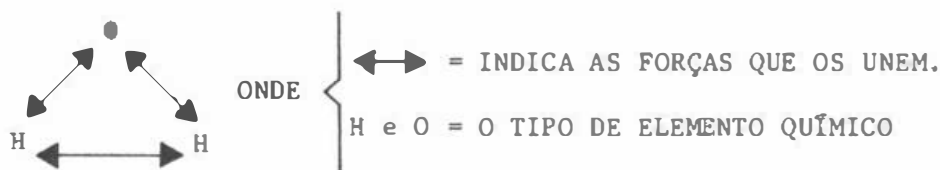
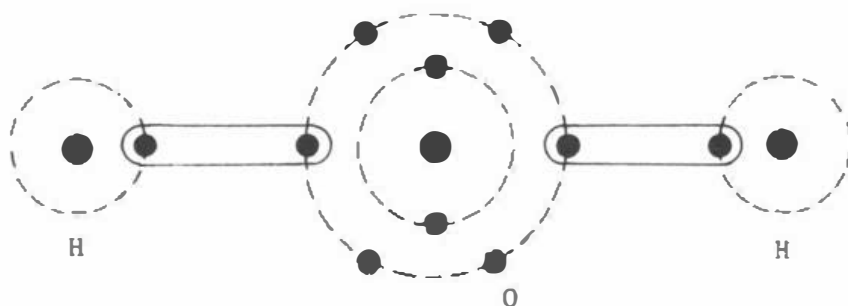


FIGURA 01

Figura 1 — Quimicamente seria H_2O ou simplesmente H_2O a representação da molécula de água.

Em toda a face da Terra, até hoje, foram encontrados 92 elementos naturais. Temos ainda alguns elementos artificiais, criados pela tecnologia moderna, como, por exemplo, o plutônio, utilizado na construção da bomba atômica. Todos os materiais encontrados na natureza, não passam de combinações entre estes elementos.

FIGURA 02



Se nos reportarmos à lição El, encontraremos lá uma tabela periódica na qual estão ordenados, de acordo com suas características, todos os elementos naturais e artificiais.

ESTRUTURA DO ÁTOMO

A palavra átomo provém do grego e etimologicamente signi

fica "não divisível". Este conceito foi atribuído ao átomo, pois pensava-se ser impossível dividi-lo.

Hoje, ele é considerado como a menor partícula componente da molécula. Porém a idéia de que o átomo é indivisível, não tem mais validade, pois sabemos, através de inúmeros estudos realizados pela física nuclear, que isso é possível.

O átomo é constituído de três partículas básicas: Prótons, Nêutrons e Elétrons, sendo que os dois primeiros constituem o núcleo do átomo, enquanto que os elétrons giram em torno do núcleo, em órbitas concêntricas. Esta configuração do átomo é chamada de modelo planetário do átomo. Se fizermos uma analogia com o sistema solar, teríamos o núcleo do átomo (sol) formado por um agrupamento de prótons e nêutrons caracterizadores da massa do átomo. E os elétrons (planetas) girariam ao redor do núcleo numa região chamada eletrosfera, em altíssima velocidade. Elétrons e prótons possuem cargas elétricas iguais, porém de sinais contrários (prótons, carga elétrica positiva; elétrons, carga elétrica negativa), enquanto que os nêutrons são desprovidos de carga elétrica.

No átomo, os elétrons se apresentam em camadas (ou níveis de energia), em número de 7, representadas, em ordem decrescente de energia por: K, L, M, N, O, P, Q. Para cada um desses níveis (camadas) existe um número máximo de elétrons, a saber:

<u>Nível</u>	<u>Nº de elétrons</u>
K	02
L	08
M	18
N	32
O	32
P	18
Q	08

Obs.: A camada K é a de maior energia (os elétrons estão rigidamente ligados ao núcleo), enquanto que a camada Q é a de menor energia (os elétrons estão fracamente ligados ao núcleo).

Desta forma, um átomo de germânio que possui número atômico 32, teria seus elétrons assim distribuídos:

<u>Nível</u>	<u>Nº de elétrons</u>
K	02
L	08
M	18
N	04
	32

Note que o nível N não está completo. A figura 3 nos mostra como ficaria esta distribuição, segundo o modelo planetário.

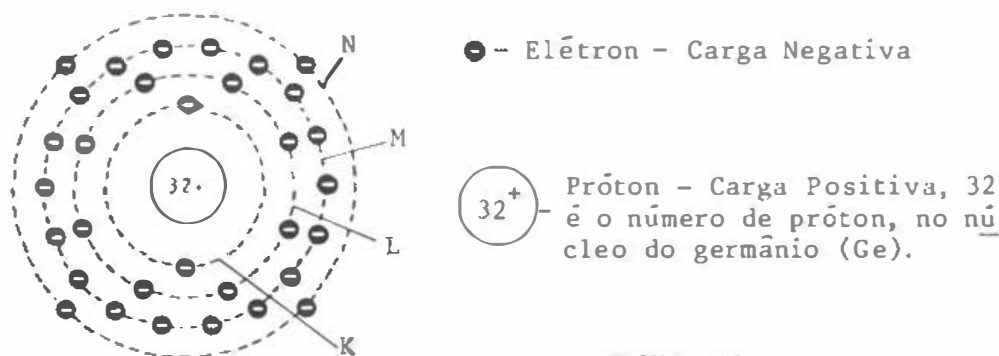


FIGURA 03

ÁTOMO DE GERMÂNIO

A última camada é também conhecida por camada de valência e, quando completa, apresenta um total de 8 (oito) elétrons, os quais recebem o nome de "Elétrons de Valência". São eles que participam das reações químicas e dos fenômenos elétricos. Como todos os sistemas físicos que procuram uma situação, na qual possam ser estáveis, o átomo, como sistema físico, também procura esta situação de estabilidade. Desta forma, a estrutura mais estável para um átomo é aquela em que há 8 elétrons na camada de valência (Regra do octeto). Por exemplo, no caso de um átomo apresentar na última camada apenas 2 elétrons, toda reação química da qual ele vier participar, será em função de atingir esta estabilidade. Caso o átomo apre-

sente apenas 1 elétron na camada K, ele buscará estabilidade de maneira a preencher esta camada, ou seja, 2 elétrons.

ÍONS POSITIVOS E NEGATIVOS

Um átomo, quando eletricamente neutro, possui o número de prótons igual ao número de elétrons, mas poderá, por razões do meio externo, ganhar ou perder elétrons. Quando ele ganhar elétrons, ficará com o seu número de elétrons maior que seu número de prótons, transformando-se assim num íon negativo. Se, ao contrário, perder elétrons, ficará com o seu número de prótons maior que o seu número de elétrons, transformando-se assim em íon positivo. E esse fenômeno de ganhar ou de perder elétrons que se dá com o átomo, ocorre normalmente na camada de menor energia do átomo, ou seja, na camada de valência.

TABELA I

NOME DO ELEMENTO	SÍMBOLO QUÍMICO	NÚMERO DE PRÓTONS	NÚMERO DE ELÉTRONS	NÚMERO DE NÊUTRONS	ELÉTRONS DE VALÊNCIA
Hidrogênio	H	1	1	0	1
Hélio	He	2	2	2	2
Sódio	Na	11	11	12	1
Fósforo	P	15	15	15	5
Cloro	Cl	17	17	18	7
Germânio	Ge	32	32	40	4
Silício	Si	14	14	14	4

Obs.: Os átomos que possuem maior facilidade em ganhar elétrons e assim tornarem-se íon negativo, são os que têm 5, 6 e 7 elétrons na camada de valência. Já aqueles que possuem 1, 2 e 3 elétrons, a tendência é doar e são denominados íons positivos. No caso do Germânio e do Silício, os quais possuem 4 elétrons na camada de valência, normalmente nem recebem e nem doam elétrons. Temos ainda, os átomos que não participam de reações químicas e têm na última camada 8 elétrons (ou 2 elétrons, como por exemplo, o Hélio).

Com relação à tabela I, observe ainda que todos os elementos que possuem o número de prótons igual ao de elétrons, são eletricamente neutros ou simplesmente neutros.

LIGAÇÕES QUÍMICAS

A forma pela qual os átomos se agrupam para compor a molécula de uma substância, dá-se o nome de LIGAÇÕES QUÍMICAS.

Os elétrons da camada K (fig. 3) estão rigidamente ligados ao núcleo e precisarão de uma elevadíssima energia para que possam escapar do átomo. Mas à medida que as camadas vão se afastando do núcleo, os elétrons vão ficando mais fracamente ligados a ele e são justamente os elétrons mais afastados do núcleo que normalmente tomam parte nas reações químicas, por serem estes os que mais facilmente se deslocam.

O átomo procura "reagir", quimicamente, para passar de uma configuração instável para outra mais estável.

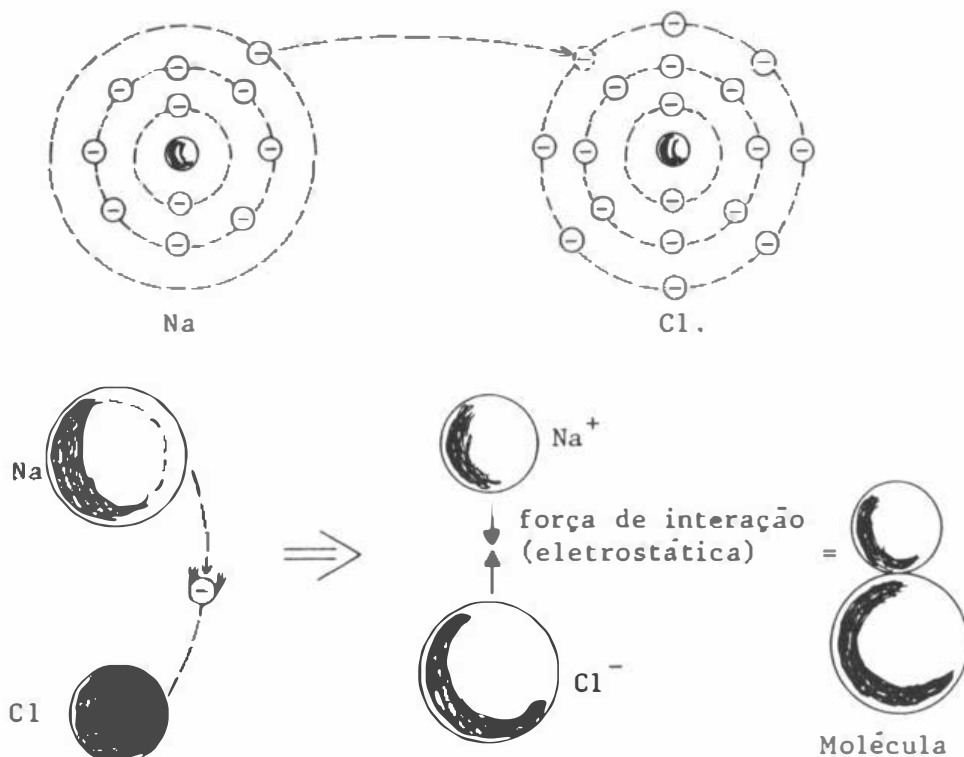
Ligação iônica:

Este tipo de ligação ocorre sempre que alguns átomos perdem elétrons, transformando-se em íons positivos (cátions), enquanto outros átomos ganham esses elétrons, transformando-se em íons negativos (ânions). Vejamos, a seguir, como ocorre a reação de um átomo de cloro com um átomo de sódio. O átomo de sódio (Na) possui número atômico igual a 11 e o átomo de cloro (Cl) igual a 17. Vamos fazer a distribuição dos elétrons por camada:

	K	2		K	2	
Na (11)	— L	8		Cl (17)	— L	8
	M	1			M	7
		<u>11</u>				<u>17</u>

O átomo de sódio (Na) possui 1 elétron na última camada enquanto, que o de cloro possui 7. Neste caso, o Na cede 1 elétron para o Cl, tornando-se, desta forma, um íon positivo, enquanto que o Cl recebe (ganha) 1 elétron, transformando-se, assim, em um íon negativo. A figura 4 ilustra o "encontro" desses átomos que dão origem ao cloreto de sódio ($\text{Na}^+ \text{Cl}^-$), mais conhecido por sal de cozinha.

FIGURA 04



A força que mantém o cátion (Na^+) unido ao ânion (Cl^-) é de natureza puramente eletrostática. Note que ambos os átomos (Na e Cl) atingiram uma configuração mais estável. Resumidamente, podemos dizer que a ligação iônica ocorre, quando se liga um metal com um não metal. Este tipo de ligação não dá origem a uma molécula de NaCl, mas sim a um "cristal" de NaCl.

Ligação covalente:

Esta ligação ocorre, quando houver um emparelhamento de elétrons, ou seja, um par de elétrons torna-se comum a dois

átomos. A ligação covalente é responsável pela formação das substâncias moleculares. A principal característica de diferenciação entre um composto iônico e um molecular é que, no estado líquido, o composto iônico conduz corrente elétrica e o molecular não conduz.

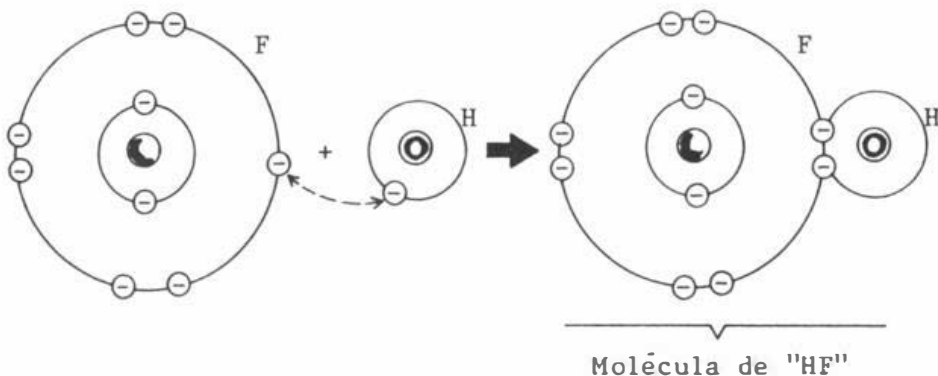
O emparelhamento ocorre por que ambos os átomos formam um sistema com menor energia, ou seja, com maior estabilidade. A figura 5 ilustra este tipo de ligação entre um átomo de fluor (F) e um átomo de hidrogênio (H). O fluor possui número atômico 9 e o hidrogênio 1.

Vamos distribuir os elétrons por camadas:

	K	2		H (1)	—	K	1
F (9)	—	L	7				

Neste caso, o fluor precisa de um elétron para se tornar estável e o hidrogênio também. Mas um não consegue "roubar" o elétron do outro, então ambos passam a compartilhar de um par de elétrons, como se fossem uma sociedade.

FIGURA 05



Antes de tratarmos diretamente do assunto semicondutor, faz-se necessário um pequeno comentário sobre condutores e isolantes.

Condutores, Isolantes e Semicondutores:

São denominações atribuídas aos materiais existentes na natureza quanto ao aspecto correspondente à condução de corrente elétrica. Na verdade, o que há de diferente nos materiais é que alguns oferecem menos resistência à passagem da energia elétrica que outros. Para que isso pudesse ser medido, a física criou uma grandeza elétrica, chamada resistividade, que indica a resistência elétrica, em OHMS (Ω) que um determinado material oferece, por unidade de comprimento (1m), à temperatura de 20 °C. Na página 2 da lição MP-1, encontra-se a resistividade de vários materiais.

a) Condutores — São materiais que possuem elétrons livres, em grandes quantidades (os elétrons de valência estão fracamente ligados ao núcleo) e por apresentarem baixa resistividade deixam de proporcionar oposição à passagem de corrente elétrica. Quanto maior for o número de elétrons livres presentes no material, maior será o fluxo de corrente pelo mesmo, quando submetido a uma diferença de potencial. Como exemplo de condutores, podemos citar o ouro, prata, cobre, alumínio e outros. Para os materiais condutores, um aumento de temperatura provoca um aumento da resistividade.

b) Isolantes — Os elétrons de valência nos materiais isolantes acham-se fortemente presos ao núcleo dos átomos. Raramente são os elétrons que têm capacidade de se desprender de seus átomos e tornarem-se elétrons livres. Esses materiais possuem uma resistividade muito elevada, dificultando, assim, a passagem de corrente elétrica, quando submetidos a uma diferença de potencial. Como exemplo, podemos citar a borracha, a mica, a porcelana, vidro, etc.

c) Semicondutores — São elementos cuja resistividade situa-se entre a dos condutores e a dos isolantes, conseqüentemente, conduzem mais que os isolantes e menos que os condutores.

Os principais semicondutores, utilizados na indústria eletrônica são o germânio (Ge) e o silício (Si), os quais, em estado puro, apresentam seus átomos dispostos uniformemente em uma configuração periódica, ou seja, sob a forma cristalina. Uma outra característica dos semicondutores é que, sob a

influência da temperatura, eles se comportam exatamente ao contrário dos condutores, isto é, à medida que a temperatura aumenta, a resistividade deles diminui.

Germânio (Ge) e silício (Si):

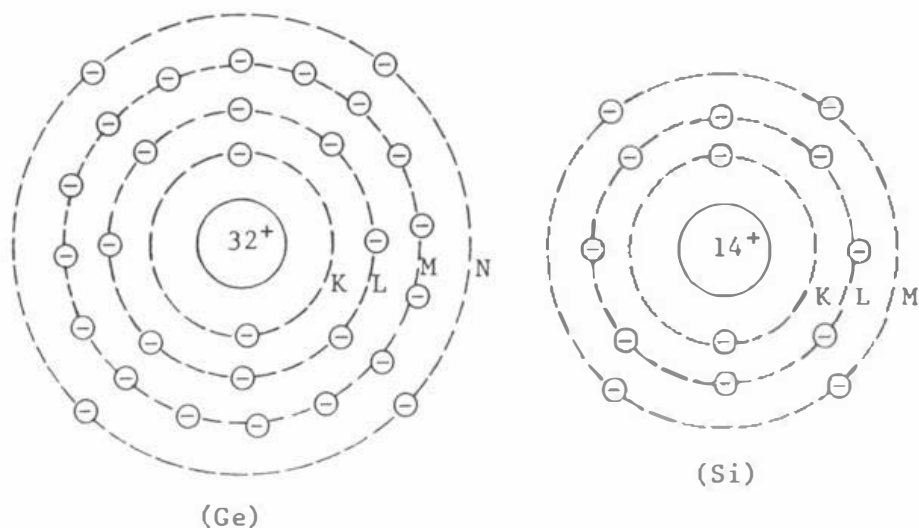
O germânio (Ge) foi descoberto por Winkler, em 1885. Trata-se de um elemento branco, acinzentado que pode ser obtido das cinzas de certos tipos de carvão, sob a forma de pó de dióxido de germânio. Possui brilho metálico, semelhante ao do estanho e se funde a 960° centígrados. Arde no ar, por isso é necessário fundi-lo no vácuo ou numa atmosfera inerte. Quando extraído das minas, o germânio vem misturado com grande quantidade de impurezas, mas, através de processos de purificação, chega-se a obter graus de purezas da ordem de 99,99999999%. O germânio possui número atômico 32, ou seja, possui 32 elétrons girando em torno de seu núcleo.

O silício (Si) já conhecido pelos antigos alquimistas, ocupa o segundo lugar na escala de abundância na crosta terrestre (26%), porém não ocorre no estado livre. Em 1823 o físico sueco Berzelius conseguiu isolá-lo, sob a forma de dióxido de silício. Aparece, com frequência, como areia, praticamente, em todas as rochas, argilas e terras. É mais difícil de se preparar e de se purificar do que o germânio, uma vez que se funde a 1420°C (centígrados). O silício possui número atômico 14.

A figura 6 nos mostra um átomo isolado de silício e um de germânio. Observe que ambos os átomos possuem 4 (quatro) elétrons de valência, ou seja, 4 elétrons na última camada. Na figura 7, temos o diagrama simplificado dos dois átomos, mostrando somente os 4 elétrons de valência circundando um núcleo "central", isto é, o núcleo do átomo e das camadas internas (carcaça atômica).

Quanto à estrutura atômica do germânio e do silício, cabe ressaltar aqui, como aspecto importante de nosso estudo, o fato de ambos os átomos apresentarem o mesmo número de elétrons na última camada, ou seja, 4 elétrons. Por esta razão são chamados de ÁTOMOS TETRAVALENTES (tetra = quatro).

FIGURA 06



A carcaça atômica do átomo de germânio (Ge) é composta do núcleo do átomo e das camadas K, L e M que são as mais internas e cujos elétrons estão mais intensamente ligados ao núcleo.

A carcaça atômica do átomo de silício (Si) consiste das camadas K, L e do núcleo.



FIGURA 07

Estrutura Cristalina dos Semicondutores:

O agrupamento ordenado ou não dos átomos, formam moléculas de diversas substâncias. Estes, quando se reúnem no espaço, formam uma estrutura sistemática e ordenada, a qual passa a ser chamada de SUBSTÂNCIA CRISTALINA (figura 8). Quando ocorrer o oposto, teremos o que se chama de SUBSTÂNCIA AMORFA. Por exemplo, o carbono, quando apresentado na forma amorfa, é conhecido por grafita. Porém, se seus átomos se ordenarem e se sistematizarem, formando uma rede cristalina, passa ser conhecido por diamante.

No estado sólido, e sob condições adequadas de fabricação, o silício constitui uma rede cristalina, onde cada átomo tem quatro átomos vizinhos equidistantes, interligados por pontes de pares de elétrons, ou seja, através de ligações covalentes.

A figura 8 nos mostra a menor estrutura cristalina que sempre se repete, podendo ser delimitada por um cubo. As esferas maiores representam as carcaças atômicas e as menores os elétrons de valência entre os quais ocorrerão as ligações covalentes.

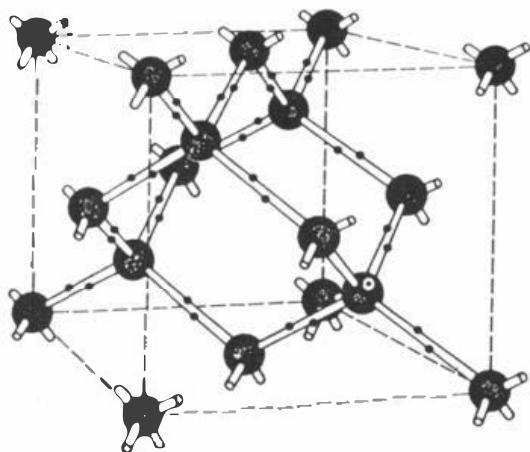


FIGURA 08

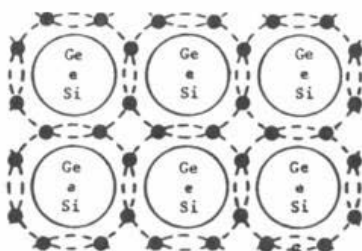
Estrutura de
um cristal
de silício.

Observe que cada átomo de silício, contribuiu com um elétron para cada ligação dupla, existente na estrutura cristalina do sistema cúbico. Isso também sucede com o átomo de germânio.

Para melhor entendermos o que é a rede cristalina, pegue mos qualquer átomo da figura 8 (do canto, por exemplo). Este átomo está ligado a 4 outros átomos por quatro ligações covalentes, completando assim a sua estrutura atômica estável que é a de 8 elétrons na última camada. E, se examinarmos o desenho espacial, veremos que qualquer átomo do conjunto está ligado a quatro outros átomos vizinhos, ficando assim todos estáveis.

Torna-se necessário dizer que a explicação é válida tanto para o silício, quanto para o germânio, já que ambos são átomos semelhantes, ou seja, possuem na camada de valência 4 elétrons.

Na figura 9, temos um diagrama simplificado de uma estrutura cristalina de silício (Si) ou de germânio (Ge).



A estrutura cristalina planificada do silício e do germânio, na prática, só é conseguida a zero grau absoluto, ou a -273°C , pois todas as ligações covalentes estarão completas e, não havendo elétrons livres, o silício ou germânio passarão a ser comportar como um material isolante.

Diagrama simplificado de uma estrutura cristalina de germânio e silício.

FIGURA 09

Elétrons e Lacunas:

Com relação à figura 9, podemos dizer, ainda, que a rede cristalina se encontra sempre a uma temperatura acima de zero absoluto, ou seja, contém sempre uma determinada quantidade de energia térmica. Essa energia térmica faz com que os elétrons e os átomos vibrem em torno de suas posições de repouso. Se for introduzida na rede cristalina uma energia suficientemente grande para superar as forças de ligação, essa energia térmica poderá provocar o rompimento de algumas ligações covalentes. Assim, os elétrons, que abandonam as ligações covalentes, rompidas, passam a se movimentar livremente no interior do cristal. Tais elétrons são denominados "Elétrons Livres" e estão em permanente movimento. Ao mesmo tempo, estão sempre co-

lidindo com os átomos da estrutura em oscilação, modificando constantemente a direção do movimento. Este movimento pode ser comandado ou direcionado, caso se aplique um campo elétrico ao cristal, ou seja, caso se submeta o cristal a uma diferença de potencial (ddp).

Antes do rompimento da ligação covalente, o átomo, do qual se desprende o elétron, estava eletronicamente neutro. Com o rompimento da ligação covalente e o conseqüente desprendimento do elétron, este átomo deixou de ser eletronicamente neutro, pois as cargas positivas do núcleo passaram a ter uma unidade a mais do que as cargas negativas. Com o desprendimento do elétron, ficou um vazio, uma lacuna, com carga positiva, pois temos um próton a mais que o número de elétrons.

Resumindo, podemos dizer que, quando um elétron de valência (carga negativa) abandona o átomo a que pertence, cria uma lacuna, que é eletricamente igual à carga do elétron, porém positiva. Note que neste processo de formação térmica, o aparecimento de um elétron livre é simultâneo ao aparecimento de uma lacuna.

Os elétrons livres e as lacunas são denominados de PORTADORES LIVRES DE CARGA ELÉTRICA, os quais tornam possível a condução de corrente elétrica através do cristal, quando o mesmo for submetido a uma diferença de potencial (ddp).

A figura 10 nos mostra como se movimentam os elétrons livres e as lacunas em um material semiconductor.

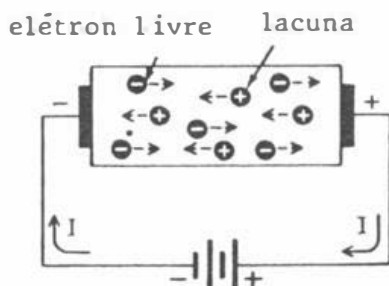


FIGURA 10

Fluxo de corrente em um material semiconductor.

Um elétron livre pode preencher o lugar de uma lacuna, completando a ligação covalente (processo de Recombinação). O número de lacunas é igual ao número de elétrons livres em um material semiconductor puro, pois tanto os elétrons livres como as lacunas aparecem e desaparecem aos pares.

ddp = diferença de potencial

Deslocamento de Elétrons e de Lacunas:

A lacuna se comporta de maneira semelhante ao elétron, porém com carga elétrica positiva. Isto significa que, ao se submeter o cristal a uma diferença de potencial (ddp), a lacuna pode mover-se (deslocar-se) do mesmo modo que o elétron, mas em sentido contrário, pois possui carga elétrica oposta a ele.

Para melhor compreendermos o movimento dos elétrons e das lacunas, observemos alguns átomos de um material semicondutor, submetido a uma diferença de potencial (ddp).

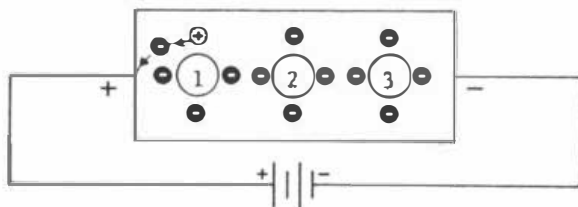
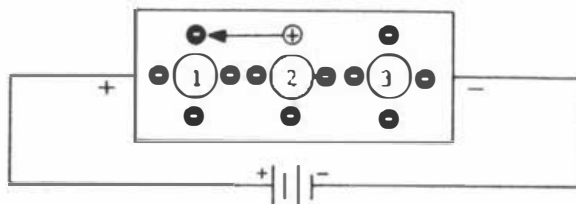
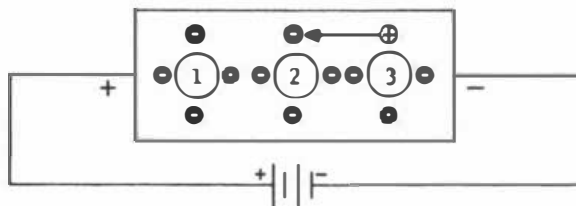


FIGURA 11

19—Um elétron do átomo 1 é sugado pela bateria devido esta possuir um potencial (+) e o elétron ser (-).



29—Um elétron que, na temperatura ambiente, foi liberado do átomo 2, e agora estaria livre, é forçado (empurrado) a suprir a lacuna do átomo 1, devido ao potencial (-) da pilha. E assim sucessivamente para os demais átomos.



39—O mesmo processo ocorre neste caso só que entre os átomos 2 e 3. Notamos então que os elétrons se deslocam para o terminal (+) e as lacunas para o terminal (-) da bateria.

Observe, na figura 11, que as lacunas são solicitadas através do cristal semicondutor para o lado negativo (-) da tensão aplicada; os elétrons livres para o lado positivo (+). Concluindo, podemos dizer que cada elétron retirado do material pelo pólo positivo da bateria ocasiona a formação de uma lacuna, porém o pólo negativo da mesma se encarrega de repor um outro.

Estes dois movimentos, cargas positivas (lacunas) para um lado e cargas negativas para o outro, é que dão origem à corrente elétrica, num material semicondutor. A figura 10 nos mostra o fluxo de corrente, num material semicondutor. É importante notar que esse fluxo de corrente em semicondutor é um pouco diferente daquele verificado nos materiais condutores, pois neste último levamos em conta somente o número de elétrons livres.

Semicondutores Intrínsecos — Quando nos referimos a um semicondutor intrínseco, queremos dizer que se trata de um semicondutor puro, praticamente sem impurezas. Na realidade, é impossível obtermos um semicondutor 100% puro. De outra forma, na fabricação de dispositivos semicondutores, impõe-se uma pureza altamente elevada (da ordem de 99,99999999%). Assim, em 10.000 toneladas de material semicondutor, provavelmente encontraremos um grama (1 gr.) de impurezas. Nesse caso, as características do cristal não sofrem interferências por parte das impurezas, pelo contrário, essas são inerentes ao próprio material semicondutor. Dessa forma, podemos dizer que os materiais semicondutores puros contêm apenas um pequeno número de elétrons livres e lacunas e, por conseqüências, conduzem pouca corrente.

Processo de Dopagem ("Doping" — Excitante, estimulante):

Diversas são as maneiras de se fazer aparecer internamente os elétrons e lacunas de um cristal semicondutor. Uma destas maneiras pode ser conseguida por intermédio da energia térmica (calor). A produção dos pares "elétrons-lacunas" dá-se o nome de GERAÇÃO TÉRMICA DE PORTADORES. Outra forma de se obter o aparecimento dos "elétrons-lacunas" é através do princípio de funcionamento dos DISPOSITIVOS FOTOSENSÍVEIS que seria fazer com que um feixe de luz recaísse sobre o material semicondutor. A dopagem, um processo muito importante, consiste em

adicionar aos semicondutores impurezas (outro tipo de átomo), por meio de processos e técnicas especiais. A relação de proporção na mistura IMPUREZA SEMICONDUTOR INTRÍNSECO é de 1 átomo de impureza para cada 1.000.000 de átomos de material semicondutor. Então surge uma pergunta: Para que isso? É que, na prática, necessitamos de um material semicondutor em que o número de elétrons livres seja bem superior ao número de lacunas (a impureza usada, no caso, será doadora) ou um material semicondutor onde o número de lacunas seja bem superior ao número de elétrons livres (para isso, usa-se uma impureza aceitadora).

Como impureza doadora, normalmente empregam-se elementos "pentavalentes", ou seja, elementos que possuem cinco (5) elétrons de valência. Entretanto, como impureza aceitadora, utilizam-se elementos "trivalentes", ou seja, elementos que possuem três (3) elétrons de valência.

De início, o material semicondutor é submetido a um rigoroso processo de purificação, retirando-se dele as impurezas e, em seguida, esse material passa por um outro processo, através do qual, ser-lhe-á adicionado outras impurezas. Cada impureza contida no cristal dará uma característica diferente a ele. Desconhecendo-se as impurezas e podendo até existirem muitas impurezas no interior do cristal, não se teria uma característica elétrica bem definida. Daí serem essas primeiras impurezas indesejáveis, porque o cristal não apresentaria nenhuma aplicação útil. Porém as que são adicionadas depois do cristal "limpo" são conhecidas e em quantidades bem dosadas o que nos permitem a fabricação de cristais semicondutores com características bem específicas (dependendo da impureza ser doadora ou aceitadora), para as mais variadas aplicações.

Semicondutor Extrínseco - Quando, em um material semicondutor intrínseco, são adicionadas impurezas conhecidas, este cristal passa a se chamar SEMICONDUTOR EXTRÍNSECO. Extrínseco significa que as características elétricas do cristal se devem às impurezas a ele adicionadas e não aos caracteres do próprio material semicondutor.

IMPUREZAS DOADORAS

Na prática utilizam-se, normalmente, três átomos, os quais se classificam como impurezas doadoras. São eles: arsênio

(As), antimônio (Sb) e fósforo (P). Todas estas substâncias possuem 5 (cinco) elétrons de valência. São portanto, chamadas de Pentavalentes (penta = cinco, valentes = valência).

Quando infiltramos estes átomos num cristal semiconductor intrínseco, fazemos com que apareçam elétrons livres no seu interior.

Lembramos que os semicondutores como o silício e o germânio apresentam 4 elétrons na camada de valência. E como estas impurezas doadoras possuem 5 elétrons de valência, estando juntos, tentar-se-ão estabilizar-se (como já vimos na regra do octeto), fazendo com que entre o ARSÊNIO e o SILÍCIO haja quatro ligações covalentes, sendo que em cada ligação participe 2 elétrons (1 de cada átomo), ficando assim os dois estabilizados. Então o último elétron que tinha o arsênio, passará a ser um elétron livre no interior do cristal semiconductor. Por isto estas impurezas são chamadas de doadoras, pois elas doam elétrons ao cristal, como vemos esquematizado na fig. 12.

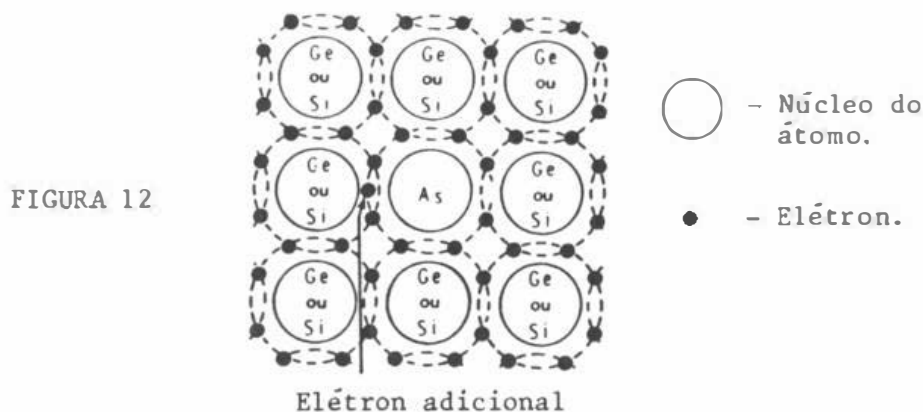


Figura 12 - Cristal Semiconductor Puro onde foi adicionado um átomo de arsênio.

Para finalizar, devemos saber que todo cristal semiconductor, dopado com impurezas doadoras, é chamado de CRISTAL SEMI CONDUCTOR TIPO N (N de negativo), referente à carga dos elétrons que ficarão "a mais no interior do cristal".

IMPUREZAS ACEITADORAS

Impurezas aceitadoras são átomos TRIVALENTES (3 elétrons

na camada de valência). Para isso se usam: o BORO (B), o ALUMÍNIO (Al), o GÁLIO (Ga) e o ÍNDIO (In).

Vejamos qual a característica do semicondutor dopado de impurezas aceitadoras:

Tomando alguns átomos de silício (o Si tem 4 elétrons de valência) e lhes adicionando um átomo de índio (o In tem 3 elétrons de valência), vejamos o que acontece (figura 13):

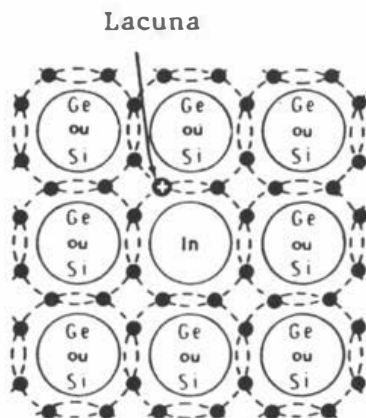


FIGURA 13

Fig. 13 – Cristal Semicondutor Puro - onde foram adicionados átomos de Índio.

Como o Índio é trivalente, isto é, tem 3 elétrons de valência, ao se ligar com um átomo tetravalente, apenas 3 elétrons dele se ligarão covalentemente aos outros 3 elétrons do semicondutor, perfazendo um total de 3 ligações covalentes, (um elétron de cada átomo em cada ligação), totalizando 6 elétrons e mais um elétron do Si que sobrou, totalizam 7. Note que está faltando um elétron para se atingir a estabilidade e como não há elétron, fica neste lugar uma lacuna (a qual tem carga elétrica positiva = (+)).

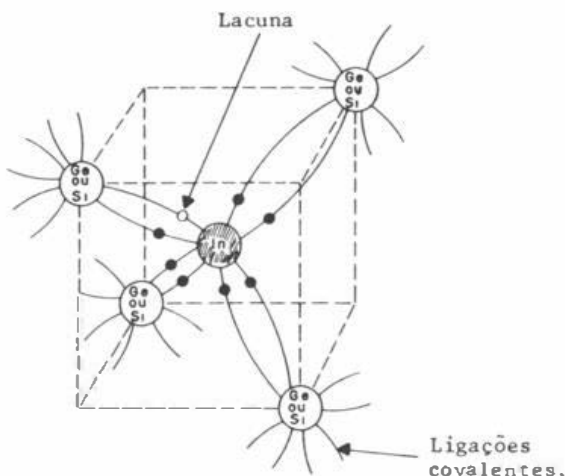
Sintetizando, a infiltração de átomos trivalentes, como o Índio, num cristal semicondutor puro, faz com que apareçam lacunas livres no seu interior, denominadas de IMPUREZAS ACEITADORAS OU RECEPTORAS. Todo cristal puro dopado com impurezas aceitadoras é chamado de CRISTAL SEMICONDUTOR TIPO P (P de po

sitivo, referindo-se à carga elétrica que tem a lacuna).

Obs.: Tanto no cristal tipo P como no tipo N, em cada átomo, o número de elétrons é igual ao número de prótons. Sendo assim, o cristal é eletricamente neutro, pois o número de elétrons do átomo + elétrons livres é igual ao número de prótons no interior dos átomos.

A figura 14 representa a mesma situação evidenciada na figura 13, porém mostrando a estrutura do cristal, vista de uma outra forma.

FIGURA 14



PORTADORES MAJORITÁRIOS E MINORITÁRIOS

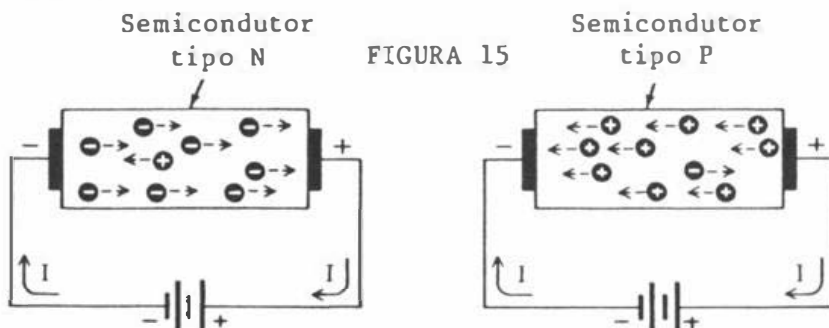
Conforme vimos anteriormente, num cristal semicondutor puro (intrínseco) à temperatura ambiente (20°C), aparecerão elétrons livres e lacunas em igual número, pois a energia térmica provoca o rompimento de algumas ligações covalentes. Se a este mesmo cristal forem adicionadas impurezas pentavalentes, cada um destes átomos pentavalentes fornecerá um elétron livre para o cristal, tornando-o um cristal do tipo "N". Note que neste cristal o número de elétrons livres é bem maior que o número de lacunas. Neste caso, os elétrons livres serão denominados **PORTADORES MAJORITÁRIOS** de corrente elétrica, enquanto que as lacunas serão denominadas **PORTADORES MINORITÁRIOS** de corrente elétrica.

Para um cristal semicondutor do tipo "P", o número de lacunas é superior ao número de elétrons livres. Neste caso, os elétrons livres serão denominados **PORTADORES MINORITÁRIOS** e

as lacunas serão denominadas PORTADORES MAJORITÁRIOS de corrente elétrica.

MOVIMENTO DOS ELÉTRONS E DAS LACUNAS NOS SEMICONDUTORES DOPADOS

Vimos no tópico anterior o comportamento e o movimento dos elétrons e das lacunas nos semicondutores puros. No semicondutor dopado, ocorre a mesma coisa, porém com uma pequena diferença: o fluxo dos portadores majoritários será muito mais intenso.



Condução em um semicondutor
tipo N

Condução em um semicondutor
tipo P

Fig. 15 — Movimento dos elétrons e das lacunas nos semicondutores dopados.

É evidente que, se existem correntes de lacunas num sentido, existirão correntes de elétrons no sentido oposto. E como a corrente externa do cristal (I) é composta somente de elétrons, a corrente total, que passa dentro do cristal semicondutor, é igual à soma da corrente de elétrons livres com a corrente de lacunas (não esqueça que uma corrente de lacunas num dado sentido é igual a uma corrente de elétrons em sentido oposto). Desta forma, ambas as correntes terão o mesmo sentido, daí o fato delas se somarem.

EFEITO DA TEMPERATURA NOS SEMICONDUTORES DOPADOS

Com o aumento da temperatura nos condutores, teremos um

movimento desordenado de elétrons, aumentando as colisões e consequentemente a resistência do material. Já para os semicondutores, ocorre o inverso, ou seja, a resistividade dos cristais puros (intrínsecos) diminui à medida que a temperatura aumenta, devido à geração térmica de portadores, a qual não é tão alta em relação à variação de temperatura. Porém, para os cristais dopados, a resistividade do cristal é altamente afetada devido à presença das impurezas.

Suponhamos um pedaço de 2 cm^3 de germânio puro. Se ele apresentar, na temperatura ambiente, uma resistência elétrica de 100Ω , este mesmo pedaço, dopado e transformado num cristal tipo N, por exemplo, apresentará uma resistência de 4Ω .

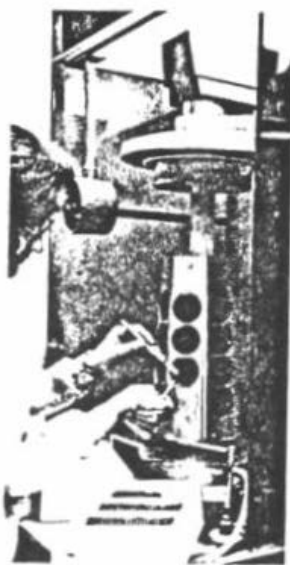
COMBINAÇÃO DAS IMPUREZAS DOADORAS E ACEITADORAS

Pegemos um cristal tipo P. Sabemos que neste cristal existe um elevado número de lacunas, que são os portadores majoritários. A medida que formos introduzindo impurezas doadoras neste cristal, os elétrons livres neutralizarão as lacunas existentes. (A este processo de combinação elétron-lacuna chamamos de RECOMBINAÇÃO).

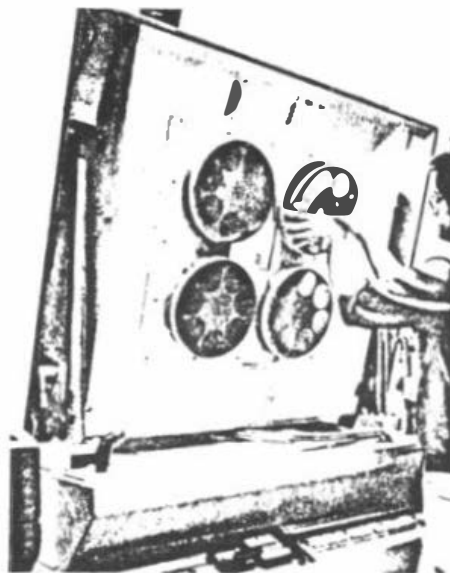
A introdução destas impurezas doadoras no cristal do tipo P, resultará no aumento da resistividade do material. Pois, se as lacunas existentes no cristal são preenchidas pelos elétrons da impureza acrescentada e o número de átomos trivalentes (impureza aceitadora existente no cristal) for igual ao número de átomos pentavalentes (impureza doadora introduzida), a resistividade deste cristal será a máxima possível. Por outro lado, se introduzirmos impurezas doadoras, a resistividade do semicondutor diminuirá e ele se transformará em um cristal tipo N, pois o número de elétrons será maior que o número de lacunas.

Lógico será imaginar o contrário, isto é, adicionar impurezas aceitadoras num cristal tipo N e transformá-lo num cristal tipo P, sem a necessidade de uma nova purificação.

ALGUNS EQUIPAMENTOS MODERNOS EMPREGADOS NA
FABRICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES



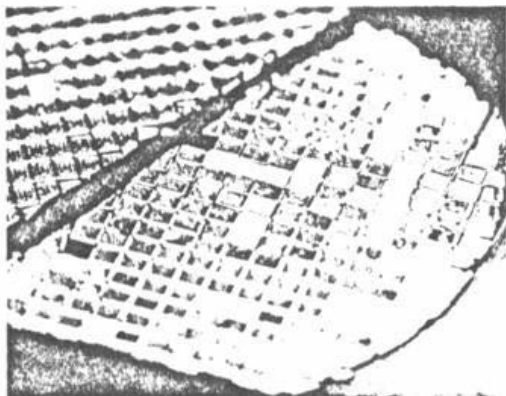
REATOR



POLIDOR



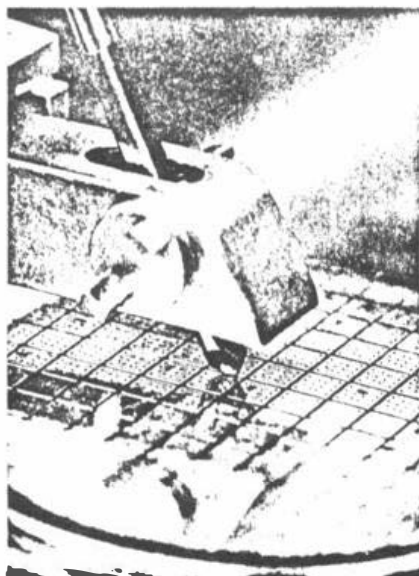
BOLACHAS(WOFRS) MONTADAS PARA EVAPORIZAR



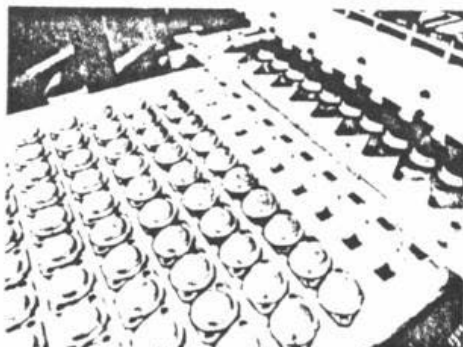
BOLACHA (WAFER) ENTRECORTADA



BOLACHAS PRONTAS PARA
SEREM MONTADAS



DIAMANTE ESCRITOR



TABULEIRO EMPACOTADOR
AUTOMÁTICO



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-7

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Os dois materiais semicondutores mais empregados na eletrônica são:
 - a) Germânio, Arsênio;
 - b) Silício, Germânio;
 - c) Gálio, Silício;
 - d) as respostas "a" e "b" estão corretas.
- 2) Uma ligação covalente é:
 - a) uma ligação onde cada átomo em um semicondutor cede elétrons a outros átomos vizinhos;
 - b) uma ligação onde cada átomo em um semicondutor compartilha seus 4 elétrons com os 4 átomos vizinhos;
 - c) uma ligação onde cada átomo em um semicondutor fica com 4 elétrons;
 - d) uma ligação onde cada átomo em um semicondutor perde 4 elétrons.
- 3) O significado de semicondutor intrínseco e extrínseco é:
 - a) semicondutor puro e semicondutor dopado;
 - b) semicondutor dopado e semicondutor puro;
 - c) semicondutor dopado e semicondutor impuro;
 - d) as respostas "a" e "b" estão corretas.

- 4) Os semicondutores são materiais:
- a) que apresentam resistividade alta;
 - b) que apresentam resistividade baixa;
 - c) que apresentam resistividade média;
 - d) que apresentam resistividade infinita.
- 5) Quando aquecemos duas barras, uma condutora e outra semicondutora, observamos que à medida que a temperatura aumenta:
- a) aumenta a resistividade do semicondutor;
 - b) diminui a resistividade do condutor;
 - c) a resistividade do condutor não altera;
 - d) diminui a resistividade do semicondutor.
- 6) A lacuna é resultante da:
- a) quebra de uma ligação iônica;
 - b) quebra de uma ligação trivalente;
 - c) quebra de uma ligação covalente;
 - d) quebra de uma ligação monovalente.
- 7) Existem dois tipos de impurezas: as doadoras e as aceitadoras. Identificar na ordem as impurezas relacionadas: impurezas doadoras, aceitadoras, aceitadoras e doadoras.
- a) Arsênio, Fósforo, Índio e Antimônio;
 - b) Boro, Gálio, Alumínio e Fósforo;
 - c) Fósforo, Antimônio, Índio e Arsênio;
 - d) Antimônio, Gálio, Índio e Arsênio.
- 8) O processo de dopar um semicondutor é aquele que:
- a) constitui em introduzir impurezas;
 - b) constitui em retirar impurezas;
 - c) constitui em preparar o semicondutor;
 - d) todas as respostas estão corretas.

- 9) A diferença entre o semicondutor tipo "N" e o tipo "P" se constitui na dopagem onde:
- a) o cristal tipo "N" é dopado com impurezas aceitadoras;
 - b) os cristais tipo "N" e "P" são dopados com impurezas doadoras;
 - c) o cristal tipo "P" é dopado com impurezas aceitadoras;
 - d) o cristal tipo "P" é dopado com impurezas doadoras.
- 10) Os semicondutores tipo "P" e "N" se caracterizam pelos portadores majoritários e minoritários onde:
- a) o tipo "P" - minoritários-lacunas e tipo "N" minoritários-elétrons;
 - b) o tipo "P" - majoritários-lacunas e tipo "N" minoritários-lacunas;
 - c) o tipo "N" minoritários-lacunas e tipo "N" majoritários-lacunas;
 - d) o tipo "N" majoritários-elétrons e tipo "P" majoritários-elétrons.

LIÇÃO E-8

FUNDAMENTOS SOBRE SEMICONDUTORES - PARTE II

INTRODUÇÃO:

Na lição anterior (E-7), estudamos alguns dos materiais semicondutores, empregados na fabricação de dispositivos de "estado sólido". Vimos também que dispomos de dois tipos de materiais semicondutores, ou seja, semicondutor do tipo P e semicondutor do tipo N. Nesta lição, vamos estudar como estes semicondutores podem ser empregados para a obtenção dos componentes ou dispositivos de estado sólido. Começaremos no estudo pelo mais simples deles, o diodo de junção. Em seguida passaremos ao estudo da formação dos transistores, ambos de ampla aplicação em diversos tipos de equipamentos eletrônicos, como, por exemplo: retificação, proteção de circuitos, modulação de ondas, amplificação, operações lógicas, etc.

Existe uma variedade enorme de tipos de diodos e transistores, cada um com uma aplicação específica. Porém nesta lição, procuraremos estudar os fundamentos destes dois dispositivos semicondutores, e em lições futuras, trataremos dos demais. O entendimento da construção e operação do diodo é essencial para compreensão dos dispositivos semicondutores, uma vez que os transistores, os circuitos integrados e outros dispositivos são basicamente construídos da mesma maneira. Ini-

ciaremos esta lição com o estudo da junção PN.

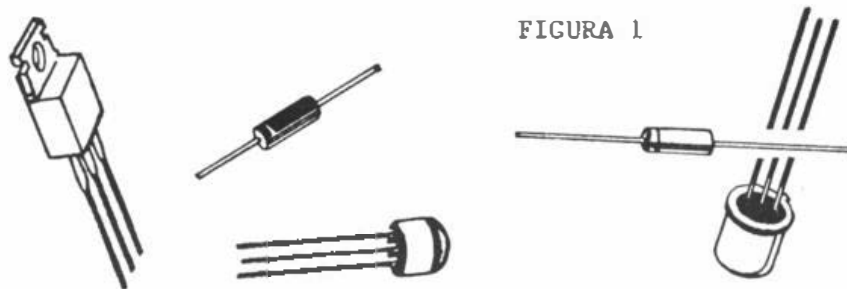


FIGURA 1

A JUNÇÃO PN

Uma junção PN é formada quando se coloca em contato um semiconductor P com um semiconductor N. Este material semiconductor (tipo P e tipo N) tanto pode ser de silício (Si) como de germânio (Ge). O bloco semiconductor tipo P e o outro semiconductor tipo N não são fabricados separadamente, como poderia parecer, mas sim em um único bloco homogêneo. Depois então, parte deste bloco único de semiconductor é dopado com impurezas aceitadoras, enquanto a outra parte é dopada com impurezas doadoras, formando-se assim uma junção PN. A junção PN também poderia ser chamada de junção NP, porém convencionalmente se designa PN.

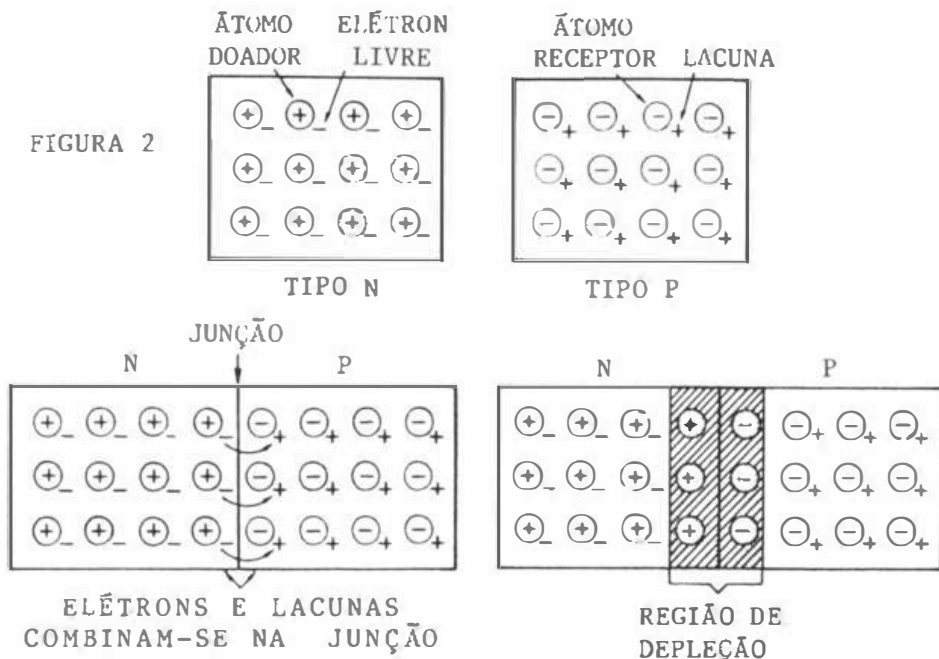
A figura 2 nos mostra, de uma maneira mais simples, como é obtida a junção PN.

Podemos dizer que uma junção PN ocorre sempre que houver uma mudança na concentração de impurezas de átomos predominantemente aceitadores para átomos predominantemente doadores (ou vice-versa), ao longo de uma distância suficientemente pequena.

Note que a junção, em si, compreende não só o limite entre as dopagens P e N, mas também determinada faixa de cada uma delas (região de depleção). Vejamos então o que se passa nesta faixa (região de contato).

Quando estes dois cristais são postos em contato nas proximidades da junção, haverá recombinações das lacunas do cristal tipo "P" com os elétrons livres do cristal tipo "N", for-

mando novas ligações covalentes e, conseqüentemente, neutralizando ambas as cargas. Por isto, próximo à junção, em cada um dos cristais, haverá uma região desprovida de portadores livres (elétrons e lacunas) que denominamos de região de depleção, como mostra a figura 2.



OBS.: Para efeito de estudo, vamos levar em consideração apenas os portadores majoritários de cada cristal, sendo as características elétricas dos portadores minoritários desprezadas no momento.

REGIÃO DE DEPLEÇÃO

Na região de contato, algumas lacunas da região P atravessam a junção na direção da região N, como alguns elétrons da região N atravessam a junção em direção à região P. Verifica-se então, que nas proximidades da junção haverá recombinações de elétrons livres com lacunas, e conseqüente neutralização dessas cargas livres. Devido à recombinação, cria-se do lado N íons positivos e do lado P íons negativos. Note que an

tes de ocorrerem as recombinações, os átomos, tanto do lado P como do lado N, estavam eletricamente neutros, ou seja, possuíam número de elétrons igual ao número de prótons. Quando um átomo da região N perde um elétron, que irá recombinar-se com uma lacuna, este átomo torna-se um íon positivo. O mesmo ocorre com as lacunas. Veja: quando um elétron recombina-se com uma lacuna, do lado P, o átomo da correspondente lacuna ganha um elétron, tornando-se assim um íon negativo.

Teremos assim, nas proximidades da junção, uma fina cama da de íons positivos do lado N e de íons negativos do lado P. E entre estas duas camadas de íons teremos uma região desprovida de portadores majoritários, chamada de região de depleção. A figura 3 mostra este fato mais claramente.

Observe que passou a existir uma "barreira" de cargas positivas (íons) dentro da região N e próximo da junção. Estes íons positivos, aí localizados, não permitirão a passagem da lacunas para o lado N. Da mesma forma que os íons negativos da região P irão obstruir a passagem de elétrons livres da região N para a região P. Veja que se um elétron tentar passar através da junção, com direção à região N, este se rá repellido pelos íons negativos da região P.

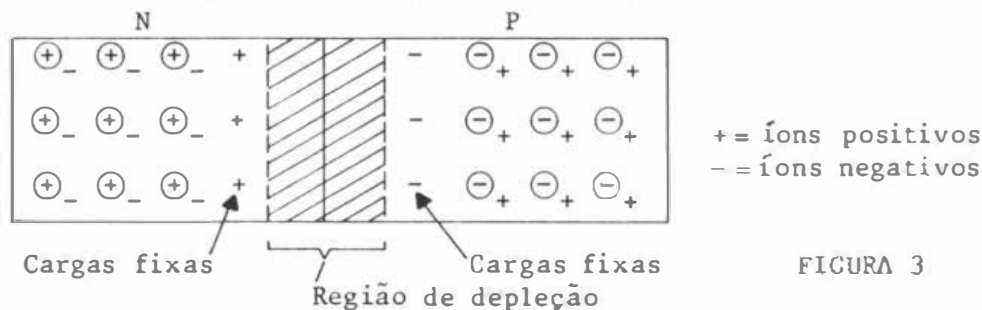
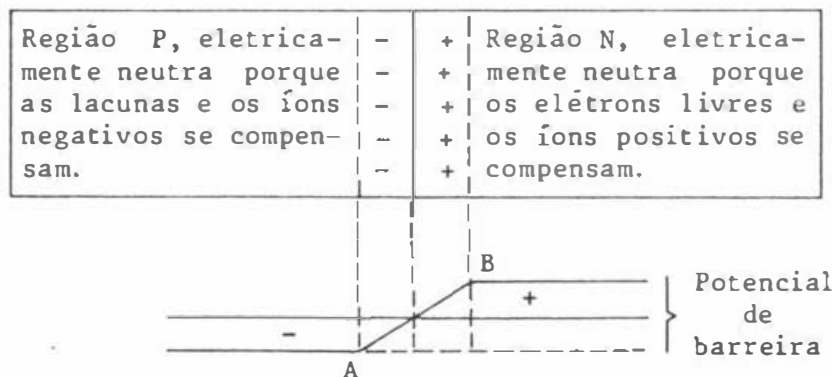


FIGURA 3



Lembre-se que os íons, tanto os positivos como os negativos, não se movimentam, ou seja, são cargas fixas. A região de depleção também é conhecida como "região de carga especial", pois trata-se de uma região cujas cargas elétricas são os íons positivos e negativos.

BARREIRA DE POTENCIAL

As cargas opostas, reconstruídas em cada lado da junção, criam uma diferença de potencial ou tensão, a qual limita o tamanho da região de depleção, impedindo as recombinações adicionais de elétrons e lacunas. Este fenômeno é designado de BARREIRA DE POTENCIAL ou TENSÃO DE BARREIRA.

A barreira de potencial, produzida por uma junção "PN", é da ordem de alguns décimos de volts, sendo de 0,7 V para a junção de silício de 0,3 V para a junção de germânio.

Sabemos que a barreira de potencial dificulta a passagem dos portadores majoritários, mas, por outro lado, ela facilita a passagem dos portadores minoritários. Vejamos agora o que acontecerá se submetemos a junção PN a uma certa tensão externa, ou seja, quando a polarizarmos.

POLARIZAÇÃO DA JUNÇÃO "PN"

Dizemos que uma junção "PN" está polarizada quando aplicamos a esta junção uma certa tensão externa suficientemente grande para romper a barreira de potencial. Podemos polarizar uma junção "PN" de duas maneiras: diretamente e reversamente.

Vejamos:

JUNÇÃO "PN" DIRETAMENTE POLARIZADA

Uma junção "PN" estará diretamente polarizada quando o pólo positivo da bateria estiver conectado à região "P", e o pólo negativo à região "N" do semiconductor. Nestas condições os elétrons livres do cristal tipo "N" serão repelidos pelo pólo negativo da bateria e forçados para junto da região de depleção, onde neutralizarão os íons positivos (átomos doadores, positivamente carregados). Por outro lado, os elétrons livres

que se haviam acumulado, para criar uma carga negativa do lado "P" da junção, serão atraídos na direção do pólo positivo da bateria. Desta forma, elétrons livres e lacunas atravessam facilmente a junção e na vizinhança da superfície de separação haverá uma grande quantidade de combinações elétrons-lacunas. Enquanto persistir a polarização, teremos um intenso e constante fluxo de elétrons da região "N", em direção à junção e de lacunas da região "P" também em direção à junção. Elétrons e lacunas irão recombinar-se e neutralizar-se mutuamente. Porém, enquanto isso estiver ocorrendo, novos elétrons e lacunas surgirão nas extremidades exteriores das regiões - "N" e "P", como mostra a figura 4. Este novo elétron que surgiu da região "P" passa pela bateria e vai para a região "N", repondo assim o elétron destruído pela recombinação. Como este fenômeno se repete com bilhões e bilhões de elétrons e lacunas, circulará pelo circuito externo, permanentemente, uma corrente que pode chegar a algumas dezenas de miliampêres. Esta corrente recebe o nome de "corrente direta da junção".

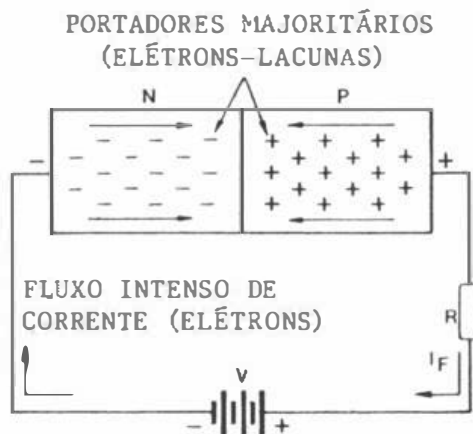


FIGURA 4

Verificou-se que a corrente direta " I_F " cresce rapidamente à medida que a tensão direta " V " aumenta. Supondo que a tensão C.C. (corrente contínua) parte de zero, as lacunas e os elétrons livres passam a avançar para a junção à medida que a tensão aumenta, sendo que estes portadores irão neutralizar a ação dos íons da zona de depleção. Desta forma, o potencial da barreira vai diminuindo. A corrente " I_F " aumenta pouco, enquanto a barreira não for totalmente destruída, mas assim que isto acontecer, elétrons livres e lacunas atraves-

sam livremente a junção, e a corrente cresce fortemente, à medida que a tensão aplicada cresce. Entretanto, esta corrente será limitada pela baixa resistência do material semicondutor, causadora de uma queda de tensão de polarização direta, aproximadamente igual à barreira de potencial, ou seja, 0,3 volts para o germânio e 0,7 volts para o silício.

O valor da corrente de polarização direta I_f é controlada pela tensão V contínua de polarização, empregada pela tensão de fluxo V_f e pela resistência R externa que envolve puramente a relação da lei de ohm:

$$I_f = \frac{(V - V_f)}{R}$$

Por exemplo, utilizando um diodo de silício com uma tensão de polarização de 6 volts e um resistor externo de 120 ohms, a corrente direta será:

$$I_f = \frac{(V - V_f)}{R} \therefore I_f = \frac{(6 - 0,7)}{120} = 0,044A \text{ ou } 44mA$$

JUNÇÃO "PN" REVERSAMENTE POLARIZADA:

Dizemos que uma junção "PN" está reversamente polarizada quando o pólo positivo da bateria estiver conectado à região "N" e o pólo negativo à região "P" do semicondutor. Em tais condições, as lacunas são atraídas para a esquerda, na direção do pólo negativo da bateria, e os elétrons livres para a direita na direção do pólo positivo. Conseqüentemente, haverá um aumento do número de íons positivos do lado "N" e de íons negativos do lado "P". Teremos assim um aumento da barreira de potencial, pelo fato da região de depleção ter-se alargado. (Veja a figura 5).



Esse aumento da região de depleção significa que a barreira de potencial será igual e oposta à tensão externa da bateria. Por isso as lacunas e elétrons (portadores majoritários) são impedidos de fluir, cessando o fluxo de corrente e a junção não conduz.

O que a tensão aplicada fez, afinal, foi afastar instantaneamente as cargas móveis da junção, aumentando a região de depleção, aumentando o número de cargas fixas (íons) e aumentando a barreira de potencial, ou seja, a tensão aplicada veio reforçar o potencial da barreira.

A região de contato entre os dois tipos de cristais é altamente resistiva, praticamente um isolante. Porém uma corrente extremamente pequena irá fluir através da junção, denominada de CORRENTE DE FUGA ou CORRENTE REVERSA e identificada por I_r . Esta corrente ocorre porque os portadores minoritários são forçados em direção à junção, onde eles se combinam e mantêm uma corrente extremamente pequena.

O número de portadores minoritários nos materiais tipo "N" e "P" é extremamente pequeno, à temperatura ambiente. Mas se aumentarmos a temperatura, também irá aumentar o número de pares elétrons-lacunas, gerados nos dois materiais, aumentando conseqüentemente a corrente de fuga.

A corrente reversa, ou de fuga, é indesejável, razão pela qual se usam métodos para combater os seus efeitos maléficos. Nos semicondutores de silício, ela dificilmente irá ultrapassar alguns milésimos de microampêres (isto à temperatura ambiente) tornando-se mais elevada nos semicondutores de germânio.

Para finalizar, observe que a junção "PN", quando reversamente polarizada, comporta-se como um capacitor que tem por dielétrico a zona de depleção. Veja que a esta junção se aplicam os princípios dos dispositivos designados por "Varícapes", ou seja, se a tensão inversa alarga a região de depleção, a capacitância diminui, e diminui tanto mais quanto maior for a tensão aplicada. Nem sempre esse efeito capacitivo da junção é desejável e hoje em dia, com o aperfeiçoamento da tecnologia dos transistores, têm-se reduzido drasticamente as capacitâncias próprias das junções. Os "Varícapes" (diodos com capacitância dependente da tensão) é um dos poucos e praticamente único exemplo que podemos citar, onde o efeito da capacitância se faz desejável.

Conclusão:

Podemos dizer que uma junção "PN" é um dispositivo elétrico unidirecional, pois conduz corrente em uma única direção. Quando polarizado diretamente, haverá um livre fluxo de corrente, apresentando uma baixa resistência. Quando polarizado reversamente, não haverá fluxo de corrente, atuando então como um circuito aberto, apresentando uma alta resistência. Portanto funciona analogamente a uma chave sensível à polaridade elétrica: Quando a junção "PN" está diretamente polarizada, funciona como uma chave fechada e quando a junção "PN" está reversamente polarizada, funciona como uma chave aberta.

CAPACITÂNCIA DA JUNÇÃO "PN"

Já que estávamos falando sobre capacitância da junção "PN", vamos estudá-la um pouco mais. Lembra-se de como é constituído um capacitor? Pois bem, o capacitor é basicamente constituído de duas lâminas metálicas, separadas por um dielétrico. E, para variar esta capacitância, basta modificar-se a espessura do dielétrico. A capacitância aumenta, quando se diminui a espessura do dielétrico e diminui, quando a espessura do dielétrico é aumentada.

A figura 6 nos mostra o esquema de um capacitor.

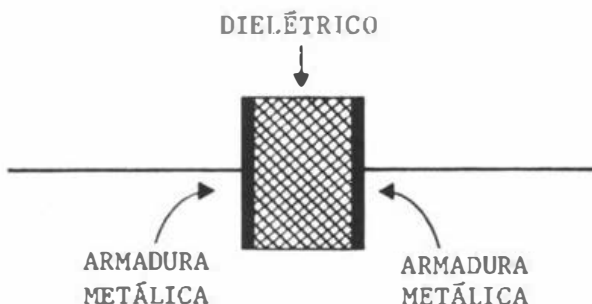


FIGURA 6

Consideremos agora uma junção "PN". Como vimos anteriormente, ao redor da junção dos dois cristais, existe uma camada de cargas estáticas que constitui a região de depleção (barreira de potencial). Esta região da barreira é constituída de

materiais semicondutores neutros e sem portadores majoritários (ELÉTRONS LIVRES E LACUNAS). Desta forma, podemos considerá-lo como um isolante, semelhante ao dielétrico de um capacitor.

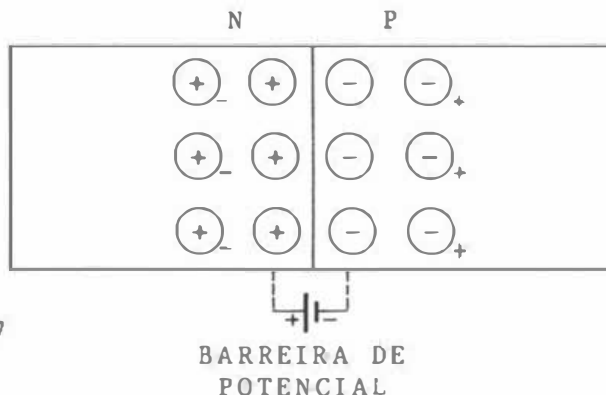


FIGURA 7

Como podemos notar na figura 7, há semelhança entre a junção "PN" e um capacitor, no qual as camadas semicondutoras no estado neutro forma o dielétrico entre a região das cargas estáticas, onde as armaduras são constituídas pelos próprios materiais semicondutores dopados "PN", que passam a se comportar como condutores. O fenômeno da capacitância ocorre também na polarização direta, provocada pelo movimento dos portadores minoritários. Porém a capacitância torna-se menos acentuada na polarização reversa. O efeito maléfico da capacitância torna-se relevante quando se trata de frequências elevadas, pois a capacitância tende a curto-circuitar a resistência interna da junção, tornando-a condutora no sentido inverso, ou seja, a junção passa a funcionar como se fosse uma chave fechada, ao invés de funcionar como uma chave aberta (polarização reversa). É devido a este fato que na grande maioria dos casos a capacitância das junções "PN" é indesejável, pois leva a junção à "Ruptura".

CURVA CARACTERÍSTICA DE UMA JUNÇÃO "PN"

Trata-se de uma curva ou uma família de curvas que relacionam as tensões, correntes e temperaturas envolvidas no fun

cionamento da junção.

O gráfico da figura 8 nos mostra um conjunto de curvas características de uma junção "PN". Note que no eixo das ordenadas (eixo vertical), temos os valores de corrente direta (I_f), na parte superior, e de corrente reversa ou inversa (I_r) na parte inferior. Já, no eixo das abscissas (eixo horizontal) temos os valores das tensões direta (V_d) e reversa (V_r).

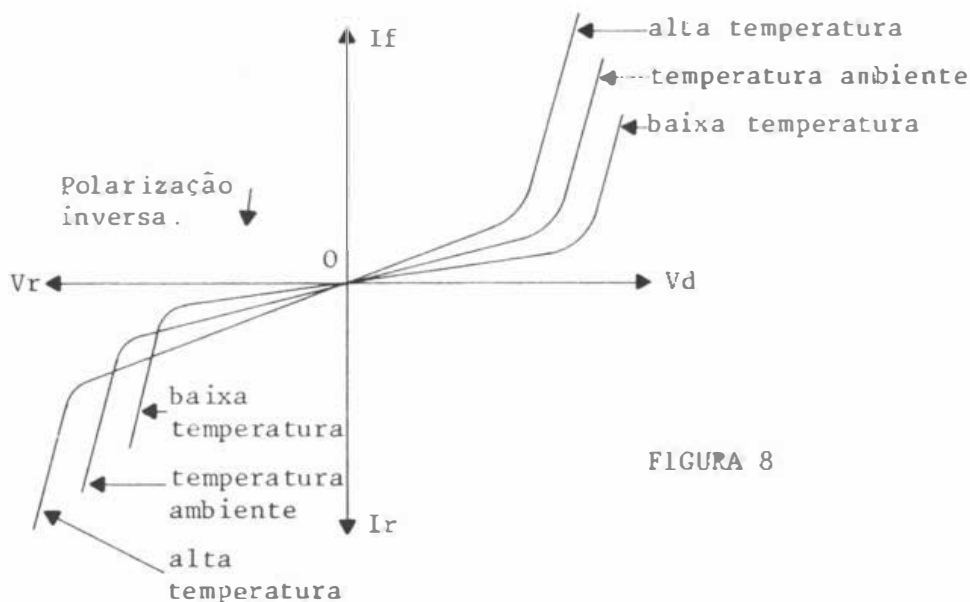


FIGURA 8

O ponto onde os dois eixos se cruzam é denominado de origem do gráfico.

Um gráfico deste tipo é obtido, quando se submete uma junção "PN" a várias tensões diretas e reversas, enquanto se efetuam as medidas da corrente, tomando certas precauções para assegurar a junção, evitando a sua danificação por excesso de corrente ou tensão.

A figura 9 mostra uma curva típica da junção "PN" quando diretamente polarizada. A curva indica a relação entre a tensão e a corrente que passa pela junção.

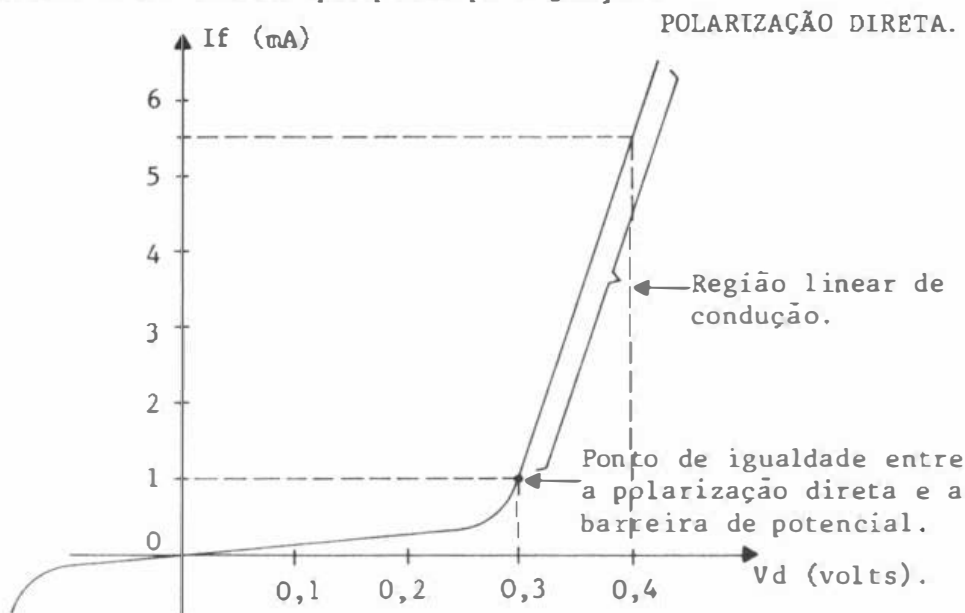


FIGURA 9

Note que, em uma tensão muito baixa, praticamente não temos corrente circulando, ou seja, a corrente através da junção "PN" é muito pequena, até que a tensão de polarização direta suba a um valor maior que 0,3 volts para o germânio (Fig. 9) e 0,7 volts para o silício (Fig. 11). A partir destes valores de tensão, a corrente crescerá rapidamente, de conformidade com o aumento da polarização externa e após superar a barreira de potencial interna da junção.

Observe que, no instante em que a tensão de polarização direta exceder a barreira de potencial (0,3 volts no germânio e 0,7 volts no silício), a corrente direta crescerá rapidamente e de forma linear, pois, nestas condições, a junção apresenta uma baixa resistência. Entretanto, se esta corrente continuar se elevando continuamente, haverá um ponto, onde a junção se danificará pelo excesso de fluxo de corrente.

Também podemos observar na Figura 9 que o ponto, onde a tensão de polarização iguala à barreira de potencial, indica uma tensão de 0,3 volts e uma corrente direta de 1 miliampê-

re, se a tensão estiver em 0,4 volts, na junção "PN" de germânio, (Figura 9). Como podemos notar, após a tensão ter excedido a barreira de potencial ou atingido a região linear de condução, uma pequena variação da tensão acarretará uma grande variação da corrente.

Vejamos agora como ficaria a curva característica para uma junção "PN" reversamente polarizada. Figura 10.

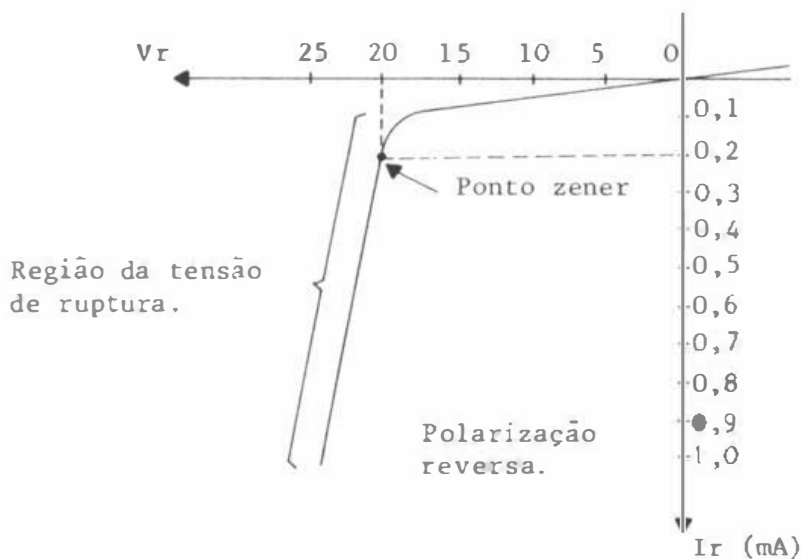


FIGURA 10

Note que as correntes reversas, através das junções "PN" de germânio ou de silício, são muito pequenas, até que a tensão de polarização reversa suba a um valor superior a 20 volts para o germânio (Figura 10) e 45 volts para o silício. Esta tensão é conhecida por "tensão de ruptura" e pode variar de junção para junção, dependendo da constituição da mesma. Com uma junção "PN" comum, deve-se evitar trabalhar na região da tensão de ruptura, pois, no momento em que ocorrer a ruptura, a junção deixará de apresentar alta resistência e, conseqüentemente, irá passar pela junção uma corrente muito alta que danificará a mesma.

Quando a junção está polarizada reversamente, a corrente é provocada pelos portadores minoritários e cresce muito lentamente com a tensão, isto até ser atingido um certo ponto a partir do qual observa-se um crescimento avassalador da corrente. Este ponto é conhecido por ponto de Zener, em homenagem ao físico que estudou o efeito. (Mais adiante faremos um breve estudo sobre o efeito Zener).

A junção polarizada reversamente apresenta uma resistência da ordem de mega-ohms, enquanto a corrente de saturação (devido a portadores minoritários) situa-se em torno de alguns nano-ampêres.

Embora a junção "PN" de silício funcione da mesma forma que a junção "PN" de germânio, existem acentuadas diferenças em suas curvas características. Observamos, portanto, a figura 11A (junção de Ge) e a figura 11B (junção de Si).

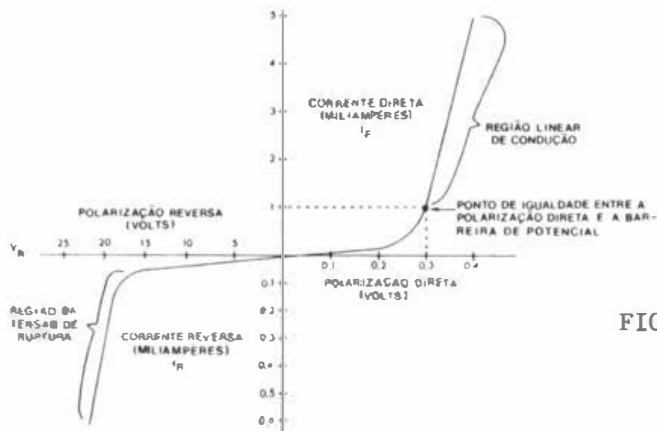


FIGURA 11A

FIGURA 11

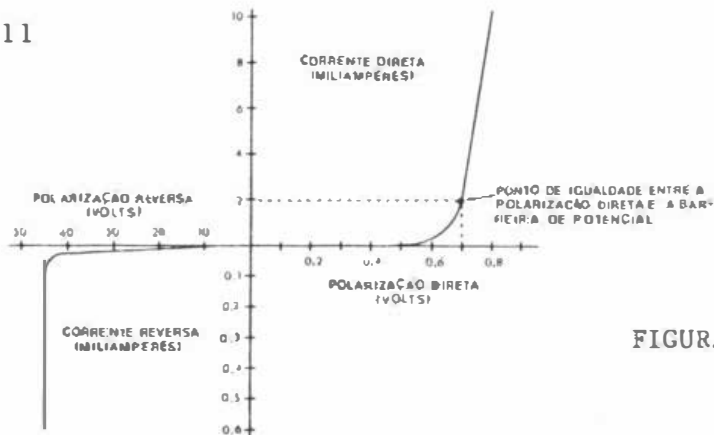


FIGURA 11B

Note que as curvas são semelhantes, porém existem duas diferenças básicas. A primeira diz respeito à polarização direta da junção "PN". Observe (Figura 11B) que, em uma junção de silício, a barreira de potencial não é superada até que a tensão de polarização direta seja, aproximadamente, igual a "0,7 volts". Uma segunda diferença seria com relação à polarização reversa. Note que a corrente reversa permanece bem abaixo de 0,1 miliampère e esta se torna relativamente alta assim que for atingida a "tensão de ruptura" que fica em torno de "45 volts", como indica a figura 11B.

EFEITO ZENER:

Continuando a análise da junção "PN" reversamente polarizada, vamos nos ater mais precisamente ao ponto zener. Como vimos anteriormente, à medida que aumenta a tensão inversa, aumenta-se também a corrente inversa, porém esta varia muito pouco permanecendo praticamente constante, até o ponto zener. Assim que é atingido o ponto zener, observa-se um aumento avassalador da corrente. Então vem a pergunta: Por que ocorre tal fato? Para respondermos a esta pergunta, vamos analisar os mecanismos que provocam tal efeito.

O efeito zener pode ocorrer por ação de um, entre dois mecanismos. O primeiro mecanismo é conhecido por "Ruptura por multiplicação de avalanche" e o segundo por "Ruptura por efeito zener".

A "Ruptura por multiplicação de avalanche" consiste no seguinte: os portadores minoritários (gerados termicamente), que formam a corrente reversa normal de uma junção "PN", deslocam-se através da zona de depleção, indo das regiões onde estão em minoria para aquelas onde se encontram em maioria. Movimentando-se assim através da barreira de potencial, esses portadores são acelerados, indo colidir com os íons do cristal, fornecendo energia suficiente para "quebrar" a ligação covalente. Além do portador original, um novo par elétron-lacuna é, então, gerado. Este novo par de portadores é acelerado e irá desencadear novos pares elétron-lacuna. Assim, cada novo portador, por sua vez, produzirá portadores adicionais, através de colisões e "quebra" de ligações covalentes. Este efeito é cumulativo e imediato, tendo como resultado um considerável aumento da corrente reversa, acarretando a "Ruptura".

da junção.

O segundo mecanismo, "Ruptura por efeito zener", ocorre devido a um campo elétrico em torno de 2×10^7 V/m. Este campo elétrico na junção pode exercer sobre um elétron fracamente "ligado" ao núcleo do átomo (elétron de valência), uma força suficientemente grande, de modo a arrancá-lo de sua ligação covalente. O novo par elétron-lacuna criado "vem contribuir para o aumento da corrente reversa. Note que este processo não envolve colisões dos portadores com os ions do cristal, mas somente a ação do campo elétrico, não havendo portanto o efeito cumulativo. Este processo ocorre mais frequentemente, quando se trata de junções fortemente dopadas.

Com base no efeito zener, foi desenvolvido o diodo zener, cujas características e aplicações veremos nas próximas lições. No diodo zener, a junção "PN" opera com polarização reversa, igual à tensão de ruptura. Neste caso, a corrente reversa é limitada num valor adequado, de tal modo que o calor produzido pela corrente não danifique a junção.

A figura 12 mostra uma curva característica da tensão corrente (V-I) de uma junção zener. Observe que as características diretas e reversas são similares à de uma junção comum. A única diferença é que a junção zener é projetada justamente para operar com uma tensão de polarização reversa alta, permitindo, com isso, uma corrente reversa bastante alta.

Podemos observar na figura 12 que a corrente reversa da junção zener permanece com um valor baixo, enquanto a tensão reversa não atingir o ponto de ruptura. Entretanto, quando a tensão atingir o ponto de ruptura, a corrente reversa cresce a uma proporção muito rápida. Esta mudança ocorre devido ao fato da resistência da junção cair com o acréscimo da tensão reversa, após o ponto de ruptura. Quando este ponto de ruptura for ultrapassado, dizemos que a junção está operando na REGIÃO DE RUPTURA ZENER ou REGIÃO ZENER e a corrente que atravessa a junção é denominada de CORRENTE ZENER, representada pelo símbolo I_z .

A impedância zener (Z_{ZT}) é dada pela relação:

$$Z_{ZT} = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z}$$

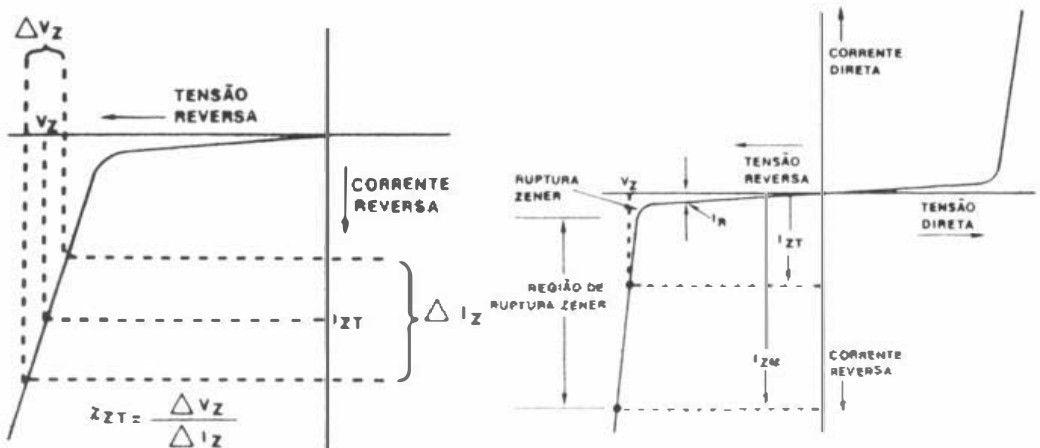


FIGURA 12

Onde:

ΔV_Z = variação da tensão zener;

ΔI_Z = variação da corrente zener.

A temperatura afeta naturalmente a tensão de ruptura de uma junção zener, ou seja, esta tensão aumenta com a temperatura para junções que operam com tensões acima de uns 6 volts e diminui para junções que operam com tensões inferiores a 6 volts. O coeficiente de temperatura é fornecido pelo fabricante, podendo ser positivo ou negativo e geralmente se encontra na faixa de $\pm 0,1\%/^{\circ}\text{C}$. O coeficiente será positivo para tensões de referência acima de 6 volts e negativo para tensões de referência abaixo de 6 volts.

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CORRENTE DE FUCA DE UMA JUNÇÃO "PN" COMUM:

Em muitas aplicações é necessário considerar o efeito da temperatura sobre a operação da junção. Normalmente a variação da temperatura afeta mais a junção sob o efeito da corrente reversa. Corrente esta causada pelos portadores minoritários, presentes nas seções "N" e "P" da junção, conforme o exposto em tópicos anteriores. Sob temperaturas extremamente baixas, a corrente reversa, através de uma junção comum, será

zero. Por outro lado, à temperatura ambiente, esta corrente será bem maior, ainda que bastante pequena. Todavia em temperaturas muito altas, uma corrente reversa, seguramente maior, irá fluir e conseqüentemente interferirá na operação normal da junção.

Se nos reportarmos à figura 8, observaremos que a tensão de ruptura também tende a aumentar com a elevação da temperatura. Porém esta não chega a ser significativa.

Em junções "PN" de silício ou de germânio, observou-se que a corrente reversa, ou de fuga, dobra de valor para cada 10° centígrados de acréscimo à temperatura.

Como a corrente de fuga em uma junção "PN" de silício é menor do que em uma junção de germânio, a junção de silício - pode ser utilizada em temperaturas mais elevadas (até 200°C - aproximadamente) enquanto uma junção "PN" de germânio poderia ser utilizada, no máximo, até a uma temperatura de 110°C.

DIODO DE JUNÇÃO:

Trata-se de uma junção "PN", devidamente encapsulada com dois eletrodos ou terminais. Recebe o nome de diodo justamente por possuir dois terminais acessíveis. Muitas vezes é denominado de "diodo semicondutor de junção" ou simplesmente "diodo de junção" para diferenciá-lo dos diodos de vácuo e a gás (daí usar semicondutor). E, para diferenciá-lo de outros tipos de diodos semicondutores (diodo de ponta, diodo de selênio, e outros), usa-se o termo junção.

O símbolo usado para representá-lo é uma seta (figura 13), a qual designa o sentido convencional da corrente elétrica (do positivo para o negativo) e que é, como se sabe, contrário ao movimento dos elétrons (sentido real de condução).

Quando se tem corrente muito intensa, o diodo de silício é mais indicado, pois resiste a temperaturas muito mais elevadas. O silício é hoje um elemento consagrado na confecção de diodos e outros dispositivos semicondutores.

A figura 14A ilustra como é efetuada a ligação de um diodo diretamente polarizado a uma bateria, onde o catodo do diodo é ligado ao pólo negativo, e, conseqüentemente, o anodo será ligado ao pólo positivo da bateria, permitindo a condu-

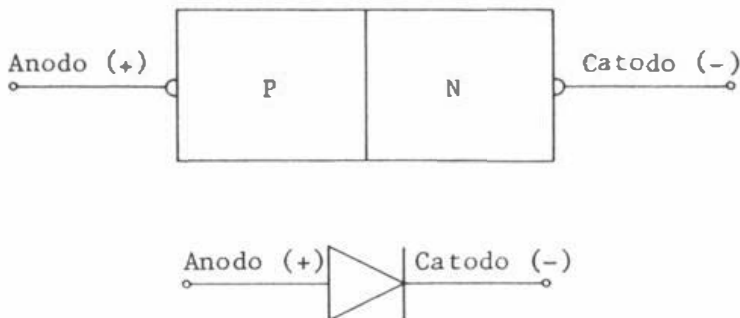


FIGURA 13

ção de uma corrente relativamente alta (I_F). Neste caso é necessário utilizar-se de um resistor em série com o diodo para protegê-lo contra correntes excessivas. Para polarizar reversamente, inverteremos a polaridade da bateria. Nestas condições, uma pequena corrente reversa (I_R) irá fluir pelo diodo, como mostra a figura 14B.

FIGURA 14A

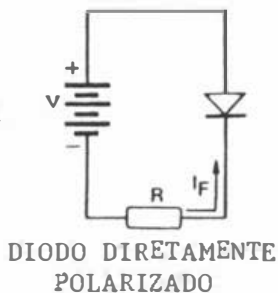
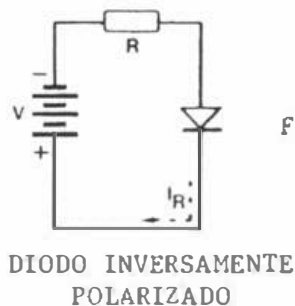


FIGURA 14B



I_F e I_R estão indicadas no sentido real (do pólo negativo para o pólo positivo da bateria).

Há diversos tipos de diodos de junção. Entre eles podemos citar: Diodo Varicap, Diodo Tunel, Diodo Zener, Diodo Controlado de Silício, Diodo Emissor de Luz, Diodo de Disparo Bidirecional, e outros, os quais serão estudados posteriormente.

TRANSISTORES:

O transistor surgiu na década de 40, mais precisamente em junho de 1948, fruto de avançados estudos da tecnologia do estado sólido, efetuados pelos cientistas do laboratório - "BELL" (Bardeen e Brattain), nos Estados Unidos. Esse primeiro transistor era constituído por uma base de germânio tipo "N", na qual se apoiavam dois finos contatos metálicos, separados por uma pequena fração de milímetro. Foi designado de transistor de pontas, por seus criadores. Por ser dotado de uma resistência de transferência, a esse primitivo dispositivo foi atribuída a denominação de TRANSfer - ResISTOR, (resistor de transferência).

O TRANSISTOR BIPOLAR leva esta denominação por ser constituído de dois tipos de cristais, os quais funcionam com portadores distintos (elétrons e lacunas). Porém, às vezes, também é referido como TRANSISTOR DE JUNÇÃO ou simplesmente TRANSISTOR. Além dos transistores bipolares, existem também os transistores unipolares que serão estudados em lições futuras.

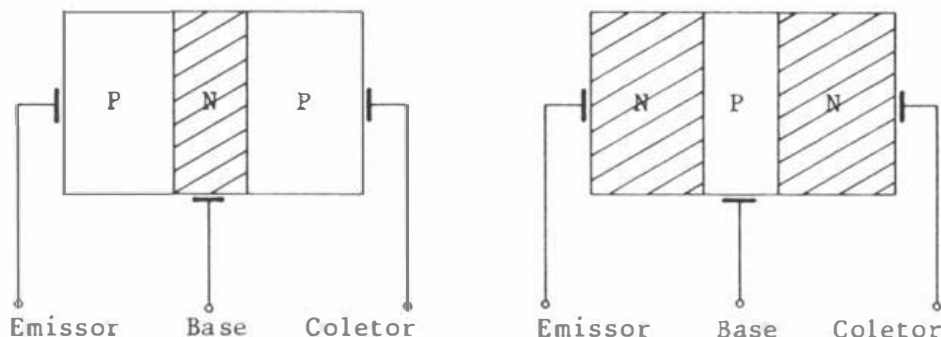
Os transistores bipolares são constituídos de três cristais semicondutores, podendo ser de silício ou de germânio, dopados (cristais extrínsecos), como os diodos de junção "PN", porém empregam três regiões semicondutoras, formando duas junções "PN". Possibilitando, desta forma, serem agrupados de duas formas diferentes, como veremos a seguir (figura 15).

Na sua forma mais simples, um transistor de junção é um semicondutor (cristal) único, porém este cristal apresenta três regiões diferentemente dopadas. Uma dessas três regiões fica intercalada entre as outras duas e é relativamente estreita em relação a elas. Esta região é denominada "base", enquanto as outras duas recebem os nomes de "Emissor e Coletor". Temos ainda dois tipos de transistores de junção, o PNP e o NPN. O primeiro possuem duas regiões tipo P, separadas por uma região tipo N. No segundo, a situação se inverte, ou seja, temos duas regiões tipo N, separadas por uma região do tipo P. Tanto o transistor NPN como o PNP podem ser constituídos com cristais semicondutores de germânio (Ge) ou de silício (Si). A figura 15 nos mostra uma representação esquemática dos dois tipos de transistores de junção.

A região da base, além de ser mais estreita que as regiões das extremidades (Emissor e Coletor), é também fracamen

te dopada em relação a estas duas.

FIGURA 15



Os transistores, da mesma forma que o diodo, são representados por um símbolo como ilustram as Figuras 16A e 16B, — que permite suas identificações em circuitos e esquemas. O símbolo é idêntico para os dois tipos: tanto para o "PNP" como para o "NPN", diferindo somente na região do emissor que é exatamente onde podemos distingui-los. Quando a região do emissor, no símbolo, contiver uma seta, indicando o sentido interno do símbolo, entrando na base, identificamos ser um transistor tipo "PNP". Por outro lado, se esta seta indicar o sentido externo do símbolo, saindo da base, sabemos que se trata de um transistor do tipo "NPN". O símbolo poderá trazer uma letra para identificar os terminais, onde a letra "E" é o emissor, a letra "B" é a base e a letra "C" o coletor.

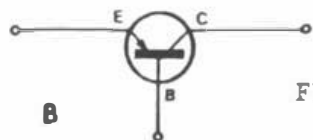
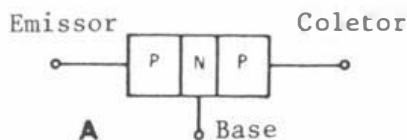


FIGURA 16A

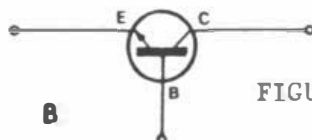
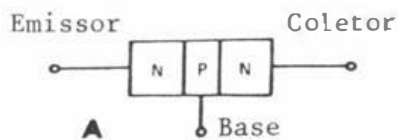


FIGURA 16B

Um transistor PNP básico
e seu símbolo

Um transistor NPN básico
e seu símbolo

CONSTRUÇÃO DO TRANSISTOR

As técnicas utilizadas na construção do transistor de junção são semelhantes às técnicas empregadas na produção dos diodos de junção. Dentre essas técnicas existem quatro tidas como básicas: crescimento, liga ou fusão, difusão e epitaxial. De um modo geral, os transistores de junção são produzidos através das técnicas de fusão e de difusão. Vejamos algumas dessas técnicas.

CONSTRUÇÃO POR FUSÃO (OU TIPO LIGA)

A base é constituída por uma lâmina fina de material tipo N ou P (N para um transistor PNP). Em seguida, duas pequenas quantidades do elemento índio são colocadas em contato com a base (lâmina) e então todo o conjunto é submetido, por um curto período de tempo, a uma temperatura superior à de fusão do índio, de modo que este dissolve o germânio, formando uma solução saturada. Ao se resfriar, o germânio se recristaliza com uma concentração suficiente do elemento índio, modificando assim sua característica de tipo N para tipo P. A figura 17 nos mostra esquematicamente um transistor construído com esta técnica.

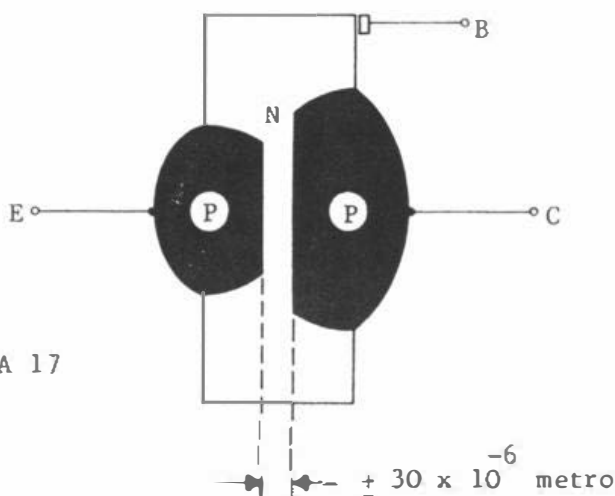


FIGURA 17

CONSTRUÇÃO POR DIFUSÃO

Submete-se a lâmina semicondutora (de germânio ou silício) a uma difusão gasosa de impurezas tipo P e tipo N, de modo a formar a junção emissor e a junção coletor. A figura 18 nos mostra um transistor planar de silício do tipo difusão. A junção coletor-base é obtida numa primeira difusão. Posteriormente, o emissor é então difundido na base, através de uma segunda difusão. Em seguida, é aplicada uma pequena camada de dióxido de silício (SiO_2) sobre toda a superfície, a qual serve de isolante para todo o conjunto, conseguindo-se assim baixas correntes de fuga. Em seguida, são depositados os contatos de alumínio onde serão soldados os terminais.

Outros processos são empregados, uns mais refinados que outros, como, por exemplo, o processo de crescimento epitaxial. Este tipo de transistor é constituído pela produção de uma fina camada cristalina sobre uma região semicondutora. Uma vez tendo esta camada a mesma estrutura cristalina do material original, possibilita a aplicação de qualquer tipo de impureza. A figura 19 mostra uma secção transversal de um transistor de crescimento epitaxial.

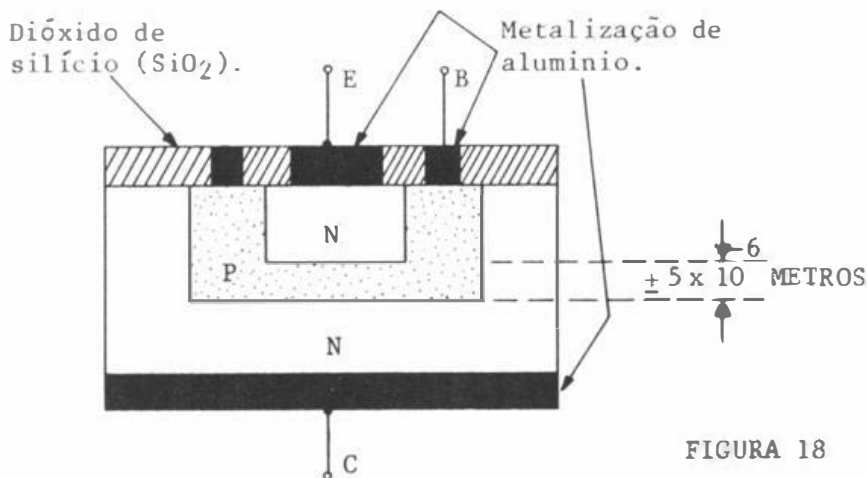


FIGURA 18

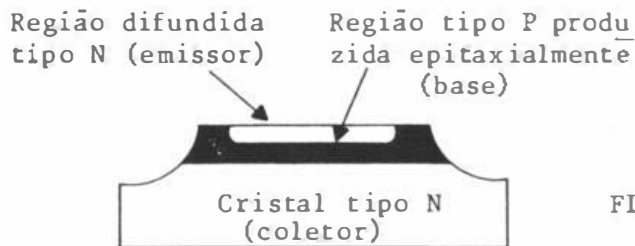


FIGURA 19

Seção transversal de um transistor de base epitaxial, que utiliza uma estrutura mesa.

O transistor da figura 18 é formado, difundindo seletivamente as regiões da base e emissor na região do coletor, de modo que todas as regiões se encontram em um único plano. Quando se utiliza este tipo de construção, o dispositivo é dito PLANAR. Já o dispositivo produzido, conforme mostra a figura 19, onde a base e o emissor ficam posicionados numa espécie de mesa ou platô (altiplano), é conhecido por dispositivo com estrutura Mesa.

Para finalizar, devido ao seu significado histórico, uma vez que hoje esta técnica praticamente não é utilizada para a produção de transistores, mencionaremos a construção do primeiro transistor inventado, conhecido por transistor de contato pontual (figura 20). Este consistia de dois fios de tungstênio, com pontas extremamente agudas, pressionadas contra uma lâmina semicondutora. Trata-se de uma construção simples, porém sem muita importância prática.

FUNCIONAMENTO DO TRANSISTOR BIPOLAR

Para que um transistor bipolar desempenhe suas funções de forma útil, este deverá estar corretamente polarizado. Polarizar um transistor significa aplicar tensões (por ex. através de baterias) nas duas junções do transistor. O funcionamento normal de um transistor baseia-se no fato de que a junção base-emissor deve ser polarizada no sentido direto, en

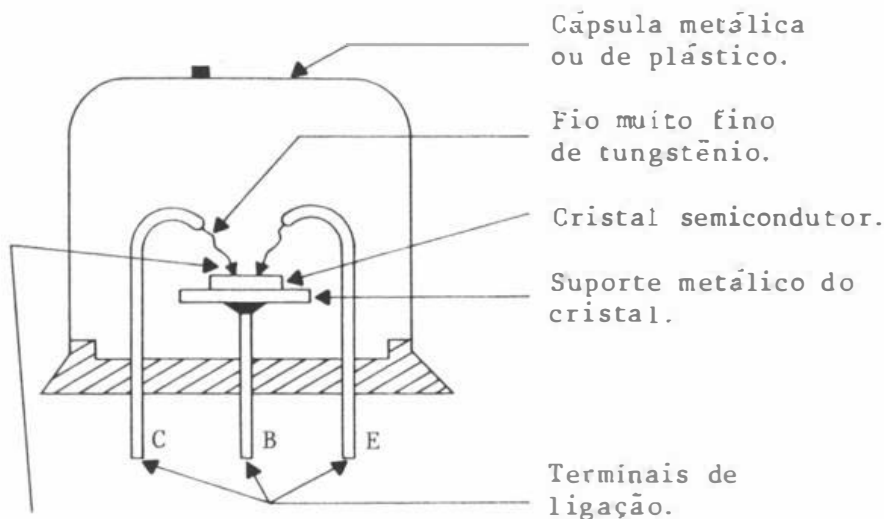


FIGURA 20

quanto a junção base-coletor é reversamente polarizada.

Vamos supor um transistor PNP, adequadamente polarizado (figura 21A). Note que a junção do coletor (superfície que se para o coletor da base) está reversamente polarizada (V_r), e com uma tensão maior que a tensão de polarização direta da junção do emissor (superfície que separa o emissor da base). A tensão de polarização direta (V_d) vence a "barreira de potencial" da junção do emissor. Com isto, a zona de depleção é diminuída (contrai-se), e uma verdadeira avalanche de lacunas emigra do emissor para a base. Como a base é fracamente dopada, ou seja, possui uma fraca percentagem de impurezas, o número de elétrons livres que nela existe é muito inferior ao número de lacunas que sobre ela avança. Assim que as lacunas atingem a base, um pequeno número delas irá recombinar com os elétrons livres da base, enquanto a maioria delas cai sob a influência da bateria B (responsável pela polarização reversa da junção do coletor), e são arrastadas para o coletor. Devido à ação da bateria B, temos um aumento da zona de depleção da junção do coletor, o que faz com que efetivamente a base do transistor seja ainda mais reduzida, pois logo que a lacuna cai nessa zona ela é fortemente atraída pelo coletor, reduzindo assim o número de combinações entre elétrons livres e lacunas, na base.

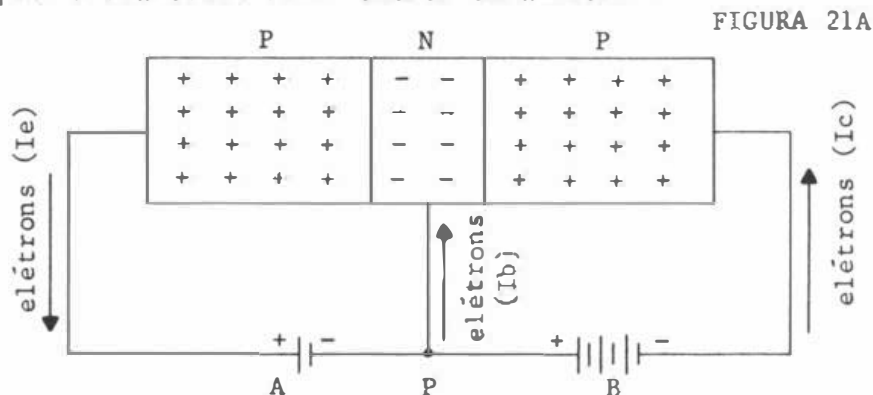
A totalidade das lacunas que avançam sobre a base e mais as que se recombinam no próprio emissor constituem no seu movimento a corrente do emissor I_e .

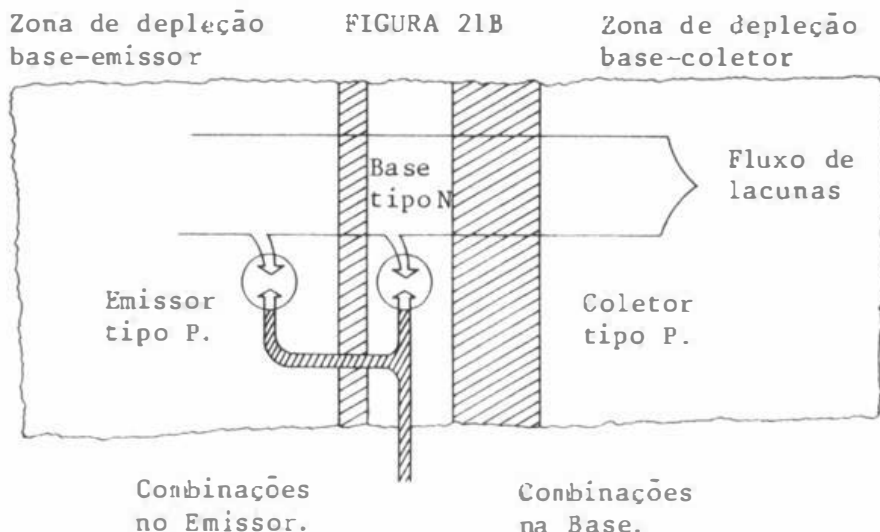
Devido ao fato de não haver acumulação de cargas livres (portadores) num transistor, para cada lacuna que o emissor perde, seja porque avança para o coletor, seja por recombinação na base ou no próprio emissor, é gerada uma nova lacuna no emissor. A bateria "A" se encarrega de retirar um elétron de valência de um átomo, gerando assim uma nova lacuna no emissor. Esse elétron livre é então atraído pelo pólo positivo da bateria "A" e, desta forma, teremos uma corrente permanente de elétrons no terminal do emissor, chamada Corrente do Emissor.

Por outro lado, o coletor não pode receber as lacunas do emissor e acumulá-las em si. Então, assim que uma lacuna penetra na região do coletor, a bateria "B" envia-lhe um elétron, que irá se combinar com esta lacuna, destruindo-a. Desta forma, teremos um movimento permanente de elétrons que saem da bateria "B" e penetram no coletor, constituindo, assim, a corrente do coletor I_c .

As poucas combinações de elétrons livres e lacunas na base ou no emissor constituem a corrente da base I_b . Como o equilíbrio de cargas tem que se manter, para cada elétron livre que se combina na base ou que emigra para o emissor para lá se recombinar, o circuito externo envia outro elétron para a base. Teremos assim um movimento permanente de elétrons sobre o terminal (eletrodo) de base, constituindo a corrente de base do transistor.

A figura 21B ilustra, resumidamente, todo este processo, o qual é conhecido como "efeito transistor".





Se aplicarmos a primeira Lei de Kirchhoff no ponto P (veja figura 21A), obteremos:

$$I_e = I_b + I_c$$

É conveniente que I_c seja grande e que I_b seja pequena. Geralmente I_b é de 1 a 2% do valor de I_e , dependendo da fabricação. Normalmente temos I_e e I_c da ordem de miliampêres, enquanto I_b é da ordem de microampêres.

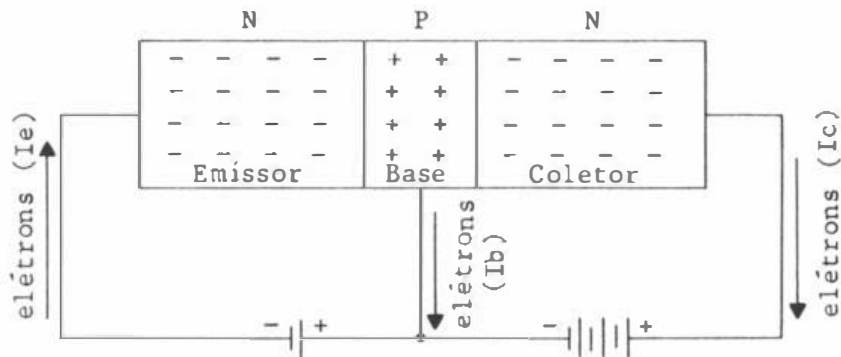
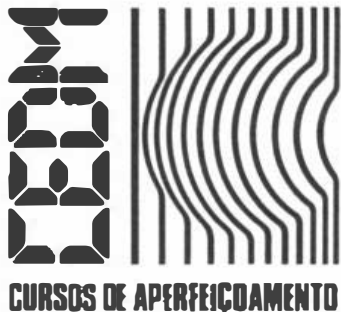


FIGURA 22

Se deixar de existir a tensão direta na junção do emissor, a corrente do emissor I_e será nula, conseqüentemente I_b e I_c se anulam.

Para um transistor tipo NPN, a explicação do efeito transistor é praticamente a mesma. A única diferença é que, agora os portadores majoritários que formaram a grande corrente, são os elétrons livres, ao invés de lacunas, como no caso do PNP. A figura 22 nos mostra um transistor NPN, devidamente polarizada.

Obs.: Para um transistor NPN, convenientemente polarizado, a corrente de emissor (I_e) é constituída pela totalidade de elétrons livres que avançam sobre a base em direção ao coletor.



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E - 8



OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

1) Chamamos de portadores de cargas móveis:

- a) os prótons livres que se deslocam através de um semicondutor;
- b) as partículas livres que se deslocam através de um semicondutor;
- c) os elétrons e lacunas que se deslocam através de um semicondutor;
- d) os elétrons e prótons livres que se deslocam através de um semicondutor.

2) Um diodo é constituído pela união de materiais semicondutores:

- a) tipo "N" e tipo "N";
- b) tipo "P" e tipo "N";
- c) tipo "P" e tipo "P";
- d) tipo "N".

- 3) A diferença de potencial (barreira de potencial) é criada devido:
- a) às cargas que atravessam a junção "PN";
 - b) às cargas negativas da junção "PN";
 - c) às cargas positivas da junção "PN";
 - d) à reconstituição de cargas opostas em cada lado da junção "PN".
- 4) Uma junção "PN" está diretamente polarizada quando:
- a) o terminal positivo e negativo da bateria está conectado respectivamente na seção "P" e "N";
 - b) o terminal negativo e positivo da bateria está conectado respectivamente na seção "P" e "N";
 - c) N.R.A.
- 5) Um diodo polarizado direta e inversamente age:
- a) respectivamente como uma chave aberta e fechada;
 - b) respectivamente como uma chave aberta e aberta;
 - c) respectivamente como uma chave fechada e aberta;
 - d) respectivamente como uma chave fechada e fechada.
- 6) A queda de tensão sobre um diodo de silício e de germânio em condução será:
- a) respectivamente 0,7 volts e 0,3 volts;
 - b) respectivamente 0,7 volts e 0,7 volts;
 - c) respectivamente 0,3 volts e 0,7 volts;
 - d) respectivamente 0,3 volts e 0,3 volts.
- 7) Um transistor, constituído de duas regiões "P", intercaladas por uma região "N", é chamado de:
- a) transistor bipolar "PNP";
 - b) transistor bipolar "NPN";

- c) transistor bipolar "PNP";
 - d) transistor bipolar "PPN".
- 8) Empregando um diodo de silício com uma tensão de polarização de 12V volts e um resistor externo de 320 ohms, a corrente direta (I_f) será:
- a) 0,035 mA;
 - b) 0,35 mA;
 - c) 35 mA;
 - d) 3,5 mA.
- 9) A corrente que flui entre o emissor e o coletor de um transistor "NPN" é constituída de:
- a) partículas;
 - b) lacunas;
 - c) prótons;
 - d) elétrons.
- 10) Quando polarizarmos simultaneamente as junções base-coletor e base-emissor de um transistor "NPN", haverá um grande fluxo de elétrons (corrente) que atravessará a região do coletor. Esta corrente é denominada de:
- a) corrente do emissor (I_e);
 - b) corrente de base (I_b);
 - c) corrente do coletor (I_c);
 - d) corrente de fluxo (I_f).

LIÇÃO E-9

DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES I

Procuraremos nesta lição desenvolver um estudo sobre os dispositivos semicondutores, particularmente sobre os TRANSISTORES BIPOLARES. Estudaremos suas características, suas limitações, bem como os métodos de polarização e estabilização térmica.

GENERALIDADES:

Com o avanço tecnológico, o transistor se tornou um dispositivo de grande importância, tanto do ponto de vista econômico como do ponto de vista técnico, trazendo, com o seu advento, uma gama de aplicação muito grande.

Ao utilizarmos o transistor, temos que levar em consideração três pontos básicos:

- 1 - Trata-se de um dispositivo frágil;
- 2 - Para cada tipo de transistor existe uma aplicação específica;
- 3 - Os terminais do transistor jamais devem ser interligados.

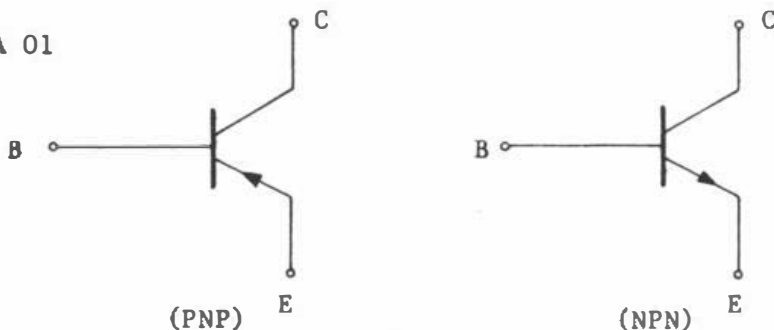
Não obstante, é indispensável conhecermos o seu funcionamento, para que este seja ligado ou substituído corretamente.

A principal diferença entre o transistor e o diodo é que o transistor é um dispositivo ativo, deixando passar mais ou menos a corrente, enquanto que o diodo deixa passar corrente num único sentido, ou seja, conduz ou não conduz corrente. Trata-se, pois, de um dispositivo passivo.

REPRESENTAÇÃO OU SIMBOLOGIA

Existem várias formas de representar um transistor, mas preferimos adotar a simbologia apresentada na figura 1, por ser a mais utilizada no Brasil.

FIGURA 01



O sentido da seta indica o sentido convencional da corrente do emissor. Enquanto que as letras B, C e E indicam os terminais de base, coletor e emissor, respectivamente.

Na representação adotada, a base será sempre a região intermediária, enquanto que o coletor e o emissor serão representados pelas outras duas regiões, constituídas do mesmo tipo de material (P ou N).

Quando os terminais do transistor forem alinhados, a base será o terminal central e o coletor será o terminal que estiver mais nitidamente destacado dos demais, podendo ser assinalado por um ponto colorido, (figura 2). Este é o caso

FIGURA 02

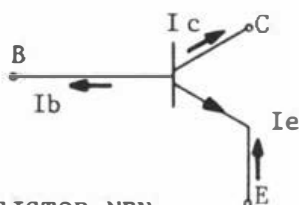


mais comum. Quando se tratar de algum outro tipo de transis

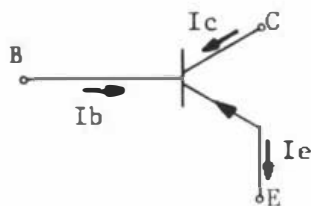
tor, deve-se consultar o manual do fabricante, o qual deve trazer todos os dados a respeito do mesmo.

SENTIDO DE CONDUÇÃO

Embora a seta (ver simbologia) indique o sentido convencional da corrente de emissor, é mais comum representarmos as correntes no sentido real, conforme mostram as figuras 3A e 3B.



TRANSISTOR NPN



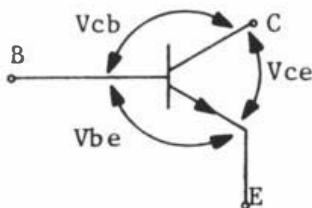
TRANSISTOR PNP

FIGURA 03A

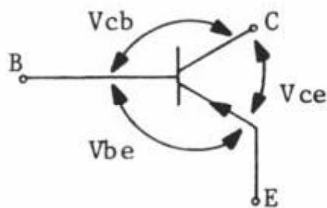
FIGURA 03B

Quanto às tensões, usa-se indicá-las da seguinte forma (figura 4).

FIGURA 04



TRANSISTOR NPN



TRANSISTOR PNP

Aplicando-se a 1ª. Lei de Kirchhoff (para correntes) na figura 3A ou 3B e a 2ª. Lei de Kirchhoff (para tensões) na figura 4, as expressões básicas do transistor serão:

$$\begin{cases} I_e = I_c + I_b & \text{(I)} \\ V_{ce} = V_{cb} + V_{be} & \text{(II)} \end{cases}$$

Onde:

I_e - corrente de emissor (C.C.)
 I_b - corrente de base (C.C.)
 I_c - corrente de coletor (C.C.)
 V_{be} - tensão base-emissor (tensão C.C.)
 V_{cb} - tensão coletor-base (tensão C.C.)
 V_{ce} - tensão coletor-emissor (tensão C.C.)

O TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR

Muito embora os transistores bipolares possam ser utilizados de várias maneiras, sua função básica mais relevante é fornecer amplificação. Para que o transistor amplifique, é necessário que este aceite um sinal de entrada (tensão ou corrente) e forneça um sinal de saída, maior em tamanho ou amplitude. Ao amplificar o sinal de entrada, verifica-se que todas as correntes e tensões variam em função deste sinal. Exemplificando, analisemos a expressão $I_e = I_c + I_b$. Se I_e dobra em valor, I_c e I_b também dobrarão em valor. Supondo que o transistor NPN esteja convenientemente polarizado (conforme a figura 5). Este fato é facilmente explicado. Sabe-se que é a tensão de polarização direta que determina o número de elétrons que o emissor fornece para a base. Logo um aumento da tensão direta implica em um aumento do número de elétrons fornecido para a região da base, portanto a corrente de emissor (I_e) aumenta. Consequentemente mais elétrons são enviados à região do coletor, contribuindo, desta forma, para um aumento da corrente de coletor (I_c). Sabemos ainda que uma parte dos elétrons não chega à região do coletor, pois combina-se com as lacunas da base. Esses elétrons acarretarão, portanto, um aumento da corrente de base (I_b). Se diminuirmos o valor da tensão de polarização direta, o efeito contrário é produzido, e as três correntes diminuem. Desta forma, fica patente o efeito amplificador do transistor.

TIPOS DE LIGAÇÕES DO TRANSISTOR

Há três diferentes configurações em que podem se apresentar os transistores. Para as três configurações, um dos três terminais do transistor é utilizado como referência, en-

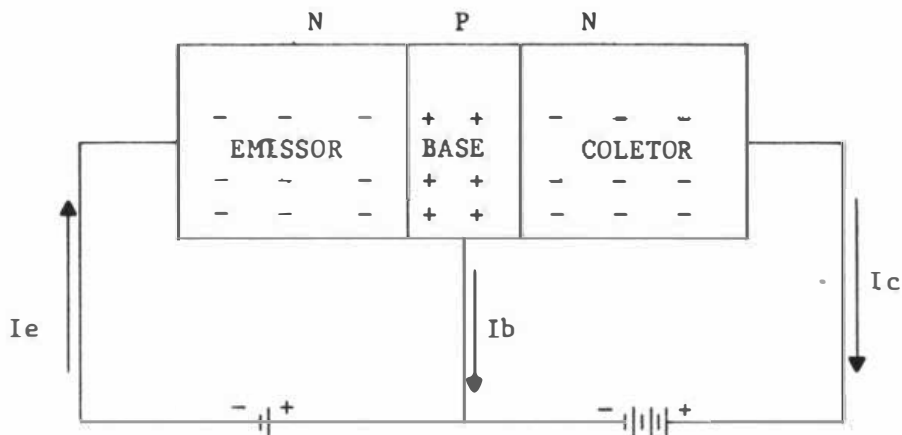


FIGURA 05

quanto os outros dois servem de terminais de entrada e de saída. Estas configurações são válidas, tanto para os transistores NPN, como para o PNP e recebem as seguintes denominações:

- Montagem emissor-comum ou emissor à massa.
- Montagem coletor-comum ou coletor à massa.
- Montagem base-comum ou base à massa.

Estudaremos cada uma delas separadamente.

MONTAGEM EMISSOR-COMUM (EC)

Trata-se da montagem que oferece maior ganho de potência e por isso a mais usada. Nesta montagem, o emissor é o terminal (eletrodo) comum aos circuitos de entrada e de saída. Nestas condições, o terminal de base é o terminal de entrada, enquanto que o coletor é o terminal de saída. Portanto a corrente de base (I_b) e a corrente de coletor (I_c) são respectivamente as correntes de entrada e saída. Na figura 6, temos um transistor NPN e um PNP, ambos em montagens de emissor-comum.

As correntes I_b e I_c , indicadas na figura 6, estão de acordo com o sentido real de condução, ou seja, de acordo com

o movimento de elétrons. A corrente de emissor I_e será a soma de I_b e I_c .

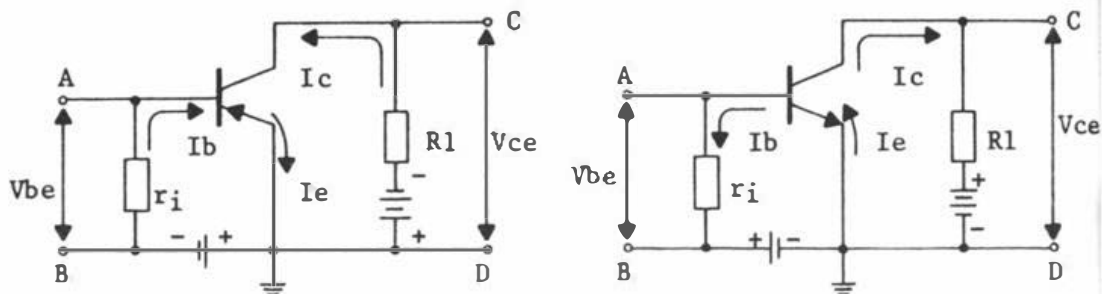


FIGURA 06

Com este tipo de montagem é possível obtermos amplificação de corrente, tensão e potência. Também nesta montagem a resistência de entrada é inferior à de saída. A resistência de entrada situa-se em torno de 1.000Ω , enquanto que a de saída está em torno de 50.000Ω (Estes valores de resistência variam de transistor para transistor).

Se não houver sinal de entrada (que irá aparecer em r_i), as três correntes do transistor permanecerão inalteradas, ou seja, o transistor se mantém na condição de repouso. Podermos então definir um coeficiente β_{cc} que nos relacione a corrente de saída com a de entrada.

$$\beta_{cc} = I_c / I_b$$

Este parâmetro é também designado por h_{FE} e é conhecido pela relação de transferência da corrente direta C.C. ou ganho de corrente C.C. O valor de β_{cc} , normalmente, é fornecido pelo fabricante. Transistores encontrados no comércio apresentam valores de h_{FE} que vão de 10 a 150 para correntes de coletor (I_c), tão grandes quanto 30A e tão pequenas quanto 5mA.

Como o valor de β não é rigorosamente constante, define-se também a relação das variações das correntes para uma tensão de coletor invariável (saída em curto-circuito).

$$\beta_{ca} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{\text{componente alternada da corrente de coletor}}{\text{componente alternada da corrente de base.}}$$

Esse parâmetro β_{ca} também é conhecido pelo nome de "ganho de corrente alternada da montagem EC, com a saída em curto-circuito".

Com este parâmetro podemos calcular o ganho de tensão (A_v) e o ganho de potência (A_p), onde:

$$A_v = \frac{R_l \cdot i_c}{r_i \cdot i_b} = \beta_{ca} \times \frac{R_l}{r_i} \quad (\text{ganho de tensão})$$

e

$$A_p = (\beta_{ca})^2 \times \frac{R_l}{r_i} \quad (\text{ganho de potência})$$

Note que o ganho de potência será muito grande, pois teremos que elevar β_{ca} ao quadrado. O valor de A_p está por volta dos 10.000.

Com relação à β_{cc} e β_{ca} , resta dizer que estes valores não são coincidentes, porém é normal considerá-los iguais e chamá-los apenas de β (beta).

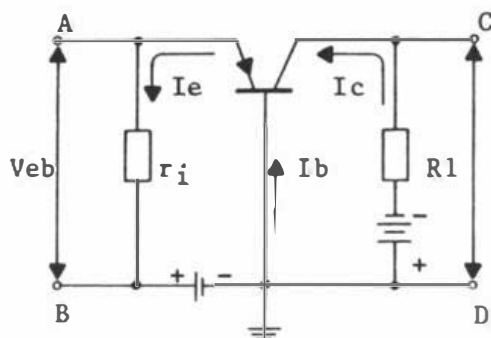
Uma outra característica que a montagem emissor-comum apresenta é a inversão de fase. Isto significa que o sinal de saída está defasado de 180° sobre o sinal de entrada.

FREQUÊNCIA DE CORTE BETA - (FASE)

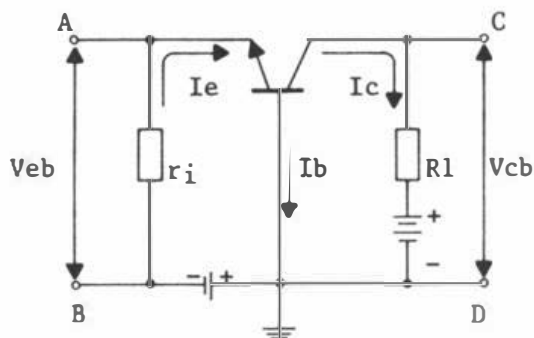
Quando um transistor, em montagem emissor-comum, é solicitado a amplificar sinais alternados, os quais possuem frequências relativamente altas, este apresentará uma redução no ganho de corrente. A frequência necessária para reduzirmos o ganho de corrente (β) em 29,3% do seu valor, a baixas frequências é chamada de frequência de corte beta (fae). Para frequências superiores à fae, o ganho de corrente do transistor fica seriamente reduzido, afetando assim o seu bom funcionamento.

MONTAGEM BASE-COMUM - (BC)

Nesta montagem, o terminal de base é comum aos circuitos de entrada e saída, de modo que o emissor é o terminal de entrada, enquanto que o coletor é o terminal de saída. (figu-



PNP



NPN

FIGURA 07

Se nenhum sinal for aplicado na entrada (entre os pontos A e B) o transistor permanece em regime estático (repouso). Nestas condições, as correntes I_e , I_c e I_b serão constantes. Para um transistor em montagem base-comum (figura 7), podemos escrever: $I_e = I_b + I_c$. Se nada vier perturbar o estado de equilíbrio do transistor, este permanecerá assim indefinidamente. Porém, se aplicarmos uma tensão alternada entre A e B, esta tensão irá fazer com que a tensão emissor-base (V_{eb}), varie de acordo com o sinal de entrada (tensão de entrada entre A e B). Desta forma, a corrente de emissor irá variar (I_e) e, conseqüentemente, as correntes I_b e I_c também irão variar. As correntes de base e de coletor (I_b e I_c) irão variar com a mesma lei ou forma do sinal aplicado ou da corrente de emissor I_e . Por exemplo: se o sinal de entrada for senoidal, as correntes I_e , I_b e I_c também serão senoidais.

Nesta montagem, é R_L (resistência de carga) que retira a tensão amplificada ou sinal de saída. Este tipo de circuito é útil, pois fornece amplificação de tensão. Devido ao fato da junção base-emissor estar diretamente polarizada, o transistor apresenta uma baixa resistência de entrada. Em contrapartida, apresenta alta resistência de saída, pois a junção base-coletor se encontra reversamente polarizada. Por exemplo, para um transistor de baixa potência, a resistência de entrada está em torno de 40Ω , enquanto que a de saída fica por volta

de $1M\Omega$ ($1 \times 10^6\Omega$).

Neste tipo de montagem, observa-se uma ligeira diminuição da corrente de saída (I_c) com relação à de entrada (I_e). Como estas correntes são praticamente iguais, a potência de saída, produzida pelo circuito, é muito maior que a de entrada. Podemos então concluir que este circuito também produz uma amplificação de potência.

Para este tipo de montagem (circuito) é definido o coeficiente alfa (α). Este coeficiente, denominado ganho de corrente, é definido pela relação entre a corrente de saída (I_c) e a corrente de entrada (I_e), portanto:

$$\alpha = I_c / I_e$$

Este coeficiente varia de transistor para transistor, porém sempre próximo da unidade. Isto porque, conforme já dissemos, os valores de I_c e I_e são praticamente iguais.

Os ganhos de tensão (A_v) da montagem base-comum são altos, podendo atingir a ordem dos 2.000 ou mais. Desde que haja uma resistência de carga (R_l) na saída, podemos calcular esse ganho, usando a seguinte expressão:

$$A_v = \frac{R_l \cdot I_c}{r_i \cdot I_e} = \frac{\text{signal de saída}}{\text{signal de entrada}}$$

$$\text{Onde } r_i = V_{eb} / I_e \text{ e } R_l = V_{cb} / I_c$$

Já o ganho de potência (A_p), que também está em torno de 2.000, pode ser calculado por:

$$A_p = \frac{R_l \cdot I_c^2}{r_i \cdot I_e^2} = \alpha^2 \cdot \frac{R_l}{r_i}$$

Geralmente, usa-se esta montagem, quando se trata de amplificar frequências muito elevadas.

MONTAGEM COLETOR COMUM - (CC)

Muito pouco utilizada, porém é a montagem que apresenta o maior ganho de corrente. Nesta montagem (figura 8), o ganho de corrente (γ^*) é definido pela expressão:

$$\gamma = \frac{I_e}{I_b} = \frac{I_b + I_c}{I_b} = \frac{I_b}{I_b} + \frac{I_c}{I_b} = 1 + \beta$$

onde I_e é a corrente de saída e I_b é a corrente de entrada.

* γ = letra grega "gama"

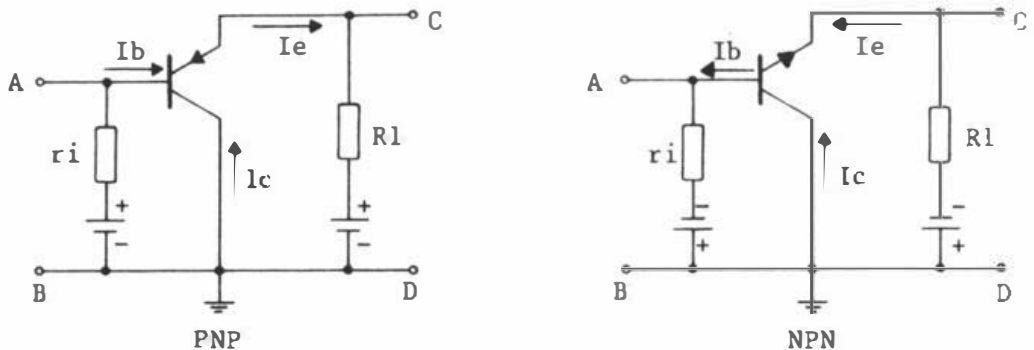


FIGURA 08

Observando a figura 8, podemos escrever: $I_e = I_b + I_c$.

Daí:

$$\gamma = \frac{I_b + I_c}{I_b} = \frac{I_b}{I_b} + \frac{I_c}{I_b} = 1 + \beta.$$

Portanto, podemos concluir que o ganho de corrente (γ) para esta montagem é uma unidade maior que o ganho de corrente para a montagem de emissor-comum.

Este circuito é pouco utilizado como amplificador, porém, devido a sua alta resistência de entrada e baixa resistência de saída, é muito utilizado para acoplar fontes de alta impedância a cargas de baixa impedância, funcionando, assim, como se fosse um transformador casador de impedâncias.

POLARIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE UM TRANSISTOR

Tanto para o transistor NPN ou PNP e para polarização

normal, temos:

- a) A junção emissor-base deve ser polarizada diretamente, ou seja, para um transistor NPN, o negativo (-) da fonte de C.C. deve ser ligado à região N (emissor) e o positivo (+), da fonte de C.C., ligado à região P (base).
 - b) A junção coletor-base deve ser polarizada inversamente, ou seja, para um transistor NPN, o negativo (-) da fonte de C.C. deve ser ligado à região P (base), enquanto que o positivo (+) da fonte de C.C. deve ser ligado à região N (coletor).
- Essas duas condições devem ser obedecidas independentemente dos tipos de ligações do transistor.
Ex. de transistor NPN (Figura 9).

A tensão V_{cb} pode ser bem maior que a tensão V_{be} .

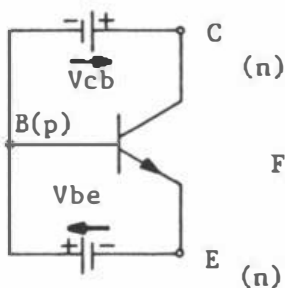


FIGURA 09

Obs.: A junção base-coletor também ficaria reversamente polarizada, se suprimíssemos a fonte de tensão V_{cb} e conectássemos uma nova fonte V_{ce} entre o coletor e o emissor (figura 10). Para se determinar o valor dessa nova fonte (V_{ce}), basta aplicar a Lei de Kirchhoff para tensões, ou seja: $V_{ce} = V_{be} + V_{cb}$

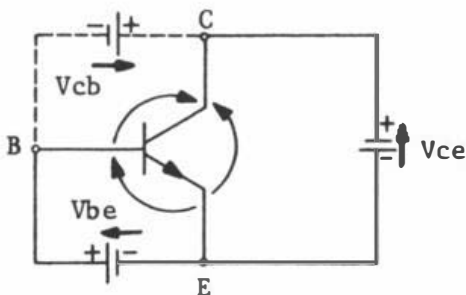
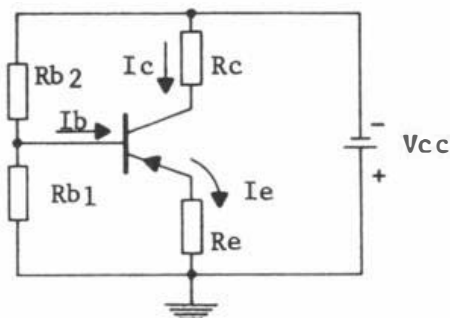


FIGURA 10

A polarização também pode ser obtida, utilizando-se de uma fonte única, sendo este método mais viável economicamente do que o anterior (onde se utilizavam duas fontes). O processo se dá por meio de divisores resistivos de tensão. Veja a figura 11.

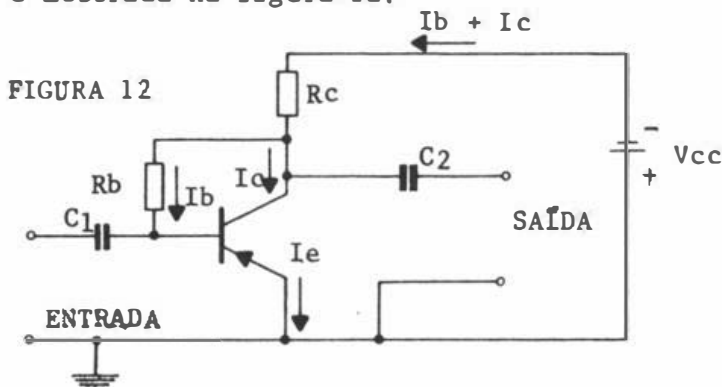
FIGURA 11



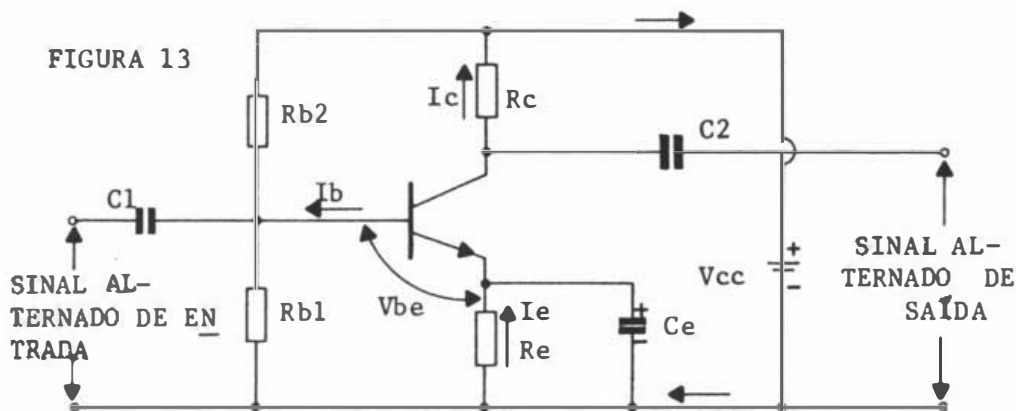
O resistor R_c e V_{cc} proporcionam uma polarização inversa para a junção base-coletor, enquanto que R_{b1} e R_{b2} reduzem a tensão da fonte V_{cc} , até um valor adequado para polarizar diretamente a junção base-emissor. Apesar de econômico e simples, resta o problema da "estabilização", podendo ocorrer um "disparo térmico" (que será visto mais adiante).

Um outro fator que afeta a estabilização dos transistores são as tolerâncias de fabricação dos dispositivos. Por exemplo, se compararmos dois transistores iguais, verificaremos que as suas características diferem ligeiramente de um para outro, tornando, assim, a estabilização, também, ligeiramente diferente.

Uma maneira simples de se conseguir a estabilização do circuito é mostrada na figura 12.



Neste circuito, a estabilização é conseguida por meio de uma realimentação negativa em corrente contínua. Infelizmente esta realimentação negativa contribui para a diminuição do ganho do circuito. Mas estes problemas podem ser contornados, se utilizarmos o sistema de polarização apresentado na figura 13, onde os resistores R_{b1} e R_{b2} formam um divisor de tensão, ligados diretamente à base do transistor em paralelo com R_e . Um aumento de temperatura provocará um acréscimo na corrente de coletor (I_c). Como $I_e = I_b + I_c$, um aumento de I_c provocará um aumento de I_e . Teremos, assim, uma queda de tensão maior em R_e , provocando um decréscimo na tensão entre a base e o emissor (V_{be}), uma vez que a tensão em R_{b1} deve ser praticamente constante. Com isto, a corrente de base (I_b) diminuirá e conseqüentemente I_c também diminuirá, compensando, assim, o aumento inicial.



No circuito da figura 13, o resistor R_e e o capacitor C_e formam um dispositivo anti-temperatura. A função do capacitor C_e (eletrolítico) é impedir a degeneração das componentes alternadas. Pode também dizer-se que o capacitor C_e atua como um filtro para as componentes alternadas, desviando-as da resistência R_e . O valor de C_e depende de dois fatores: a frequência a amplificar e o valor estipulado para R_e . De qualquer modo, o valor do capacitor C_e deve ser tal que a reatância X_c ($X_c = 1/2\pi f c$) seja inferior a um décimo do valor de R_e .

Este processo é tido como o mais generalizado para a po-

larização de transistor em montagem de emissor-comum. Convém salientar que os circuitos de polarização propostos podem ser utilizados para qualquer uma das três montagens básicas de um transistor, o circuito da figura 13 é conhecido por "circuito de polarização por realimentação série", polarização independente de β ou ainda por "polarização por divisor de tensão".

RELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS ALFA (α) E BETA (β) DE UM TRANSISTOR BIPOLAR

Para uma ligação base-comum, a relação entre a corrente de coletor (I_c) e a corrente de emissor (I_e) recebe o nome de fator de amplificação ou ganho de corrente estática (α).

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e}$$

Como I_c é menor que I_e , concluímos que α (alfa) é menor que a unidade (1).

$$\alpha < 1 \quad \text{pois } I_c < I_e.$$

Em se tratando de uma ligação emissor comum, geralmente a mais utilizada, define-se um outro fator de amplificação, o qual consiste no quociente entre I_c e I_b , também conhecido pelo nome de ganho de corrente estática da ligação emissor comum e é representado pela letra β (Beta).

$$\beta = \frac{I_c}{I_b}$$

Como I_c é muito maior que I_b , conclui-se que β sempre será maior que a unidade (1). Este parâmetro (β) depende das propriedades físicas do material utilizado para a fabricação do transistor, bem como de sua estrutura geométrica. Daí o fato do fabricante fornecer uma faixa de valores e é dentro desta faixa que se encontra o valor real de β .

As fórmulas, a seguir, nos dão as relações entre α e β e vice-versa.

$$\alpha = \frac{\beta}{(1 + \beta)}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)}$$

Demonstração:

Sabemos que: $I_c = \beta I_b$ (1)

$$I_e = \frac{I_c}{\alpha} \quad (2)$$

$$I_e = I_c + I_b \quad (3)$$

Substituindo: (1) e (2) em (3), vem:

$$\frac{I_c}{\alpha} = \beta I_b + I_b$$

$$I_c = \alpha I_b (\beta + 1)$$

$$\alpha = \frac{I_c}{I_b} \cdot \frac{1}{(1 + \beta)}$$

$$\text{como: } \frac{I_c}{I_b} = \beta$$

Logo:

$$\alpha = \frac{\beta}{(1 + \beta)} \quad \text{c.q.d (como queríamos demonstrar)}$$

Partindo da equação de alfa (α) em função de beta (β), temos:

$$\beta = \alpha (1 + \beta).$$

$$\beta = \alpha + \alpha \beta$$

$$\beta - \alpha \beta = \alpha$$

$$\beta (1 - \alpha) = \alpha \quad \text{logo: } \beta = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)}$$

c.q.d.

ESTABILIZAÇÃO DO PONTO DE FUNCIONAMENTO DE UM TRANSISTOR

A estabilização do ponto de funcionamento médio do transistor é de vital importância para que o mesmo possa desempenhar, normalmente, as suas funções. Devido ao fato do semicondutor ser sensível à temperatura, os circuitos de polarização tornam-se um pouco complicados. Um aumento descontrolado da temperatura pode levar o transistor à destruição. O caso é muito mais grave para os transistores de germânio do que para os de silício.

A principal causa disto tudo reside no fato da corrente de fuga I_{cbo} crescer, quando a temperatura sofre um acréscimo. O valor de I_{cbo} é fornecido pelo fabricante e, normalmente, é dado para a temperatura de 25°C . Para o germânio, pode-se dizer que o valor de I_{cbo} duplica a cada acréscimo de 9°C na temperatura. Por exemplo, se a temperatura inicial for de 25°C e esta crescer para 70°C (aumento de 45°C), a corrente I_{cbo} deverá ser $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 2^5 = 32$ vezes mais elevada (isto para um transistor de Ge).

Os transistores de germânio apresentam I_{cbo} , em torno de $10\mu\text{A}$ a 25°C , enquanto que os de silício estão na faixa de $0,001$ a $0,1\mu\text{A}$. Porém para os transistores de silício, o valor de I_{cbo} duplica para cada aumento de 6°C na temperatura.

Verifica-se, assim, a importância dos circuitos de estabilização, geralmente, combinados com os circuitos de polarização, para fornecer tensões adequadas ao bom funcionamento dos transistores.

Não é apenas I_{cbo} que provoca a instabilidade térmica dos transistores, também as correntes I_{cbo} e I_{ceo} colaboram, para que haja instabilidade.

CORRENTES I_{cbo} , I_{ceo} e I_{cbo}

A ocorrência dessas correntes dá-se devido aos portadores minoritários, de formação térmica. Para se determinarem os valores dessas correntes, procede-se como mostra a figura 14.

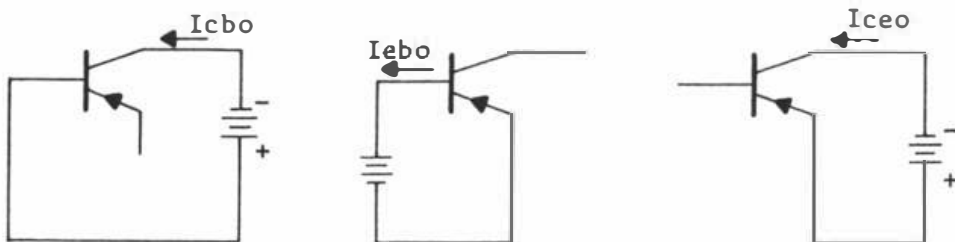
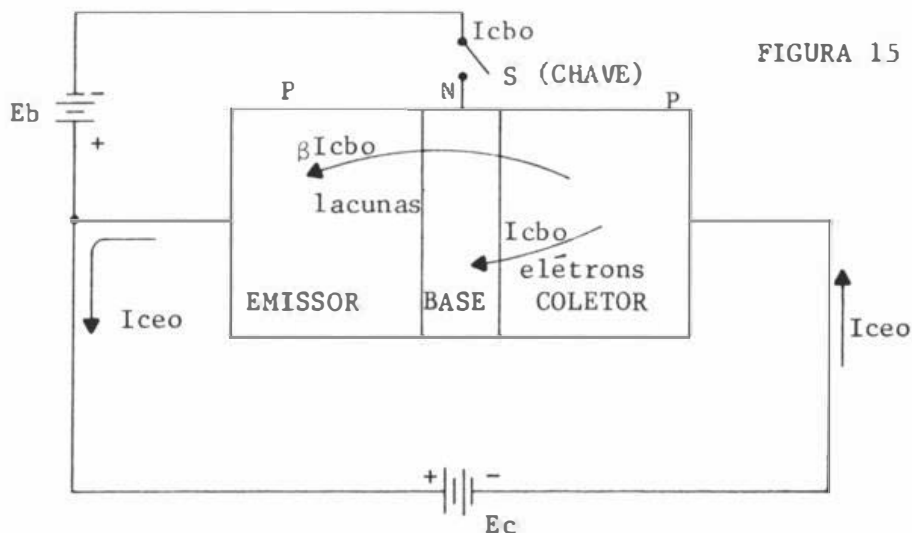


FIGURA 14

Note que I_{cbo} é a corrente que se verifica entre coletor e base, tendo o terminal de emissor desligado. O mesmo ocorre para I_{ebo} (coletor desligado) e I_{ceo} (base desligada).

A corrente I_{ebo} não influi muito no processo de estabilização, porém a corrente I_{ceo} , por assumir valores elevados, tem grande importância no processo de estabilização do transistor. Quando este está em pleno funcionamento, essas correntes estão presentes. Vamos supor um transistor PNP em montagem EC (emissor-comum), com a base desligada (figura 15). Nestas condições, a corrente de base (I_b) é nula ($I_b = 0$), porém a corrente de coletor (I_c) não é, pois as cargas minoritárias provocam a circulação de I_{ceo} . Por sua vez, a corrente I_{ceo} é composta por duas parcelas: uma de grandeza βI_{cbo} (devido às lacunas que se dirigem do coletor para o emissor) e outra de valor I_{cbo} (devido ao movimento dos elétrons livres do coletor para a base e de lacunas do emissor para a base), então teremos: $I_{ceo} = I_{cbo} + \beta I_{cbo} = (1 + \beta) I_{cbo}$. Fica, assim provado o quanto I_{ceo} é maior que I_{cbo} , pois o valor de β (beta) é relativamente grande.



Também podemos concluir que a corrente de coletor (I_c), em funcionamento normal, vai ser reforçada por I_{ceo} , portanto:

$$I_c = \beta I_b + I_{ceo}$$

$$\text{Onde: } I_{ceo} = (1 + \beta) I_{cbo}.$$

A figura abaixo nos mostra as correntes de fuga no transistor.

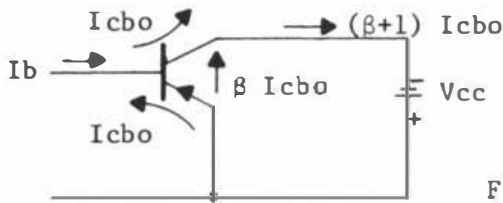


FIGURA 16

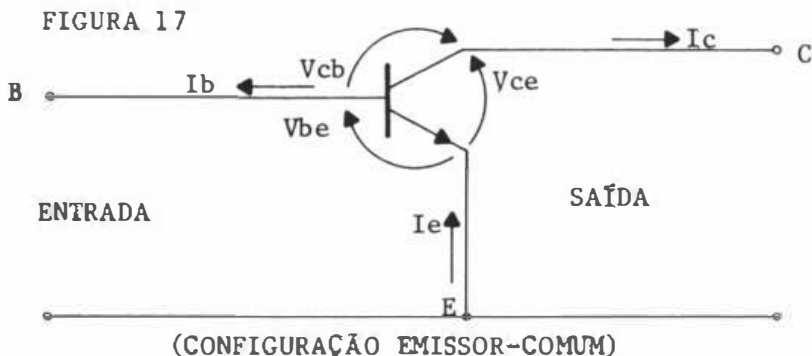
CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS TRANSISTORES BIPOLARES:

Trata-se de uma forma gráfica de descrever as características dos transistores. Tais curvas, geralmente, são fornecidas pelos fabricantes.

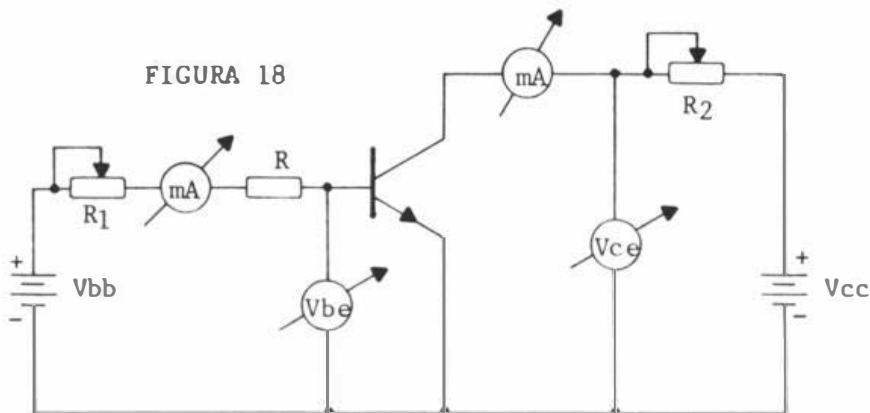
Como sabemos, os transistores são dispositivos que apresentam 3 (três) terminais e, no geral, apresentam, também, 6 variáveis, sendo 3 correntes e 3 tensões. As curvas características relacionam estas variáveis, pondo, em evidência, três das seguintes grandezas.

- V_{be} - tensão entre base e emissor;
- V_{ce} - tensão entre coletor e emissor;
- V_{bc} - tensão entre base e coletor;
- I_e - corrente de emissor;
- I_b - corrente de base;
- I_c - corrente de coletor.

A figura 17 nos mostra essas variáveis, para a configuração emissor-comum.



Para se obter as características de entrada e de saída (família de curvas que relacionam correntes e tensões de entrada e correntes e tensões de saída respectivamente), normalmente utiliza-se um circuito semelhante ao mostrado na figura 18 (neste caso, temos um transistor NPN, em emissor comum).



Vejamos então algumas das famílias de curvas características mais importantes:

a) Curva $I_b \times V_{be}$ - O sinal de tensão de entrada (V_{be}) é injetado entre a base e o emissor, variando, desta maneira, a corrente de base (I_b) do circuito. Mantendo-se V_{ce} constante, e variando-se a tensão V_{be} , através de uma resistência variável (R_1) e, através de um miliamperímetro, mediremos os valores da corrente de base I_b e obteremos, assim, a curva $I_b \times V_{be}$ (figura 19) para um certo V_{ce} constante. O processo se repete para um outro valor de V_{ce} constante, diferente do inicial e, assim, sucessivamente, até obtermos um conjunto de curvas.

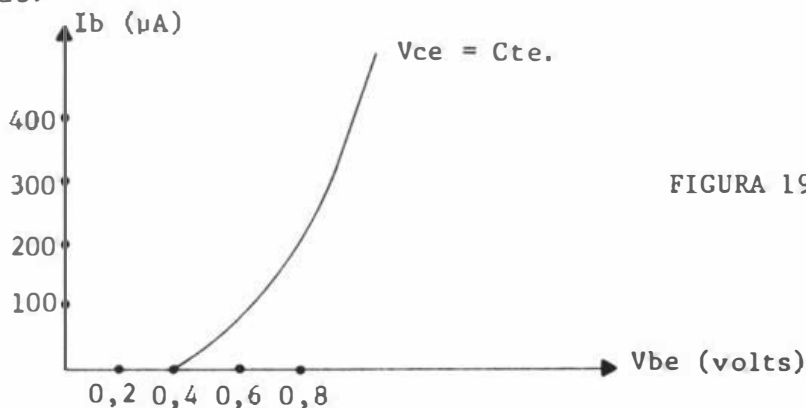


FIGURA 19

Na prática, o fabricante nos fornece apenas uma delas, devido à quase coincidência com as demais.

b) Curva $I_c \times V_{ce}$ - Esta curva nos mostra as características de saída do transistor. Mantendo-se R_1 fixa, portanto, I_b constante, variamos a tensão V_{ce} . Variando-se R_2 , medimos os valores de I_c correspondentes. Obtemos, assim, a primeira curva. Fixando-se outros valores para I_b , obtemos outras curvas e assim conseguimos uma "família" de curvas características. (figura 20)

Nota-se que a corrente I_c quase não sofre influência pela tensão V_{ce} . Isto deve-se ao fato de que, para cada valor da corrente I_b , a curva obtida é praticamente paralela ao eixo horizontal. Também percebe-se claramente que quanto maior for a corrente I_b , maior será a corrente I_c .

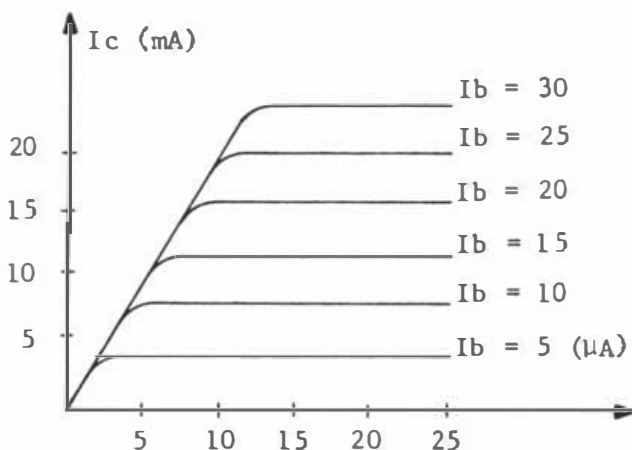


FIGURA 20

c) Curva $I_c \times I_b$ - A capacidade do transistor em fornecer um ganho de corrente é determinada, variando-se sua corrente I_b e medindo-se a variação de I_c . Isto é feito para a tensão V_{ce} constante. Portanto esta curva (Figura 21) nos fornece o ganho de corrente (β), também conhecido como "relação de transferência de corrente direta".

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} \quad \Delta I_c = \beta \Delta I_b \text{ (eq. de uma reta).}$$

Fixando-se V_{ce} e variando a corrente de base I_b , através

do ajustamento de R_1 , medimos os valores de I_c , para cada valor de I_b correspondente. Repetindo-se esse processo para um outro valor de V_{ce} , conseguimos uma família de curvas características. Como essas curvas estão muito próximas uma da outra, o fabricante nos fornece apenas uma das curvas, ou seja, uma curva média.

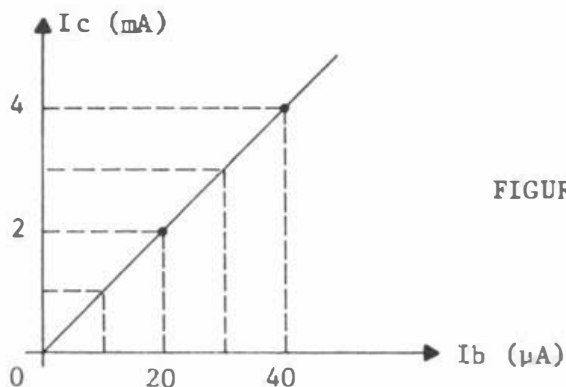


FIGURA 21

Observações:

-Alguns fabricantes costumam reunir estes três gráficos em um único, como mostra a Figura 22.

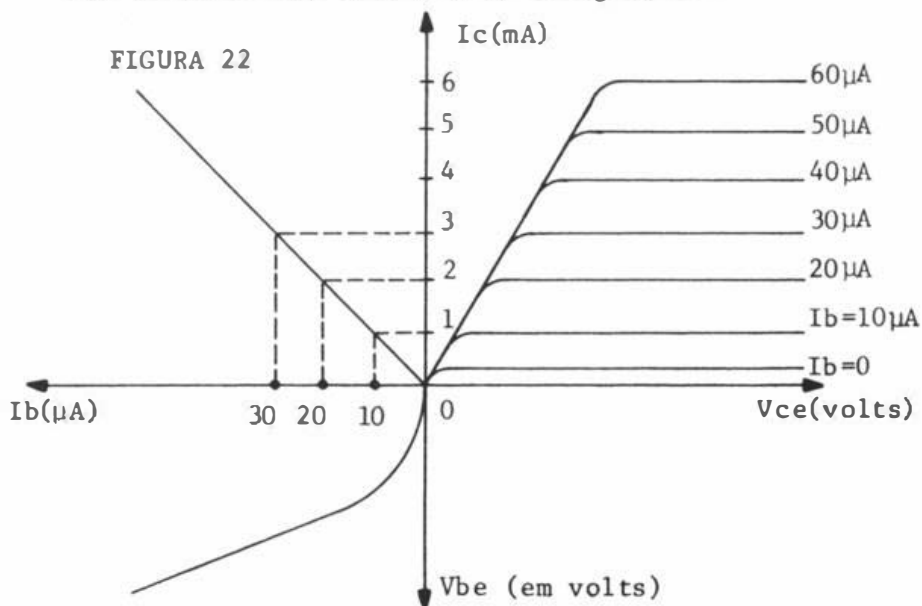


FIGURA 22

- Para a configuração emissor-comum existe ainda uma outra curva característica, de grande utilidade para o nosso estudo. Trata-se da curva $I_c \times V_{be}$, a qual nos relaciona a corrente I_c com a tensão de entrada V_{be} , para um determinado valor fixo de V_{ce} (Figura 23).

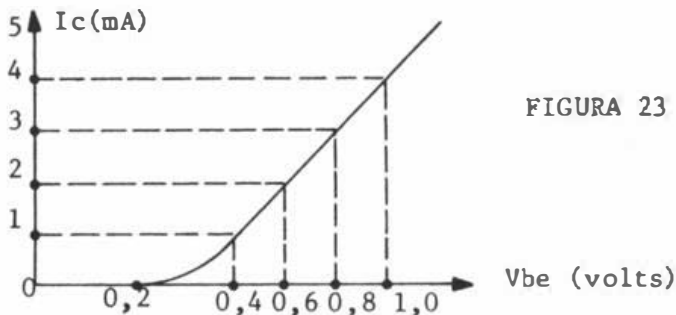


FIGURA 23

- Outro fato que nos chama a atenção é que a posição ou disposição (modo em que as curvas estão dispostas, uma em relação à outra) das curvas características está - sob a influência da temperatura. Daí o fato dos fabricantes fornecerem a temperatura em que tais curvas foram obtidas.

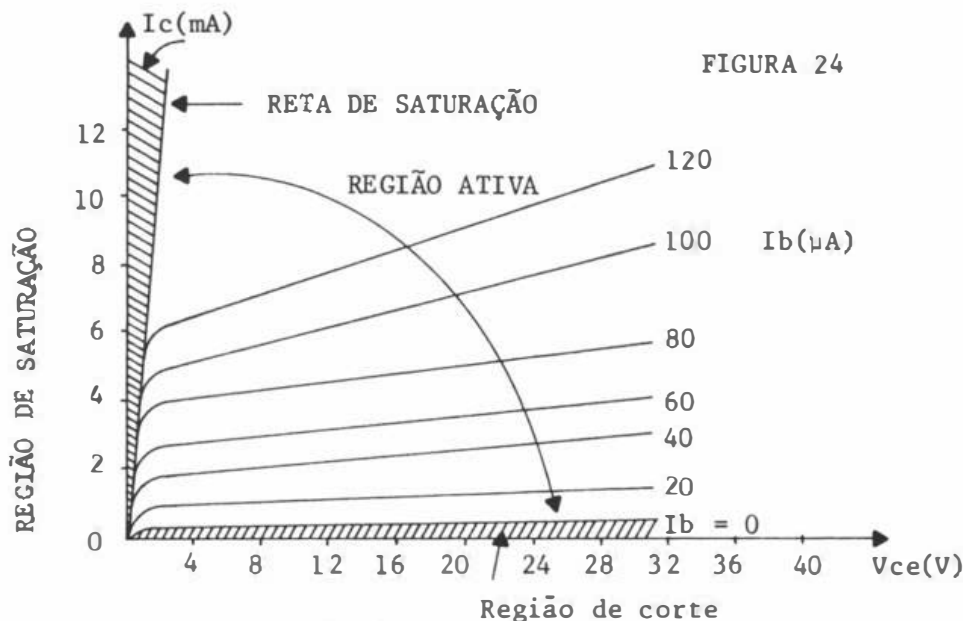
REGIÃO ATIVA, REGIÃO DE CORTE E REGIÃO DE SATURAÇÃO

Consideremos um transistor NPN na montagem "EC". A tensão de saída será a tensão entre o coletor e o emissor (V_{ce}) e a corrente de saída será a corrente de coletor (I_c). A curva $V_{ce} \times I_c$ (figura 24) representa as características de saída para a situação considerada.

A região ativa é a região de funcionamento (operação normal) de qualquer transistor amplificador. Teoricamente, qualquer ponto pertencente a essa região pode ser o ponto de funcionamento do transistor.

Define-se a região de corte (figura 24), como sendo a região compreendida entre o eixo horizontal e a característica de corrente de base nula ($I_b = 0\mu A$). Explica-se a existência dessa região com base no fato de que a corrente de coletor não se anula, quando a corrente de base for nula, pois teremos uma corrente de fuga, I_{cbo} , criada pelas cargas minoritárias de formação térmica. Quando um transistor estiver

operando na região de corte, ele pode ser considerado, para e feitos práticos, como um "interruptor aberto". Neste caso, dizemos que o transistor está no "corte".



A terceira região é a de saturação. Nesta região a resistência de coletor atinge seus valores mais baixos e, consequentemente, teremos a máxima corrente de coletor. Quando o transistor estiver operando nesta região, podemos considerá-lo como um "interruptor fechado".

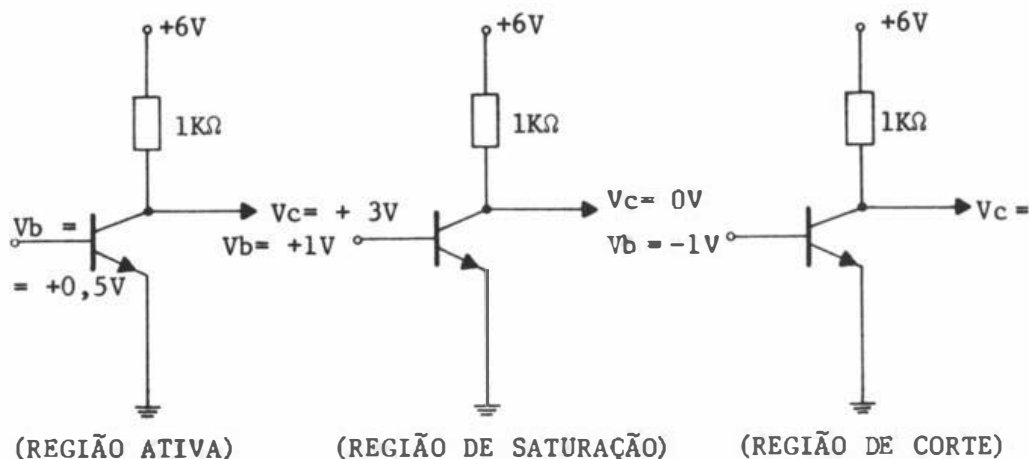
Nas regiões de corte e de saturação o transistor não pode amplificar. Podemos, então, utilizar o transistor como um "interruptor eletrônico" que comuta do corte (circuito aberto) para a saturação (circuito fechado) e vice-versa. Quando o transistor opera nas regiões de corte e de saturação as relações α , β e γ deixam de ser válidas.

Vamos supor um transistor NPN na montagem emissor-comum (EC). Na figura 25, temos este transistor em três situações diferentes. Em cada uma dessas situações o transistor está operando em uma das três regiões descritas.

Note que na região ativa a junção base-emissor está diretamente polarizada (com uma tensão de + 0,5 volts), fazendo com que o transistor conduza. A corrente de coletor (I_c) flui através do coletor, provocando uma queda de tensão de 3,0

volts, devido ao resistor de $1K\Omega$ e, conseqüentemente, a tensão de coletor (V_c) será de 3,0 volts.

FIGURA 25



Na região de saturação o transistor tem na junção emissor-base uma forte polarização direta ($+1V$). Nestas condições o transistor conduz intensamente, havendo, portanto, uma grande queda de tensão na resistência de $1K\Omega$. Sendo assim, o transistor funciona praticamente como um curto-circuito, pois quase toda a tensão de alimentação está aplicada sobre a resistência de carga ($1K\Omega$). Então, para efeitos práticos, podemos considerar a tensão de coletor como sendo nula ($V_c = 0$).

Finalmente, na região de corte, temos a junção emissor-base inversamente polarizada. Desprezando-se a corrente, devido aos portadores minoritários, cessam todas as outras correntes. Portanto, não haverá praticamente nenhuma queda de tensão na resistência de $1K\Omega$, conseqüentemente, a tensão de coletor (V_c) será praticamente igual à tensão de alimentação ($+6V$).

Voltaremos a este assunto mais adiante, quando definirmos o ponto de saturação e o ponto de corte.

RETA DE CARGA E PONTO DE OPERAÇÃO

A reta de carga nos fornece as condições de trabalho do transistor num dado circuito. Vamos supor o circuito da figura 26.

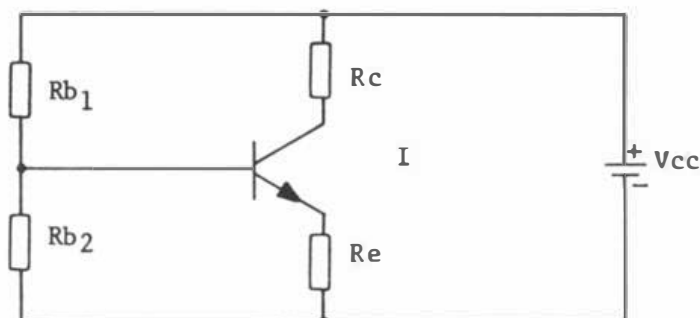


FIGURA 26

Os resistores R_{b1} , R_{b2} , R_c e R_e estabelecem o ponto de operação "Q" (ou ponto quiescente) o qual deverá estar sobre a reta de carga. Para obtermos a reta de carga, necessitamos de dois pontos A e C (figura 27), desta forma, escrevemos a equação da malha "I" referente ao circuito ilustrado na fig. 26.

$V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{ce} + R_e \cdot I_e$, como $I_c \approx I_e$ teremos:

$$V_{cc} = I_c (R_c + R_e) + V_{ce}$$

O primeiro ponto C é obtido, fazendo-se $I_c = 0$. Desta forma, toda a tensão V_{cc} estará aplicada entre o coletor e o emissor, pois não haverá corrente circulando pela resistência R_c .

$$V_{cc} = V_{ce} \quad \text{ponto C}$$

Para se obter o segundo ponto A, basta fazer $V_{ce} = 0$ e teremos:

$$V_{cc} = I_c(R_c + R_e) + \cancel{V_{ce}}^0$$

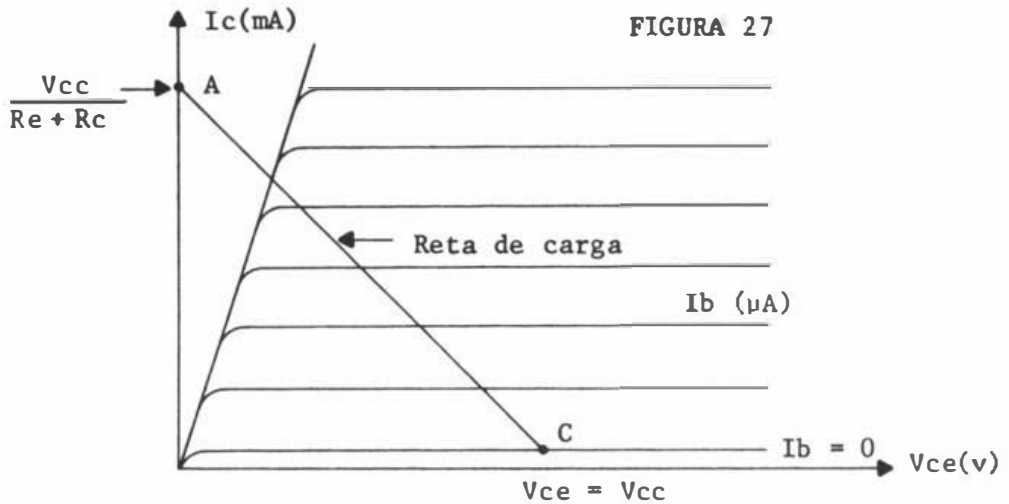
$$V_{cc} = I_c(R_c + R_e) \text{ logo } I_c = \frac{V_{cc}}{R_c + R_e} \quad \text{ponto A}$$

Feito o cálculo dos valores destes dois pontos, basta marca-los no gráfico $I_c \times V_{ce}$. A reta que une estes dois pontos é designada por "reta de carga".

Caso Particular - Para $R_e = 0$, substitui-o na expressão de I_c (A - 2º ponto) e obtém-se:

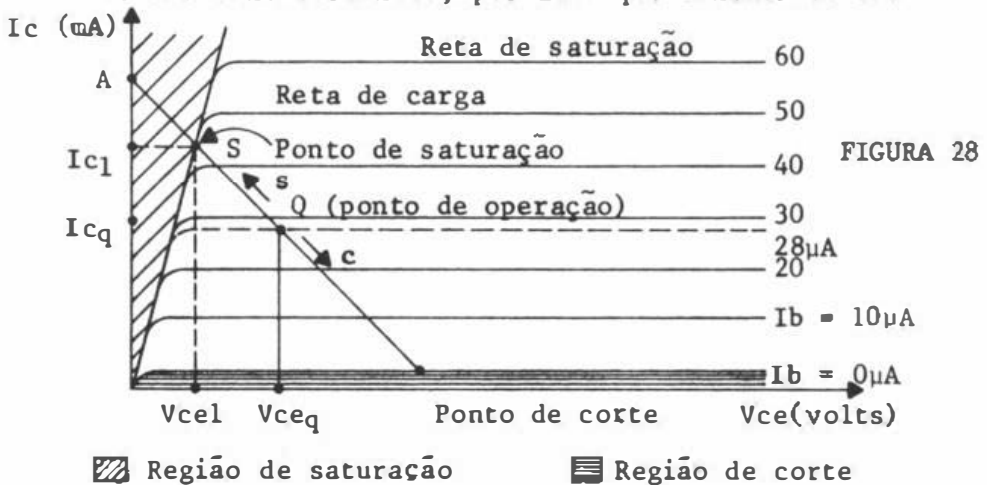
$$I_c = \frac{V_{cc}}{R_c} \quad \text{A partir desta expressão, podemos, então concluir que toda a tensão } V_{cc} \text{ está aplicada sobre o resistor } R_c.$$

Na figura 27, temos a curva característica $I_c \times V_{ce}$, sobre a qual traçamos a reta de carga.



O ponto de polarização (Q) localizar-se-á sobre a reta de carga, numa região determinada, pois a sua real posição es tá ligada a determinados fatores que definirão o projeto. Na prática, costuma-se fazer com que o ponto de operação (Q) fique bem no centro da reta de carga, conseguindo-se, assim, um maior espaço para o ponto Q se movimentar sobre a reta de carga, sem problemas de distorção no sinal de saída (figura 28).

Obs.: Os pontos "S" e "C" são respectivamente os pontos de saturação e corte. Quando se atinge o ponto S, o valor de I_c não aumentará mais, por mais que aumentamos I_b .



Na condição de saturado, o transistor se encontra com as duas junções (BE e BC) diretamente polarizadas.

Dizemos que o transistor está CORTADO, quando, diminuindo-se I_b (sinal de entrada), o ponto de operação (Q) aproxima-se do ponto C (ponto de corte).

No ponto C o transistor estará com as duas junções (BE e BC) inversamente polarizadas.

Vamos agora a um exemplo, para fixar melhor este assunto.

Exemplo: Ao circuito transistorizado, semelhante ao apresentado na figura 26, é fornecido a curva $I_c \times V_{ce}$ (figura 29) e os valores $R_e = 800\Omega$ e $R_c = 3,2K\Omega$. Pede-se determinar: V_{ce} , I_c e I_e referentes ao ponto Q, através do traçado da reta de carga, sabendo-se que $I_b = 30\mu A$.

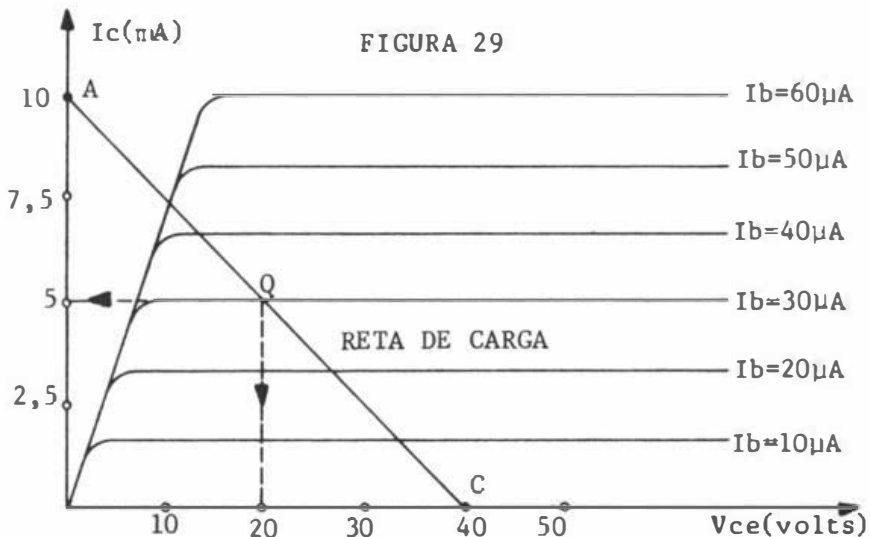
Solução:

a) Traçado da reta de carga.

1ª Ponto (C) $\rightarrow V_{ce} = V_{cc} \rightarrow V_{ce} = 40 \text{ volts}$

2ª Ponto (A) $\rightarrow I_c = \frac{V_{cc}}{R_c + R_e} = \frac{40}{3200 + 800} = \frac{40}{4000} = 10 \text{ mA}$

Uma vez determinados os valores dos pontos A e C, traça-se a reta de carga (figura 29).



b) Determinação do Ponto Q:

Conhecendo-se I_{bq} ($30\mu A$), o cruzamento da reta de carga com a curva de $I_b = 30\mu A$, define-se o ponto de operação.

OBS.: Nas equações, empregaremos q no lugar de Q .

c) V_{ceq} , I_{cq} , I_{eq} ,

Através da projeção do ponto Q sobre os dois eixos (I_c e V_{ce}), obteremos:

$$V_{ceq} \approx 20 \text{ volts} \quad \text{e} \quad I_{cq} = 5 \text{ mA}$$

O valor de I_{eq} é obtido através da equação de corrente do transistor.

$$I_e = I_c + I_b$$

para o ponto Q , teremos:

$$I_{eq} = I_{cq} + I_{bq}$$

$$I_{eq} = 5 \times 10^{-3} + 30 \times 10^{-6} \rightarrow I_{eq} \approx 5,03 \times 10^{-3} \text{ Amp.}$$

ou

$$I_{eq} = 5,03 \text{ mA}$$

LIMITAÇÕES DOS TRANSISTORES BIPOLARES:

Quando estivermos trabalhando em um determinado projeto, devemos lançar mão dos dados fornecidos pelo fabricante, relativos ao elemento a ser utilizado. As limitações são os valores máximos de tensão, corrente, frequência, temperatura, potência, etc. Também devem ser levadas em consideração as regiões de corte e de saturação. Todos esses fatores devem ser respeitados, para melhor desempenho do dispositivo, evitando-se, assim, a diminuição de sua vida útil, ou, até mesmo, a sua destruição total. Vejamos, então, alguns desses fatores:

a) Máxima corrente de coletor (I_{cm}) - Trata-se do valor máximo que a corrente contínua de coletor pode atingir. Se trabalharmos com valores de I_c , abaixo de I_{cm} , o transistor irá trabalhar com segurança. O valor de I_{cm} , geralmente, é fornecido pelo fabricante, sendo que o seu valor vai desde alguns miliampêres até dezenas de ampêres, dependendo do tipo de transistor.

b) Máxima tensão entre o coletor e emissor (V_{cem}) - Se for aumen

tada demasiadamente a tensão entre o coletor e o emissor (V_{ce}), corre-se o risco de ultrapassar o valor da tensão zener para a junção base-coletor, pois como já foi visto $V_{cb} = V_{ce} - V_{be}$. Se isto acontecer, ocorrerá o efeito de AVALANCHE, provocando um aumento, quase que instantâneo, da corrente de coletor, perdendo-se o controle sobre a mesma e danificando o dispositivo. O valor fornecido pelo fabricante (V_{cem} ou V_{ceo}) é o valor máximo permissível e vai desde alguns volt até algumas centenas de volts.

c) Máxima potência dissipada na junção base-coletor - Na junção base-coletor é que se aplica quase toda a tensão externa. O calor é aí gerado por efeito joule. Um cálculo aproximado nos dá a potência dissipada na junção B-C, para uma montagem em emissor-comum, como sendo: $P_d = V_{ce} \cdot I_c$.

A máxima potência que um transistor pode dissipar, depende de fatores, como: temperatura ambiente, invólucro, refrigeração, isolante, dissipadores de calor, etc. A potência dissipada P_d pode atingir até algumas dezenas de Watts. O valor de $P_{d\max}$ também é fornecido pelo fabricante. Por exemplo, um dado transistor apresenta $P_{dm} = 400\text{mW}$, então $V_{ce} \cdot I_c = 400\text{mW} = \text{constante}$. Este fato está representado na figura 30 por uma hipérbole, na qual todos os seus pontos apresentam dissipação de potência igual à P_{dm} (no caso, igual a 400mW).

d) Máxima frequência - Para que o transistor opere satisfatoriamente, é necessário que seja respeitado o limite de frequência. Este, geralmente, é fornecido pelo fabricante.

Através de estudos mais aprofundados, ficou provada a dependência de α (ganho de corrente estática) à frequência. Quando o sinal aplicado entre o emissor e a base for de frequência muito alta, esta será curto-circuitada, devido à capacitância existente entre a base e o emissor e, conseqüentemente, não resultando em sinal de saída. Isto ocorre para uma ligação base-comum.

Na configuração emissor-comum, o fabricante nos fornece a frequência de transição (f_t) e é nesta frequência que a amplificação de corrente torna-se unitária. Para frequências maiores do que a frequência de transição, o ganho de corrente passa a ser pequeno, tornando-se desprezível.

Se reunirmos todas essas limitações em um único exemplo, considerando, para tanto, a característica de saída ($V_{ce} \times I_c$)

da montagem emissor comum, obteremos o seguinte gráfico (figura 30).

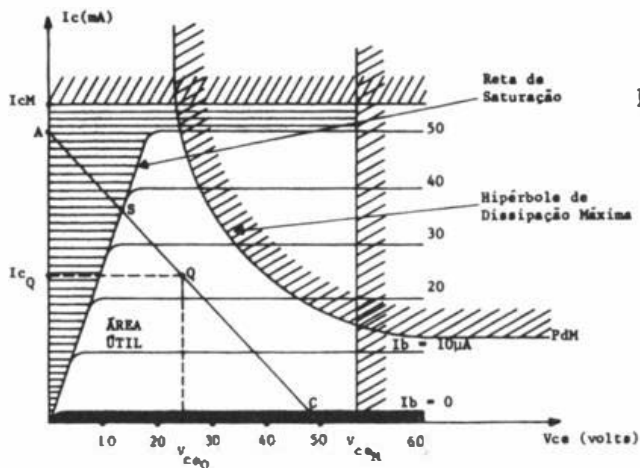


FIGURA 30

Área útil - Trata-se da área, onde o transistor pode operar livremente. Logo o ponto de operação (Q) deverá estar contido no interior desta área e ele já pertencendo à reta de carga, deverá estar contido na mesma.

A área útil se entende como a área limitada pela hipérbole da potência máxima da corrente de coletor e da tensão máxima de coletor emissor.

Obs: A hipérbole de dissipação máxima é obtida, variando-se os valores de V_{ce} e I_c , de modo a manter o produto de ambos, constante e igual à P_{dmax} . (P_{dM}).

- Uma das condições a que a reta de carga tem de obedecer é que esta não pode cortar a hipérbole de máxima dissipação do coletor; quando muito, poder-lhe-á ser tangente.

CARACTERÍSTICAS DOS AMPLIFICADORES

Como dissemos anteriormente, a principal função do transistor é amplificar. E, baseando nos tipos de ligações do transistor, é que surgiram os diversos tipos de amplificadores. Daí os três tipos básicos, a saber:

- a) Amplificador em base comum
- b) Amplificador em emissor comum
- c) Amplificador em coletor comum

Vejamos algumas das características necessárias para o estudo dos amplificadores.

- a) - Impedância de entrada (Z_e) - Trata-se do quociente entre a tensão de entrada (E_e) e a corrente de entrada (I_e).

$$Z_e = \frac{E_e}{I_e}$$

- b) - Impedância de saída (Z_s) - Trata-se do quociente da tensão (sinal) de saída (C.A.), quando a saída estiver em vazio, ou seja, sem carga conectada, logo $I_s = 0$. Quando a corrente de saída (C.A.) estiver curto-circuitada, ou seja, quando a tensão de saída for nula, conseqüentemente, a tensão de saída ($E_s = 0$) será zero.

$$Z_s = \frac{E_s \text{ (vazio)}}{I_s \text{ (curto-circuito)}}$$

- c) - Amplificação de corrente (A_i) - É a relação entre a corrente de saída I_s (C.A.) e a corrente de entrada I_e (C.A.)

$$A_i = \frac{I_s}{I_e}$$

- d) - Amplificação de tensão (A_e) - Relação entre a tensão E_s (C.A.) de saída e tensão E_e (C.A.) de entrada.

$$A_e = \frac{E_s}{E_e}$$

- e) - Amplificação de potência (A_p) - Trata-se, pois, do produto entre os dois fatores acima: A_i e A_v .

$$A_p = A_i \times A_v \text{ ou } A_p = \frac{I_s}{I_e} \times \frac{E_s}{E_e}$$

ou seja, a relação entre a potência de saída e a de entrada.

- f) - Relação de fase - Trata-se da defasagem entre a tensão de saída e a tensão de entrada, ou seja, o quanto, em graus, uma está atrasada ou adiantada em relação à outra.

Definidos alguns parâmetros, na prática, observam-se as seguintes características dos amplificadores, quanto ao tipo de ligação do transistor, no circuito.

Características Amplif. em	a	b	c	d	e	f
Base Comum	$\approx 50\Omega$	$\approx 200K\Omega$	$\pm 0,97$ vezes	± 900 vezes	≈ 900 vezes	-
Emissor Comum	$\approx 3K\Omega$	$\approx 50K\Omega$	± 100 vezes	± 1000 vezes	± 10.000 vezes	180°
Coletor Comum	$\approx 300K\Omega$	$\approx 50\Omega$	± 100 vezes	$\pm 0,99$ vezes	± 100 vezes	$\sim$

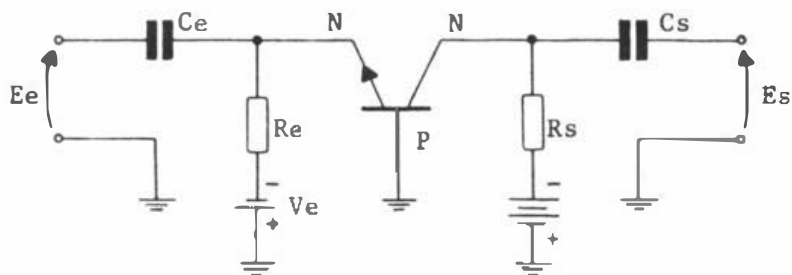
Neste quadro, temos um pequeno resumo dos amplificadores.

Seus circuitos estão representados abaixo (figura 31), utilizando-se apenas transistores NPN. Os circuitos para os transistores PNP são os mesmos, bastando apenas inverter a ligação das baterias para, desta maneira, se obter a polarização correta do transistor.

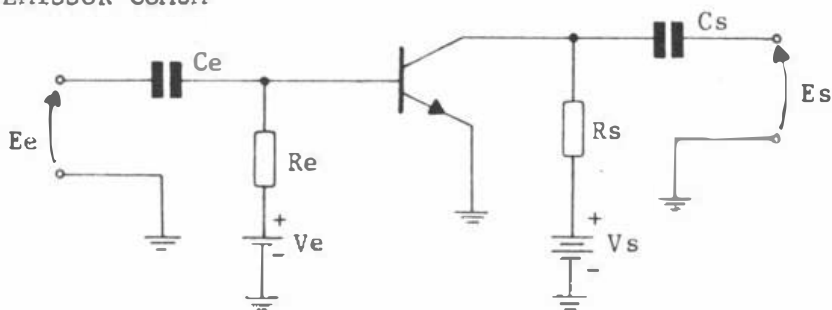
A função do capacitor C_e é o de acoplar o sinal a ser amplificado à entrada do amplificador, ou seja, deixando passar apenas a parte de C.A. do sinal, enquanto que C_s serve para recolher o sinal de saída.

R_e é a resistência de entrada, também designada por resistência limitadora, enquanto que R_s é a resistência de carga ou de saída. As baterias V_e e V_s são utilizadas para a correta polarização do transistor. Na prática, utiliza-se normalmente uma única bateria, para a polarização do transistor.

a) BASE COMUM



b) EMISSOR COMUM



c) COLETOR COMUM

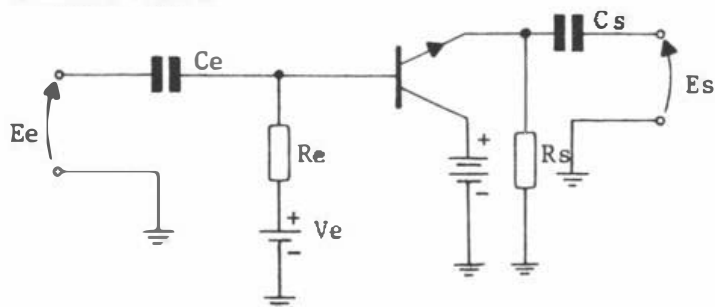


FIGURA 31 (a,b e c).



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-9

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Quando utilizamos um transistor, devemos levar em conta que:
 - a) Podemos interligar seus terminais;
 - b) Para cada transistor existe uma aplicação específica;
 - c) Não necessitamos dos dados fornecidos pelo fabricante.
- 2) Numa configuração emissor-comum, a defasagem entre o sinal de saída e o sinal de entrada é de:
 - a) 90°;
 - b) Zero;
 - c) 180°
- 3) O sinal de entrada, para a configuração emissor-comum, é injetado entre:
 - a) base e coletor;
 - b) coletor e emissor;
 - c) base e emissor.

- 4) A configuração coletor-comum apresenta:
- a) ganho elevado de corrente e resistência de saída baixa;
 - b) ganho elevado de tensão e resistência elevada de entrada;
 - c) ganho baixo de tensão e de corrente.
- 5) A junção entre o emissor e a base de um transistor P-N-P é:
- a) diretamente polarizada;
 - b) inversamente polarizada;
 - c) indiferentemente, tanto faz direta ou indiretamente polarizada.
- 6) O ponto de operação (Q) se encontra:
- a) sobre a reta de saturação;
 - b) sobre a reta de carga;
 - c) fora da área útil.
- 7) A corrente de fuga I_{cbo} aumenta com:
- a) o acréscimo da umidade;
 - b) a diminuição de I_{ceo} ;
 - c) o aumento da temperatura.
- 8) Nos circuitos emissor-comum, a estabilização de C.C. se faz necessária para:
- a) aumentar o ganho de tensão;
 - b) compensar possíveis variações na corrente de fuga;
 - c) melhorar a resposta de frequência.
- 9) Dados: $V_{cc} = 30$ volts; $R_c = 2500\Omega$ e $R_e = 500\Omega$; $I_{b2} = 30\mu A$, e $I_c \times V_{ce}$ (Fig. 29). Os valores de V_{ceq} , I_{cq} e I_{eq} , são aproximadamente:
- a) 15 (V); 5 (mA); 5,03 (mA);
 - b) 20 (V); 5,03 (mA); 5,0(mA);
 - c) 18 (V); 5,5 (mA); 4,95 (mA).

- 10) Com relação à figura 30, dizemos que um transistor está - no corte quando:
- a) o ponto de operação (Q) se encontra sobre a reta de saturação;
 - b) o ponto Q está no ponto C, ou precisamente no interior da região de corte;
 - c) o ponto de operação se encontra no interior da região útil ou área útil.



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

LIÇÃO E-10

DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES II

INTRODUÇÃO

Procuraremos, nesta lição, bem como nas próximas, analisar os diversos tipos de dispositivos de estado sólido, utilizados na prática. Até o momento, estudamos o princípio de funcionamento de dois tipos de dispositivos semicondutores. O primeiro deles, o diodo de junção e é justamente, sobre os diodos que iremos falar nesta lição. Veremos que há inúmeros tipos de diodos com variadas características e aplicações diversas daquelas já vistas e que estavam longe de serem controladas pelos "diodos de junção". Também discorreremos sobre os "dispositivos sensíveis à luz", os quais formam uma outra família de dispositivos, conhecida por "Dispositivos optoeletrônicos", muito usados hoje em dia.

Com isso, desenvolveremos esta lição com o objetivo de levar até o aluno os conhecimentos necessários, para que possa compreender e atuar sobre funcionamento de circuitos eletrônicos de aparelhos altamente sofisticados. A seguir, a apresentação e estudos desses dispositivos semicondutores.

DIODO DE CONTATO PONTUAL OU DE CONTATO DE PONTA

Este tipo de diodo é constituído de um fio condutor fino, em forma de S (conhecido por "bigode de gato") que faz contato, sob pressão, com uma pequena placa de material semiconductor. O conjunto é encerrado hermeticamente em uma pequena cápsula do mesmo modo que no diodo de junção.

O fio condutor (bigode de gato) é feito de liga de platina, de tungstênio, de ouro, de bronze fosforoso e de outros materiais. Apresenta várias dobras (daí o formato de "S"), a fim de exercer ação de mola e fazer pressão sobre a superfície do semiconductor, estabelecendo, assim, o contato com pressão suficiente para manter a ponta do fio na posição adequada. A figura 1 nos mostra o aspecto simplificado do diodo de contato por ponta.

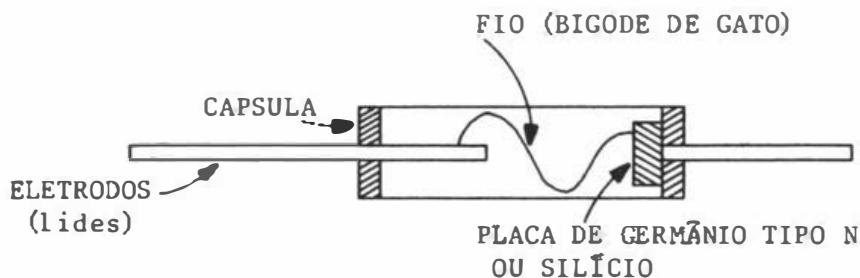
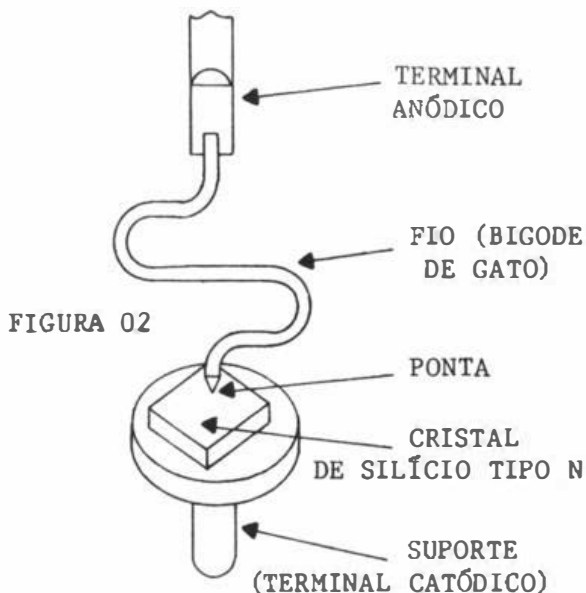


FIGURA 01

A placa de material semiconductor (cristal) pode ser de germânio (Ge) ou de silício (Si). Seu processo de fabricação consiste em submeter o cristal a impulsos de corrente num intervalo de tempo muito pequeno, ocasionando, com isso, a fusão de impurezas contidas na parte metálica que se dissolvem na pastilha semicondutora, junto da região de contato. Devido à fusão e o resfriamento rápido, aparentemente, tem-se uma transformação localizada de material tipo N em material tipo P, obtendo-se, dessa forma, uma junção PN a qual, através de testes precisos, comprova as propriedades de retificação. Essa junção PN possui dimensões muito reduzidas. A figura 2 nos mostra a constituição interna de um diodo de contato pontual.



Observe que a região de contato, constituindo a junção "PN", apresenta dimensões diminutas. Devido a isso, consegue-se uma grande redução da capacitância, desse modo, permitindo a sua utilização em circuitos de alta frequência e baixa potência. O diodo de contato, além de ser de construção barata, pode ser usado para detectar frequências até 10.000 MHz (megaciclos por segundo), sendo que os modelos em miniatura podem detectar frequências de até 70.000 MHz. À medida que as impurezas dos semicondutores N forem aumentadas, o diodo poderá trabalhar com frequência também maior, porém mais baixa será a tensão inversa que ele poderá resistir.

Os diodos de "contato de ponta" são empregados em circuito de alta frequência, como: discriminadores nos receptores de rádio FM e nos receptores de TV., detectores de vídeo nos receptores de TV., detectores de ondas dos aparelhos de radar, etc...

Os diodos de contato de ponta possuem as mesmas limitações dos diodos retificadores, ou seja:

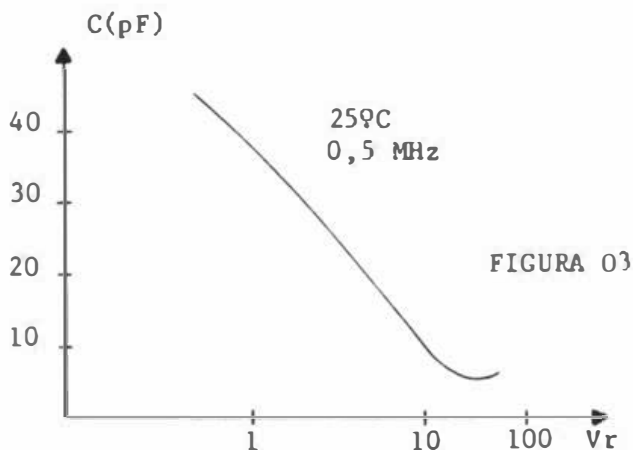
- máxima tensão inversa;
- máxima intensidade de corrente direta;
- máxima dissipação de potência, etc.

A simbologia usada para representar o diodo de contato

de ponta é a mesma utilizada para representar os diodos de junção (diodo retificador).

DIODO VARICAP OU VARACTOR (DV)

Na lição E-8, estudamos a capacitância da junção "PN". Viemos que, quando uma junção "PN" está reversamente polarizada, a zona de depleção pode ser considerada semelhante ao dielétrico de um capacitor e que um aumento da tensão inversa provoca um alargamento da zona de depleção e, conseqüentemente, ocorrerá uma diminuição da capacitância (quanto maior a tensão menor será a capacitância). Desse modo, podemos concluir que a capacitância da barreira de potencial não é constante, mas varia inversamente com a tensão aplicada. A figura 3 ilustra esse fato. A curva aí representada é do BB 106, varicap de sintonia para TV (VHF).



A partir desse fenômeno é que se desenvolveu o varicap, ou seja, "diodo com capacitância dependente da tensão".

A figura 4 nos mostra a simbologia usada para identificar um diodo varicap.

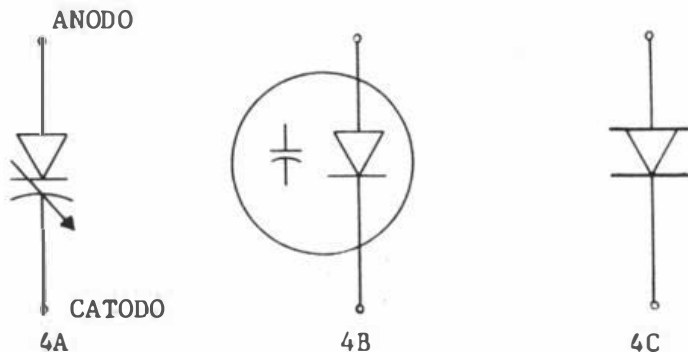


FIGURA 04

O símbolo do centro, 4(b), inclui um pequeno símbolo de capacitor, tornando assim o dispositivo fácil de se identificar.

Um modelo elétrico para um diodo varicap sob polarização reversa é ilustrado na figura 5. A resistência R_s representa a resistência ôhmica série do diodo e C_r representa a capacitância da junção, enquanto que R_r representa a resistência reversa do diodo, a qual é normalmente desprezada.

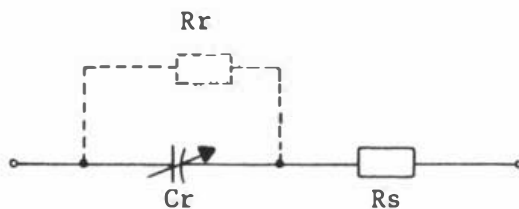


FIGURA 05

No comércio, encontram-se varicaps com capacitância variando na faixa de 1 pF até 100 pF ou 200 pF aproximadamente e com tensão inversa de algumas dezenas de volts. Esses diodos possuem os mais variados aspectos, dependendo de sua aplicação e procedência.

A figura 6 nos mostra dois diodos varicaps, projetados

para funcionarem em frequência bem acima de 500 megahertz com uma dissipação de potência de 500 miliwatts.

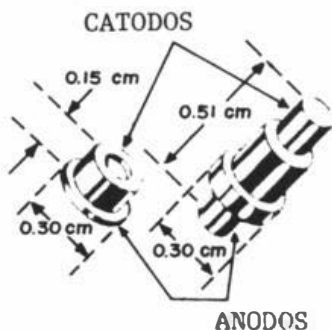


FIGURA 06

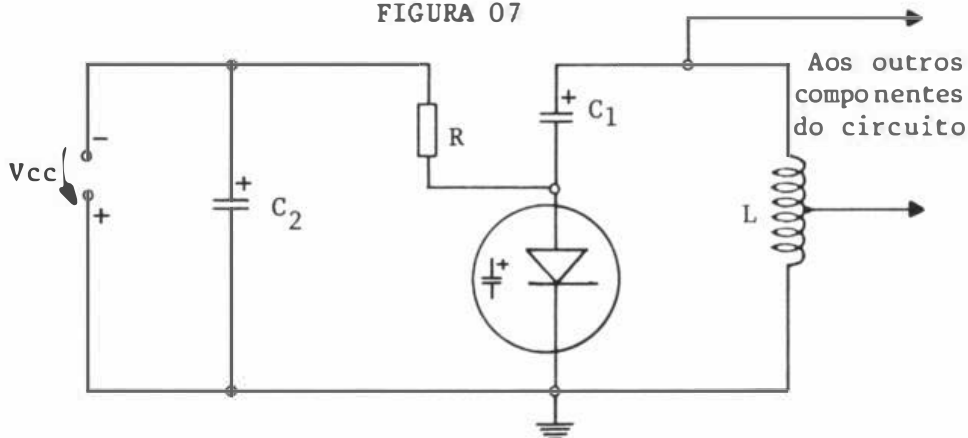
Limitações de um diodo varicap:

- máxima tensão inversa (polarização reversa);
- máxima dissipação de potência.

O diodo varicap é usado para substituir capacitores convencionais em muitas aplicações, mas geralmente usa-se o varicap para variar a frequência de um circuito ressonante. Também é usado em circuitos multiplicadores de frequência, amplificadores de alta frequência, controle automático de frequências (CAF) em receptores de FM, seletores de canais (VHF e UHF) dos televisores, etc.

A figura 7 nos mostra um circuito, onde o varicap atua no sentido de variar a frequência de um circuito ressonante.

FIGURA 07



O capacitor C1 é bem grande, tendo, portanto, uma baixa reatância na frequência de ressonância do circuito paralelo - ressonante, o qual se resume no indutor L e no diodo varicap.

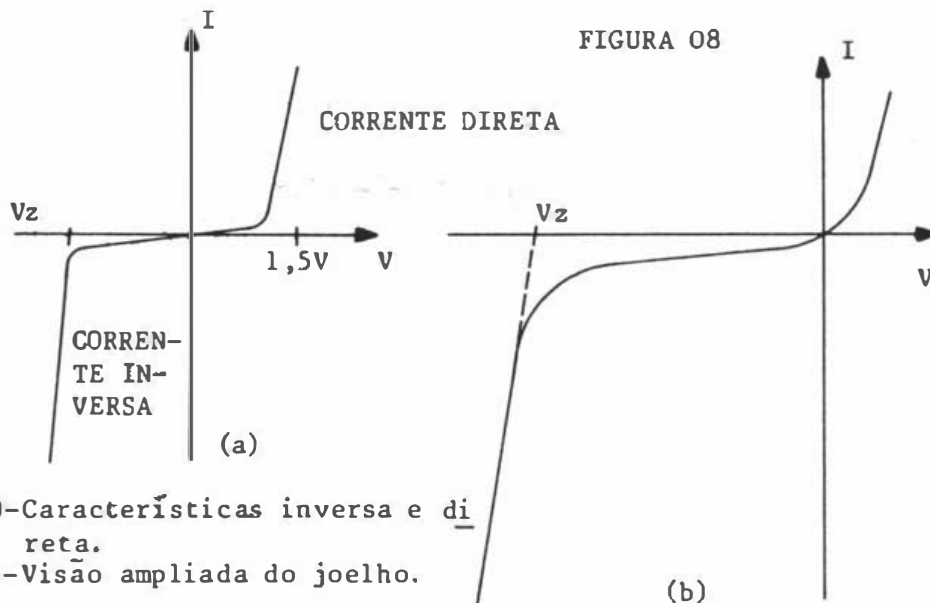
O capacitor C1 serve para evitar que a corrente de polarização CC flua através do indutor L, enquanto que o capacitor C2, o resistor R e Vcc (tensão C.C.) são usados para polarizar reversamente o diodo varicap. Variando-se a tensão de polarização, varia a capacitância do diodo varicap (DV), alterando-se assim a frequência do circuito ressonante. Dessa forma, o diodo varicap (DV) torna-se um componente sintonizado, comumente chamado de varicap sintonizado.

DIODO ZENER

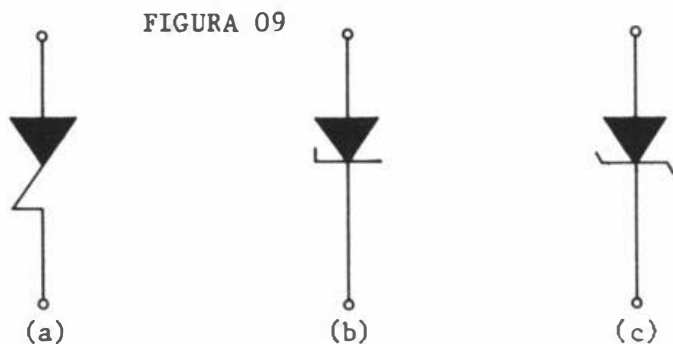
Também é conhecido como diodo de *ruptura ou de avalanche*. Trata-se, pois, de diodos concebidos com capacidades adequadas de dissipação de potência para operar na região de ruptura. Estes diodos, normalmente, são empregados como dispositivos de tensão constante, tensão de referência ou reguladores de tensão.

Na lição E-8, vimos que o efeito zener pode ocorrer por ação de dois mecanismos: multiplicação de avalanche e ruptura por efeito zener. É baseado nesses fenômenos que se constrói o diodo zener. Para diodos fortemente dopados, o efeito predominante é a ruptura por efeito zener, enquanto que para diodos fracamente dopados predomina a multiplicação por avalanche. No entanto o termo zener é normalmente usado tanto para o diodo de avalanche como para diodo de ruptura. Outrossim diodos de silício operados em ruptura ou por avalanche, com capacidade para manter tensões de até algumas centenas de volts e com potência nominal de até 50W, são encontrados disponíveis no mercado.

Porém à medida que a tensão for aumentada, a corrente reversa (inversa) permanecerá relativamente constante, até atingir um certo valor de tensão, quando, então, com um pequeno incremento na tensão reversa, a corrente reversa aumentará drasticamente. Isto significa que a resistência interna diferencial do diodo é baixa para essa região de trabalho. É devido a esse fato que temos o ramo da curva tensão-corrente quase perpendicular ao eixo horizontal (figura 8B).



Na figura 9, temos a simbologia adotada para identificar o diodo zener, sendo a última (c) a mais utilizada.



Na simbologia empregada para representar os diodos, o sentido da seta indica a direção convencional da corrente, ou seja, do anodo para o catodo. Para um diodo zener convenientemente polarizado (polarizado reversamente), o sentido convencional da corrente reversa será do anodo para o catodo. O sentido real é o mais utilizado para o estudo e análise de cir-

cuitos. Porém o sentido da corrente será do catodo para o anodo. Na figura 10, temos representados os sentidos real e convencional da corrente reversa de um diodo zener convenientemente polarizado (pólo negativo da bateria ligado ao anodo e pólo positivo da bateria ligado ao catodo).

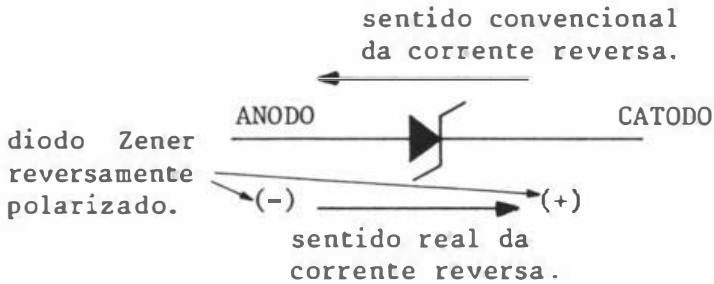


FIGURA 10

Com relação ao fato do traçado da curva tensão-corrente ser quase perpendicular ao eixo horizontal, podemos observar que a curva característica do zener, na prática, não é exatamente perpendicular, pois a tensão varia ligeiramente com a corrente. O aluno irá entender melhor este fato, observando a figura 11.

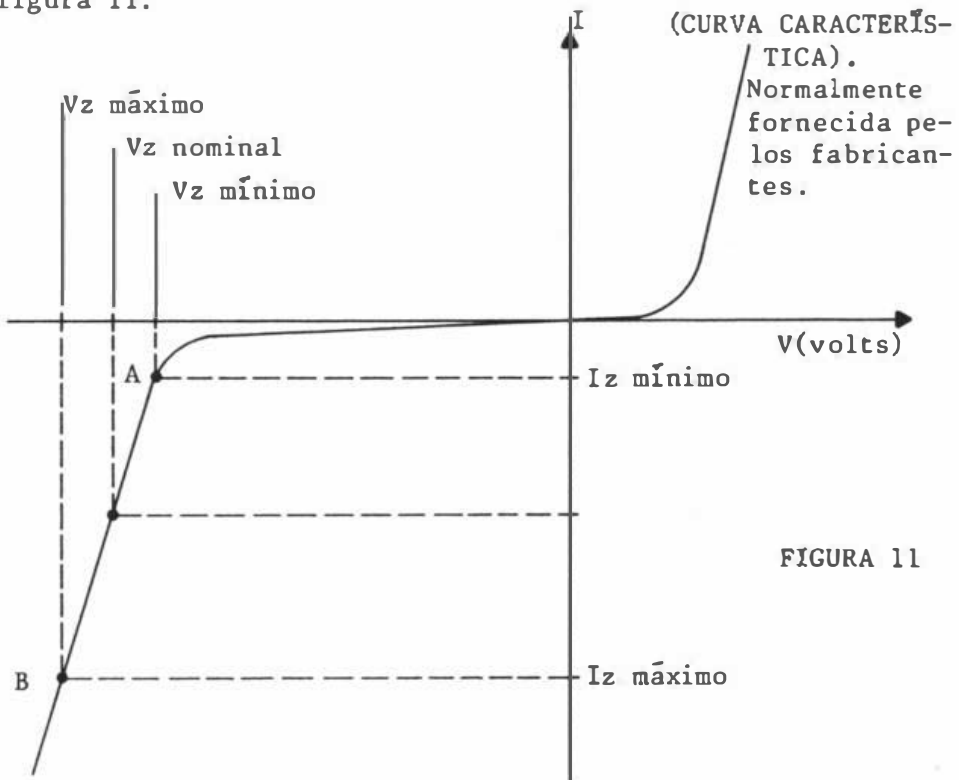


FIGURA 11

Note que para uma variação relativamente grande da corrente, temos uma ligeira variação da tensão (V_z máximo - V_z mínimo).

APLICAÇÕES DO DIODO ZENER

A principal finalidade do zener é "estabilizar tensões", ou seja, manter a tensão aplicada na "carga" constante, mesmo que a tensão da rede elétrica varie (dentro de certos limites). Suponhamos que, no circuito da figura 12, o diodo zener esteja trabalhando na região de avalanche controlada. Isto -

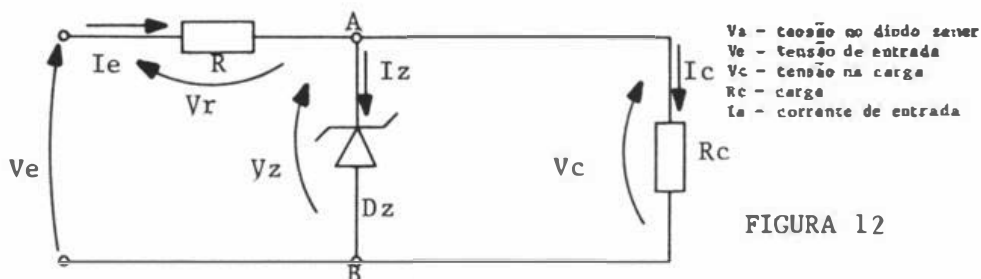


FIGURA 12

nos leva a considerar V_z como sendo constante. Caso venha a ocorrer uma variação da corrente na carga ou alteração da tensão de entrada (V_e), o diodo zener (D_z) deverá compensar tais variações, desde que estas não ultrapassem certos limites. Com base nesses fatos, caso a tensão de entrada (V_e) diminua, a tensão, sobre a carga (R_c), tenderá a diminuir e o diodo zener passará a conduzir menos corrente (I_z), de modo que a queda de tensão em R (V_r) diminua, mantendo assim a tensão sobre a carga (V_c) constante. Se ocorrer o oposto, ou seja, V_e aumentar, a tensão sobre a carga (V_c) tenderá a aumentar e o zener passará então a conduzir mais corrente, aumentando assim a queda de tensão (V_r) sobre o resistor R , mantendo, desse modo, a tensão sobre a carga constante. Para melhor entendimento desse fato, basta aplicar as leis de Kirchhoff, ou seja:

$$\begin{cases} V_e = V_r + V_z. \\ V_z = V_c \end{cases} \quad (i) \quad \text{ou ainda}$$

$$I_e = I_z + I_c. \quad (II) \quad p/ \quad I_e = \text{cte.}$$

Poderíamos ainda dizer que uma variação da tensão de entrada ou da corrente de saída irá provocar uma variação da resistência intrínseca do dispositivo (diodo zener), o qual procurará manter o produto $R_z \cdot I_z$ igual a uma constante e consequentemente constante também será a tensão de saída (tensão aplicada à carga).

Apresentamos abaixo (figura 13) o modelo elétrico do diodo zener, facilitando assim o melhor entendimento da conclusão acima.

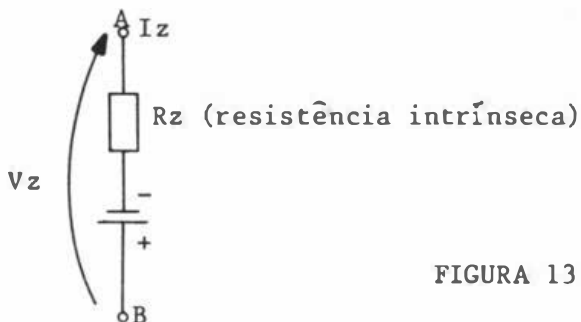


FIGURA 13

Estão sendo muito difundidas atualmente e muito utilizadas, na prática, as chamadas FONTES DE TENSÃO ESTABILIZADAS que alimentam aparelhos eletrônicos, utilizando tensão DC de valor constante. Quaisquer que sejam as variações na intensidade de corrente ou na tensão C.A., de entrada, não irá alterar a tensão de saída.

Uma outra aplicação interessante dos diodos zener, quando ligados em oposição, em um circuito de C.A., é que produzem uma onda quadrada, no caso dos zener serem iguais. Se forem diferentes, produzirão picos negativos e positivos da onda quadrada de amplitude diferente, figura 14.

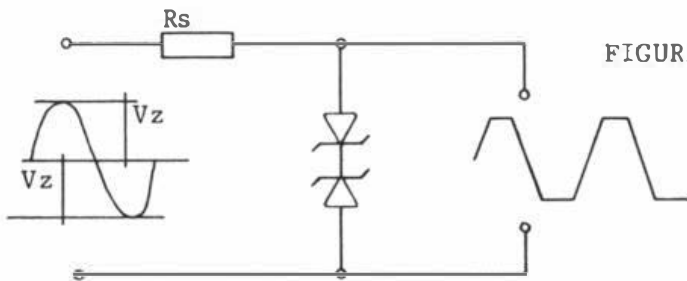


FIGURA 14

Além dessas aplicações, os diodos zener são aplicados na proteção de medidores, supressão de faíscamento em interruptes, etc...

LIMITAÇÕES DO DIODO ZENER

Corrente mínima (I_z mínimo) - É o mínimo valor de corrente do diodo (I_z) abaixo do qual o mesmo não deve ser usado. Como esta corrente está no joelho da curva (figura 11, ponto A), onde a resistência dinâmica é grande, podemos concluir que para correntes menores do que I_z mínimo, a regulação será muito pobre, ou seja, o diodo praticamente deixa de operar como regulador de tensão.

Corrente máxima (I_z máximo) - Trata-se, pois, da máxima corrente permitida que atravessa o diodo sem danificá-lo. Se o valor da corrente que o atravessa for superior ao valor máximo permitido, esta provocará uma dissipação de potência fora das especificações de construção, super aquecendo-o, podendo inclusive danificá-lo completamente.

Máxima potência dissipada - A temperatura limite é de aproximadamente (200°C), dessa forma, os diodos zener são encontrados, no comércio, classificados em "séries", conforme a máxima potência que os mesmos são capazes de dissipar. Para os diodos de alta potência são utilizados, de preferência, invólucros metálicos, com o objetivo de auxiliar a dissipação do calor produzido na junção, devido a passagem de corrente elétrica através da mesa. Encontramos na prática, diodos zener com potências que vão desde 0,5 W (500 mW) até 80 W aproximadamente. Exemplificando, um diodo zener muito usado na prática, é o BZX76/C5V6 de fabricação nacional, da série de 400 mW, com tensão zener igual a 5,6 volts.

Retornaremos ao assunto, diodo zener, quando do estudo dos "retificadores" e "estabilizadores" de tensão, nas próximas lições.

DIODO TÚNEL

Trata-se de um diodo construído com base no efeito túnel. Este novo diodo foi anunciado em 1958 pelo pesquisador Leo Esaki que observou um fenômeno estranho ao qual deu o nome de "efeito túnel".

Na lição E.8, quando estudamos a junção "P-N", vimos que, ao colocarmos as lâminas de material tipo N em contato com as de tipo P, os elétrons de N têm tendência a emigrar para a região P onde se combinam com as lacunas, da mesma forma as lacunas de P emigram parcialmente para N e se combinam com os elétrons. Dessas combinações resultam íons negativos e íons positivos, os quais formam a barreira de potencial, que impede esse movimento de difusão de cargas livres, criando assim uma região isenta de cargas livres que recebe o nome de zona de depleção.

O fenômeno de tunelamento ocorre para regiões do tipo N e P, altamente dopadas, ou seja, com uma concentração de impurezas muito superior à normal. Dessa forma, conseguimos uma redução considerável da zona de depleção. Para os diodos túnel, essa zona tem uma espessura da ordem de $100 \text{ \AA}$ (10^{-6} cm). Para uma tensão inversa muito pequena ocorre uma quebra das ligações dos elétrons de valência dos átomos da região P, próximos da junção. Esses elétrons penetram na região N, formando a corrente inversa. Sob tensões inversas, portanto, o diodo comporta-se como uma resistência muito fraca e a corrente inversa aumenta, à medida que a tensão inversa aumenta. Quando diretamente polarizado, uma pequena tensão direta já é suficiente para vencer a barreira de potencial da junção e produzir a corrente direta, pois os elétrons da região N são "forçados" a atravessar a barreira de potencial, fazendo com que o diodo passe a conduzir. Na figura 15, temos a curva característica de um diodo túnel e seu símbolo.

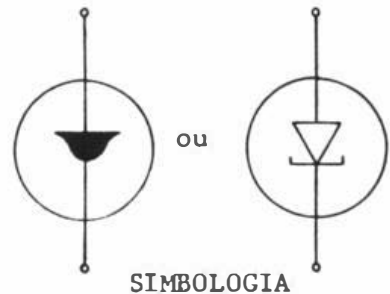
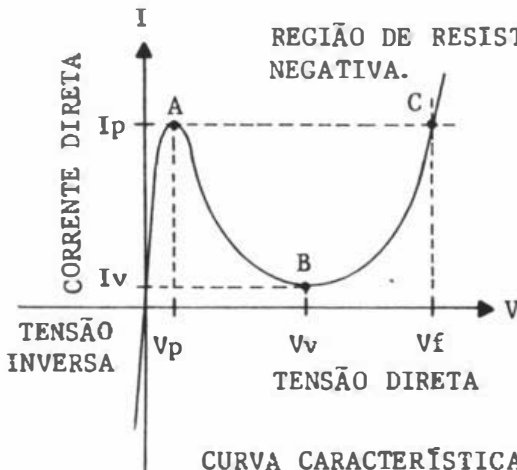


FIGURA 15

Se aumentarmos a tensão para valores acima da tensão de pico, a corrente diminui. O intervalo em que isso ocorre, vai desde V_p (tensão de pico) até V_v (tensão de vale), caracterizando assim a região de resistência negativa. A partir de V_v (tensão de vale), se continuarmos aumentando a tensão, a corrente também aumentará, pois a resistência assume valores positivos. Em V_f (tensão direta de pico), a corrente atinge novamente o valor de pico (I_p). Para tensões maiores, a corrente aumentará para além deste valor.

Observe que, para valores de correntes entre I_p e I_v , podemos obter o mesmo valor de corrente para três diferentes valores de tensões. Esta característica torna possível o uso do diodo túnel em circuitos de pulsos e digitais.

Os diodos túnel mais comuns são feitos de germânio (Ge) ou de arseneto de gálio (GaAs). Dificilmente se encontrará diodo túnel feito de silício. O ponto A (ver figura 15) é conhecido por ponto de pico, não é muito sensível à temperatura, porém o ponto B (figura 15) ou ponto de vale (V_v , I_v) é muito sensível à temperatura.

O diodo túnel pode ser usado como amplificador, oscilador, multivibrador, etc., podendo trabalhar com frequências extremamente altas. Suas principais vantagens são: baixo nível de ruído, tamanho reduzido, simplicidade de fabricação, - baixo custo, alta velocidade, imunidade ao meio ambiente e baixa potência. Como desvantagens apresenta: baixa variação na tensão de saída e o fato de não possuir isolamento entre entrada e saída, dificultando, assim, o projeto de circuitos.

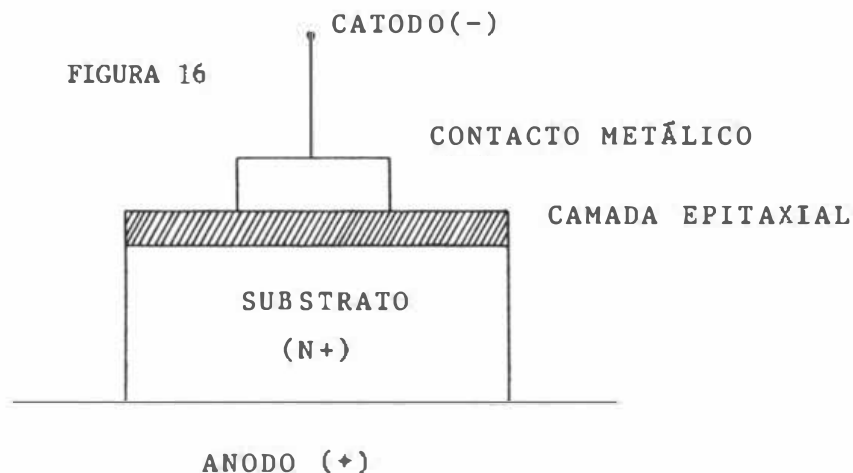
DIODO GUNN

O diodo recebeu o nome de J.B. Gunn, cientista que, em 1963, estudou o fenômeno, também conhecido por efeito Gunn.

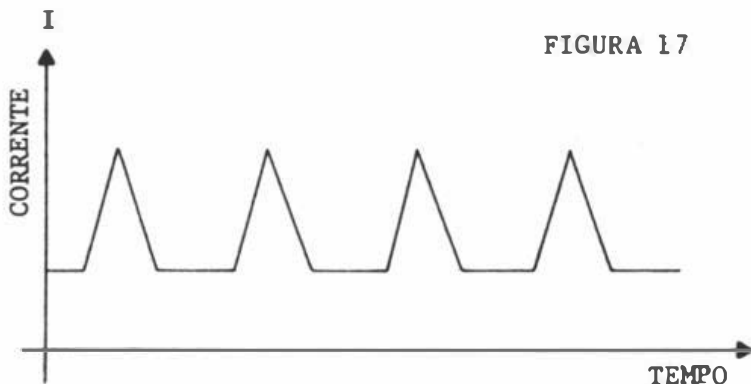
Este diodo é encapsulado em pequenos invólucros cerâmicos ou metálicos. É muito usado em sistemas de radar de baixa potência. Como fonte de microondas pode gerar frequências de trabalho entre 6 e 60GHz (giga-hertz), com tensões contínuas de alimentação de pouco mais de uma dezena de volts. Dependendo da frequência escolhida, as potências de saída vão de 10 a 250 miliwatts.

No diodo Gunn não há junção PN, o que há é um disco não

homogêneo, revestido de uma camada epitaxial de arseniato de gálio, tipo N, depositada sobre um substrato (base) de baixa resistividade (N+), do mesmo material. Possui dois eletrodos (terminais), um dos quais está soldado ao substrato (anodo), enquanto que o outro está ligado a um depósito metálico, obtido por evaporação, sobre a outra face do disco (catodo). A figura 16 mostra um esquema construtivo do diodo Gunn.



Se aplicarmos uma corrente contínua ao diodo, de modo que o anodo fique positivo (+), obteremos uma corrente que é formada por impulsos pontiagudos, sobrepostos a um valor contínuo (veja a figura 17). Estes impulsos podem ser usados para excitar oscilações senoidais numa cavidade ressonante, metalizada (ou metálica) que funciona como um circuito ressonante, paralelo, convencional com capacitor e bobina.

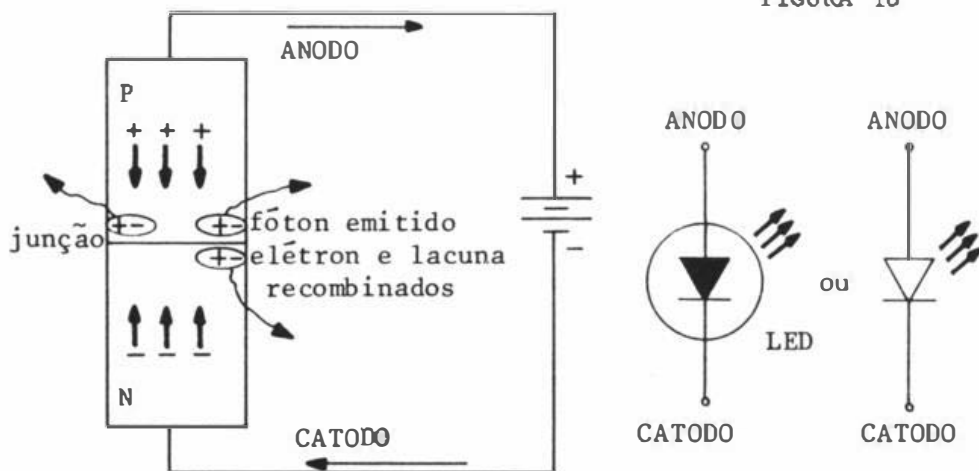


A frequência do diodo Gunn depende da espessura da camada epitaxial, porém se variarmos a tensão de polarização aplicada, poderemos, também, obter um ajuste da frequência dentro de uma certa faixa relativamente estreita.

DIODO EMISSOR DE LUZ (LED)

São dispositivos semicondutores que produzem luz, quando submetidos a uma corrente ou tensão externa. Trata-se simplesmente de um diodo de junção PN que emite luz pela recombinação de elétrons e lacunas, quando este estiver diretamente polarizado. Se um elétron possuir energia suficiente, ao recombinar-se com uma lacuna, produzirá um fóton de energia luminosa, assim sendo, muitas combinações poderão resultar numa substancial quantidade de luz a ser irradiada. A luz concentra-se perto da junção, devido ao fato de que a maior parte dos portadores se recombina nas proximidades da mesma. Este fato é mostrado, esquematicamente, na figura 18. Nessa mesma figura, temos o símbolo utilizado para identificar o LED.

FIGURA 18



Esse efeito de luminescência foi verificado por Henry Round, em 1907, mas, somente em 1972, o diodo emissor de luz (LED) foi introduzido no mercado.

Os leds são diodos semicondutores que, quando direta-

te polarizados, emitem luz. A luz emitida é monocromática, produzida, como já dissemos, pelas recombinações entre elétrons e lacunas nas proximidades da junção.

As cores da luz são obtidas pela escolha do cristal e da impureza. Por exemplo, um LED, que utiliza o arseniato de gálio (GaAs), emite radiações infravermelha (invisíveis), muito utilizadas em sistemas de alarme. Os LEDs dopados com fósforo, emitem luz vermelha ou amarela de acordo com a concentração de impurezas.

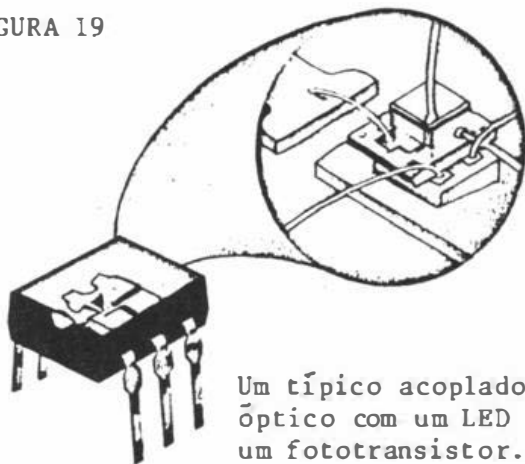
O LED é muito utilizado em circuitos de sinalização de baixo consumo, substituindo as lâmpadas incandescentes, tradicionalmente, utilizadas nestes circuitos. Podemos citar algumas vantagens dos LED's, tais como: baixa dissipação de energia, pois praticamente não há aquecimento, baixo consumo, longa vida útil, grande confiabilidade, tamanho reduzido, etc...

Também é utilizado para indicações de estado: ligado e desligado (display). É aplicado ainda em sistemas de intrusão (alarme), onde utiliza-se LED que emite luz "infravermelha", pois esta não pode ser vista pelo olho humano. O LED infravermelho também é utilizado para formar o ACOPLADOR ÓPTICO, coligado a dispositivos sensíveis à luz, como: Fototransistores e Fotodiodos.



Display numérico de segmentos com LEDs.

FIGURA 19



Um típico acoplador óptico com um LED e um fototransistor.

Na figura 19, temos algumas ilustrações típicas de aplicações dos diodos emissores de luz.

A figura 20 mostra um típico invólucro de LED.

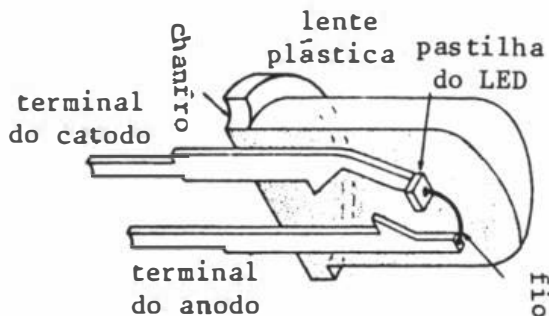


FIGURA 20

Os LED's também funcionam em circuitos de C.A. Neste caso, normalmente, é ligado em paralelo e em oposição com o LED, um diodo retificador, cuja função será de proteger o LED nos semiciclos em que este estiver polarizado reversamente.

DISPOSITIVOS SENSÍVEIS À LUZ

Os componentes optoeletrônicos têm encontrado grande aceitação na eletrônica moderna. São eles os responsáveis pela substituição de muitos componentes mecânicos por componentes eletrônicos, graças à sua capacidade de transformar sinais ópticos em sinais elétricos. O que realmente acontece é que existem substâncias que são eletricamente melhores condutoras, quando expostas à luz do que na obscuridade. Este fenômeno conhecido, há muito tempo, recebe o nome de "Fotocondutividade". Baseado nesse fenômeno, foram desenvolvidos os fotodiodos (FD), os fototransistores, os fotorresistores (LDR) e outros dispositivos que veremos a seguir. O fenômeno "fotocondutividade" é estudado no capítulo da física, conhecido por fotoeletricidade, estudo das relações entre a luz e a eletricidade. Mas o que é a luz? Físicos ilustres como: Newton, Maxwell e Planck deram-lhe interpretações diferentes. Mas foram Planck e Einsten que afirmaram ser a luz ondas eletromagnéticas emitidas de modo descontínuo, em forma de quantidades bem discretas, denominadas de "fótons". Fótons são pequenas quantidades de energia (pequenos pacotes denominados quanta). Segundo Planck, cada fóton transporta uma energia elemen-

tar E que depende exclusivamente da frequência da radiação luminosa, ou seja:

$$E = h.f.$$

onde: E - energia do fóton.

h - constante de Planck = $6,62517 \times 10^{-34}$ Joules/
segundo.

f - frequência.

A energia do fóton depende da frequência e do comprimento de onda (λ). A frequência pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

onde: v - velocidade da luz = 300.000.000 metros/segundo

λ - comprimento de onda

A luz (radiação eletromagnética) capaz de provocar sensação visual em um observador normal, possui comprimento de onda (λ) compreendido aproximadamente entre 4.000 Å e 7.800 Å (Å - Angstrom = 10^{-10} metros). A cor da luz depende da sua frequência. Radiações ultravioletas ($\lambda < 4.000$ Å) e infravermelhas ($\lambda > 7.800$ Å) não são perceptíveis aos olhos dos seres humanos. A figura 21 mostra uma representação esquemática da propagação de ondas eletromagnéticas.

FIGURA 21

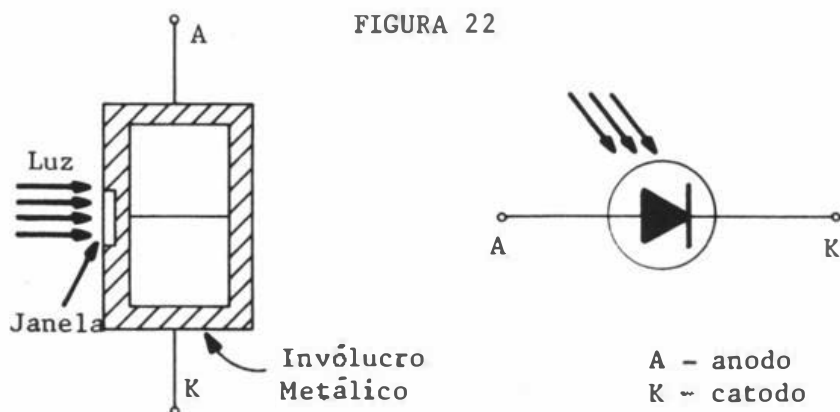


A luz, ao incidir num material semiconductor, transfere a energia dos fótons para o semiconductor, podendo, então, gerar pares elétrons-lacunas. Daí o fato dos semicondutores (diodos, transistores e outros dispositivos) serem encapsulados - com invólucros opacos, para evitar o efeito "fotocondutividade".

de". Quando porém, se deseja que o efeito fotocondutividade, exerça influência sobre determinado dispositivo, este deverá dispor de janelas, para que a luz possa atingir o material se micondutor

FOTODIODO - (FD)

Basicamente assemelha-se aos diodos de junção comuns, porém é um dispositivo sensível à luz. Acondicionado em um invólucro plástico ou metálico, tendo na parte superior uma "janela" (material transparente) por onde penetram os raios - de luz. Alguns fotodiodos possuem até uma pequena lente que permite convergir (direcionar) os raios luminosos sobre a junção. Convém salientar que o fotodiodo nada tem a ver com o diodo emissor de luz (LED), uma vez que o primeiro necessita de luz para operar, o segundo emite luz, quando em operação. A figura 22 mostra detalhes construtivos de um "FD", bem como a simbologia usada para representá-lo.

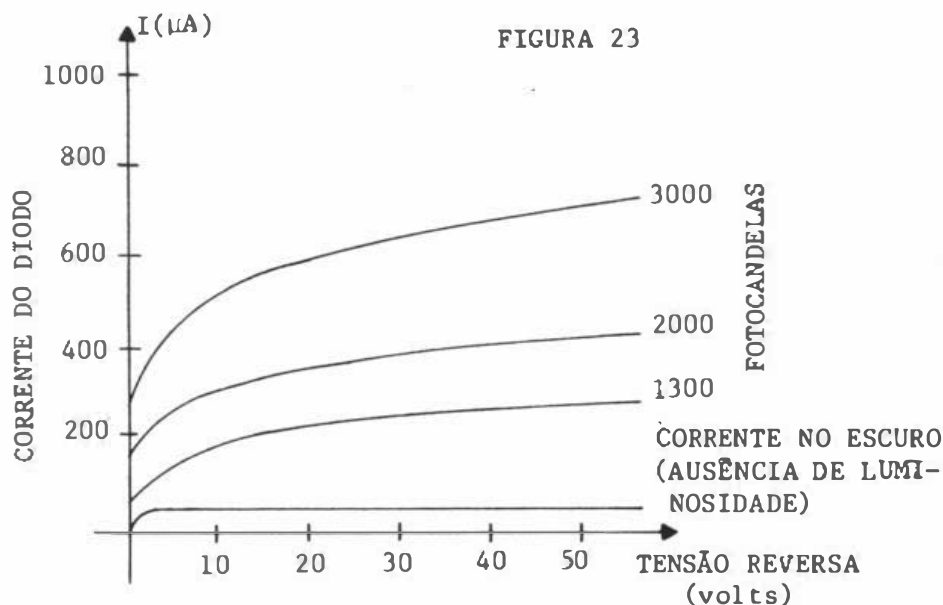


Normalmente o "FD" é submetido a uma tensão de polarização reversa, criando-se assim uma larga região de depleção em torno da junção "P-N". Com a incidência de luz sobre a junção, os pares elétrons-lacunas criados são puxados em direções opostas. Os elétrons são drenados em direção ao lado positivo da fonte (região "N") e as lacunas são levadas para o lado negativo da fonte de polarização (região "P", criando-se,

desse modo, uma pequena corrente na direção reversa do "FD". Quando a intensidade de luz aumenta, aumenta também o número de fótons que produzem mais pares elétrons-lacunas, aumentando, assim, a condutividade "FD", conseqüentemente, resultando-se numa corrente maior.

Este fato é mostrado através da curva característica do foto diodo (figura 23).

A luz incidente fornece energia sob a forma de fótons. É essa energia que contribui para o aumento de portadores (fotogeração), provocando assim um aumento da corrente reversa da junção.



O foto diodo oferece muitas aplicações na leitura óptica de cartões e fitas nos computadores, nos sistemas de depleção de luz, nas chaves operadas por luz, nos dispositivos de alarme contra incêndio e em controle automático de iluminação etc...

A grande vantagem do "FD" sobre os outros dispositivos fotossensíveis é que este pode responder mais rapidamente a variações de intensidade da luz. Em contra partida, tem, como desvantagem, o fato de sua fotocorrente de saída ser rela-

tivamente baixa, se comparada com a de outros dispositivos fotossensíveis.

FOTOTRANSISTOR

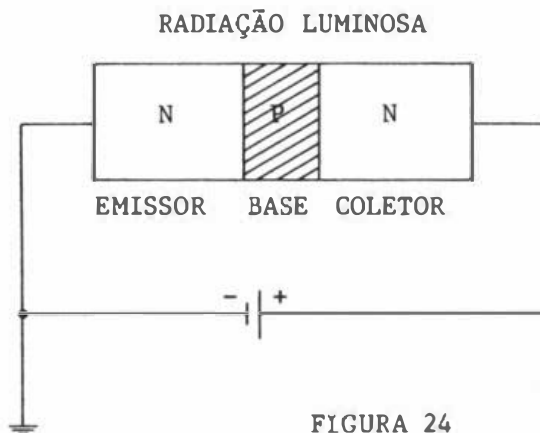
Construído de maneira semelhante ao transistor comum. Montado sobre uma "janela" transparente, de maneira que a luz incidente possa atingir a junção base-coletor (junção fotosensível). Normalmente é ligado a uma configuração emissor-comum (emissor ligado à terra), porém com a base desconectada. Devido a esse fato, recebe também o nome de "fotoduplodiodo" ou "fotodiodo de junção múltipla". Supondo a junção emissor-base ligeiramente polarizada no sentido direto e a junção coletor-base reversamente polarizada e que, inicialmente, não exista luz incidindo sobre a junção base-coletor, teremos apenas a corrente reversa, constituída de portadores minoritários, gerados termicamente (I_{co}).

Se um feixe luminoso incidir sobre a junção coletor-base (figura 24), ocorrerá geração adicional de portadores que contribuirão para a corrente reversa, da mesma forma que as cargas minoritárias geradas termicamente. Se designarmos de I_l a componente da corrente reversa, devido à incidência de luz, teremos:

$$I_c = (\beta + 1) \cdot (I_{co} + I_l)$$

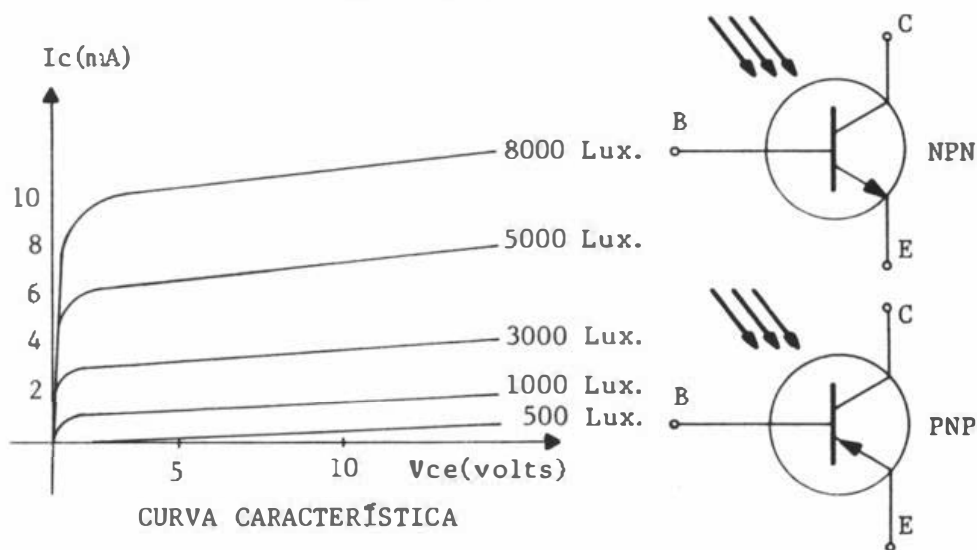
I_c é a corrente de coletor. Observe que, devido ao efeito transistor e à radiação luminosa, a corrente é multiplicada pelo fator $(\beta + 1)$.

A principal vantagem que o fototransistor apresenta com relação ao fotodiodo é o ganho em corrente, pois a corrente produzida na base pelo efeito fotoelétrico é amplificada de $(\beta + 1)$ vezes, originando a corrente de coletor. Na figura 25, temos a curva característica de um fototransistor e o seu respectivo símbolo elétrico.



Através da curva característica (figura 25), é fácil de se verificar que quanto maior for a intensidade da luz incidente sobre o fototransistor, maior será sua corrente de coletor.

FIGURA 25

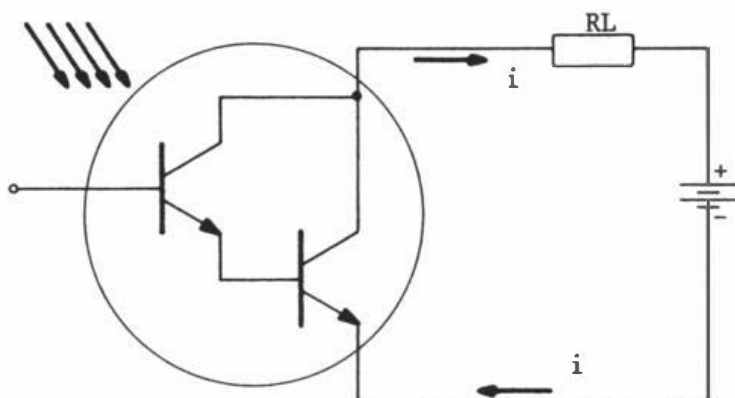


Quanto à aplicação, pode-se dizer que, praticamente, são as mesmas do fotodiodo, porém com a vantagem de não necessitar de uma amplificação posterior. Uma de suas aplicações -

mais comuns está na leitura óptica de trilhas sonoras em projetores cinematográficos.

Um fototransistor pode ser interligado a um transistor - bipolar comum, de maneira que o primeiro controla a operação do segundo. Este arranjo recebe o nome de circuito foto - darlington, podendo ser simultaneamente formado e embalado numa única cápsula (figura 26). Esta montagem proporciona um grande acréscimo na sensibilidade, pois o ganho do fototransistor é efetivamente multiplicado pelo ganho do transistor bipolar, obtendo-se assim uma corrente de saída relativamente alta.

FIGURA 26



FOTORRESISTOR (LDR)

Também conhecidos por RESISTORES DEPENDENTES DE LUZ ou LDR (Light Dependent Resistor). Estes dispositivos apresentam, como característica principal, a diminuição de sua resistência ôhmica, quando aumenta a intensidade de luz que incide sobre ele. No escuro (penumbra), estes dispositivos podem apresentar uma resistência tão alta como $2M\Omega$ e, quando iluminado com luz forte, esta resistência pode cair para valores tão baixos como algumas dezenas de ohms. Porém a variação da resistência de um LDR não é proporcional à intensidade de luz. Dependerá, também, do material utilizado, do processo de

fabricação e principalmente do comprimento de onda (λ), da luz que sobre ele incide. Por exemplo, as células fotoelétricas - de selênio são sensíveis a todo o espectro visível, enquanto as células feitas a partir de sulfureto de chumbo apresentam um máximo de sensibilidade (resistência mínima) para as radiações infravermelhas. Materiais como sulfureto de cádmio (Cds) e sulfureto de tálio também são largamente utilizados para a construção destes dispositivos.

Na figura 27, apresentamos o esquema de um LDR muito comum, a célula fotoelétrica, muito utilizada em iluminação pública. Ao lado, o símbolo elétrico usado para representar o LDR.

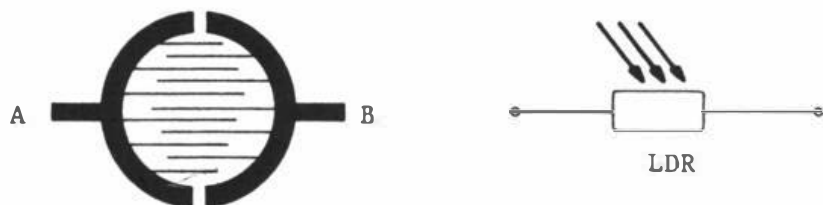


FIGURA 27

Este dispositivo é amplamente utilizado em: circuitos de alarme e comutação, circuitos de controle, circuitos contadores, fotômetros, etc. O seu funcionamento é bem simples. Basta colocarmos uma lâmpada com sua luz direcionada para o fotorresistor. Ao interrompermos o fecho de luz, a resistência do fotorresistor irá variar, interrompendo o dispositivo a ele ligado, como mostra a figura 28.

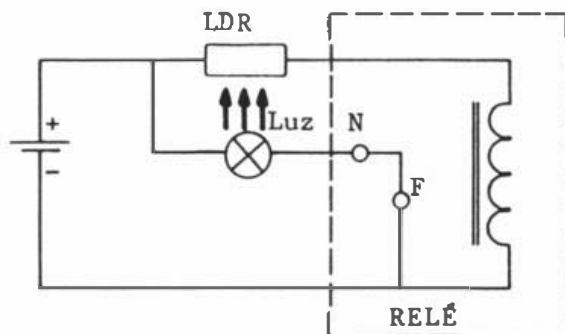


FIGURA 28

Ao incidir luz sobre o LDR, este terá sua resistência diminuída. Conseguimos assim acionar o relê de contato, normalmente fechado, que, ao abrir-se, desliga a luz e, dessa forma, o LDR volta a condição de resistência elevada, reiniciando novo ciclo. Porém a variação de sua resistência não é instantânea. Para os LDR's mais comuns, esta variação fica em torno de $200\text{K}\Omega/\text{s}$.

CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Trata-se de um dispositivo semicondutor que, ao receber raios luminosos (solares) em sua junção "P-N", consegue transformar estes raios luminosos em energia elétrica, conseguindo, dessa forma, manter uma d.d.p. que possibilita alimentar circuitos eletrônicos.

Devido à barreira de potencial existente na junção "P-N", os elétrons livres só circularão com o rompimento das ligações covalentes, provocadas pela incidência de luz.

Uma aplicação simples desse fenômeno são as chamadas CÉLULAS SOLARES, onde um número muito grande de células são colocadas lado a lado e interligadas de maneira conveniente, formando um conjunto capaz de gerar energia elétrica. Em condições normais, uma célula fotovoltaica, com uma área de 3cm^2 , pode fornecer uma potência em torno de 37mW .

Na figura 19, temos a representação simplificada de uma célula fotovoltaica, constituída de silício (tipo "P" ou "N").

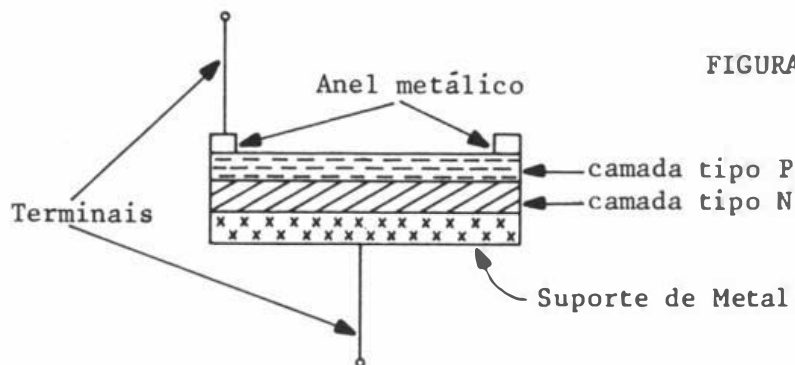


FIGURA 29

Esse dispositivo é amplamente utilizado em aplicações militares e espaciais. É comum encontrá-lo a bordo de satélites e aeronaves para transformar energia luminosa (solar) em energia elétrica, empregada para alimentar vários tipos de equipamentos eletrônicos.

O silício e o selênio são os materiais mais utilizados em sua construção.



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-10



OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) O diodo de contato de ponta é usado em circuitos de:
 - a) alta frequência e alta potência;
 - b) baixa frequência e alta potência;
 - c) alta frequência e baixa potência.
- 2) A capacitância do diodo varicap varia:
 - a) diretamente com a tensão de polarização reversa;
 - b) inversamente com a tensão de polarização reversa;
 - c) dependendo da corrente de saturação.
- 3) O sentido real da corrente reversa para o diodo zener será:
 - a) do catodo para o anodo;
 - b) do anodo para o catodo;
 - c) os itens a e b estão incorretos.
- 4) A principal aplicação do diodo zener consiste:
 - a) na desestabilização de tensões;
 - b) na estabilização de tensões;
 - c) na geração de onda dente de serra.

5) O LED caracteriza-se por:

- a) absorver luz;
- b) refletir luz;
- c) emitir luz.

6) O fenômeno de tunelamento ocorre nas regiões tipo N e P, quando estas estão:

- a) altamente dopadas;
- b) medianamente dopadas;
- c) fracamente dopadas.

7) O diodo Gunn é muito empregado em:

- a) sistemas de radares de alta potência;
- b) sistemas de radares de baixa potência;
- c) sistemas receptores de baixa frequência.

8) Os LDR's caracterizam-se por:

- a) transformar raios luminosos em energia elétrica;
- b) aumentar sua condutividade quando exposto a radiações luminosas;
- c) apresentar resistência ôhmica baixa, no escuro.

9) A corrente, devido à radiação luminosa em um fototransistor, é multiplicada pelo fator:

- a) $(\beta + 1)$;
- b) $(\beta - 1)$;
- c) $(\beta + \alpha)$.

10) A luz incidente numa junção "PN" de um fotodiodo contribui para:

- a) uma diminuição de portadores;
- b) um aumento de portadores;
- c) um super-aquecimento da junção, destruindo-a.

LIÇÃO E-11

DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES III

INTRODUÇÃO

Dando continuidade ao estudo dos dispositivos semicondutores, procuraremos, nesta lição, examinar, de forma simples e objetiva, as características básicas de mais uma série de componentes utilizados na prática. Começaremos pelos componentes da família dos Tiristores.

TIRISTORES:

O termo tiristor abrange uma ampla gama de dispositivos de estado sólido, usados como chaves eletronicamente controladas, ou seja, caracterizam-se especialmente pela comutação entre o estado de condução e o estado de não condução. Esses dispositivos, geralmente, são utilizados no controle eletrônico de potência elétrica (tanto em C.A. como em C.C.). Em circuitos de controle de potência é normal o uso da válvula tiratron, porém, hoje em dia, os tiristores substituem-na por completo e com grandes vantagens, tais como: tamanho reduzido, menor consumo, maior capacidade de manejar potências maiores, mais robustez, etc...

Uma idéia (conceito) bem simplista, porém muito difundida, a respeito do que vem a ser esses versáteis dispositivos

é que "eles são apenas uma versão eletrônica das chaves mecânicas e dos relês", o que não deixa de ser verdade.

Atualmente, a maior parte das aplicações que envolvem controle de potência pode ser satisfeita com o emprego de alguns dos tiristores citados a seguir: SCR, DIAC, TRIAC, UJT, etc.

SCR - (RETIFICADORES CONTROLADOS DE SILÍCIO)

O SCR é também conhecido por diodo controlado de silício unidirecional. Trata-se, basicamente, de um retificador - que conduz corrente em um único sentido. Contudo é um dispositivo que pode conduzir ou interromper a condução, ou seja, estar ligado ou desligado, o que caracteriza uma ação de comutação que pode ser usada para controle de corrente elétrica.

Quanto à sua construção, trata-se de um dispositivo de estado sólido, possuindo quatro camadas semicondutoras (cristais) fortemente dopadas, (dois do tipo "N" e dois do tipo "P") intercaladas (PNPN), formando um conjunto de três junções, encapsuladas e hermeticamente seladas. O SCR possui três terminais, atados a três de suas quatro camadas construtivas. Esses terminais correspondem aos seus três eletrodos: ANODO, CATODO e PORTA. O eletrodo porta é também denominado GATE ou simplesmente GATILHO. A figura 1 nos mostra alguns aspectos construtivos do SCR, bem como a sua simbologia.

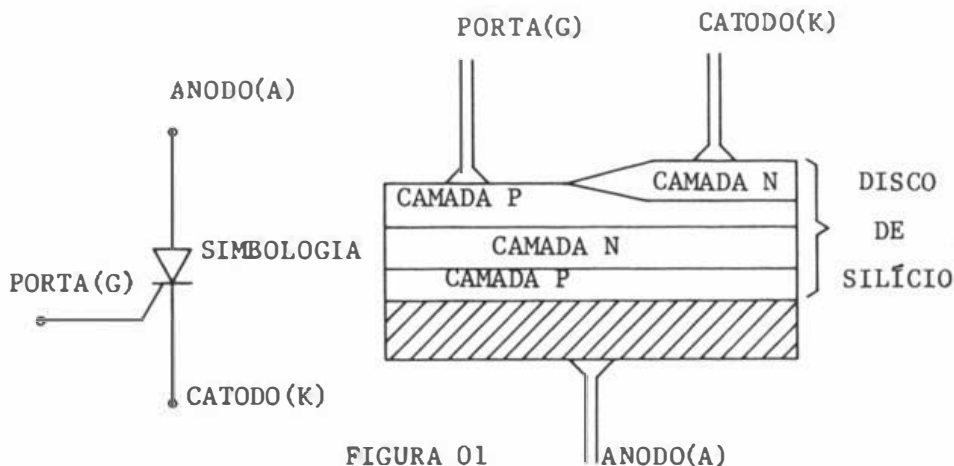


FIGURA 01

O SCR é quase sempre feito de silício, mas o germânio também pode ser usado. As quatro camadas do SCR são geralmente formadas por um processo de difusão, mas também pode ser empregado um método combinado de liga-difusão. Em princípio, o SCR nada mais é do que dois transistores, um NPN e outro PNP, interconectados de modo a formar um par em realimentação regerativa, conforme nos mostra a figura 2.

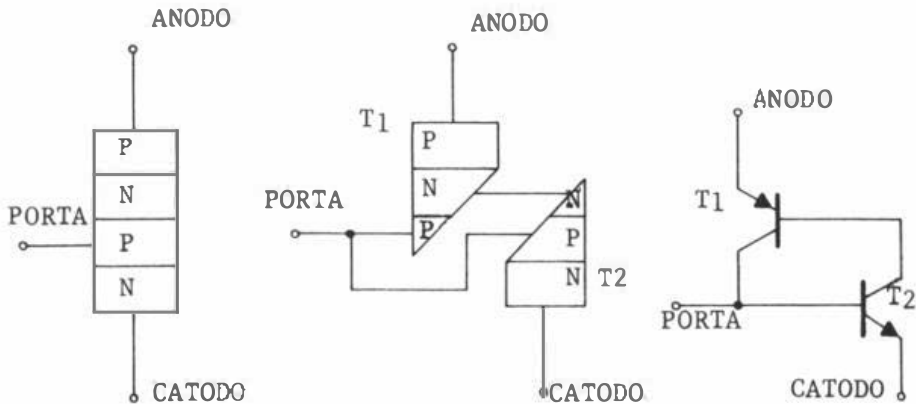


FIGURA 02

PRINCÍPIO FÍSICO DE OPERAÇÃO:

Para facilitar a compreensão do princípio de funcionamento do SCR, propomos o circuito da figura 3, onde temos um SCR devidamente polarizado.

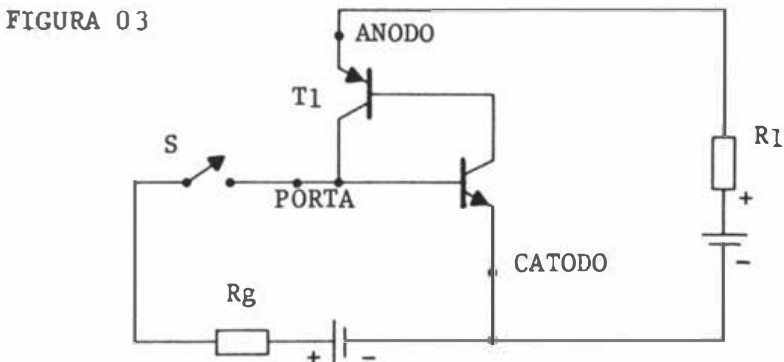


FIGURA 03

Estando a chave S aberta, o anodo do circuito, com relação ao catodo, será positivo e o terminal de porta estará em aberto. De acordo com essas condições, o transistor NPN não deverá conduzir, devido à sua junção de emissor não estar sujeita a uma tensão de polarização direta, capaz de produzir uma corrente de base. Com isso, o transistor PNP deverá permanecer cortado. Assim, o circuito equivalente do SCR não deverá permitir o fluxo de corrente de seu catodo para seu anodo. Porém, se a porta do circuito equivalente do SCR for feita momentaneamente positiva com relação ao catodo, teremos, então, a junção de emissor do transistor NPN diretamente polarizada, com o que esse transistor passa a conduzir.

O fato do transistor NPN estar conduzindo irá provocar o fluxo de uma corrente de base no transistor PNP. Essa corrente de base fará com que o transistor PNP passe a conduzir. Entretanto a corrente de coletor, que circula pelo transistor PNP, irá provocar o fluxo de uma corrente de base no transistor NPN. Dessa forma, teremos os dois transistores conduzindo em realimentação mútua, permitindo assim o fluxo contínuo de uma corrente elétrica do catodo para o anodo do circuito. É importante notar que uma vez iniciada a condução, não há mais a necessidade de existir a corrente de porta, visto que a corrente de base do transistor T2 é fornecida pelo coletor do transistor T1 e a corrente de base do transistor T1 é fornecida pelo coletor do transistor T2.

Concluindo, podemos dizer: assim que aplicarmos uma tensão momentânea na entrada "porta" do SCR, esta irá fazer com que o circuito comute para o estado ligado, que permanecerá conduzindo, mesmo que a tensão de "porta" seja removida. Para que o circuito (circuito equivalente do SCR) volte para o estado de não-condução ou desligado, basta reduzir a tensão de anodo para catodo a um valor próximo de zero. Isto fará com que os transistores T1 e T2 entrem em corte. Com isso o dispositivo deverá conduzir apenas uma pequena corrente de fuga, a qual irá fluir na direção reversa.

O resistor R_g é utilizado para limitar a corrente de porta, bem como o R_L , para limitar a corrente catodo-anodo, de modo a manter essa corrente a um valor seguro, quando o dispositivo estiver ligado. Sem o resistor R_L , a corrente catodo-anodo (ou simplesmente corrente de anodo) poderá assumir valores elevadíssimos, e, com isso, passar a danificar constantemente.

mente o SCR.

O processo pelo qual o SCR passa do estado de não condução para o estado de condução, chama-se DISPARO. O processo oposto chama-se BLOQUEIO. A figura 4 nos mostra mais um aspecto físico do SCR.

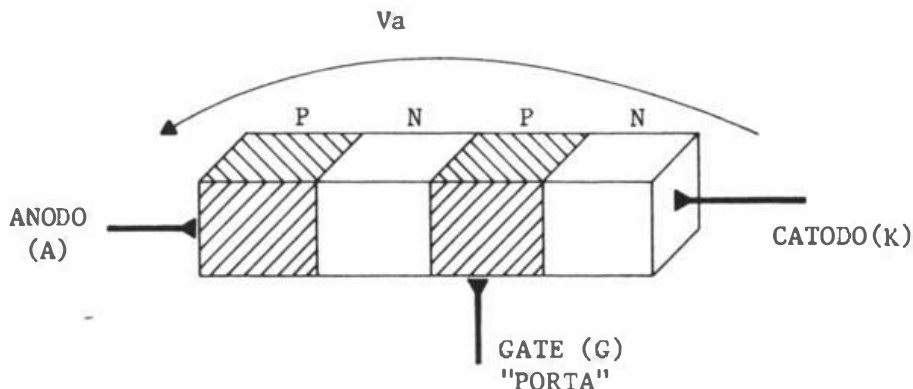


FIGURA 04

V_a = tensão catodo-anodo

O disparo de um SCR pode ser conseguido através de dois processos básicos:

1- Através da aplicação de tensões entre anodo-catodo suficientemente elevadas.

2- Através da polarização direta entre porta e catodo. - Neste caso, o disparo é conseguido instantaneamente, desde - que a corrente de porta passe a ter um valor suficiente.

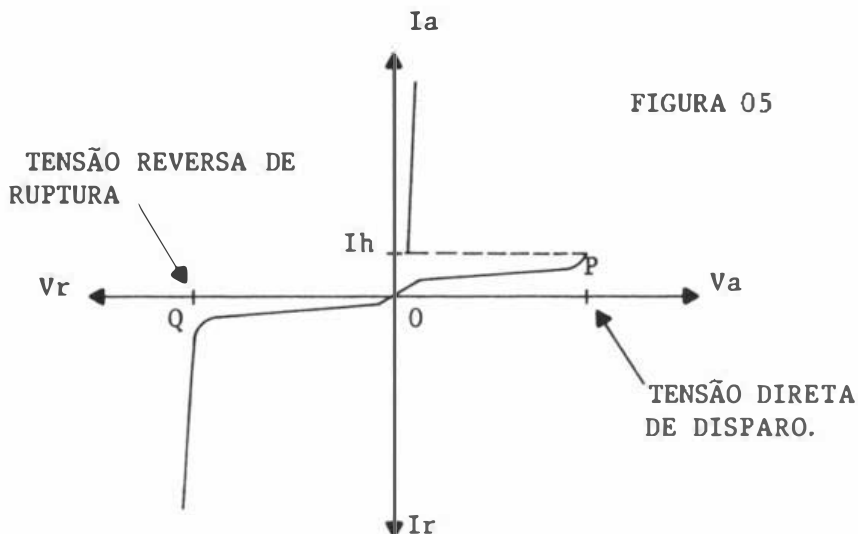
Para que possamos entender melhor o processo de operação do SCR, vamos examinar a característica tensão-corrente do mesmo.

CARACTERÍSTICA TENSÃO-CORRENTE:

A figura 5 nos mostra a curva tensão-corrente de um SCR típico.

Tal curva é obtida, variando-se a tensão catodo-anodo (V_a) do SCR, numa larga faixa, enquanto dele se observa a corrente de anodo (I_a).

Inicialmente, o SCR é polarizado na direção direta, man-



tendo-se a "porta" em aberto. Nessas condições, se observarmos a figura 5, notaremos que a tensão V_a parte de zero e o SCR conduz apenas uma pequena corrente direta (I_a), também denominada de corrente de fuga. Note que a tensão V_a cresce continuamente, desde o ponto "O" até o ponto "P". Nesse trecho, a corrente direta I_a cresce muito pouco, permanecendo praticamente constante. Entretanto, assim que a tensão V_a atingir o ponto P, a corrente I_a aumentará rapidamente, instante em que a tensão V_a retornará para um valor baixo, enquanto que a corrente I_a continuará crescendo.

O valor da tensão V_a (no ponto P), capaz de provocar um aumento repentino na corrente I_a , é denominado de "tensão direta de disparo". Quando esse valor de V_a for atingido, o SCR será então comutado do estado de não-condução para o estado de condução. O fato da tensão V_a , no instante em que o SCR for disparado, retornar a um valor muito baixo, ocorre porque a resistência do SCR cai para um valor extremamente baixo. Com isso, praticamente, toda a tensão fornecida pela fonte ficará aplicada sobre o resistor série. A figura 6 nos mostra o circuito referente a essa situação.

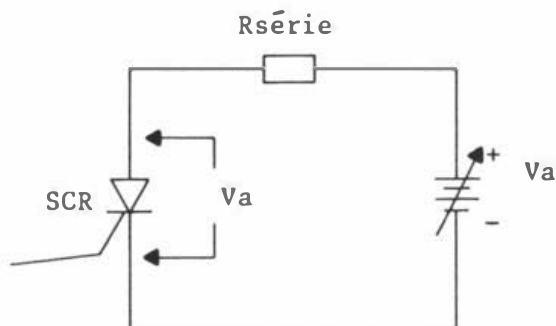


FIGURA 06

Enquanto o SCR estiver conduzindo (ligado) qualquer aumento da tensão V_a , provocará um acréscimo elevadíssimo da corrente I_a . (Note que, nesse trecho, a curva é uma reta quase que paralela ao eixo vertical - veja figura 5). O SCR somente será comutado de volta ao estado de não-condução, quando o valor de I_a cair abaixo de um certo valor mínimo. Esse valor mínimo da corrente I_a é denominado de "corrente de retenção" e geralmente é indicado por I_h . Como podemos verificar, através da figura 5, o valor de I_h está localizado no ponto onde ocorre o disparo.

Ao aplicarmos uma tensão reversa no SCR, ele passará a se comportar da mesma forma que um diodo PN reversamente polarizado. Assim, à medida que a tensão reversa (V_r) sobre o SCR crescer, partindo de zero, teremos apenas uma pequena corrente reversa (I_r), circulando através do dispositivo. No instante em que a tensão V_r atingir o ponto "Q", ocorrerá a ruptura do SCR, conseqüentemente a corrente I_r irá crescer rapidamente. Ao valor da tensão V_r , que provoca a ruptura do SCR, dá-se o nome de "tensão reversa de ruptura". Se uma corrente reversa excessivamente alta fluir pelo SCR, após a sua ruptura, ele poderá ficar completamente danificado. Essa possibilidade, normalmente, é evitada, pois o SCR, geralmente, está sujeito a tensões de operação bem abaixo do valor da tensão de ruptura. A figura 5 nos mostra a relação entre a tensão V_a e a corrente I_a , quando a porta do SCR está aberta. Conseqüen

temente nenhuma corrente de porta irá fluir pelo dispositivo. No instante em que a porta se torna positiva com relação ao catodo, a corrente de porta irá fluir, modificando as características diretas do SCR. O gráfico ($V_a \times I_a$), apresentado na figura 7, nos mostra como as variações na corrente de porta (I_g) afetam a relação entre a tensão direta do SCR e a sua corrente direta.

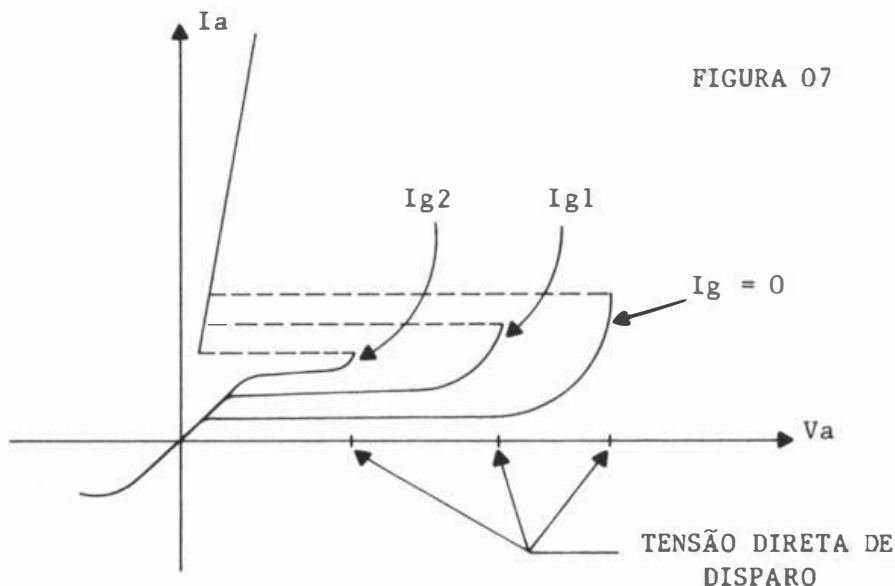


FIGURA 07

Com base nas curvas apresentadas na figura 7, podemos concluir que "a tensão direta de disparo do SCR é inversamente proporcional à corrente de porta I_g ", ou seja, quanto maior for a corrente I_g , menor será o valor da tensão direta de disparo. Sendo assim, podemos dizer que um SCR somente poderá conduzir, quando ele estiver sujeito a uma combinação apropriada de corrente de porta e tensão direta de disparo.

APLICAÇÕES PRÁTICAS DO SCR:

Seu principal uso é controlar a aplicação de potência - contínua ou alternada de vários tipos de cargas, tais como: lâmpada incandescente, forno elétrico, motor elétrico, etc.

O circuito da figura 8 nos mostra uma aplicação simples

do SCR em controle de potência com retificação (meia-onda) para uma carga resistiva (R_L). Esse circuito fornece uma fase (ângulo de disparo) desde zero (potência plena) até 90° ou $\pi/2$ (meia potência) da onda da tensão de anodo (V_a).

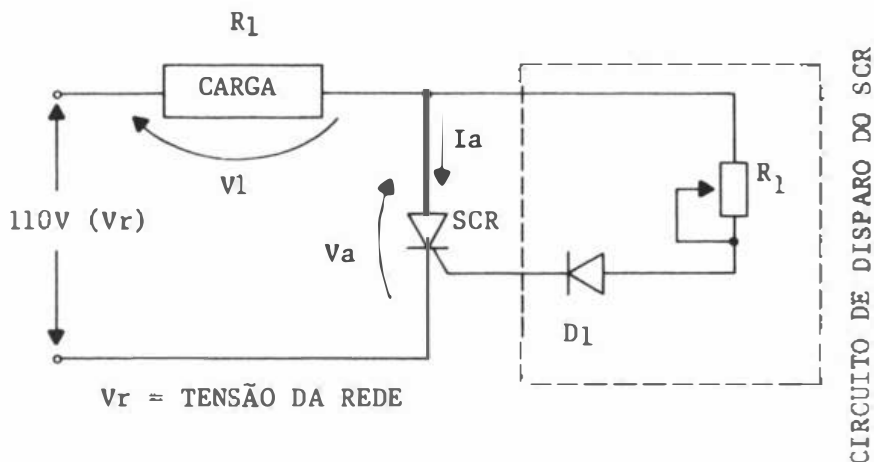
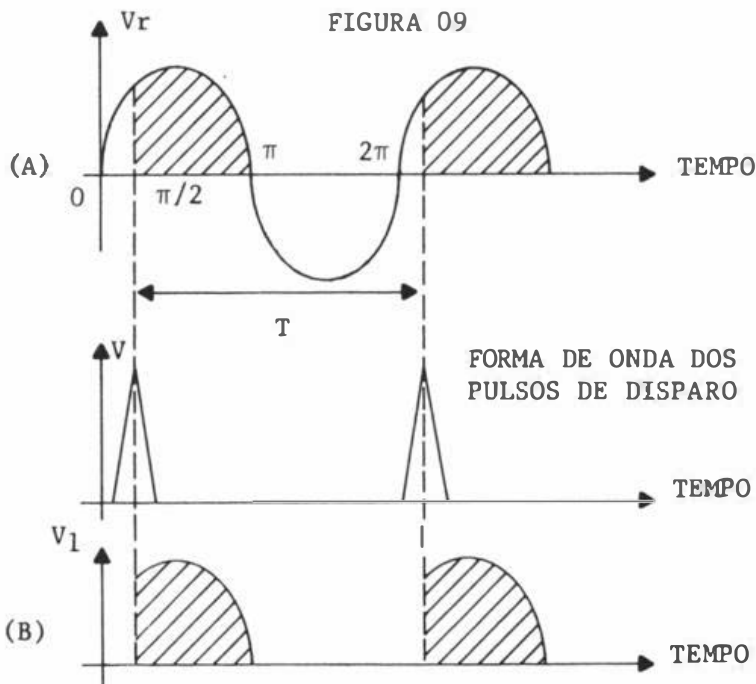


FIGURA 08

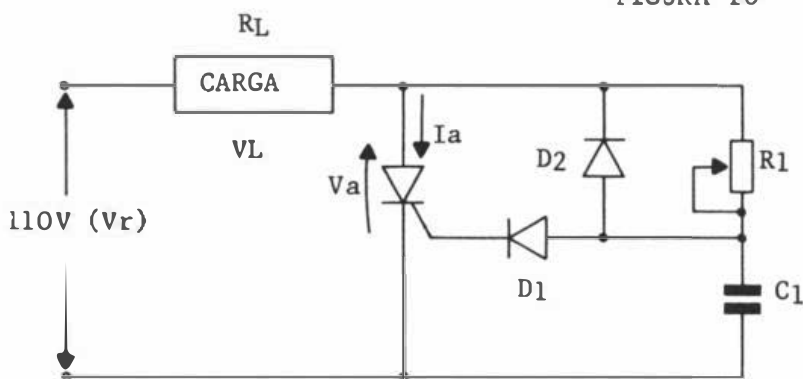
As formas de ondas obtidas são mostradas na figura 9.



Observando a figura 9, podemos notar: à medida que a tensão cresce, pelo semiciclo positivo, a tensão, na junção porta-anodo, também crescerá, bem como a sua corrente, porém, limitada pelo potenciômetro (R_1). No instante em que ocorrer o pulso de disparo, o SCR passará a conduzir e a carga irá receber toda a tensão da rede, mantendo o estado de condução do SCR durante todo o semiciclo positivo, pois, assim que a tensão (V_r) entrar no seu semiciclo negativo, o SCR será bloqueado, entrando em corte, automaticamente. O processo é reiniciado no próximo semiciclo positivo. A função do diodo D_1 é proteger a junção porta-anodo, no semiciclo negativo.

Devido ao fato da corrente de porta ser controlada através do potenciômetro (R_1), podemos controlar a fase, entre a condução total ($\theta = \pi/2$). Para isso, basta variar a corrente de porta. Esse circuito só permite um controle de $\pi/2$ (90°), pois a corrente de disparo está em fase com a tensão da rede. Para permitir o controle até π (180°), utilizaremos um capacitor C_1 , conforme nos mostra a figura 10.

FIGURA 10



Em cada semiciclo negativo, o capacitor C_1 carregar-se-á através do diodo D_2 que se encontrará diretamente polarizado. Durante o semiciclo negativo, o SCR não conduzirá, pois ele estará polarizado reversamente e o diodo D_1 não permitirá que

a corrente de porta flua pelo SCR, pois ele também estará polarizado reversamente.

O nível ao qual o capacitor C1 se carrega pode ser controlado pelo ajuste do potenciômetro R1. Se o valor de R1 for próximo de zero, o capacitor C1 carregar-se-á quase que instantaneamente, provocando o disparo do SCR. Quando o valor de R1 for elevado, o SCR levará um tempo maior para ser ativado.

Em resumo, podemos dizer que o capacitor é carregado até o ponto de disparo do SCR, num tempo determinado pela constante R_1C_1 . O diodo D2 se presta a descarregar o capacitor, após o disparo do SCR.

Os circuitos apresentados nas figuras 8 e 10 apresentam uma limitação: conduzem apenas nos semiciclos positivos. Se colocarmos uma ponte retificadora em ambos os circuitos (veja figura 11), o SCR passará a conduzir nos dois semiciclos (positivo e negativo).

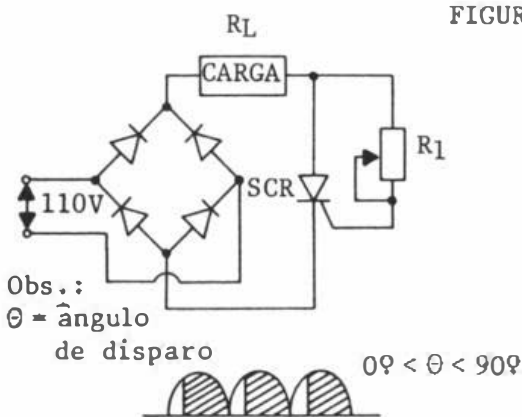
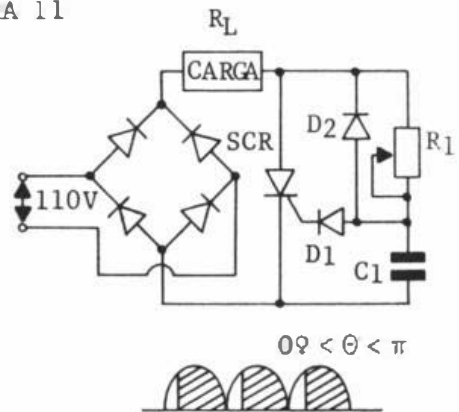


FIGURA 11



Os circuitos apresentados até aqui são elementares, porém são valiosos para demonstrar as vantagens do SCR em controle de potência.

A seguir, algumas limitações dos SCR:

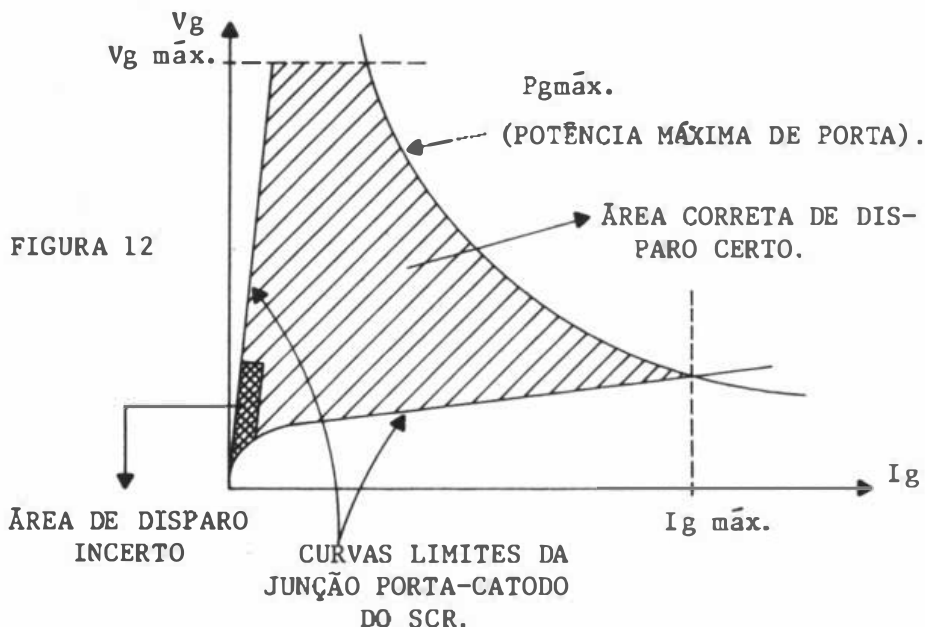
Máxima intensidade de corrente na condução;

Mínima intensidade de corrente que sustenta a condução;

Máximo valor de tensão direta;
 Máximo valor de tensão inversa;
 Tensão de disparo;
 Máxima dissipação de potência;
 etc...

Para maiores detalhes, deve-se consultar o manual fornecido pelos fabricantes.

A figura 12 nos mostra a característica de porta de um SCR ($V_g \times I_g$), através da qual podemos determinar a área correta de disparo do SCR.



Passemos agora, ao estudo de mais um dispositivo da família dos tiristores, o TRIAC.

TRIAC - (Triodo Tiristor Bidirecional).

O SCR é um dispositivo unidirecional, pois controla o fluxo de corrente de uma única direção. Para realizar o controle de um ciclo completo de um sinal alternado (C.A.), é necessário o uso de dois SCRs em paralelo, mas em direções opostas. O TRIAC é um dispositivo que satisfaz estas condições, ou seja, possui as mesmas características básicas de comutação - que o SCR, dotado dessas características em ambas as direções.

A figura 13 nos mostra um diagrama simplificado de um TRIAC (A), sua equivalência em SCR (B) e a simbologia (C) usada para representá-lo.

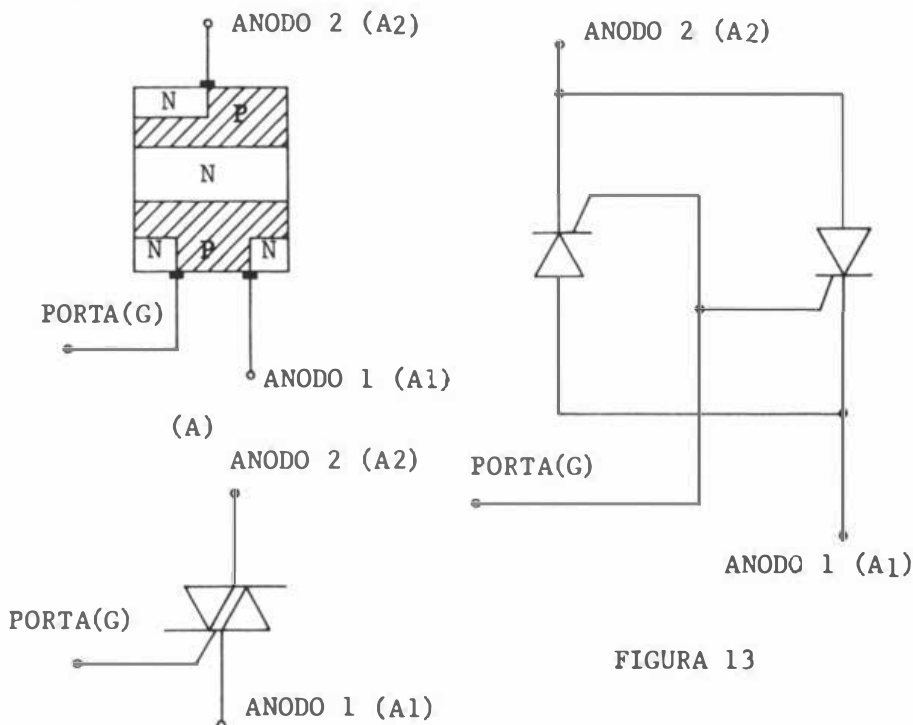
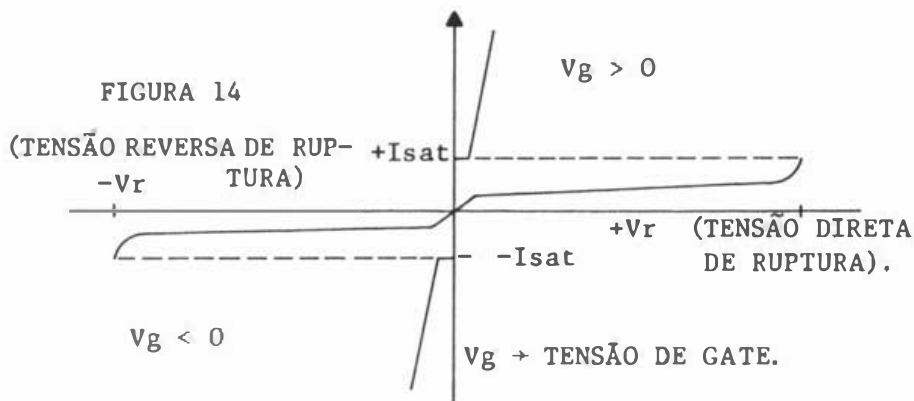


FIGURA 13

Suas limitações são idênticas às do SCR. Devido ao fato de ser o TRIAC um dispositivo bidirecional, conservando basicamente as características de funcionamento do SCR, a curva $I_a \times V_a$ será simétrica (veja figura 14).



O método de disparo do TRIAC, através da porta (G), é um pouco diferente do método do SCR, uma vez que o TRIAC conduz nos dois sentidos. Para provocar o disparo, é suficiente que a tensão de porta (V_g) assuma qualquer valor entre as duas tensões dos terminais (ânodo e cátodo) do TRIAC.

Já, para que o TRIAC seja levado ao corte, é necessário manter em zero o nível da tensão entre os seus terminais, (ou mantê-la suficientemente pequena, para que a corrente caia para um valor abaixo do nível da corrente de retenção), durante um certo período.

Numa aplicação qualquer, a tensão alternada do circuito em que o TRIAC estiver inserido deve ter um valor inferior à tensão de ruptura (veja figura 14).

A principal diferença entre um TRIAC e um SCR é que o primeiro pode ser disparado por um impulso positivo ou negativo, sem considerar a polaridade da tensão aplicada aos seus terminais principais (A1 e A2).

Devido à baixa energia necessária à porta do TRIAC, para que ele passe a conduzir, o disparo pode então ser provocado por qualquer dispositivo semicondutor, como, por exemplo, um transistor comum, ou um transistor unijunção ou ainda um outro tiristor.

Normalmente o TRIAC é utilizado para controle de potência C.A. (corrente alternada). A figura 15 nos mostra uma típica aplicação do TRIAC para controle de potência em um circuito monofásico C.A.

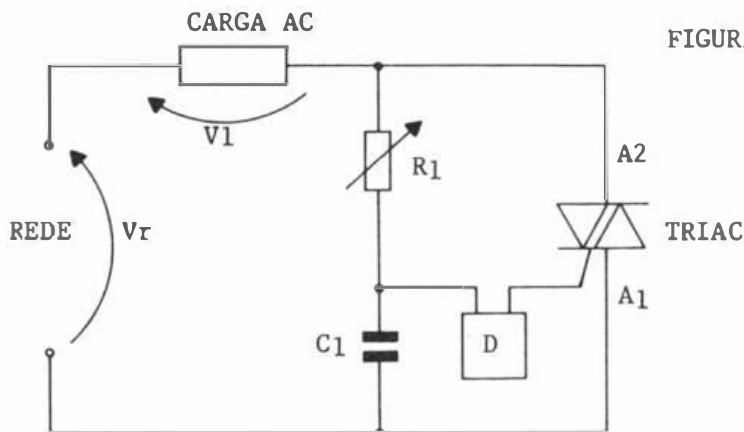


FIGURA 15

Onde:

- D - circuito de disparo;
 R1 - potenciômetro através do qual podemos variar o ângulo de disparo (θ).

A figura 16 nos mostra as formas de onda obtidas para o circuito da figura 15.

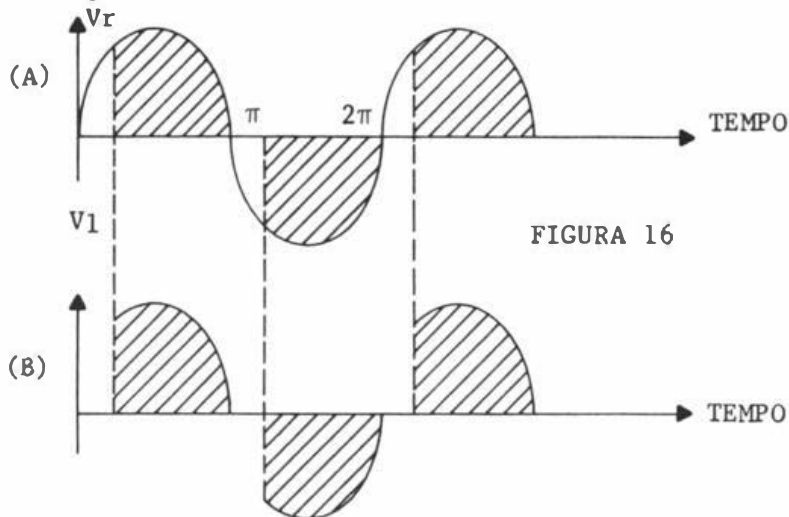


FIGURA 16

Obs.: A figura (16A) mostra a forma de onda aplicada ao circuito (V_r). E a forma de onda da tensão aplicada na carga (V_l) é mostrada na figura (16B).

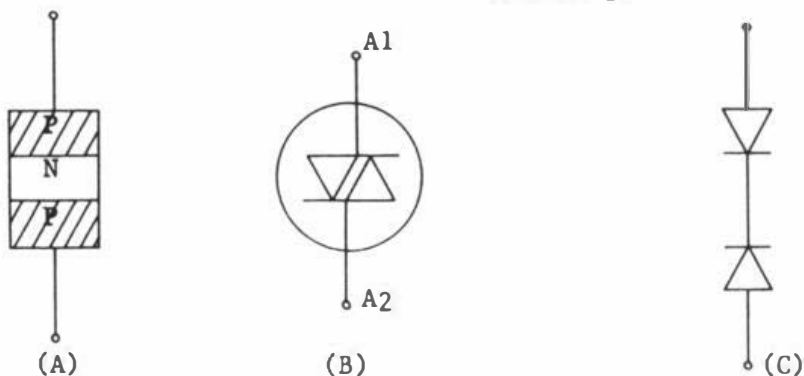
Da mesma forma que o SCR, o TRIAC pode ser utilizado para controlar a intensidade luminosa de uma lâmpada incandescente (light dimmer) ou ainda para controlar a velocidade de um motor elétrico. Esses são apenas dois exemplos de aplicação, porém, hoje em dia, o TRIAC é amplamente utilizado em aplicações industriais para o controle de potência.

DIAC - (Diodo de Disparo Bidirecional).

O DIAC, também denominado de "diodo simétrico", é basicamente um interruptor bidirecional. Sua construção é semelhante à de um transistor, uma vez que possui três camadas semicondutoras alternadamente dopadas (figura 17A). A figura 17B nos mostra o seu símbolo, que se assemelha ao do "TRIAC". O DIAC, porém, não possui o eletrodo (terminal) de porta, possuindo apenas os dois terminais principais (A_1 e A_2). Difere também do transistor, quanto à concentração de dopagem, pelo

fato de possuir apenas dois terminais conectados unicamente às camadas externas. Seu aspecto físico nos lembra muito o diodo de junção PN. Em ambas as direções, uma junção sempre deverá estar diretamente polarizada, enquanto que a outra, reversamente. A junção polarizada reversamente controlará a corrente que circula pelo DIAC e este operará como se contivesse dois diodos de junção PN, conectados opostamente (veja a figura 17C).

FIGURA 17



O DIAC apresentará uma alta impedância até a tensão aplicada atingir o valor de ruptura (V_r), geralmente em torno de 35 volts. Para tensões iguais ou superiores à tensão de ruptura (V_r), o DIAC passará a exibir uma "resistência negativa", ou seja, à medida que a corrente for crescendo, a tensão entre os seus terminais diminuirá. Portanto a função do DIAC é a de uma chave bidirecional, ativada sempre que sua tensão de ruptura (V_r) for ultrapassada (em qualquer direção).

Normalmente, o DIAC está associado ao TRIAC em circuitos de controle de potência, tanto em aplicações industriais como em aparelhagens eletrodomésticas.

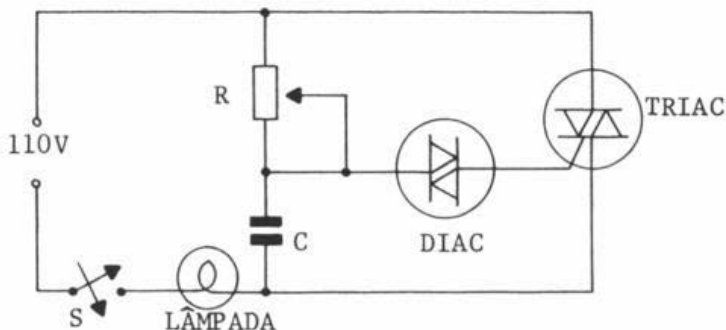
Na figura 18, temos uma aplicação típica do DIAC associado a um TRIAC no controle do funcionamento de uma lâmpada.

Como podemos observar, o funcionamento desse circuito é muito simples.

O TRIAC está ligado em série com a lâmpada e esta é alimentada por uma tensão alternada de 110V. No início de cada semiciclo (positivo ou negativo) da tensão, o TRIAC não con-

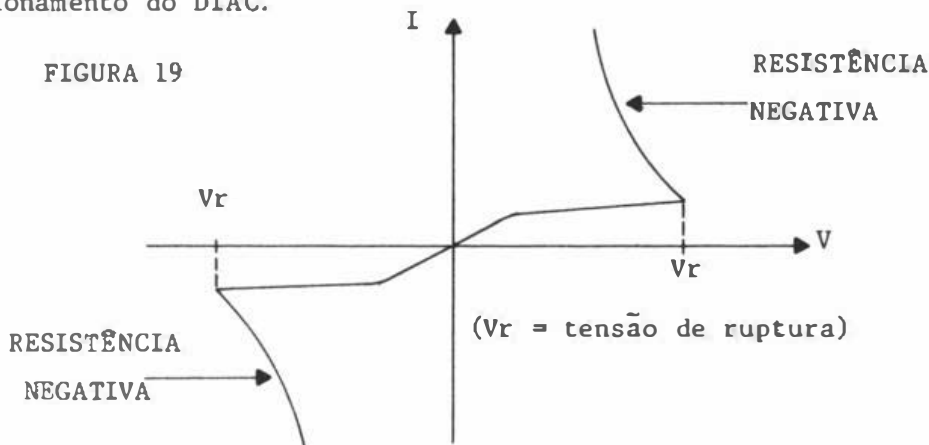
duz e a tensão total da linha é então aplicada entre os seus terminais, enquanto que a lâmpada permanece apagada. Como o TRIAC está ligado em paralelo com o potenciômetro (R) e com o capacitor (C), a tensão da rede, que está aplicada sobre os terminais do TRIAC, irá fazer com que circule uma corrente na malha RC. Dessa forma, o capacitor (C) deverá carregar-se. Assim que a tensão sobre o capacitor atingir o valor da ten -

FIGURA 18



são de ruptura do DIAC, o capacitor passará a se descarregar através do terminal de porta do TRIAC, disparando-o. No instante em que o TRIAC é disparado, a tensão da linha, que se acha aplicada sobre o TRIAC, é transferida para a lâmpada, permanecendo aplicada sobre os terminais da mesma durante o restante do respectivo semiciclo. Essa sequência de eventos é repetida a cada semiciclo da tensão aplicada, seja o semiciclo positivo ou negativo.

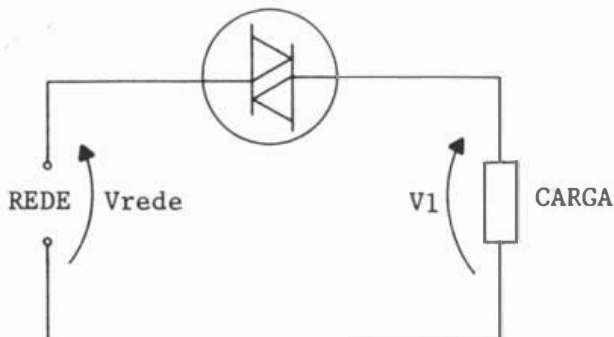
A figura 19 nos mostra uma curva característica de funcionamento do DIAC.



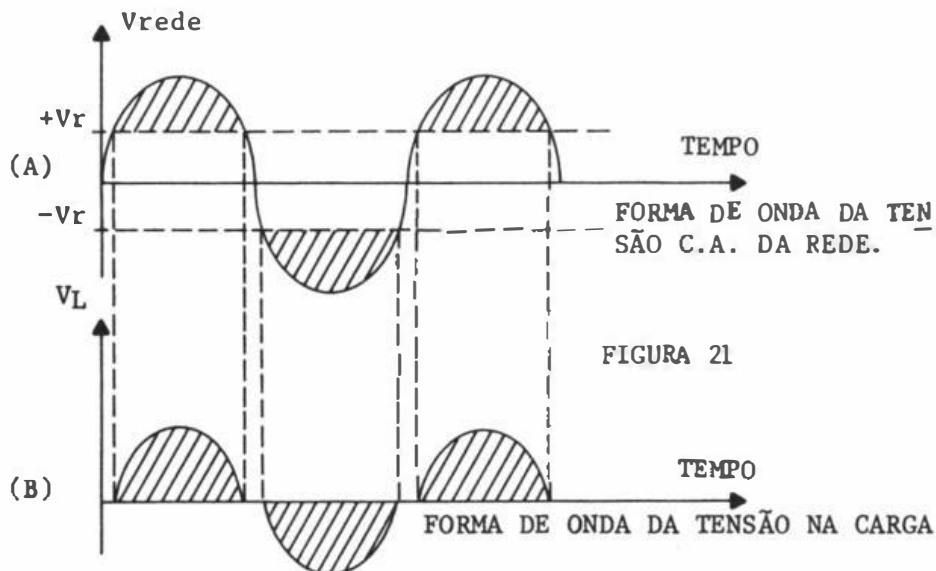
Uma das principais aplicações do DIAC é como elemento auxiliar no disparo do SCR e do TRIAC, em circuitos de controle de potência.

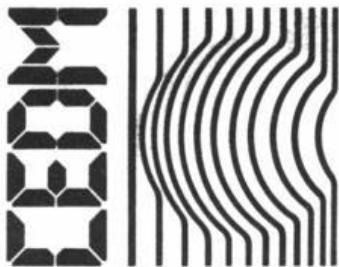
Uma outra aplicação, um tanto mais elementar, é mostrada na figura 20, onde apenas o DIAC é utilizado no controle da potência de uma carga.

FIGURA 20



A figura 21A nos mostra a forma de onda da tensão C.A. da rede, enquanto que a figura 21B nos mostra a forma de onda da tensão na carga. Ambas as figuras estão relacionadas com o circuito apresentado na figura 20.





CURSOS DE APERFEIÇOAMENTO

CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANA

EXAME DA LIÇÃO E-11

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) O termo tiristor abrange uma ampla gama de dispositivos de estado sólido, utilizados como:
 - a) chave eletronicamente controladas;
 - b) as alternativas a e c estão corretas;
 - c) versão eletrônica das chaves mecânicas e relês;
 - d) N.R.A.
- 2) Os tiristores (SCR, DIAC e TRIAC) são amplamente utilizados:
 - a) no controle de potência;
 - b) no controle de frequência;
 - c) no controle da intensidade sonora;
 - d) N.R.A.
- 3) Quanto à sua construção, o SCR é constituído de:
 - a) 4 camadas semicondutoras (duas do tipo N e duas do tipo P) fortemente dopadas;
 - b) 3 camadas semicondutoras;
 - c) 4 camadas semicondutoras fracamente dopadas;
 - d) 3 camadas do tipo P e uma do tipo N.
- 4) O disparo de um SCR pode ser conseguido:
 - a) através da aplicação de tensões baixíssimas entre anodo e catodo;

- b) através da polarização direta entre porta e catodo;
 - c) através da polarização reversa entre porta e catodo;
 - d) N.R.A.
- 5) De acordo com o gráfico apresentado na figura 5, o valor da corrente de retenção (I_h) está localizado no ponto:
- a) onde ocorre o disparo do SCR;
 - b) onde ocorre a tensão reversa de ruptura;
 - c) onde ocorre a tensão reversa de disparo;
 - d) as alternativas b e c estão corretas.
- 6) Com base no gráfico apresentado na figura 7, podemos concluir que:
- a) a tensão direta de disparo do SCR é inversamente proporcional à corrente de porta (I_g);
 - b) a tensão direta de disparo do SCR é diretamente proporcional à corrente de porta (I_g);
 - c) a tensão reversa de disparo do SCR é inversamente proporcional à corrente de porta;
 - d) N.R.A.
- 7) O TRIAC pode ser considerado como sendo:
- a) um DIAC e um SCR ligados em série;
 - b) dois DIACs ligados em paralelo;
 - c) dois SCRs ligados em paralelo e em direções opostas, ou seja, ligados em antiparalelo;
 - d) um SCR e um DIAC ligados em paralelo.
- 8) Para realizarmos o controle de um ciclo completo de um sinal alternado (C.A.), normalmente utilizamos um:
- a) TRIAC;
 - b) DIAC;
 - c) SCR;
 - d) N.R.A.
- 9) O DIAC é um dispositivo utilizado para:
- a) disparar o TRIAC;
 - b) auxiliar o diodo zener a conduzir;
 - c) auxiliar o SCR a entrar em corte;
 - d) as alternativas b e c estão corretas.
- 10) Para valores de tensões acima do valor da tensão de ruptura (V_r), o DIAC passa a apresentar:
- a) uma resistência negativa;
 - b) uma capacitância negativa;
 - c) as alternativas a e b estão corretas;
 - d) N.R.A.

LIÇÃO E-12

DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES IV

INTRODUÇÃO:

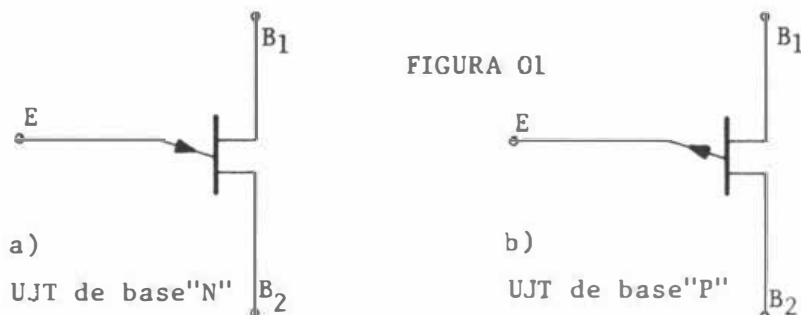
Dando continuidade ao estudo dos dispositivos semicondutores, desenvolveremos nesta lição um breve estudo sobre os TRANSISTORES UNIJUNÇÃO (UJT) e os TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO (MOSFET e JFET). Esses dispositivos, por suas propriedades elétricas específicas, são utilizados em muitas aplicações práticas interessantes, das quais examinaremos algumas delas.

TRANSISTORES UNIJUNÇÃO - (UJT)

Trata-se, pois, de um importante dispositivo da família dos tiristores, apresentando características elétricas e físicas bastante diferentes daquelas dos diacs e triacs, estudados em lições anteriores. É utilizado normalmente como gerador de formas de onda e chave eletrônica, sendo amplamente usado em circuitos eletrônicos.

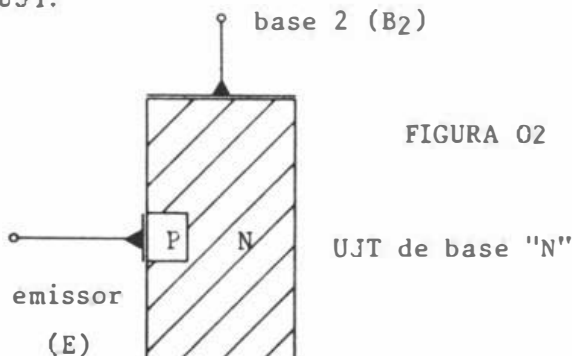
A estrutura básica do UJT é muito simples, possuindo uma única junção semicondutora, como o próprio nome sugere. Apre-

senta três terminais, emissor(E), base(1) e base(2), cujo símbolo se acha representado na figura 1.



O unijunção é formado por uma única barra de silício, do tipo "N", levemente dopada. Em seus extremos estão ligados os terminais referentes à base (1) e à base (2). E numa região central, altamente dopada, constituída de material tipo "P", produzida por difusão, correspondente ao emissor (E), é então conectado o terceiro terminal (terminal do emissor). Teremos assim uma junção do tipo "P-N", onde o lado "N" apresenta dois terminais (base 1 e base 2) e o lado "P" apresenta um terminal (emissor). Devido ao fato do transistor unijunção apresentar dois terminais de base, esse dispositivo também é conhecido como diodo de dupla base.

Quando a região semicondutora, correspondente ao emissor, for do tipo "P", teremos o UJT de base "N" (figura 1A) e quando essa região for do tipo "N", teremos o UJT de base "P" (figura 1B). A figura 2 nos mostra um esquema simplificado da estrutura do UJT.



A junção "P-N" pode ser representada por um diodo (D). A resistência entre a base(2) e o emissor é representada pelo resistor R_{b2} e a resistência entre a base(1) e o emissor é representada pelo resistor R_{b1} , sendo a soma de R_{b1} e R_{b2} igual à resistência ôhmica total da barra de silício entre os terminais B_1 e B_2 , também conhecida como resistência inter-base (R_{bb}).

Dessa forma, podemos montar o circuito equivalente do UJT. (Desenvolveremos o assunto com referência ao UJT de base "N", mostrado na figura 3). O resistor R tem como função limitar a corrente que flui através do emissor(E), a um nível seguro.

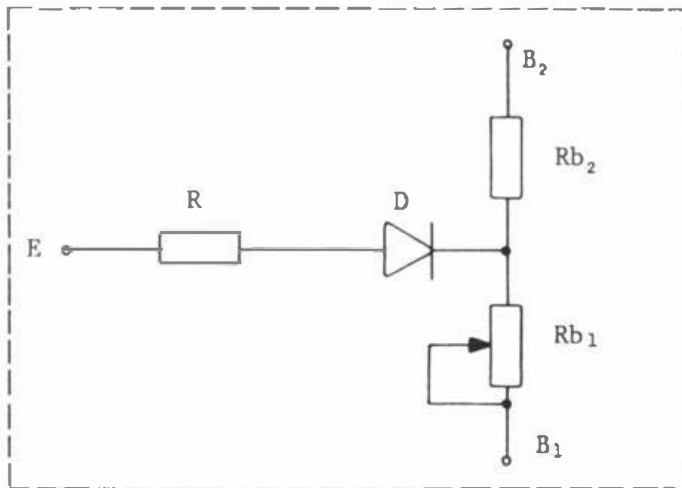


FIGURA 03

$$R_{bb} = R_{b1} + R_{b2}$$

O valor de R_{bb} está compreendido na faixa de $3K\Omega$ a $15K\Omega$ aproximadamente. Devido à região de emissor estar mais próxima da base 2, o valor da resistência ôhmica R_{b2} deverá ser um pouco menor do que o valor de R_{b1} . O valor de R_{b1} varia com a corrente que circula entre a base 1 e o emissor.

Polarização do UJT - É feita de modo que a base 2 e o emissor fiquem diretamente polarizados em relação à base 1. A tensão entre bases 1 e 2 é denominada V_{bb} e a tensão de emissor representamos por V_e . A figura 4 ilustra este fato.

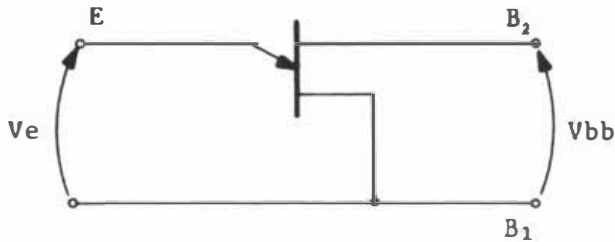


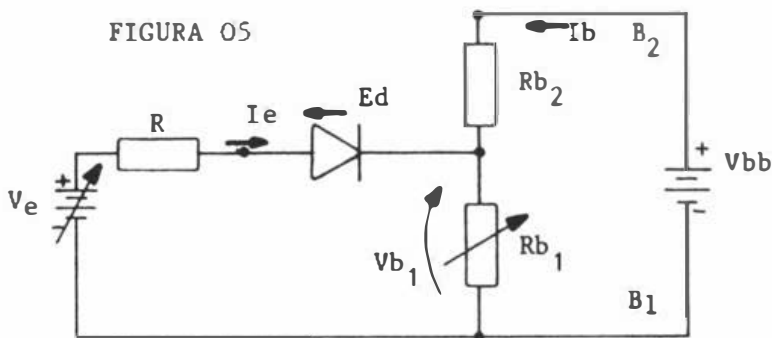
FIGURA 04

OPERAÇÃO DE UM UJT:

Para melhor estudo desse dispositivo, vamos lançar mão do modelo apresentado na figura 3, acrescentando as fontes responsáveis pela polarização, fato este ilustrado na figura 5.

A fonte V_{bb} polariza diretamente a base 2 em relação à base 1. Se V_e não for alta, o suficiente para fazer com que o diodo D seja diretamente polarizado, os resistores R_{b1} e R_{b2} deverão permitir que apenas uma pequena corrente circule entre os terminais B_2 e B_1 . Devido ao fato de não termos corrente circulando através do diodo, a corrente que flui entre os terminais pode ser calculada aplicando-se a lei de OHM, ou seja:

$$I_{b1b2} = V_{bb} / (R_{b1} + R_{b2})$$



A relação V_{b1}/V_{bb} é conhecida como relação intrínseca de equilíbrio; é representada pela letra grega η (eta), normalmente fornecida pelo fabricante.

$$\eta = V_{b1}/V_{bb}$$

Cada tipo de UJT possui uma relação intrínseca de equilíbrio específica, sendo que seus valores típicos variam de aproximadamente 0,5 a 0,75. Uma vez conhecido o valor de (η) para um determinado UJT, podemos determinar o valor da tensão V_{b1} para qualquer valor de tensão aplicada (V_{bb}). Para tanto, basta utilizar a expressão a seguir:

$$V_{b1} = \eta \cdot V_{bb}$$

O valor da relação intrínseca de equilíbrio também poderá ser calculada através da expressão:

$$\eta = R_{b1}/R_{b1} + R_{b2}$$

Se aumentarmos V_e gradativamente, a partir do instante em que $V_e \geq (E_d + V_{b1})$, o diodo D estará diretamente polarizado, passando a conduzir. Este valor de V_e , requerido para polarizar diretamente o diodo D, é chamado de tensão de pico (V_p) que é calculada pela expressão:

$$V_p = \eta V_{bb} + V_f$$

Onde V_f é a tensão requerida para polarizar diretamente o diodo. Por exemplo: diodo de Si $\rightarrow V_f = 0,7V$.

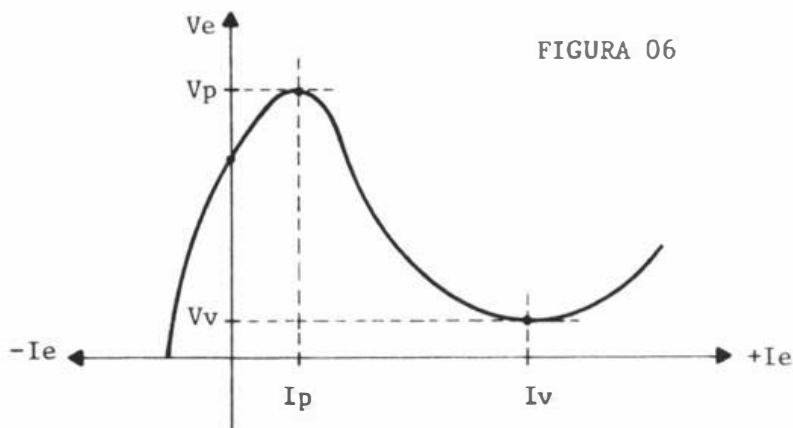
Quando o valor de V_p é alcançado, o diodo passa a conduzir, permitindo a circulação de corrente no sentido direto (I_e). Teremos então a corrente do emissor (elemento P) para as bases (elemento "N"), constituída, em sua maioria, de portadores positivos (lacunas), sendo injetados na região tipo N. Com o aumento de portadores na barra de silício tipo N, mais precisamente, na região correspondente à R_{b1} , observa-se um decréscimo no seu valor, isto é, a resistividade da barra diminuirá. Com isto, a tensão sobre R_{b1} (V_{b1}) também irá diminuir, fazendo com que mais portadores sejam injetados na barra, contribuindo, desta forma, para uma diminuição ainda maior da resistividade da barra de silício, entre o emissor e a

base. Temos assim um novo decréscimo de R_{b1} . Isto torna-se um ciclo vicioso, tendo como consequência a apresentação de uma região de resistência negativa. E um aumento de I_e só será limitado por circuito externo.

Podemos afirmar então que quando o UJT atingir as condições enunciadas acima, ocorrerá seu disparo.

A característica de resistência negativa do UJT o torna útil para a geração de sinais cíclicos (Oscilador de relaxação). Um outro uso importante desse dispositivo é a sua utilização para o disparo de tiristores. O UJT é capaz de produzir pulsos de corrente ideais para disparar os SCRs ou TRIACs.

A figura 6 nos mostra a característica tensão versus corrente ($V \times I$), entre o emissor(E) e a base(B1) de um UJT comum.



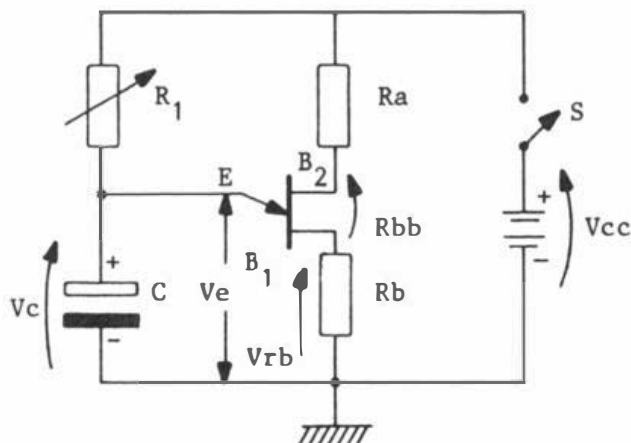
A curva mostrada na figura 6 ilustra a relação entre a corrente que flui pelo emissor de um UJT (I_e) e a tensão(V_e), aplicada entre os terminais de emissor (E) e de uma das bases (B1). Esta curva poderá ser obtida através do circuito apresentado na figura 5. Os valores de V_e e I_e poderão ser obser-

vados enquanto V_s varia sobre uma ampla faixa.

Quando o valor da tensão V_e se iguala a zero, teremos uma pequena corrente negativa ($-I_e$) circulando através do terminal de emissor. Trata-se pois de uma pequena corrente de fuga, devido à tensão relativamente grande (V_{b1}) que está aplicada sobre o resistor R_{b1} . À medida que a tensão V_e aumenta, a corrente de fuga diminui. Isto acontece porque a tensão V_e se opõe à tensão V_{b1} . No instante em que a tensão V_e se iguala com a tensão V_{b1} , a corrente I_e resultará positiva ($+I_e$). Quando V_e atingir o valor da tensão de pico (V_p), o UJT estará no estado ligado. A corrente que flui neste ponto é chamada de corrente de pico (I_p).

Além do ponto onde ocorre a tensão de pico (V_p), o valor da tensão V_e passa a variar inversamente com relação à corrente $+I_e$, ou seja, à medida que a corrente $+I_e$ aumenta, a tensão V_e diminui, o que vem a caracterizar uma certa região de resistência negativa do UJT. Esta resistência negativa permanece até o instante em que a tensão V_e passa a crescer novamente. De acordo com o gráfico apresentado na figura 6, o ponto onde a tensão V_e atinge seu valor mínimo e começa a subir é chamada de "tensão de vale" (V_v), que corresponde, nesse mesmo instante, a uma "corrente de vale" (I_v).

Essa característica de resistência negativa do UJT é tão útil para a geração de sinais cíclicos. Como exemplo prático de aplicação do transistor unijunção (UJT), apresentamos o esquema simplificado de um "Oscilador de relaxação" (figura 7). Este tipo de circuito possui a capacidade de gerar dois tipos de formas de onda, as quais poderão ser utilizadas em diversas aplicações. Vejamos então como funciona este circuito.



OBS: CAPACITOR ELE
TROLÍTICO.

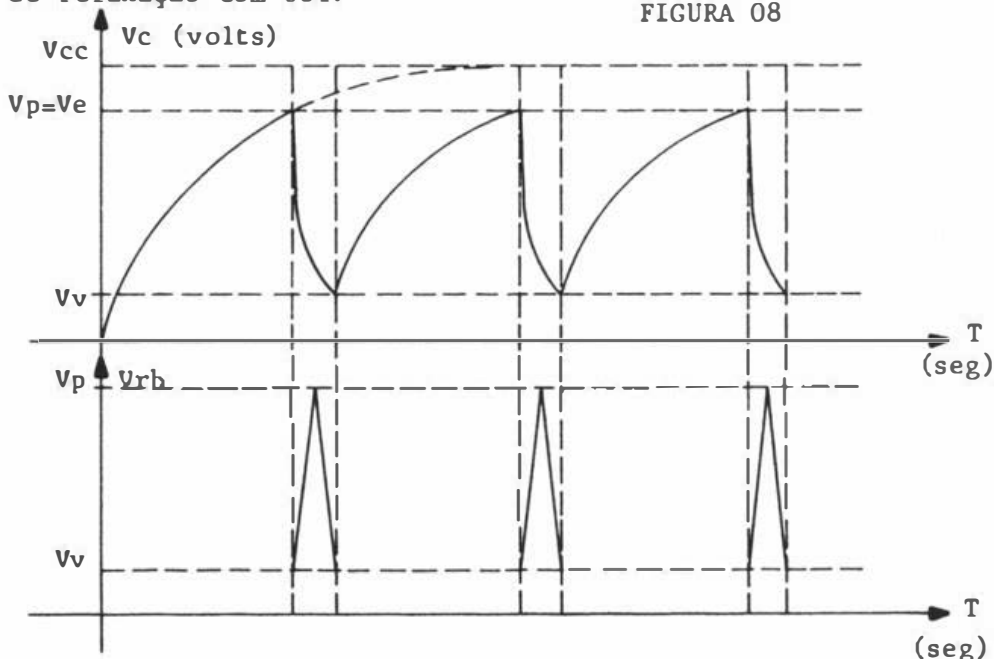


FIGURA 07

Ao fechar a chave S, o capacitor C carregar-se-á através do resistor R1. O capacitor C tenderá atingir a tensão de alimentação V_{cc} , porém quando a tensão do capacitor atingir o valor de pico V_p do UJT, este disparará e a resistência entre seus terminais E e B1 diminuirá. Isto permite que o capacitor se descarregue através do UJT e do resistor R_b , de modo que a tensão sobre o capacitor C diminua rapidamente até o valor V_v do UJT e isto faz com que o tiristor (UJT) seja desligado. Tão logo o UJT é desativado, o capacitor C começa a se carregar novamente, reiniciando um novo ciclo.

A figura 8 nos mostra as formas de onda para o oscilador de relaxação com UJT.

FIGURA 08



Nota-se que a tensão segue um padrão de onda dente de serra e depois do disparo inicial varia apenas entre V_v e V_p . Também pode-se verificar que a tensão nunca cai completamente a zero. Sempre haverá uma pequena queda sobre R_b , devido a uma pequena corrente que circula pelo UJT (de B1 a B2), mesmo quando este se encontra no estado desligado. Se a resistência R_1 , (variável) diminui, o capacitor C carrega-se mais rapidamente e o circuito opera a uma frequência maior. Deste modo consegue-se controlar a frequência ou a oscilação do cir-

cuito. Uma outra forma de se atuar sobre a frequência é através da substituição do capacitor C por uma unidade maior ou menor. Um capacitor maior carregará-se mais lentamente, enquanto um capacitor menor deverá carregar-se a um ritmo mais rápido. A frequência de operação deste circuito depende do valor do capacitor C e do resistor R por onde ele se carrega. Esta frequência pode ser calculada pela fórmula:

$$f = 1/R_1C.$$

Onde:

f - em hertz

C - em farads

R₁ - em Ohms.

As formas de onda mostradas na figura 8, produzidas pelo oscilador de relaxação com UJT, possuem uma grande aplicação em circuitos eletrônicos. Porém, o UJT também poderá ser utilizado em aplicações onde não se requer que ele oscile continuamente. É o caso onde o UJT pode funcionar como elemento biestável, ou seja, o UJT funciona como uma chave (passando de seu estado ligado para o estado desligado e vice-versa) assim que receber um sinal adequado em sua entrada.

Um outro uso importante do UJT é como dispositivo de disparo uma vez que ele pode produzir pulsos de corrente ideais para o disparo de SCRs.

UJT PROGRAMÁVEL (PUT)

Trata-se de um dispositivo construído a partir de quatro camadas semicondutoras, porém capaz de desempenhar as mesmas funções que o UJT. O UJT programável é identificado pela sigla PUT. A figura 9 nos mostra o símbolo esquemático para o "UJT Programável" (PUT).

Note que o PUT possui três terminais (ânodo, cátodo e porta). A principal diferença entre o UJT comum e o PUT está no fato de que a tensão de pico (V_p) deste último é controlável. Como vimos, no UJT comum o valor da tensão de pico (V_p) é fixa, não podendo ser controlada externamente. O controle da tensão de pico (V_p) do PUT é conseguido através da va-

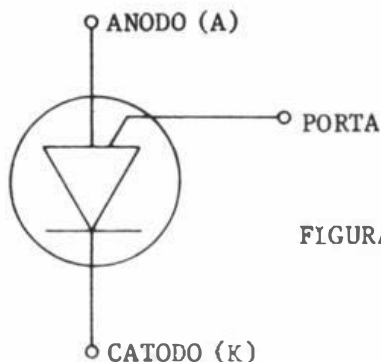


FIGURA 09

riação da tensão entre a porta e o catodo, porém com a porta sempre positiva em relação ao catodo.

Os terminais de anodo e catodo são, normalmente, usados da mesma maneira que os terminais de emissor (E) e base 1 (B1) do UJT, com o anodo sempre positivo com relação ao catodo. Com isto, as características $V \times I$, entre os terminais de anodo e catodo, são idênticas às dos terminais E e B1 do UJT. O PUT possui as mesmas características de disparo do UJT, apresentando uma região de resistência negativa entre os seus pontos de pico e vale.

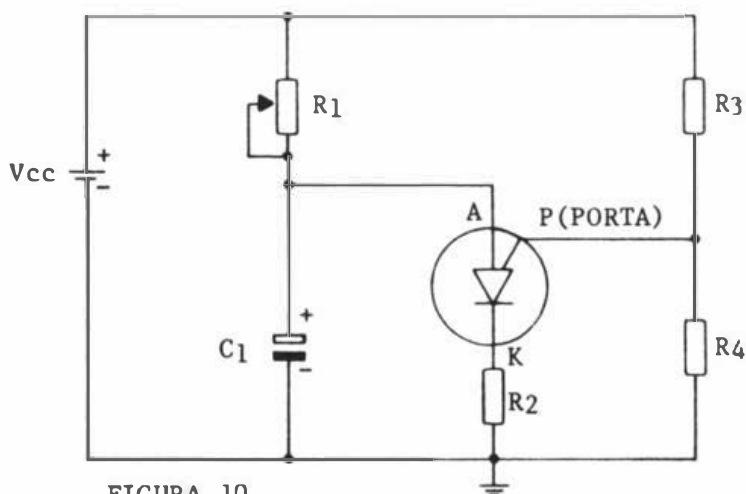


FIGURA 10

Como exemplo de aplicação do PUT, podemos citar o circuito oscilador de relaxação (figura 10), o qual produz as mesmas formas de onda básicas mostradas na figura 8.

Com relação ao circuito da figura 10, notamos que a frequência do oscilador com PUT poderá ser ajustada pela relação entre R_3 e R_4 que controla o valor da tensão de pico (V_p) do dispositivo. Além da frequência, os resistores R_3 e R_4 controlam outras características do PUT, como a corrente de pico (I_p) e a corrente de vale (I_v).

Além do uso em osciladores de relaxação, o PUT pode ser utilizado como dispositivo de disparo para SCRs. Devido a sua construção em quatro camadas semicondutoras, o PUT pode fornecer pulsos de disparo que apresentam uma amplitude maior que os obtidos através dos UJT's comuns, o que o habilita a disparar SCRs que apresentam características de corrente mais elevadas. O PUT também poderá ser utilizado em circuitos temporizadores de longa duração pois apresenta uma baixa corrente de fuga de porta para anodo.

O PUT, além de ser mais sensível que o UJT, respondendo mais rapidamente, apresenta as suas principais características elétricas passíveis de controle externo, o que o torna mais versátil que o UJT comum.

MOSFET E JFET - TRANSISTORES DE EFEITO DE CAMPO

Trata-se de importantes dispositivos de estado sólido, capazes de fornecerem amplificação e que podem concorrer com os transistores comuns em muitas aplicações. Caracterizam-se como possuidores de "altíssima impedância de entrada".

Atualmente existem no mercado dois tipos de transistores de efeito de campo: o FET de junção (JFET) e o transistor de efeito de campo com metal-óxido-semicondutor (MOSFET), também conhecido como transistor de efeito de campo de porta isolada (IGFET). Estudaremos primeiramente o transistor de efeito de campo de junção.

JFET - TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO DE JUNÇÃO

Do inglês (JUNCTION FIELD EFFECT TRANSISTOR), o JFET é um dispositivo que, através de uma polarização reversa, apli-

cada a seus elementos de controle (portas), controlará o fluxo de corrente que circula por uma região conhecida por canal.

Esta região é formada por material semiconductor, fracamente dopado (tipo N ou P), em forma de barra (parte hachurada da figura 11), tendo em seus extremos dois contatos ôhmicos (metal-semiconductor), denominados de FONTE (source) e DRENO (drain). Às vezes, a fonte também recebe a denominação de SUPRIDOURO (S). As regiões opostas ao canal (parte branca da figura 11) são fortemente dopadas e de material semiconductor de tipo oposto ao utilizado na região do canal (tipo P ou N). Nestas duas regiões há dois contatos ôhmicos, os quais recebem o nome de PORTA ou GATE (G), ligados entre si, constituindo assim o terceiro terminal. A figura 11 nos mostra um esquema representativo da construção interna de um JFET.

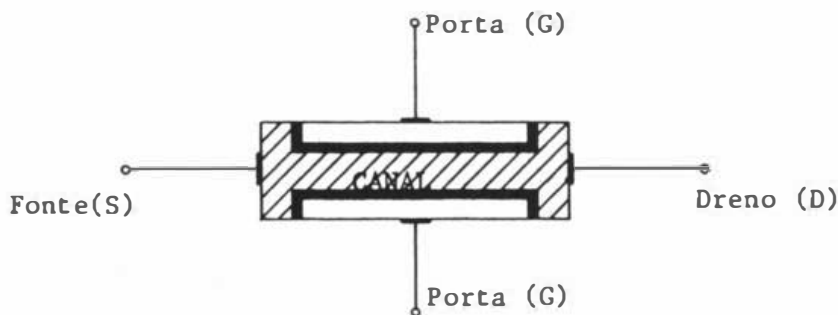


FIGURA 11

Como podemos notar, as regiões em negrito são duas junções "P-N". A região compreendida entre as duas junções "P-N" e a barra de material semiconductor (normalmente silício) forma um verdadeiro canal, por onde circularão os portadores de carga elétrica.

Conforme o tipo de material semiconductor de que é composto o canal, podemos classificar o JFET em:

a) JFET de canal N - quando o canal for do tipo "N" e o gate do tipo "P" (figura 12A);

b) JFET de canal P - quando o canal for do tipo "P" e o gate do tipo "N" (figura 12B).

Na grande maioria dos FETs de junção, o canal é geometricamente simétrico, não havendo diferença entre os terminais, que poderão ser usados indistintamente como dreno ou como fontes (supridouro).

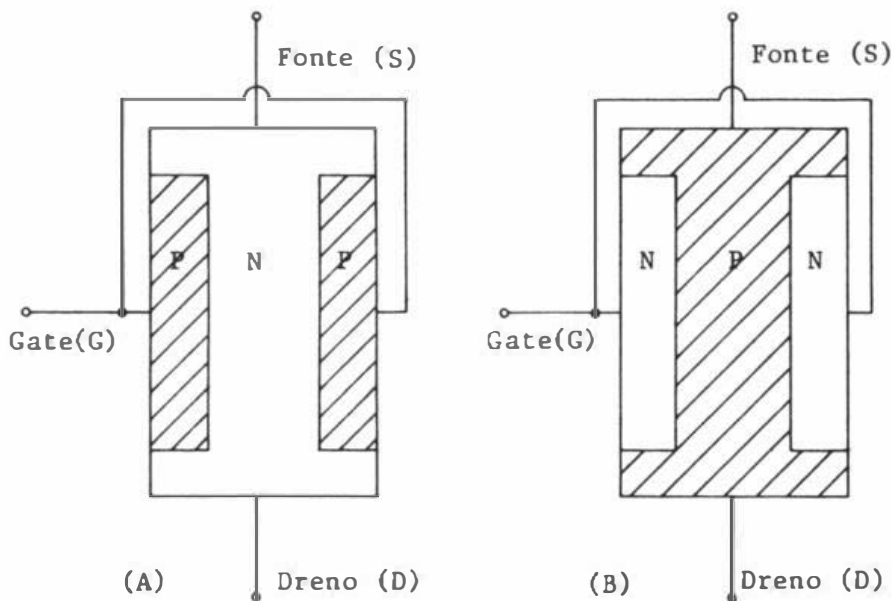
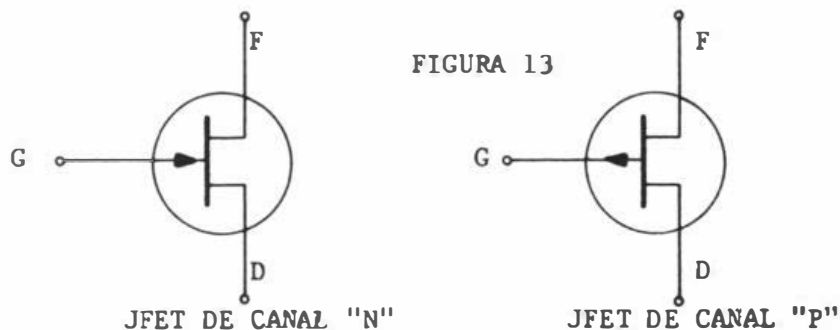


FIGURA 12

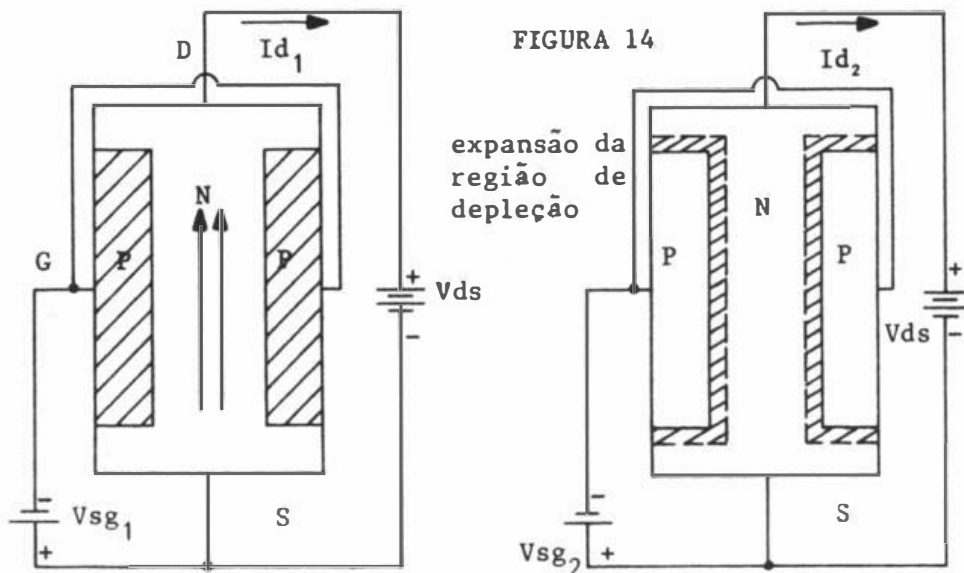
A simbologia utilizada para representar cada tipo de FET de junção encontra-se na figura 13.



O JFET tem o gate (G) como "eletrodo de comando", por isso é simples seu princípio de operação.

Em aplicações normais de um JFET de canal "N", o gate(G) deverá ser inversamente polarizado em relação à fonte (S), enquanto que o dreno (D) deverá ser diretamente polarizado em relação à fonte. Como num transistor bipolar comum, um FET de junção necessita de duas tensões externas de polarização (V_{ds} e V_{sg}), como mostra a figura 14A.

A tensão V_{ds} faz com que uma corrente flua pelo canal tipo "N", o qual se comporta como um simples resistor. Esta corrente denomina-se corrente de dreno (I_d). Ao se aplicar a tensão V_{sg} , as duas junções "PN" do JFET ficarão inversamente polarizadas, formando uma região de depleção (região desprovida de portadores majoritários), a qual expande-se internamente, ao longo do canal, afastando todos os portadores que, por ventura, venham aproximar-se da junção (figura 14B). Teremos, desta forma, uma diminuição da corrente de dreno (I_d). Como o tamanho da região de depleção é controlada pela tensão V_{sg} , concluímos que de um acréscimo em V_{sg} , resulta um decréscimo de I_d e vice-versa. De uma maneira mais simples, podemos dizer que a tensão V_{sg} controla a resistência do canal e consequentemente consegue controlar a intensidade da corrente de dreno (que flui pelo canal).



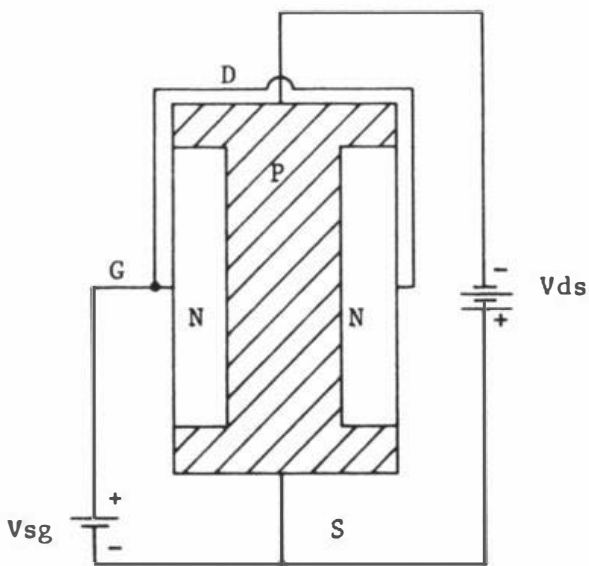
Nas condições descritas anteriormente, as duas junções "P-N" inversamente polarizadas fazem com que o JFET apresente altíssima impedância de entrada (cerca de 1.000.000 de megaohms).

Caso aconteça que as junções "PN" sejam diretamente polarizadas, resultará em uma corrente relativamente alta através das junções, com uma diminuição significativa da impedância de entrada, acarretando, com isso, uma redução do seu ganho. Se a tensão de polarização direta for muito elevada, o JFET poderá danificar-se, devido ao grande aquecimento que irá ocorrer nas junções.

Também é desaconselhável uma polarização inversa muito elevada, pois poderá ocorrer uma ruptura das junções, podendo danificar o dispositivo.

Quanto ao princípio de funcionamento de um JFET de canal "P", pode-se dizer que é análogo ao que acabamos de descrever, tendo como diferença a polaridade das baterias (figura 15) que deve ser invertida. Para este tipo de JFET, verifica-se um fluxo de lacunas através do canal (I_d).

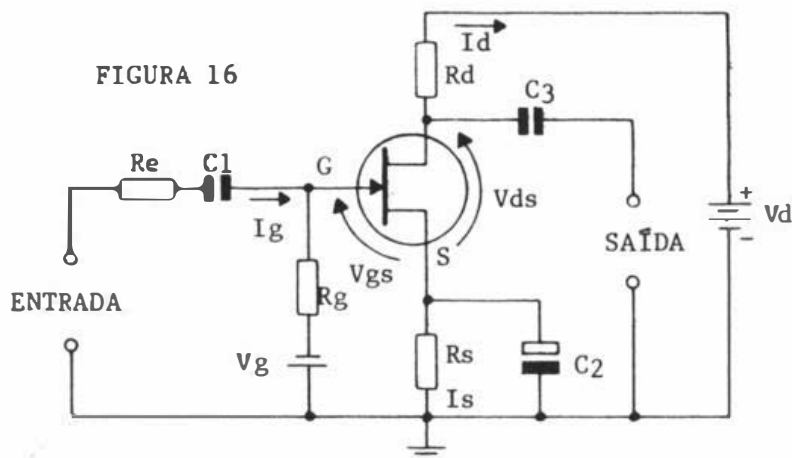
FIGURA 15



Analogamente aos transistores bipolares, os JFET's possuem, na prática, três tipos diferentes de montagens, a saber:

- Montagem com dreno comum (dreno à massa).
- Montagem com fonte comum (fonte à massa).
- Montagem com gate comum (gate à massa).

A montagem mais utilizada é a Fonte (S) à massa, ilustrada na figura 16.



(exemplo de montagem supridor à massa ou circuito seguidor de fonte).

A função do capacitor C2 (capacitor eletrolítico) é reduzir ao máximo a degeneração da corrente alternada.

O JFET COMO AMPLIFICADOR:

O circuito mostrado na figura 16 ilustra a aplicação típica de um JFET funcionando como amplificador. Neste caso, o sinal aplicado entre a porta e a fonte comanda a corrente I_d , e a variação desta corrente é então aproveitada para produzir uma tensão alternada sobre uma carga colocada no circuito dreno-fonte. Tal tensão nada mais é do que uma réplica amplificada do sinal injetado entre a porta e a fonte.

A região do canal onde as duas "zonas de depleção" sobrepõem-se é denominada "pinçamento". Uma vez atingida esta condição, a corrente de dreno (I_d) praticamente não sofre variações com a variação de V_{ds} . Além disso, sabe-se que o pinçamento pode ocorrer para diferentes valores de V_{gs} . A figura 17 nos mostra a região onde o JFET opera como amplificador.

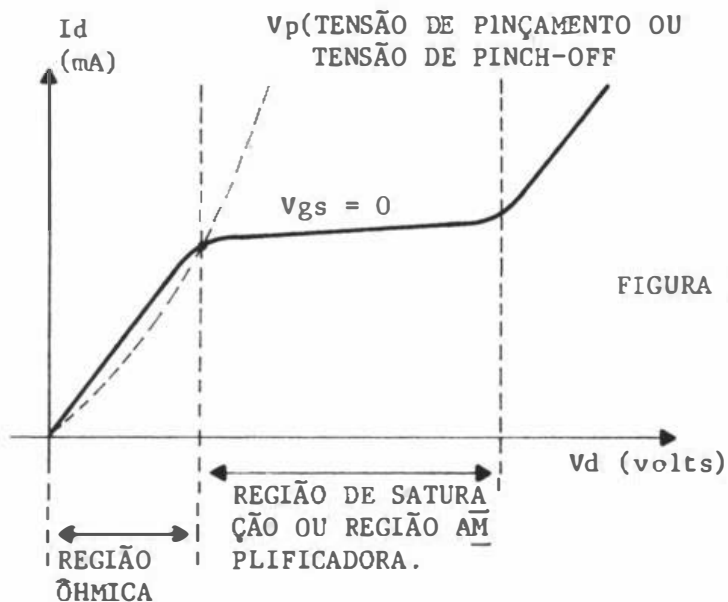


FIGURA 17

Na região ôhmica o JFET pode ser usado como um resistor variável, controlado por tensão.

A região de pinçamento também é conhecida por região de "pinch-off". Quando o nível da corrente I_d se estabiliza, devido à expansão da região de depleção, reduzindo-se a largura do canal, diz-se que a corrente I_d está no seu ponto de "pinch-off" ou ponto de pinçamento. A tensão V_p é o valor da tensão V_{ds} necessária para saturar ou limitar a corrente I_d .

A capacidade de amplificação de um JFET, normalmente, é medida através da observação do efeito que a tensão porta-su-
prido (Vgs) tem sobre a corrente de dreno (Id). Essas duas
quantidades são expressas em uma razão matemática. A esta re-
lação dá-se o nome de "Transcondutância do JFET, a qual é ex-
pressa matematicamente da seguinte forma:

$$g_m = \Delta I_d / \Delta V_{gs}$$

Normalmente, a transcondutância do JFET é determinada -
dentro da região de "pinch-off", uma vez que esta região é a
mais usada. Para finalizar, podemos dizer que quanto maior -
for a variação em Id para uma dada variação em Vgs, maior se-
rá o ganho do JFET e, logicamente maior será a transcondutân-
cia.

MOSFET - TRANSISTOR A EFEITO DE CAMPO COM METAL-ÓXIDO-SE- MICONDUTOR

Também conhecido por IGFET (do inglês: INSULATED GATE
FIELD EFFECT TRANSISTOR) é um elemento largamente utilizado na
construção de circuitos integrados. Sua construção é baseada -
na técnica MOS, muito difundida entre os fabricantes de cir-
cuitos integrados. A denominação MOS surgiu devido à dispo-
sição relativa das camadas (figura 18) que formam o dispositi-
vo, ou seja, Metal-Óxido-Semicondutor. O processo é iniciado,
partindo-se de um elemento de silício (tipo N ou P) de eleva-
da resistividade, denominado substrato. Este dispositivo é en-
tão formado pela implantação de um canal tipo "N" dentro de
um substrato tipo "P". Sobre este conjunto é depositada uma
fina camada de óxido de silício (SiO2). Entretanto os termi-
nais opostos do canal tipo "N" são deixados expostos, de modo
que a eles se possam conectar dois eletrodos (CONTATOS), deno-
minados FONTE(S) e DRENO(D). Um terceiro eletrodo é conecta-
do à estrutura substrato + canal, através da deposição de uma
fina camada metálica (geralmente alumínio) sobre a camada de
óxido de silício (SiO2), material isolante. Este eletrodo é
denominado gate (G) ou porta.

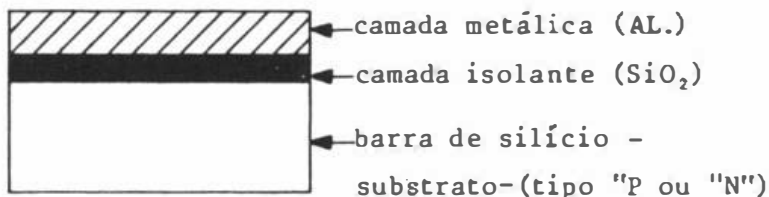


FIGURA 18

A simbologia utilizada para o MOSFET, canal "N" e "P", encontra-se na figura 19. Deve-se observar que o sentido da flecha vai do substrato para o canal, quando este for do tipo "N" e do canal para o substrato, quando o canal for tipo "P".

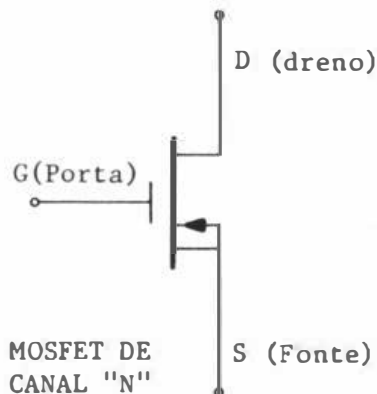
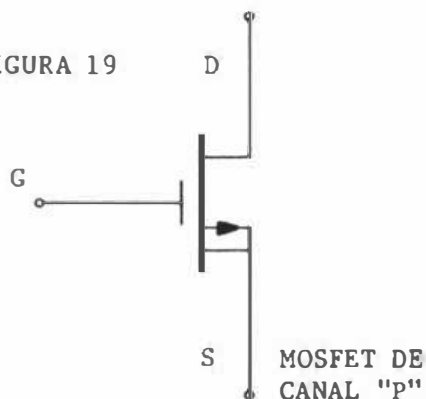


FIGURA 19



Para melhor compreendermos o funcionamento do MOSFET, vamos fixar um tipo de construção, por exemplo, o canal "N".

As duas regiões "N" estão separadas pelo substrato "P". Ao conectarmos, entre a FONTE(S) e o DRENO(D), uma bateria e o pólo negativo desta for conectado ao substrato (pastilha de silício) tipo "P", a corrente que flui entre ambos será extremamente baixa, pois os poucos elétrons livres, nela existentes, serão atraídos pelo pólo positivo da bateria, indo alojar-se na superfície inferior da camada isolante. Invertendo-se a polarização da bateria, os elétrons livres também serão atraídos pelo pólo positivo da bateria, indo alojar-se na superfície inferior do substrato (silício tipo "P"). As mesmas conclusões serão obtidas para os elementos de canal "P", porém tendo como portadores minoritários, as lacunas.

Ao contrário do FET de junção que opera no modo de depleções (ou depleção), o MOSFET foi projetado de maneira que existam dois tipos básicos de MOSFET: O MOSFET DE CRESCIMENTO ou REFORÇO) e o MOSFET DE DEPLEÇÃO.

MOSFET DE CRESCIMENTO

Consiste em induzirmos um canal "N" entre as duas regiões "N", através de uma polarização adequada. Como é sabido, a porta (G) encontra-se isolada da estrutura por uma fina camada de material isolante SiO_2 . Logo o contato metálico da porta, o isolante e o substrato "P" formarão um capacitor, tendo por dielétrico o SiO_2 . Ao aplicarmos uma tensão positiva à porta, induziremos na placa inferior do capacitor (substrato "P") cargas negativas, estabelecendo-se, desta maneira, um contato entre a Fonte(S) e o Dreno(D), fazendo com que a corrente que circula entre estes dois elementos seja função de tensão positiva aplicada à porta, controlando-se assim, a largura do canal (figura 20). Este tipo de MOSFET caracteriza-se pela elevada resistência de entrada, da ordem de $10^{14} \Omega$, sendo largamente usado em circuitos de comutação.

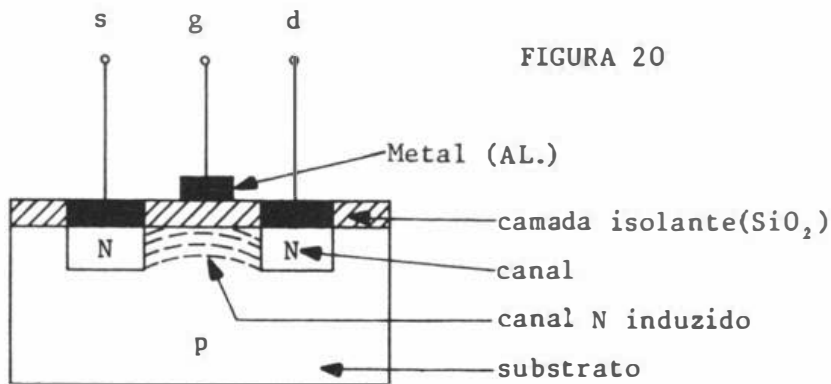
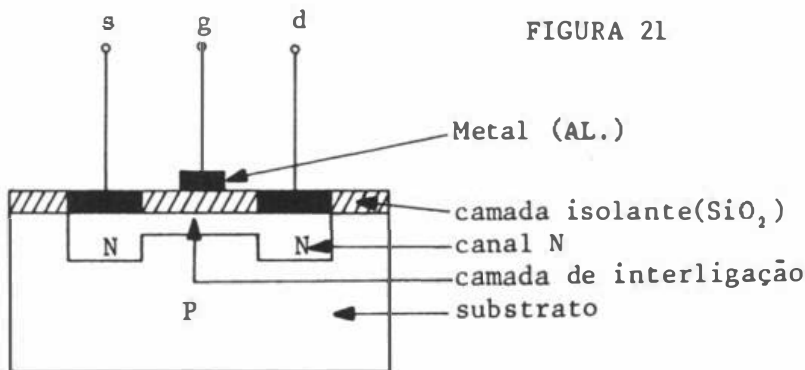


FIGURA 20

Cabe observar ainda que, para o MOSFET DE CRESCIMENTO, quanto maior for o valor da tensão positiva aplicada à Porta (G), maior será a largura do canal formado (induzido) e, conseqüentemente, tanto maior será a corrente de dreno (I_d). Caso a porta for inversamente polarizada, a corrente de dreno será nula ($I_d = 0$).

MOSFET DE DEPLEÇÃO

Basicamente não existe alteração alguma para o MOSFET de crescimento, exceto uma estreita camada tipo "N" interligando Fonte(S) e Dreno(D) que permite o fluxo de corrente, mesmo quando nenhuma tensão for aplicada à Porta(G) (figura 21). Ao aplicarmos uma tensão positiva à Porta (G), o dispositivo com portar-se-á de modo análogo ao do tipo de indução. Caso se aplique uma tensão negativa, o dispositivo apresentará característica de depleção, apresentando uma diminuição de portadores de carga livres na estreita região difundida entre dreno e fonte. Podemos então variar a resistividade do canal, com tensões positivas e negativas de porta, controlando assim o fluxo de corrente através do dispositivo.



O MOSFET de depleção é largamente utilizado em amplificadores de tensão, em amplificadores de RF, em amplificadores de ganho controlado, em receptores de rádio e TV, etc. Este dispositivo também caracteriza-se pela alta impedância de entrada, da ordem de $10^{14} \Omega$ para qualquer que seja a polaridade da tensão aplicada à Porta (G) do mesmo. Isto ocorre devido à camada de isolante (SiO_2) que separa a porta do canal, a qual impede a passagem de corrente elétrica.

Apesar das inúmeras vantagens do MOSFET, este possui falhas de relevante importância: a pouca espessura da camada de óxido (SiO_2) a torna muito frágil e uma tensão relativamente baixa, aplicada entre a porta e a fonte, poderá danificá-la perfurando-a e inutilizando, desta forma, o dispositivo. O próprio manuseio e também o deslocamento do dispositivo no

interior de sua embalagem poderá perfurar a fina camada de óxido. Daí o fato de, ao se adquirir um MOSFET, encontrá-lo com seus terminais curtos circuitados através de uma lâmina metálica.

Para os MOSFET's de porta dupla foi desenvolvido um sistema de proteção contra tensões excessivas e cargas eletrostáticas (originados pelo movimento de vai e vem), utilizando-se de dois pares de zeners, ligados em série-oposição e conectados entre cada porta e a fonte (figura 22).

O MOSFET de porta dupla equivale a dois MOSFET's do tipo depleção, ligados em série, onde ambas as portas controlam a corrente de dreno (I_d).

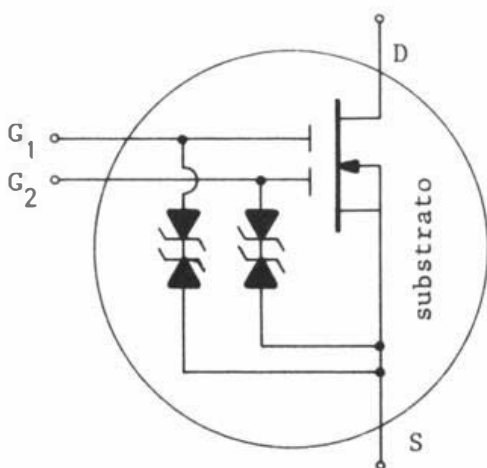
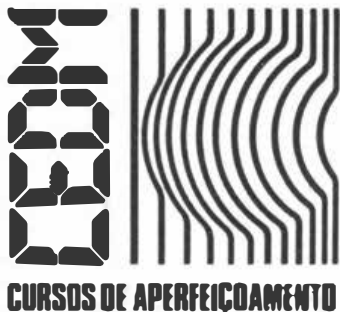


FIGURA 22

A figura 22 nos mostra um MOSFET de porta dupla com diodos zener protegendo-o.



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 · CEP 86100 · LONDRINA · PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-12

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) O transistor unijunção (UJT) possui:
 - a) uma única junção do tipo "P-N";
 - b) duas junções do tipo "P-N";
 - c) três junções do tipo "P-N";
 - d) N.R.A.
- 2) Em um UJT, a região central possui material tipo "P":
 - a) levemente dopado;
 - b) altamente dopado;
 - c) medianamente dopado;
 - d) N.R.A.
- 3) Com relação à figura 3, a função do resistor R é:
 - a) limitar a corrente que flui pelo emissor (E);
 - b) limitar a corrente da base 1 (B1);
 - c) limitar a corrente da base 2 (B2);
 - d) os itens a, b e c estão corretos.
- 4) A relação intrínseca de equilíbrio (η) de um UJT pode ser calculada através da expressão:
 - a) $\eta = V_{bb}/V_{b1}$;
 - b) $\eta = V_s/V_{bb}$;
 - c) $\eta = V_{b1}/V_{bb}$;
 - d) $\eta = V_{bb}/V_s$.

- 5) O fato do UJT possuir uma região de resistência negativa, habilita-o em aplicações do tipo:
- a) os itens a e b são falsos;
 - b) geração de sinais não cíclicos;
 - c) geração de sinais cíclicos;
 - d) N.R.A.
- 6) O UJT programável (PUT) é construído a partir de:
- a) duas camadas semicondutoras;
 - b) quatro camadas semicondutoras;
 - c) três camadas semicondutoras;
 - d) N.R.A.
- 7) Os JFET e MOSFET (transistores de efeito de campo), possuem como principal característica:
- a) altíssima impedância de entrada;
 - b) uma única junção "P-N";
 - c) ganho de corrente igual a zero;
 - d) os itens a e b estão corretos.
- 8) Os transistores de efeito de campo normalmente apresentam três terminais, a saber:
- a) catodo, anodo e fonte;
 - b) dreno, fonte e porta (gate);
 - c) porta, anodo e dreno;
 - d) N.R.A.
- 9) O JFET de canal "N" possui:
- a) canal tipo "P" e gate tipo "N";
 - b) canal tipo "P" e dreno tipo "N";
 - c) canal tipo "N" e gate tipo "P";
 - d) as alternativas a e b estão corretas.
- 10) O MOSFET de crescimento caracteriza-se pela:
- a) elevada resistência de entrada;
 - b) elevada corrente de entrada;
 - c) baixa resistência de entrada;
 - d) os itens a e c estão corretos.

LIÇÃO E-13

DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES V

INTRODUÇÃO

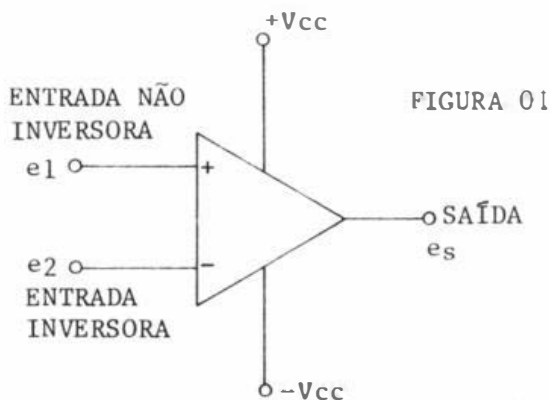
Finalizando a série sobre dispositivos semicondutores, apresentaremos, nesta lição, algumas características descritivas dos amplificadores operacionais, estudadas em um amplificador operacional hipoteticamente ideal. Em seguida, apresentaremos um breve estudo sobre os circuitos integrados, bem como sobre as principais técnicas utilizadas na fabricação dos mesmos.

AMPLIFICADOR OPERACIONAL (A.O.)

Apesar de hoje em dia os computadores eletrônicos digitais possuírem uma grande influência sobre as atividades do homem em sistemas de controles industriais, os métodos analógicos ainda levam grande vantagem. Vantagens estas relacionadas ao fato de a maioria das aplicações industriais não exigirem resultados de alta precisão numérica, porém requerem uma reprodução fiel das variáveis em tempo, o que pode ser obtido através de um sistema analógico, uma vez que a resposta de um

sistema analógico, bem projetado pode ser considerada instantânea.

Hoje, a maioria dos métodos analógicos possuem suas bases fundamentais, ligadas ao amplificador operacional, que na da mais é que um amplificador de corrente contínua de grande estabilidade, alto ganho, com características de frequência controláveis, apresentando geralmente entradas diferenciais. A figura 1 nos mostra a representação simbólica de um amplificador operacional.



O nome amplificador operacional deve-se ao fato do dispositivo ser empregado para executar diversas operações matemáticas, como adição, multiplicação, integração, diferenciação, inversão, e uma série de outras funções.

Com relação ao símbolo do amplificador operacional, (figura 1), o triângulo indica o sentido do fluxo de sinal, ou seja, indica o lado em que se verifica a amplificação.

Independentemente de diferenças quanto à aplicação do amplificador operacional nos mais variados circuitos, esses sempre apresentaram algumas características descritivas em comum. Assim, se considerarmos o amplificador operacional sem levarmos em consideração os circuitos com os quais ele poderá estar conectado, observaremos as seguintes características:

- . Ganho infinito - tanto mais efetivo é o amplificador quanto mais elevado ganho tiver.
- . Impedância de entrada infinita - isto quer dizer que a fonte de sinal não é afetada pelo amplificador e não existe, portanto, fluxo de corrente nos terminais de entrada.
- . Impedância de saída nula - isto significa que o amplificador não é afetado pela carga e pode fornecer qualquer valor de corrente que seja necessária, podendo funcionar como uma fonte de impedância nula para próximo estágio amplificador (se for o caso).
- . Resposta Instantânea - a largura de faixa é considerada infinita para respostas de frequência.
- . Quando o sinal de entrada (e_2-e_1) for nulo, a saída - também será nula, isto, se considerarmos o amplificador operacional como sendo ideal.

O amplificador operacional pode ser construído com componentes discretos, porém é mais comum encontrá-lo sob a forma de circuito integrado (CI), construído de modo a ser utilizado em vários tipos de aplicações.

Sua capacidade de amplificação (ganho) pode ser controlada pelo uso de componentes externos, sendo que este amplificador possui normalmente características próprias que vão possibilitar, de vários modos, o ajustamento de sua operação.

Nota-se, pelo circuito da figura 1, que o amplificador operacional possui duas entradas e uma saída. Uma das entradas é conhecida como entrada não inversora (+), ou seja, os sinais aplicados nessa entrada não são invertidos quando aparecem na saída. A outra entrada é referida como entrada inversora (-), ocorrendo a inversão do sinal de entrada na saída, ou seja, a polaridade do sinal de saída é sempre oposta à entrada. Teoricamente, quando o sinal de entrada for nulo (igual a zero), o sinal de saída também deverá ser nulo, porém isto não ocorre, pois as tolerâncias dos componentes tornam impossível construir um circuito balanceado. Este balanceamento é então conseguido, usando um potenciômetro, tendo os seus terminais opostos, conectados aos terminais de OFF SET NULL e o terminal central conectado ao terminal terra do circuito.

Normalmente, o ganho de tensão está entre 15.000 e 20.000 vezes o sinal de entrada. A resposta em frequência torna-se prejudicada em função do aumento da frequência, ou seja, quanto maior for a frequência, menor deverá ser o ganho do amplificador (veja figura 2).

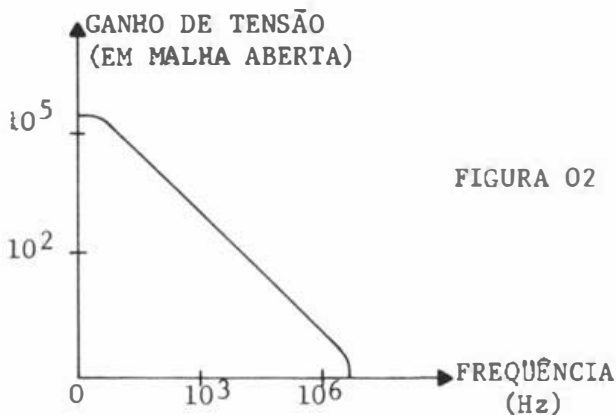


FIGURA 02

Utilizando-se das propriedades do amplificador operacional, podemos associá-lo a circuitos de entrada (impedâncias Z_1 e Z_2) e pelo circuito de realimentação ou "feedback" (impedância Z_f), conforme nos mostra a figura 3.

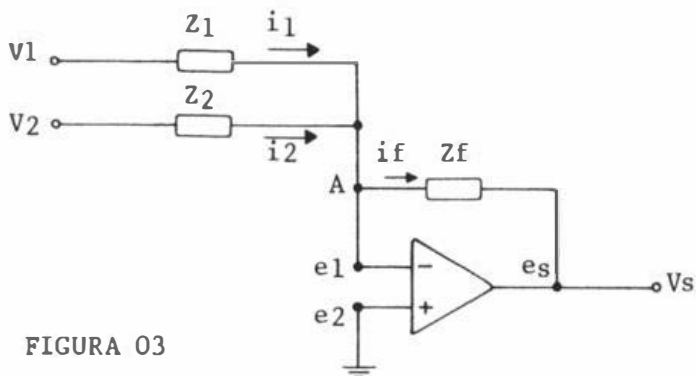


FIGURA 03

Para o nó A (veja figura 3), temos:

$$i_1 + i_2 + i_f = 0$$

ou

$$(V_1 - e_1) / Z_1 + (V_2 - e_2) / Z_2 = (e_1 - e_s) / Z_f$$

Se considerarmos o amplificador como sendo ideal, a tensão e_1 poderá ser considerada nula, tendo em vista que o ganho e a largura de faixa do amplificador são infinitos. Assim sendo, podemos escrever:

$$V_1 / Z_1 + V_2 / Z_2 = - V_0 / Z_f$$

ou

$$-V_s = (Z_f / Z_1) \cdot V_1 + (Z_f / Z_2) \cdot V_2 \text{ (expressão I)}$$

Com base no circuito da figura 3 podemos escrever que:

$$i_1 = V_1 / Z_1 \text{ (expressão II)}$$

$$i_2 = V_2 / Z_2 \text{ (expressão III)}$$

$$i_f = V_0 / Z_f \text{ (expressão IV)}$$

Tendo como base as expressões I, II, III e IV, poderemos determinar as operações fundamentais que o amplificador operacional pode efetuar. A seguir, enumeramos apenas as mais importantes:

1) Inversor de Ganho Unitário - considerando-se o circuito da figura 4, teremos:

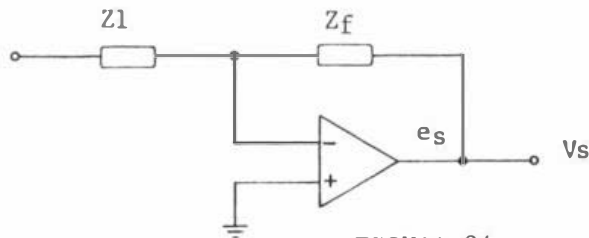


FIGURA 04

Se considerarmos o circuito (figura 4) como sendo puramente resistivo, podemos substituir Z_1 e Z_f por R_1 e R_f respectivamente e teremos:

$$V_s = - V_1 \cdot R_f/R_1$$

Se fizermos $R_f = R_1$, teremos um circuito inversor com ganho unitário, ou seja, igual a -1. Logo, podemos escrever que:

$$V_s = -V_1$$

Porém, se $R_f \neq R_1$, teremos um amplificador inversor (com ganho diferente de 1), ou seja:

$$V_s = - V_1 \cdot R_f/R_1$$

Obs.: A relação R_f/R_1 nos fornece o ganho do amplificador.

2) Amplificador "Não Inversor" - para obtermos tal função, basta ligarmos o amplificador operacional conforme nos mostra a figura 5. Considerando-se o circuito como sendo puramente resistivo, podemos então substituir a impedância Z_f pela resistência R_f e a impedância Z_1 pela resistência R_1 . Com base na expressão I, podemos escrever:

$$V_s = V_1 \cdot (R_1 + R_f/R_1)$$

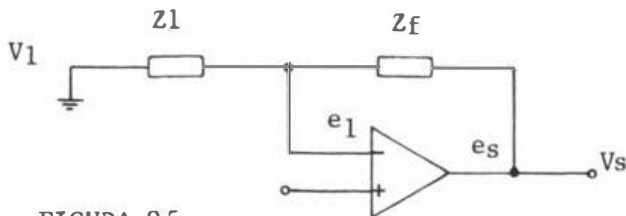


FIGURA 05

Se fizermos $R_1 \neq R_f$, teremos um ganho diferente de 2. Porém se $R_1 = R_f$ teremos um ganho igual a 2, ou seja, $V_s = 2.V_1$.

3) Circuito Seguidor ou Abaixador de Impedância - trata-se de um circuito de ganho unitário, onde o sinal de saída é injetado (realimentação) na entrada, sem que haja atenuação (veja figura 6).

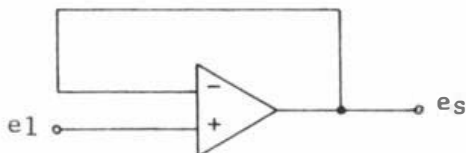


FIGURA 06

Devido ao fato do circuito não ser inversor e de possuir uma impedância infinita na entrada e uma impedância nula na saída, é válida a relação:

$$e_s = e_1$$

4) Circuito Somador Inversor - trata-se de um circuito capaz de somar as tensões de entrada e, em seguida, amplificar o resultado desta soma. A figura 7 nos mostra um amplificador operacional conectado de modo a fornecer na saída um sinal equivalente à soma dos sinais de entrada.

Considerando-se as impedâncias $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n, Z_f$ como sendo impedâncias puramente resistivas e, aplicando-se a 1ª. Lei de Kirchhoff ao nó A do circuito (veja figura 7), teremos:

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

Ou

$$i = V_1/R_1 + V_2/R_2 + \dots + V_n/R_n \quad (\text{expressão V})$$

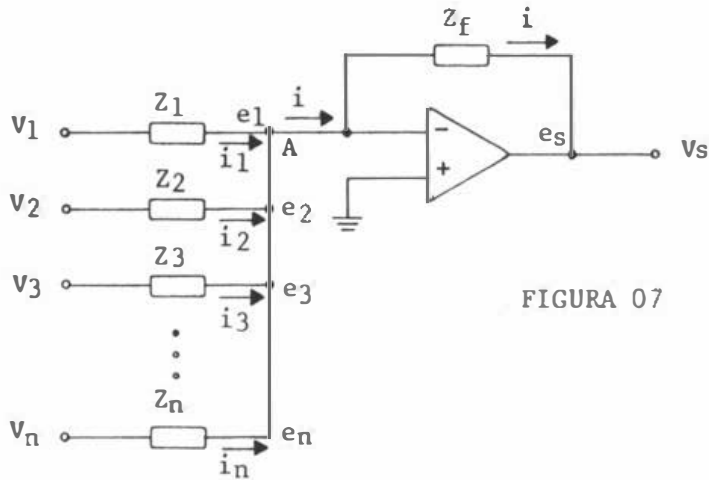


FIGURA 07

Para o caso particular $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n$, podemos reescrever a expressão V da seguinte forma:

$$i = 1/R (V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)$$

Como $V_s = R_f \cdot i$, teremos:

$$-V_s = R_f/R \cdot (V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n) \text{ (expressão VI)}$$

Como podemos observar pela expressão VI, a saída (V_s) é proporcional à soma das tensões de entrada ($V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$). O sinal negativo (-) em V_s indica que o sinal de saída está invertido.

5) Circuito Subtrator - A figura 8 nos mostra um amplificador operacional e alguns resistores conectados entre si de maneira a constituírem um circuito subtrator.

Se todas as resistências forem idênticas, o circuito da figura 8 irá fornecer uma saída que é igual à diferença entre os sinais de entrada V_1 e V_2 , ou seja:

$$V_s = V_2 - V_1$$

Porém, se os resistores não forem iguais, o sinal de saída será:

$$V_s = V_2 \cdot R_s / R_2 - V_1 \cdot R_f / R_1$$

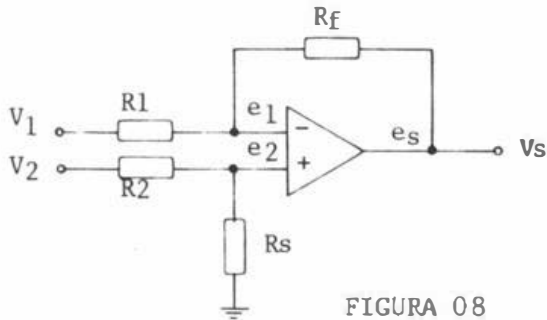


FIGURA 08

6) Circuito Integrador - a figura 9 mostra um circuito - integrador, onde a saída V_s corresponde ao integral matemático da tensão V_1 . Este circuito é de fundamental importância - na solução de equações diferenciais e na simulação de sistemas dinâmicos.

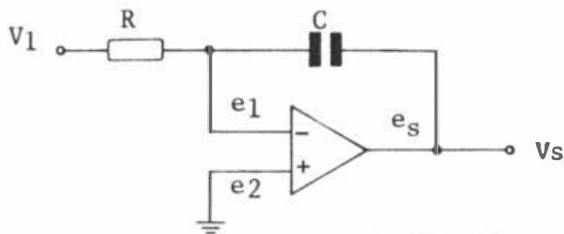


FIGURA 09

Considerando-se que a corrente no terminal de entrada (e_1) seja nula, toda a corrente que circula através do resistor (R) do circuito de entrada deve circular através do circuito capacitivo de realimentação. Com base neste fato e, sem adentrarmos em cálculos matemáticos mais complexos, podemos escrever que:

$$-C.(dV_s/dt) = V_1/R$$

Daí, vem:

$$V_s = -(1/Rc) \int_0^t V_1(t).dt.$$

O que nos diz que a saída V_s é proporcional ao integral de entrada da tensão V_1 . Nestas condições, podemos dizer que se a tensão V_1 for um sinal senoidal, a tensão V_s também será um sinal senoidal. Porém, se a tensão V_1 for fixa(constante), a tensão V_s será um sinal inclinado (ascendente ou descendente) e com uma inclinação constante, enquanto a tensão V_1 não mudar de valor. Assim, se tivermos uma tensão V_1 , do tipo onda quadrada, aplicada na entrada do circuito, a tensão de saída V_s será uma onda de picos.

Para um circuito integrador de N entradas (figura 10), a tensão de saída poderá ser calculada pela seguinte expressão matemática:

$$V_s = -1/Rc \int_0^t (V_1+V_2+V_3+... + V_n) dt$$

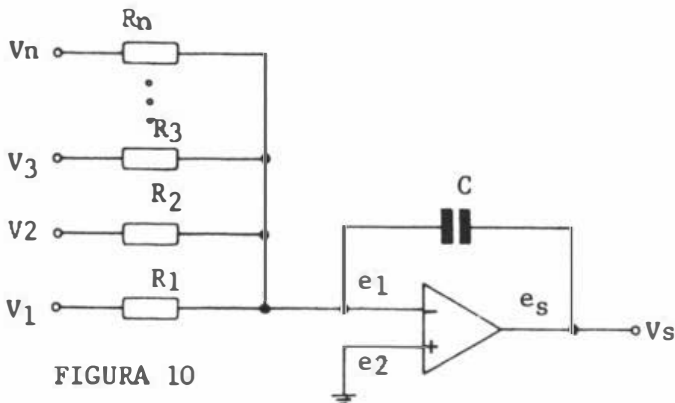
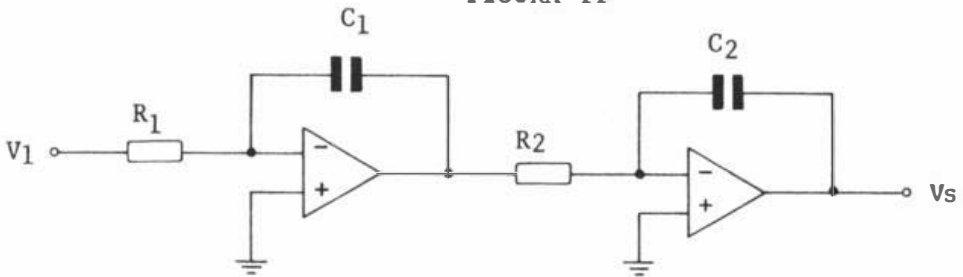


FIGURA 10

No caso de desejarmos realizar uma dupla integração, podemos lançar mão do circuito apresentado na figura 11.

FIGURA 11



Com relação ao circuito da figura 11, se $R_1 = R_2 = R$ e $C_1 = C_2 = C$, poderemos então calcular a tensão de saída V_s através da expressão:

$$V_s = -(1/Rc)^2 \cdot \int_0^t \cdot \int_0^t V_1(t) \cdot dt \cdot dt$$

7) Circuito Diferenciador - este tipo de circuito é capaz de executar justamente o contrário do que faz um circuito integrador. Para tanto, basta utilizarmos um circuito capacitivo na entrada ao invés de um circuito resistivo como vínhamos fazendo. A figura 12 nos mostra o esquema básico de um circuito diferenciador.

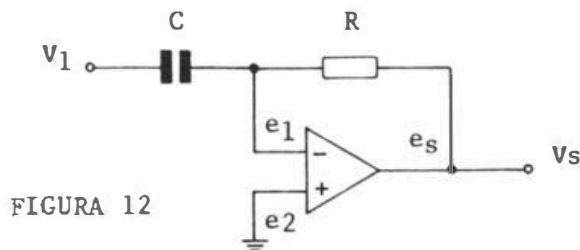


FIGURA 12

Para este circuito a tensão de saída V_s é proporcional à derivada da tensão de entrada em relação ao tempo (dV_I/dt). No circuito da figura 12, a tensão de saída V_s poderá ser calculada através da expressão:

$$V_s = - R_c \cdot dV_I/dt$$

8) Comparadores - os comparadores de tensão que utilizam amplificadores operacionais funcionam da seguinte forma: aplica-se uma tensão de referência em uma das entradas e a tensão a ser comparada é aplicada à outra entrada. Dessa forma, podemos construir comparadores de dois modos, conforme mostra a figura 13.

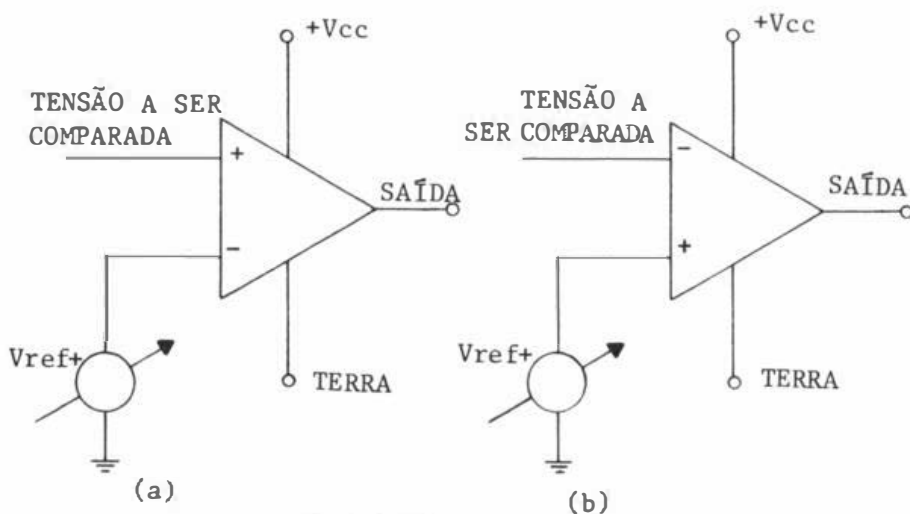


FIGURA 13

Assim a tensão de saída do circuito da figura 13A será identificada na representação mostrada na figura 14A e a tensão de saída do circuito da figura 13B será idêntica à representação mostrada na figura 14B.

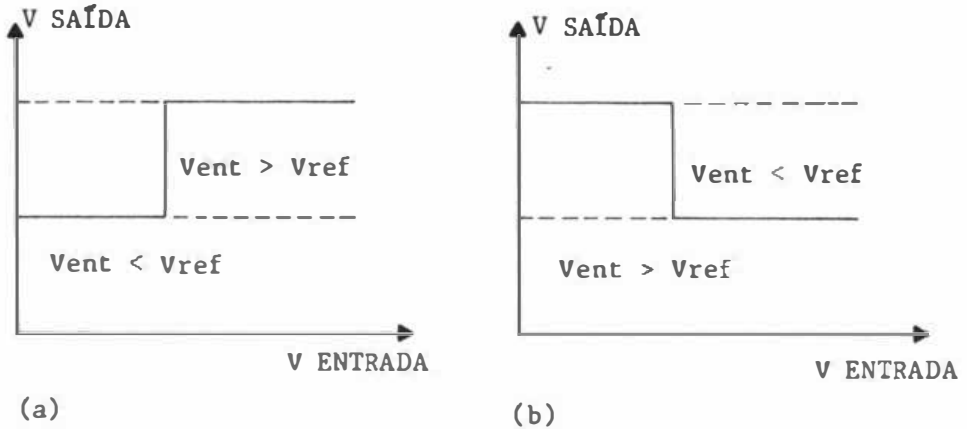


FIGURA 14

Os amplificadores operacionais se prestam ainda, para uma série de outras aplicações. Devido à grande versatilidade desses dispositivos e também devido às operações matemáticas que podem executar. Os amplificadores operacionais constituem-se no elemento básico dos computadores analógicos. Porém, hoje em dia, seu campo de aplicação generalizou-se de tal forma que, além da computação analógica, eles são utilizados em fontes estabilizadas, geradores de funções, sistemas de servo-mecanismos, conversores analógico-digitais, digital-analógicos, etc...

Como o estudo do amplificador operacional não se restringe apenas aos assuntos que abordamos nesta lição, comprometemo-nos, à medida que for necessário, fornecer informações adicionais sobre o mesmo, uma vez que um estudo ou uma análise mais aprofundada deste assunto requereria, por parte dos senhores alunos, um profundo conhecimento de cálculo diferencial e integral, o qual não desenvolveremos, uma vez que foge um pouco das diretrizes básicas do curso.

CIRCUITOS INTEGRADOS (CIs)

O advento dos "Circuitos Integrados" provocou um avanço fantástico da indústria eletrônica equivalente ao dos transistores, em 1948. Historicamente o CI. surgiu nos laborat

rios da Texas Instruments, em 1958, quando o pesquisador Jack Kilby conseguiu uma estrutura de transistores e resistores mediante difusão em uma fina placa de silício. Em 1960 descobriu-se a técnica planar e, em 1962, começaram a ser comercializados os primeiros CIs planares com estrutura RTL em uma só placa de silício com uma área de aproximadamente 1mm^2 . Hoje, temos grandes indústrias investindo recursos econômicos, técnicos e humanos para o desenvolvimento e ampliação do campo de aplicações dos CIs.

Uma das áreas que mais se beneficiou com o advento dos CIs foi a digital, destacando-se os computadores eletrônicos, os quais tiveram seu desenvolvimento garantido, graças às grandes vantagens apresentadas por esses minúsculos componentes.

A tecnologia de circuitos integrados apresenta as seguintes vantagens, quando comparada com componentes discretos interconectados por técnicas convencionais:

- a) baixo custo de produção;
- b) tamanho e peso reduzidos;
- c) alta confiabilidade (longa vida e segurança de funcionamento);
- d) melhor desempenho;
- e) obtenção de dois ou mais componentes com características bem próximas;
- f) ótimo acoplamento térmico.

De um modo geral os CIs podem ser classificados em duas categorias: CIs digitais e CIs lineares, os quais estudaremos logo mais adiante.

A tecnologia de construção de circuitos integrados permite realizar todo um circuito, contendo dezenas, centenas e até milhares de componentes, numa pequena área de material semicondutor (geralmente silício). A fabricação dos CIs envolve estudos do material a ser utilizado, bem como processos e princípios de projeto, os quais constituem a chamada "tecnologia dos semicondutores". Sob o ponto de vista da tecnologia empregada na fabricação dos CIs, estes poderão ser classificados em:

- a) Monolíticos;
- b) película fina (ou filme fino);
- c) película espessa (ou filme grosso);
- d) Híbridos.

Cada tipo possui uma série de vantagens sobre os demais, mas também apresenta algumas limitações. Desenvolveremos o nosso estudo, procurando, através de uma breve análise sobre os aspectos construtivos desses CIs, mostrar as principais características de cada um deles.

CI. MONOLÍTICO

O nome monolítico deriva-se da junção de dois vocábulos gregos: monos (único) e lithos (pedra) e significa uma só pedra. Na realidade, esse significado, uma só pedra, refere-se a um só cristal, ou seja, todos os elementos constituintes do CI, tanto os ativos (diodos e transistores) como os passivos (resistores, capacitores e interconexões) são formados ao mesmo tempo sobre uma pequena pastilha de silício de modo a constituírem uma estrutura indivisível.

Quanto à fabricação, os CIs monolíticos podem ser bipolares ou MOS. Na técnica MOS (Metal-óxido-semicondutor) num transistor de canal N, a condução de corrente elétrica é devida aos elétrons, enquanto que para um transistor de canal P a condução de corrente se deve ao movimento de lacunas (tal como nos FETs discretos). Já nos bipolares temos a condução de correntes pelos dois tipos de portadores de corrente: os elétrons e as lacunas.

A técnica básica de fabricação de um CI monolítico é praticamente a mesma utilizada para a fabricação dos transistores, ou seja, a técnica (ou processo) de difusão planar. Na tecnologia planar, atualmente dispomos de três processos convencionais, utilizados na fabricação dos CIs: processo planar/epitaxial; processo de tripla difusão e processo de isolamento dielétrico. Dentre esses processos, o mais utilizado é o processo planar/epitaxial, o qual passaremos a estudar logo em seguida. Porém, antes de descrevermos o processo global de fabricação do CI, tendo em vista, ser este muito complexo, apresentaremos uma série de informações, bem como alguns processos intermediários, utilizados na fabricação dos mesmos.

- Substrato: trata-se de um pedaço de material semicondutor (geralmente de silício) cuja finalidade é de servir como base mecânica dos elementos do CI, servindo também como um grande canal de escoamento de corrente para a maioria dos elementos do CI.

- Material monocristalino: trata-se de uma porção de material sólido no qual a rede cristalina é geometricamente definida, seguindo um determinado padrão.

- Crescimento epitaxial: trata-se de um processo, pelo qual se produz uma camada muito fina de silício monocristalino, através de uma reação de redução do hidrogênio, a partir do tetracloreto de silício, os quais reagem também com o substrato de silício. Para tanto o substrato de silício é aquecido até uma temperatura de 1.200°C e o vapor de tetracloreto de silício se mistura com o hidrogênio. Essa mistura gás/vapor é então orientada, de modo a passar sobre o substrato. Ao separarem-se do tetracloreto de silício os átomos de silício se depositam sobre a superfície do substrato, formando, então, a camada de silício monocristalino. A reação de redução se encontra sintetizada na expressão a seguir: $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 \xrightarrow{1200^{\circ}\text{C}} \text{Si} + 4\text{HCl}$.

Utilizando-se desse processo, podemos obter camadas de silício de até $10\mu\text{m}$ ($10 \times 10^{-6}\text{m}$). A vantagem desse processo reside no fato de podermos controlar a condutividade da camada de silício monocristalino, bastando para tanto adicionarmos - uma certa quantidade de impurezas juntamente com o vapor de tetracloreto de silício.

Em se tratando de circuitos integrados, normalmente o substrato é de silício do tipo "P" e a camada epitaxial também é de silício, porém do tipo "N".

A figura 15 nos mostra alguns aspectos da camada epitaxial com distribuição controlada de impurezas por meio de atmosfera ativa.

- Difusão de estado sólido: é um processo, mediante o qual, podemos introduzir impurezas atômicas em uma determinada região superficial de uma placa de silício (bolacha do inglês wafer). Na verdade, trata-se de um processo de dopagem - da placa de silício com material do tipo "N" ou "P", o que possibilita a formação de regiões com propriedades elétricas

diferentes. Tais regiões é que irão constituir-se nos elementos ou dispositivos eletrônicos do circuito integrado.

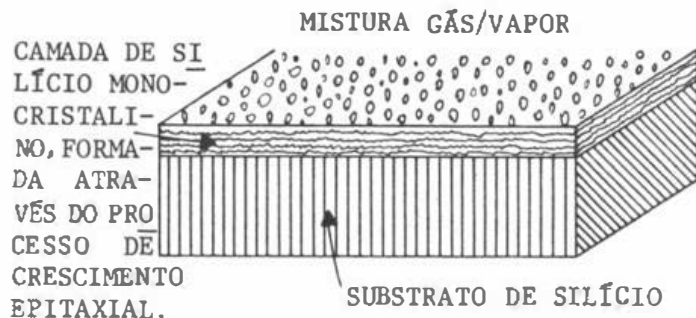


FIGURA 15

O processo de difusão consiste em aquecermos a placa de silício em uma atmosfera de vapor da própria impureza com a qual se pretende dopar a placa de silício. Assim que a placa de silício se encontrar a uma temperatura entre 1000°C e 1200°C e, estando ela em contato com a atmosfera de vapor, que contém a impureza, alguns dos átomos dessa atmosfera entrarão em contacto com a superfície da placa, difundindo-se na mesma de modo a formarem um único material. Esse processo é muito lento e a quantidade de impureza que pode penetrar na placa de silício, dependerá da constante de difusão da impureza e do tempo em que a placa de silício ficar exposta à ação da atmosfera de vapor. A figura 16 nos mostra, de maneira muito simplificada, uma placa de silício que passou pelo processo de difusão de impurezas.

A principal diferença entre os processos de crescimento epitaxial e de difusão está no fato deste último iniciar-se de fora para dentro da placa de silício, enquanto que o primeiro consiste na incorporação dos átomos à rede cristalina do substrato (placa) de silício.

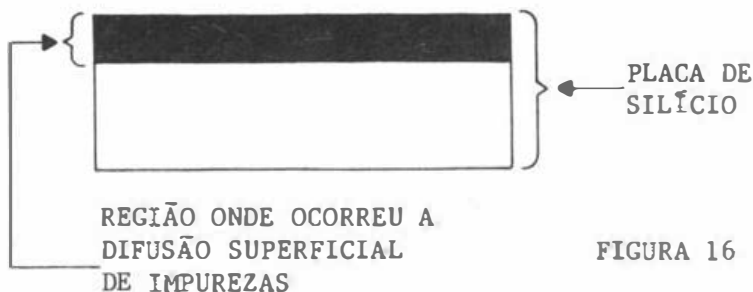


FIGURA 16

- Oxidação: trata-se de um processo através do qual podemos oxidar a superfície de uma placa de silício, bastando para tanto submeter a placa de silício a uma determinada temperatura na presença de oxigênio. Muitas vezes, usa-se o oxigênio juntamente com vapor de água para acelerar o processo de oxidação. Dessa forma, consegue-se uma camada de dióxido de silício (SiO_2) com uma espessura em torno de $2\mu\text{m}$ (ou $12 \times 10^{-6}\text{m}$).

- Difusão seletiva: sabe-se que a difusão de impurezas (átomos) sobre a camada de óxido de silício é mais lenta que no próprio silício. Podemos então utilizar esse fenômeno para obtermos uma difusão seletiva, ou seja, para difundir impurezas em determinadas regiões da placa de silício. Esse processo inicia-se com a formação de uma camada de óxido de silício na superfície da placa, eliminando-se, em seguida, o óxido de silício das regiões onde se pretende introduzir as impurezas.

Uma vez retirado o óxido, introduz-se a placa de silício em um forno de difusão, onde é então colocada em contato com uma atmosfera de vapor que contém a impureza em suspensão. Os átomos da impureza, contidos nessa atmosfera de vapor, irão difundir-se nas regiões, onde o óxido foi eliminado. A figura 17 nos mostra um exemplo de difusão seletiva.

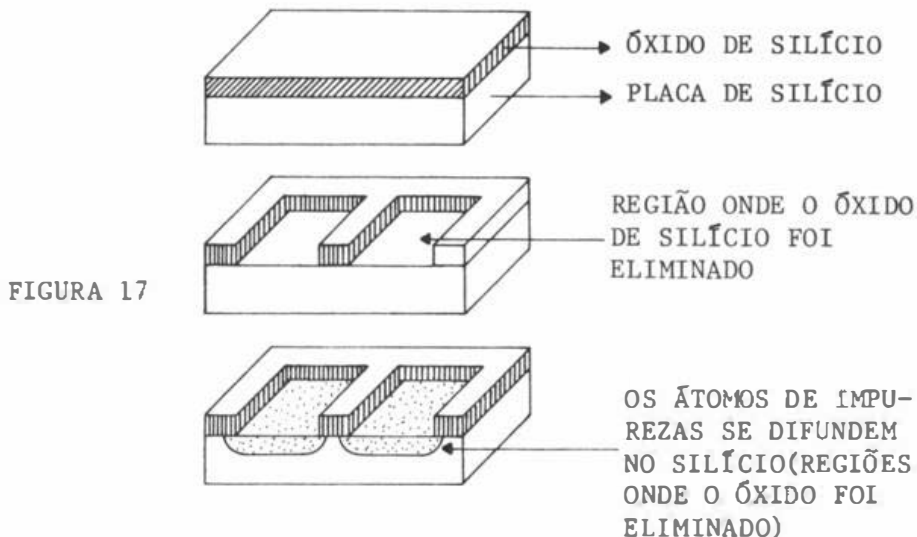


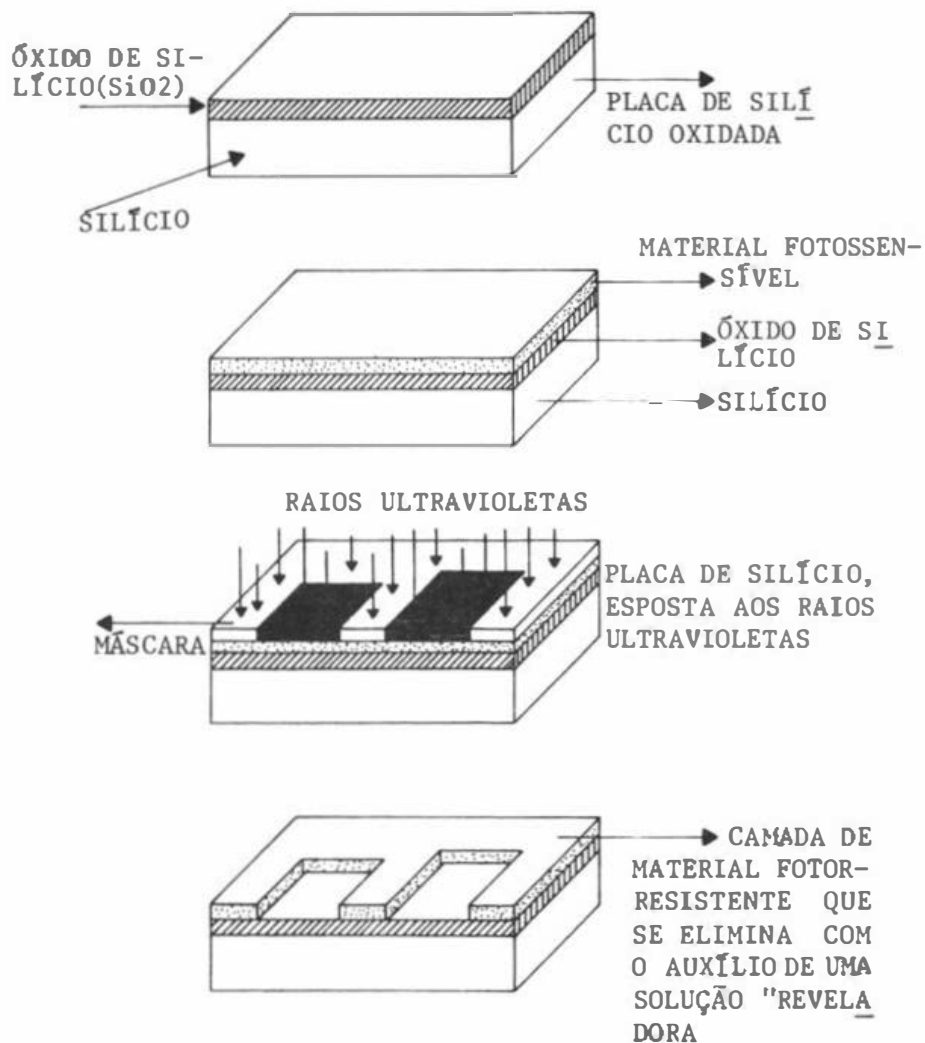
FIGURA 17

- Eliminação do óxido: para eliminarmos o óxido de silício de determinadas regiões, utiliza-se um processo chamado fotorresistente, semelhante ao processo fotolitográfico, utilizado na confecção de chapas de circuitos impressos. O processo inicia-se por recobrir o óxido de silício com um material fotosensível, sobre o qual é colocada uma máscara, contendo o desenho em negativo das regiões onde se pretende retirar o óxido de silício (região opaca da máscara). Assim, onde se deseja retirar material óxido, a máscara será opaca, pois todo o conjunto será submetido à luz ultravioleta, a qual irá fixar o material exposto, ou seja, o material que está sob as regiões transparentes (ou translúcidas) da máscara. Em seguida, todo o conjunto é mergulhado em uma solução de ácido fluo-rídrico, o qual irá atacar o óxido exposto até deixar o silício a descoberto, ou seja, até retirar totalmente a camada de óxido. Porém, o restante da camada de óxido (que foi fixada a través da incidência de luz ultravioleta sobre o material fo-torresistente) permanecerá inalterada, pois o material fotorresistente é insolúvel. Por último, elimina-se todo o restante do material fotorresistente mediante o uso de um revela-dor, ficando então o bloco de silício com áreas protegidas pe-lo óxido e outras disponíveis para a difusão de material tipo "P" ou "N".

A figura 18 nos mostra, em uma seqüência, como se proces-sa a eliminação seletiva do óxido de silício por intermédio de um processo fotossensível.

Obs.: As regiões desprovidas de óxido de silício recebem o nome de "janela".

FIGURA 18



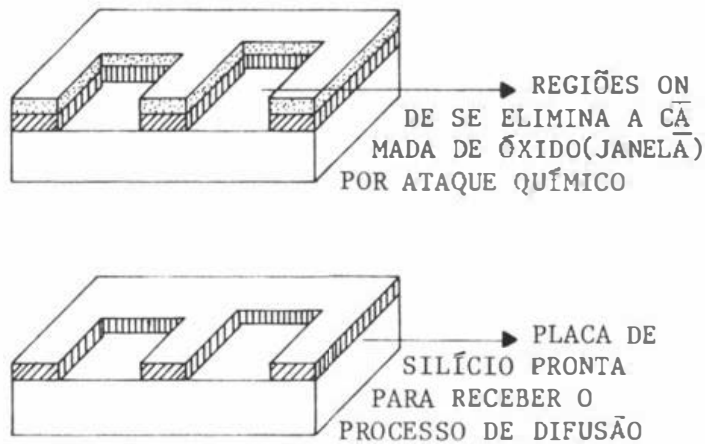


FIGURA 18

- Máscaras: normalmente as máscaras são feitas de um material plástico denominado "rubilite". Para a confecção de circuitos integrados, geralmente, utiliza-se de três (3) a sete (7) máscaras diferentes, dependendo, evidentemente, da tecnologia que está sendo empregada.

A máscara de rubilite é fabricada com uma tolerância de $50\mu\text{m}$ ($50 \times 10^{-6}\text{m}$) a $0,1\text{mm}$ de espessura. A figura 19 nos mostra um fluxograma contendo a sequência de fabricação de máscaras.

A máscara original (com área em torno de 1m^2), em rubilite, passa por um processo de redução de 10 a 30 vezes, dependendo do circuito. Obtemos, assim, uma máscara de auto-resolução (em uma pequena placa de vidro). Essa máscara será, então, colocada em uma moldura-padrão. Em seguida, a máscara passa por uma segunda redução e, logo após, através de um processo de foto-reprodução, é reproduzida várias vezes sobre uma

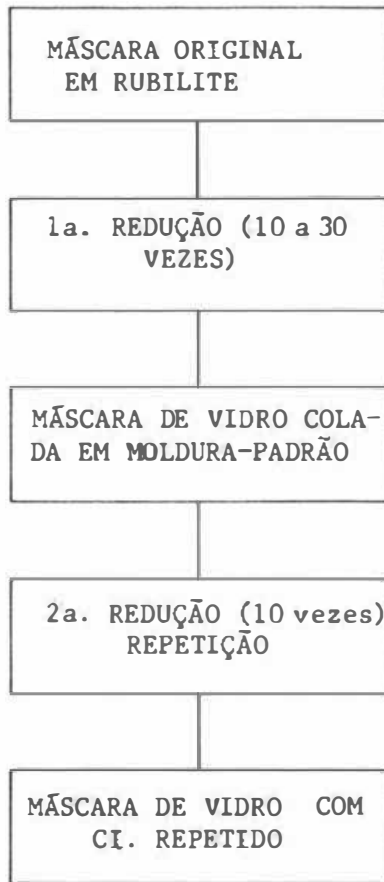


FIGURA 19

chapa fotossensível. Esta chapa fotossensível, será então colocada em contato íntimo com as pastilhas (placas) de silício recobertas de material fotossensível, resultando, no final, nas pastilhas (placas) fotogravadas.

- Isolamentos: nos circuitos integrados, os elementos, que compõem o circuito, são formados um ao lado do outro e muito próximos um do outro. Como o substrato, geralmente de silício, é um material condutor, torna-se necessário que cada um desses elementos que compõem o CI. estejam eletricamente isolados do resto da massa de silício, de tal modo que a resistência entre ambos seja elevadíssima. Dessa forma, consegue-se evitar um acoplamento elétrico, prejudicial entre os componentes.

Diferentes métodos têm sido postos em prática para se

conseguir o isolamento elétrico entre os diferentes componentes de um circuito integrado. Entre eles, destacam-se o método de isolamento por diodo e o método de isolamento por camadas de óxido ou por dielétrico.

O isolamento por diodo é o mais utilizado e consiste em estabelecermos uma junção PN em redor do componente, o qual, uma vez em funcionamento o dispositivo (CI), deverá apresentar uma polarização invertida, de modo que a resistência entre certo componente do circuito e o substrato de silício seja muito elevada (da ordem de dezenas de Megaohms). A figura 20 nos mostra uma sequência de figuras as quais ilustram as etapas básicas da formação do isolamento por junção PN.

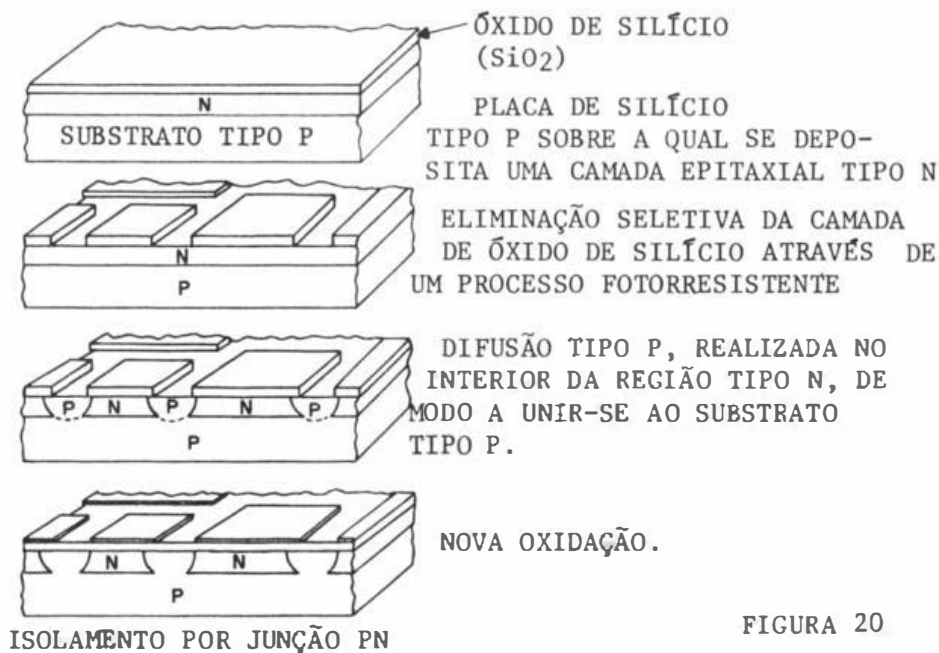


FIGURA 20

Note que a placa (ou pastilha) de silício é formada por um substrato do tipo "P", sobre o qual se deposita uma camada epitaxial do tipo "N", difundindo-se completamente regiões do tipo "P" no interior da camada do tipo "N", de modo que a região do tipo "P" que foi difundida, una-se com a região tipo "P" do substrato. Como resultado final, teremos todas as regiões do tipo "N" rodeadas por uma junção "PN". Quando o cir

cuito integrado definitivo entrar em funcionamento, o substrato deverá ser conectado a um potencial negativo para que cada uma das junções "PN" tenha uma polarização inversa.

A constante dielétrica do silício tipo P é 12, bastante alta; isso resultará em uma desvantagem para esse método, pois, infelizmente, isto resultará em uma capacitância parasita que poderá interferir no funcionamento do CI.

O método de isolamento por camadas de óxido ou por dielétrico, consiste na formação de uma camada de óxido de silício ao redor de cada elemento componente do circuito. Esse método é particularmente utilizado em casos especiais, quando o circuito integrado precisa trabalhar com altas frequências e também quando se necessita de dispositivos resistentes à radiação, posto que o óxido de silício não é afetado pela mesma. A capacitância parasita, nesse caso, é bem menor que a apresentada no método anterior, pois a constante dielétrica apresentada pelo óxido de silício é igual a 4, resultando em uma capacitância parasita três vezes menor.

- Formação dos transistores integrados: na figura 21A, apresentamos a estrutura de um transistor planar epitaxial discreto. Observe que o contato do coletor é feito na superfície inferior da estrutura. A resistência interna, em série com o contato do coletor, mantém-se dentro de um nível muito baixo, utilizando uma placa de silício com um substrato N^+ (alta concentração de átomos doadores) de baixa resistividade. Já na figura 21B, temos um transistor planar, construído com base nos circuitos integrados, monolíticos, utilizando as técnicas epitaxial e difusão. Nesse caso, o contato do coletor faz-se no topo da placa de silício, sendo que este se acha eletricamente separado do substrato por intermédio de dois diodos de isolamento reversamente polarizados. O fato do contato do coletor estar colocado no topo da estrutura, irá implicar em um aumento do percurso da corrente de coletor e, conseqüentemente, implicará em um aumento da resistência de coletor e da tensão de saturação entre coletor-emissor ($V_{ce\ sat.}$). Além disso, o transistor integrado apresenta uma capacitância parasita que fornecerá um caminho a mais para a corrente de fuga.

Os principais fatores que influenciam as características elétricas de um transistor são: tamanho e forma geométrica, níveis de dopagem, qualidade do silício empregado e tipo

de difusão (processo). Desses fatores, os que oferecem maior flexibilidade em termos de projeto são a forma geométrica e o tamanho. A principal vantagem dos transistores integrados em relação aos transistores discretos reside no fato dos primeiros apresentarem uma considerável melhoria no desempenho, uma vez que aqueles estão fisicamente próximos uns dos outros e suas características elétricas pouco variam de um transistor para outro.

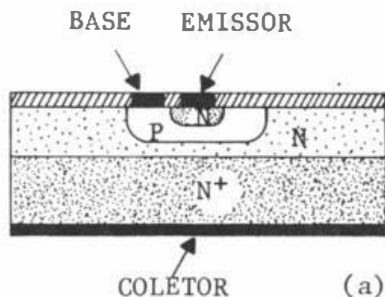
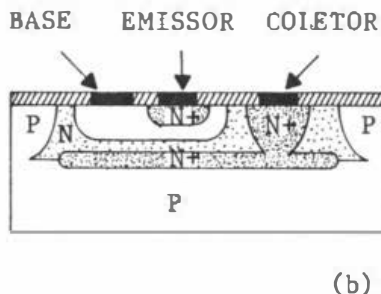


FIGURA 21



TRANSISTOR PLANAR DISCRETO

TRANSISTOR INTEGRADO

Devido ao fato das impurezas do tipo "N" apresentarem valores menores da constante de difusão D do que as impurezas do tipo "P" e, como a região de coletor fica sujeita ao aquecimento durante as difusões de base e emissor exigindo, portanto, o uso de impurezas com baixo coeficiente de difusão - como forma de evitar o deslocamento da junção coletora, é que a grande maioria dos transistores fabricados com a técnica de circuito integrado são do tipo "NPN". Um outro fator muito importante que também nos leva a utilizar as impurezas do tipo "N" para a formação das regiões do emissor e do coletor é que, geralmente, essas impurezas apresentam uma "solubilidade sólida" relativamente grande se comparada com as de algumas impurezas do tipo P, permitindo, assim, dopagens mais altas do emissor do tipo "N" (N^+).

- Transistor PNP Lateral: o transistor-padrão em circuito integrado é do tipo NPN, porém, em algumas aplicações, é necessário ter, no mesmo CI, transistor do tipo NPN e PNP. A técnica do "transistor lateral" nos permite formar transistores do tipo PNP e, ao mesmo tempo, transistores NPN. A figura

22 nos mostra a estrutura lateral de um transistor PNP. Durante a difusão da região do tipo P, para formar a região da base de uma estrutura NPN, se difundem duas regiões do tipo "P", uma ao lado da outra, formando-se, assim, o transistor lateral.

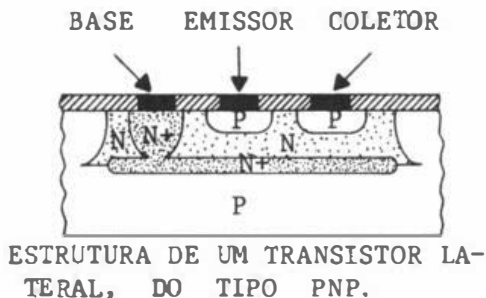


FIGURA 22

ESTRUTURA DE UM TRANSISTOR LATERAL, DO TIPO PNP.

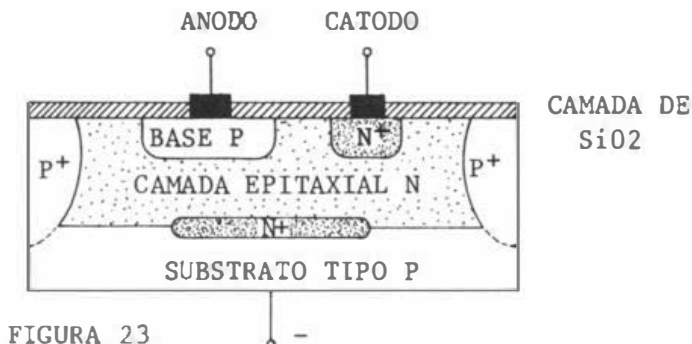
Nesse tipo de transistor, a corrente do coletor circula paralelamente em relação à superfície da estrutura, ou seja, lateralmente do emissor para o coletor. Esse dispositivo apresenta um ganho de corrente muito baixo (0,5 a 5) uma vez que a região de base entre o emissor e o coletor é muito grande ($\pm 25\mu\text{m}$).

- Transistor NPN com superganho: se diminuirmos a largura efetiva da região de base até atingir o ponto de "punch-through" (menor tensão em que ocorre a ruptura), através da difusão do emissor na região de base, conseguiremos um considerável aumento no ganho de corrente (algo em torno de 5000), porém a tensão de ruptura será muito pequena (em torno de 5 volts). Entretanto, se esse transistor, na montagem emissor-comum, for operado em série com um transistor integrado-padrão (NPN), na montagem base comum (ligação cascata), teremos um ganho super alto em correntes baixas e com tensões de ruptura bem maiores (em torno de 50 volts).

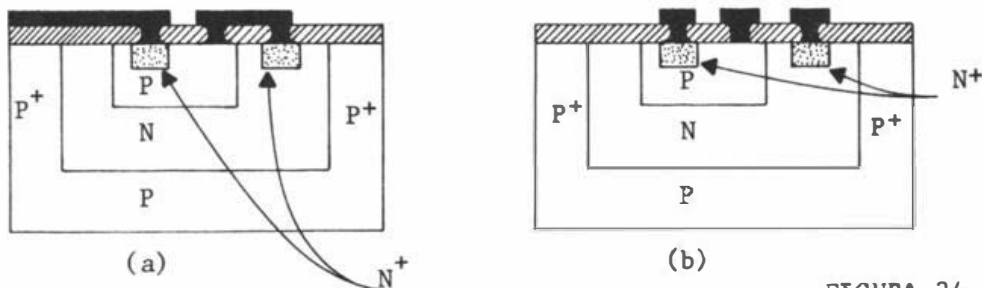
- Formação dos diodos integrados: os diodos nos circuitos integrados são feitos com estruturas semelhantes a dos transistores, ou seja, é simplesmente uma junção PN de um transistor NPN. Existem três maneiras diferentes de se obter

um diodo a partir de um transistor: utilizando o diodo emissor-base, com o coletor curto-circuitado com a base; utilizando o diodo emissor-base, com o coletor em aberto e utilizando o diodo coletor-base com o emissor em aberto.

O diodo coletor-base com emissor em aberto tem uso mais limitado, sendo adequado para a formação de conjuntos de diodos catodo comum (coletor "N" é o catodo) e também para a formação de conjuntos anodo comum (a base "P" é o anodo). A figura 23 nos mostra a estrutura de um diodo coletor-base.



Os dois primeiros tipos (emissor-base) são muito usados na fabricação de diodos, desde que a tensão de polarização inversa necessária ao circuito não ultrapasse o valor da tensão de ruptura entre a base e o emissor ($\approx 7,0$ volts). Recorrendo-se a um curto-circuito (primeiro caso) entre a base e o coletor, conseguimos evitar o funcionamento parasítico dos transistores NPN ou PNP. A figura 24A nos mostra a seção transversal de um diodo emissor-base com o coletor em curto com a base. A figura 24B nos mostra a seção transversal de um diodo emissor-base com o coletor em aberto.



Na figura 25 temos um conjunto de curvas características (corrente direta x tensão direta) referentes aos três tipos básicos de diodo: a) base-emissor (coletor curto-circuitado com a base); b) base-emissor (coletor aberto) e c) coletor-base (com emissor em aberto).

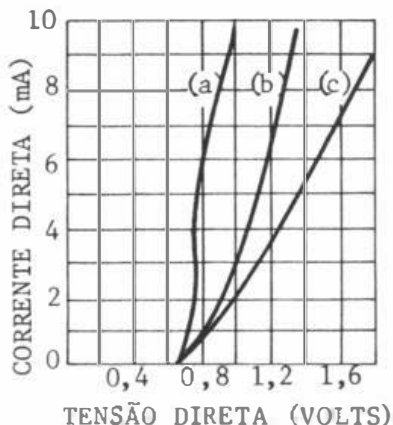


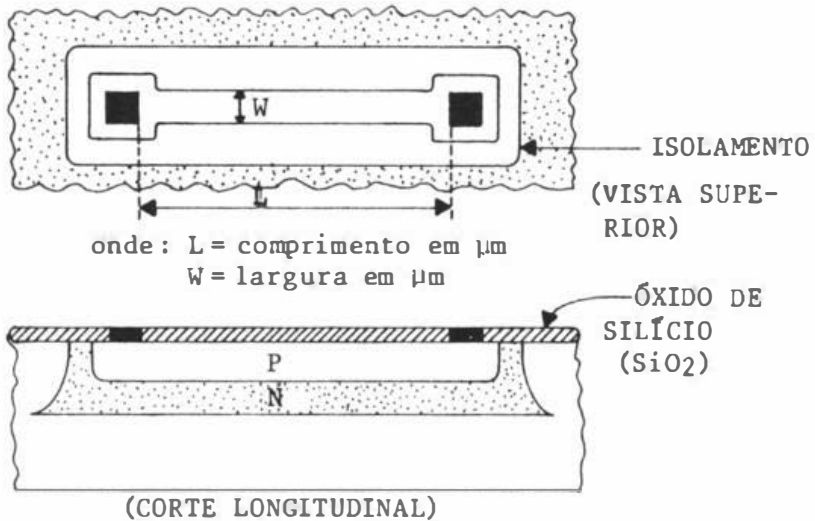
FIGURA 25

Observando a figura 25, podemos concluir que o diodo emissor-base com o coletor em curto com a base é o diodo que fornece a maior condução para uma dada tensão direta.

- Formação dos Resistores integrados: a técnica básica para a formação dos resistores integrados consiste na modificação da resistividade de uma região isolada da placa de silício, através da difusão de impurezas doadoras ou aceitadoras, de maneira que o valor do resistor passa a depender da profundidade da difusão, da concentração das impurezas, do material e da área do resistor. Porém as variáveis: concentração e profundidade estão atreladas ao processo de formação dos transistores uma vez que a difusão da base (ou a do emissor) é feita simultaneamente com a difusão do resistor.

Quanto à forma das resistências, estas consistem de uma linha muito fina e estreita, provida de contatos ôhmicos em ambas as extremidades, conforme nos mostra a figura 26.

FIGURA 26



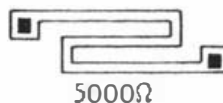
- ESQUEMA BÁSICO DE UMA RESISTÊNCIA DIFUNDIDA.

A faixa prática de valores obtidos para resistores de base difundida vai de 20Ω a $50\text{K}\Omega$, isso levando em consideração que a difusão da base do transistor proporciona uma resistividade da ordem de $100\Omega/\mu\text{m}^2$, sendo a largura típica de uma resistência em torno de $12\mu\text{m}$. Isto quer dizer que uma pequena linha resistente apresentará uma resistência de 100Ω para cada $12\mu\text{m}$ de comprimento(l), de modo que, para obtermos uma resistência de 1000Ω necessitaremos de uma linha com $120\mu\text{m}$ de comprimento(l).

Para obtermos valores mais altos de resistência, o comprimento (l) deverá aumentar proporcionalmente. Porém, para obtermos valores mais baixos de resistência, o comprimento(l) deverá diminuir, enquanto que a largura w deverá aumentar. A figura 27 nos mostra uma comparação entre as formas geométricas de uma resistência de 100Ω e uma de 5000Ω .



100 Ω

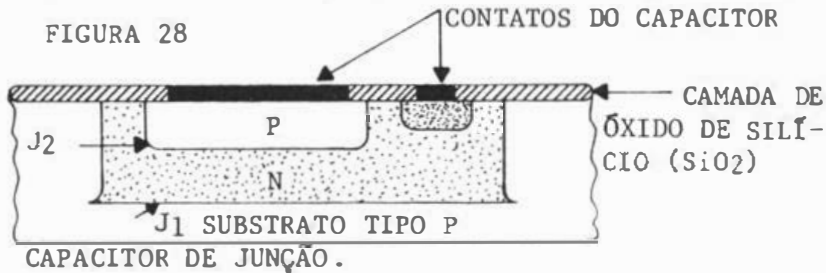


5000 Ω

ESCALA EM μm

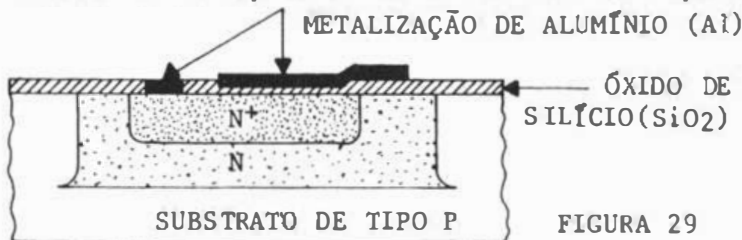
FIGURA 27

- Formação dos capacitores integrados: normalmente os capacitores em circuitos integrados são obtidos, utilizando-se a capacitância de uma junção "PN" polarizada reversamente ou através da técnica de filme fino. Os capacitores obtidos a partir da capacitância de uma junção "PN" são conhecidos como "capacitores de junção" (veja figura 28). O capacitor é formado pela junção J2 (reversamente polarizada) que separa a camada epitaxial do tipo N da região superior, difundida com impureza do tipo P, sendo que o valor da capacitância desse capacitor depende da área da junção e da concentração de impurezas.



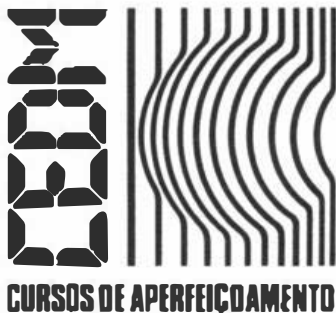
A junção J1 introduz uma capacitância parasita indesejável, a qual é minimizada ao levarmos o substrato tipo P a um potencial mais negativo.

Geralmente as capacitâncias são muito baixas, exigindo grandes áreas do CI, o que nos leva a usar componentes discretos ao trabalharmos com valores elevados de capacitância (valores superiores a 100 pF). Já os capacitores construídos com a técnica de filme fino ou capacitores MOS (Metal-óxido-semi-condutor) podem atingir valores de capacitância da ordem de algumas centenas de picofarads. A figura 29 nos mostra a estrutura básica de um capacitor de filme fino ou capacitor MOS.



A região N^+ e a camada metálica (Alumínio) constituem as placas do capacitor enquanto que uma camada de óxido de silício com espessura cuidadosamente controlada forma o dielétrico.

Na lição E-19, daremos continuidade ao estudo sobre circuitos integrados.



CURSO DE ELETROÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-13

OBSERVAÇÃO

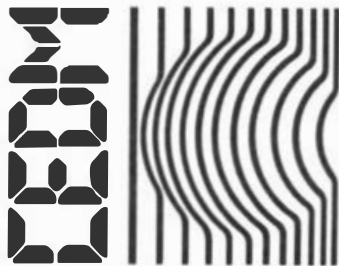
- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Uma das principais características de um amplificador operacional é:
 - a) alta impedância de entrada;
 - b) os itens a e d estão corretos;
 - c) alta impedância de saída;
 - d) impedância de saída nula.
- 2) Ao aplicarmos um sinal alternado na entrada (-) de um amplificador operacional, teremos na saída:

a) sinal não invertido;	c) sinal invertido;
b) sinal não amplificado;	d) N.R.A.
- 3) Se aplicarmos um sinal nulo em uma das entradas de um amplificador operacional, teoricamente, o sinal de saída será:

a) nulo;	c) um sinal contínuo;
b) diferente de zero;	d) N.R.A.
- 4) Para um amplificador operacional qualquer, quanto maior for a frequência:
 - a) maior será o ganho do amplificador;
 - b) menor será o ganho do amplificador;

- c) maior será o ganho de corrente;
 - d) os itens a e c estão corretos.
- 5) Com relação ao circuito da figura 4, a expressão que nos fornece o ganho do amplificador é:
- a) R_f/R_1 ; b) $-R_1/R_f$; c) R_1/R_f ; d) $-R_f/R_1$.
- 6) Devido à grande versatilidade apresentada pelo amplificador operacional, este veio a constituir-se em um elemento básico na formação dos:
- a) contadores;
 - b) computadores digitais;
 - c) computadores analógicos;
 - d) N.R.A.
- 7) Uma das vantagens apresentadas pelos circuitos integrados, quando comparados com os componentes discretos é:
- a) alto custo de produção;
 - b) baixa confiabilidade;
 - c) tamanho e peso reduzidos;
 - d) tamanho e peso relativamente grandes.
- 8) Quanto à fabricação, os CIs monolíticos podem ser:
- a) de película fina;
 - b) bipolares ou MOS;
 - c) híbridos;
 - d) de película espessa.
- 9) O valor de um resistor CI monolítico pode ser ajustado variando-se:
- a) a largura e a espessura;
 - b) a espessura e o comprimento;
 - c) o comprimento e a largura;
 - d) N.R.A.
- 10) O dielétrico de um capacitor CI monolítico é formado por:
- a) ácido fosfórico;
 - b) óxido de silício (SiO_2);
 - c) safira;
 - d) alumínio.



CURSOS DE APERFEIÇOAMENTO

CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

LIÇÃO E-14

DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES VI

INTRODUÇÃO:

Dando continuidade ao estudo dos circuitos integrados (CIs), apresentaremos, nesta lição, a descrição do processo planar/epitaxial. Em seguida, passaremos ao estudo dos CIs de película fina, CIs de película espessa e CIs híbridos e, para finalizar, faremos um breve estudo sobre as mais recentes técnicas utilizadas na fabricação de circuitos integrados.

PROCESSO PLANAR/EPITAXIAL

Para construirmos um C.I. completo, deveremos, de acordo com esse processo, formar todos os elementos (dispositivos) de uma só vez. Para tanto, seguiremos a técnica de formação dos transistores, justamente por ser essa a mais extensa e complexa em relação à técnica de formação dos demais elementos. Visando a maior clareza e, conseqüentemente, melhor compreensão do processo por parte do aluno, iremos descrever passo a passo a formação de um circuito hipotético (figura 1), partindo-se do pressuposto de que todos os elementos estejam em linha.

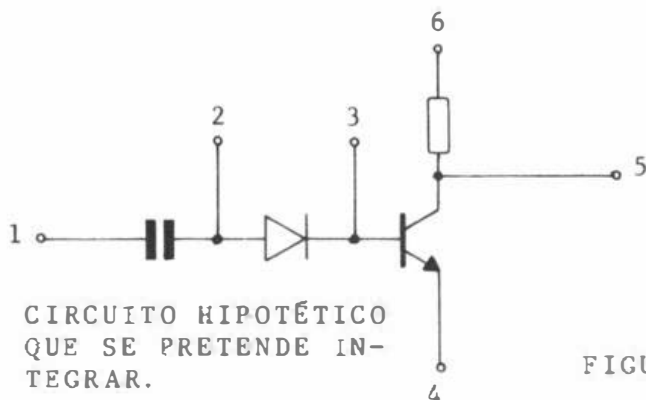
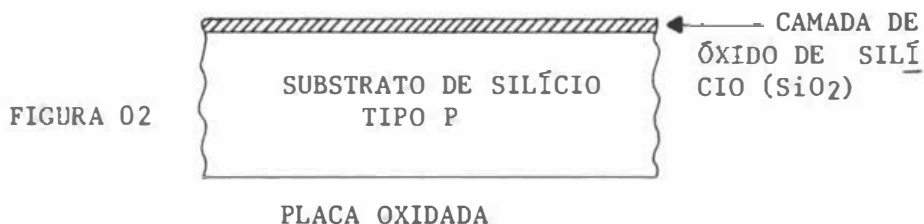


FIGURA 01

O processo é iniciado, partindo-se de uma placa de silício, tipo P, uniformemente dopada e previamente oxidada na parte superior, a qual constituir-se-á no substrato do C.I. (figura 2).



Após a oxidação da placa, espalha-se um elemento fotos- sensível sobre a mesma. Em seguida, coloca-se a primeira mäs- cara, à qual irá selecionar as regiões, onde deverá ocorrer a primeira difusão. Essa difusão sob a camada epitaxial irá for

mar a zona N^+ (camada enterrada), destinada a diminuir a resistência do coletor do transistor. Após o ataque químico, a placa estará pronta para passar pelo processo de difusão. Geralmente utiliza-se o arsênio (As) como impureza, pois a constante de difusão sólida do arsênio é muito maior do que a constante de difusão sólida do fósforo e do boro. A figura 3 nos mostra a estrutura da placa após a difusão do arsênio.



FIGURA 03

DIFUSÃO DE TIPO N^+ PARA OS
TRANSISTORES

Uma vez completado o processo referente à primeira difusão, todo o óxido da superfície da placa é removido e uma camada epitaxial do tipo N é depositada sobre toda a superfície da placa. Após o processo de crescimento epitaxial, oxida-se novamente a superfície da placa conforme nos mostra a figura 4.

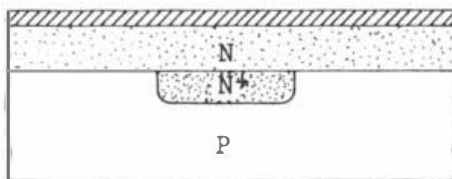


FIGURA 04

CRESCIMENTO DE UMA CAMADA E-
PITAXIAL (TIPO N) E, EM SEGUI-
DA, NOVA OXIDAÇÃO SUPERFICIAL

Logo após a última oxidação, espalha-se elemento fotosensível sobre toda a superfície da placa e, através de uma segunda máscara, previamente alinhada com a primeira, serão demarcadas as regiões (janelas) onde, por difusão, formar-se-ão as camadas de isolamento do tipo P^+ , que delimitam as regiões de tipo N reservadas para cada elemento. Uma vez realizada a difusão de material tipo P^+ , a superfície da placa é novamente oxidada. A figura 5 nos mostra alguns detalhes da difusão de isolamento.

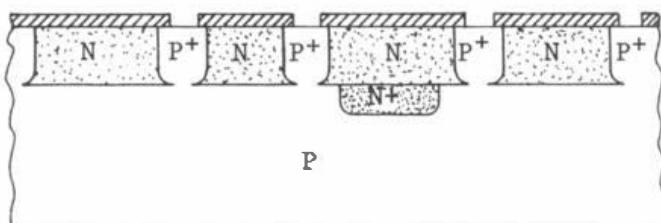


FIGURA 05

DIFUSÃO DE ISOLAMENTO DE TIPO P^+

Na etapa seguinte, através da aplicação e exposição (aos raios ultravioletas) da terceira máscara, determinam-se as regiões onde devemos realizar as difusões de base e construir o corpo dos resistores. Com essa difusão formam-se, também, as regiões correspondentes à base do transistor NPN (coletor e emissor do PNP), o anodo do diodo e o eletrodo "P" do capacitor. Nova camada de óxido de silício é então depositada sobre a superfície. A figura 6 nos mostra detalhes da estrutura após esta última etapa.

Após a colocação da camada de óxido, aplica-se a quarta máscara, a qual selecionará as regiões do emissor e o contato N^+ do coletor do transistor NPN, do diodo (catodo) e o eletrodo N do capacitor. Na realização dessa etapa, utiliza-se a difusão do fósforo de alta concentração (N^+). Devido ao fato da difusão ser realizada com elevada concentração de impure-

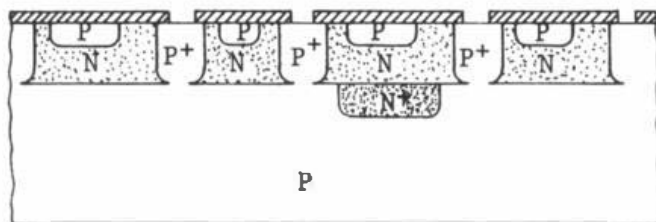


FIGURA 06

DIFUSÃO DE BASE (TIPO "P")

zas, nessa mesma etapa, são também realizadas as difusões que visam a reduzir o valor dos contatos ôhmicos e as difusões para a formação dos resistores de baixo valor. A figura 7 nos mostra a difusão de tipo N+ referente a essa etapa.

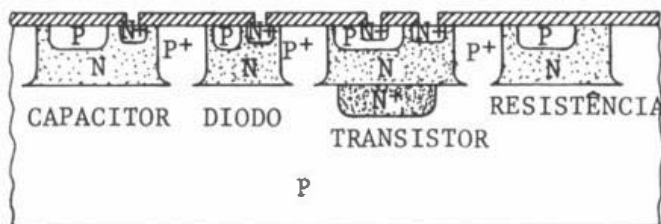
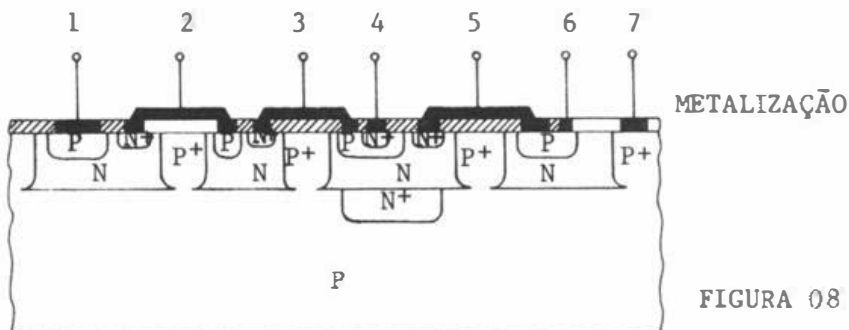


FIGURA 07

DIFUSÃO DE TIPO N+

Após uma nova oxidação, poderemos então utilizar a quinta máscara, através da qual se faz a abertura de janelas destinadas à conexão dos dispositivos com o meio externo. Por vaporização a vácuo deposita-se uma fina camada de alumínio (Al)

sobre toda a placa. Como última etapa, aplica-se uma sexta máscara para a remoção do alumínio, resultando daí a interconexão dos dispositivos que constituem os circuitos integrados. A figura 8 representa essa última etapa, na qual é mostrada a metalização dos contatos.

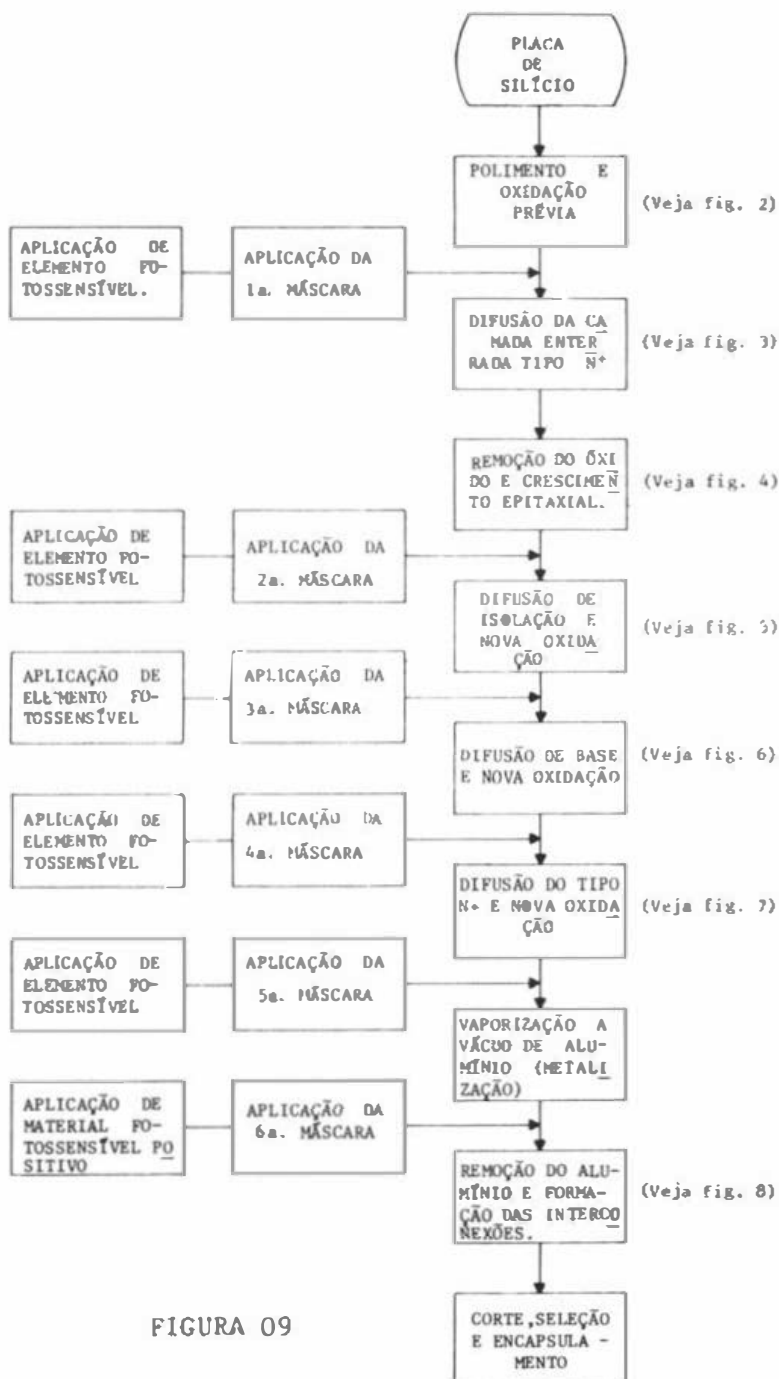


METALIZAÇÃO DOS CONTATOS E DEPÓSITO DA REDE DE INTERLIGAÇÃO

FIGURA 08

Com vistas a facilitar a compreensão do processo, por parte dos alunos, apresentamos na figura 9 um fluxograma contendo todas as etapas básicas da formação do C.I. através do processo planar/epitaxial.

Após a constituição das pastilhas (chips) de circuito integrado, todas elas serão testadas individualmente, através de pontas de prova acopladas a um computador. As pontas de prova irão tocar as regiões de contato e farão uma série de medições as quais serão comparadas com as especificações do projeto. Se houver discrepâncias entre os valores medidos e os especificados, a pastilha que está sendo testada será então recoberta por uma fina camada de tinta, cuja finalidade é tão somente a de identificar a pastilha defeituosa quando do corte da placa. Uma vez realizado o teste, a placa é, então,



cortada. Para tanto, através do uso de raio laser ou de uma ponta de diamante, fazem-se ranhuras em torno das pastilhas - que constituem a placa, de modo que, mediante pressão, a placa se parta ao longo das ranhuras. A figura 10 ilustra alguns aspectos com relação à formação e ao corte da placa.

FIGURA 10



Após o corte, as pastilhas (chips) defeituosas são refugadas, enquanto que as aprovadas passam para a fase de encapsulamento. As ligações entre as regiões de contato da placa e os terminais externos são feitos por termo-compressão ou por ultra-som.

Existem vários tipos de encapsulamento, sendo o mais comum o DUAL-IN-LINE-PACKAGE, ou cápsula em linha dupla, ou ainda DIP. A figura 11 mostra um típico encapsulamento em linha dupla. Observe que a cápsula apresenta duas filas de pinos - montados que podem ser inseridos num receptáculo ou soldados diretamente à placa de circuito impresso.

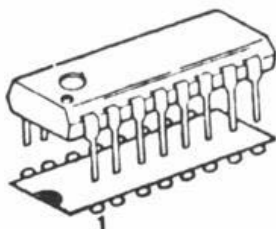


FIGURA 11

Essas cápsulas (invólucro) podem ser tanto de material plástico como de cerâmica. Os dispositivos plásticos são relativamente mais baratos e são mais adequados a maioria das aplicações industriais, operando numa faixa de 0º a 70º centígrados.

Já os dispositivos de cerâmica oferecem uma melhor proteção contra umidade e suportam melhor a temperatura, operando numa faixa de -55º a 125º centígrados.

Os DIPs mais conhecidos possuem normalmente 14 ou 16 terminais, podendo, em algumas versões, ter apenas 8 terminais, figura 12. Este tipo de cápsula é muito utilizada com CIs monolíticos.



FIGURA 12

Outro tipo de encapsulamento muito utilizado é o FLAT-PACK, ou cápsula chata semelhante à linha dupla, porém é menor e bem mais fina, figura 13. Seus terminais estendem-se na horizontal, circundando externamente as bordas. Este tipo de encapsulamento é muito utilizado onde o espaço é limitado. Normalmente é feito de cerâmica ou de material metálico, suportando temperaturas entre -55º a + 125º centígrados. Também são muito utilizados com os CIs monolíticos.

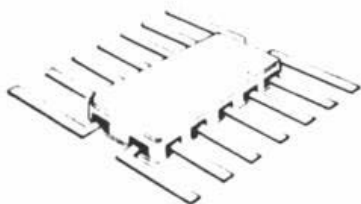


FIGURA 13

Uma outra maneira de se protegerem os CIs é através da montagem METAL CANS, recipientes metálicos, semelhantes aos utilizados para encapsular os transistores, figura 14.



FIGURA 14

Observa-se na figura 14 que a cápsula metálica possui apenas 8 pinos, podendo possuir um número maior de terminais, normalmente utilizados para abrigar CIs monolíticos, do tipo película ou híbridos. Suportam uma faixa de temperatura entre -55° até $+125^{\circ}$ centígrados. São adequados para aplicações espaciais e militares.

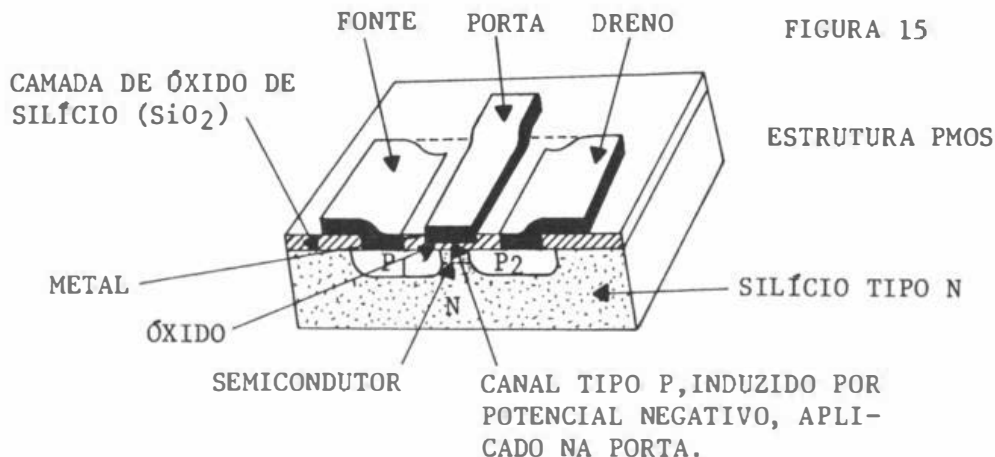
Antes de passarmos ao estudo das outras técnicas de fabricação dos CIs, vamos fazer um pequeno parêntese para falarmos um pouco sobre os circuitos MOS.

CIRCUITOS INTEGRADOS MOS:

Os CIs MOS são fabricados utilizando-se processos similares aos empregados na fabricação dos circuitos bipolares, uma vez que a técnica dos circuitos monolíticos é utilizada na obtenção de ambos os circuitos (bipolar e MOS). O circuito MOS apresenta uma alta impedância de entrada e um elevado ganho de tensão, podendo, portanto, ser utilizado com vantagens nos amplificadores lineares.

Devido a sua construção, o transistor MOS é auto-isolante. Isso faz com que ele ocupe menos espaço no circuito integrado do que o transistor bipolar. A auto-isolação decorre do fato da "fonte" e o "dreno" se encontrarem isolados pelas suas próprias junções PN, enquanto que a "porta" é isolada por uma fina camada de óxido de silício e o "canal" formado

sobre a região correspondente à "porta" é igualmente isolada pela junção PN que lhe está associada. A figura 15 nos mostra uma estrutura básica de um transistor MOS (tipo PMOS).



A estrutura do transistor MOS nos permite controlar a condução de corrente entre duas regiões, fonte e dreno, através de uma tensão aplicada à região de porta, situada entre a fonte e o dreno. O espaço entre a fonte e o dreno de um transistor MOS poderá ser utilizado como uma resistência, cujo valor dependerá do potencial aplicado ao terminal de porta e da transcondutância do conjunto. As resistências são obtidas fixando-se a tensão de porta em um valor conveniente e conectando-se esta ao dreno, de modo que o conjunto fique no estado de não condução, estabelecendo-se assim, uma certa resistência entre a fonte e o dreno. Esse tipo de resistência ocupa uma área superficial bem menor, se comparada com a área ocupada pelas resistências difundidas, o que nos possibilita aumentar a densidade dos componentes em uma pastilha.

Apesar dessas vantagens, os transistores MOS, infelizmente, apresentam velocidades de comutação muito baixas em relação aos transistores bipolares. Porém, desde a sua aparição (final da década de 60) até os dias de hoje, a tecnologia MOS tem passado por muitas modificações, estando em constante evolução. Hoje já dispomos de dispositivos MOS que possuem rapi-

dez de operação compatíveis com a nossa necessidade. Essa constante evolução originou algumas variações nos processos de fabricação bem como novas denominações. A seguir, citaremos algumas dessas denominações.

- Estrutura MNOS (Metal-Nitreto-Óxido-Semicondutor): Trata-se de uma estrutura na qual se empregam duas camadas de material isolante na região de porta. Primeiramente, uma fina camada de óxido de silício, em contato com o silício (substrato). Em seguida deposita-se uma camada de nitreto de silício sobre a camada de óxido (veja figura 16). A região de porta é então formada sobre a camada de nitreto de silício.

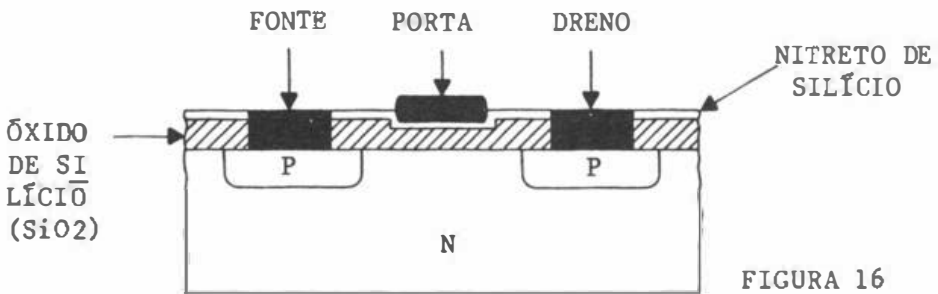


FIGURA 16

- Estrutura PMOS: Trata-se de uma tecnologia que nos permite uma elevada densidade de integração (de 3000 a 15000 transistores por pastilha) a um custo relativamente baixo, porém possui o inconveniente de ser muito lento, uma vez que a condução de corrente elétrica se deve ao movimento de lacunas (veja figura 15).

- Estrutura N.MOS: A tecnologia NMOS é um pouco mais complexa que a PMOS, porém apresenta uma maior rapidez de operação, uma vez que a condução de corrente elétrica se deve ao

movimento de elétrons. A figura 17 nos mostra alguns aspectos de um transistor NMOS.

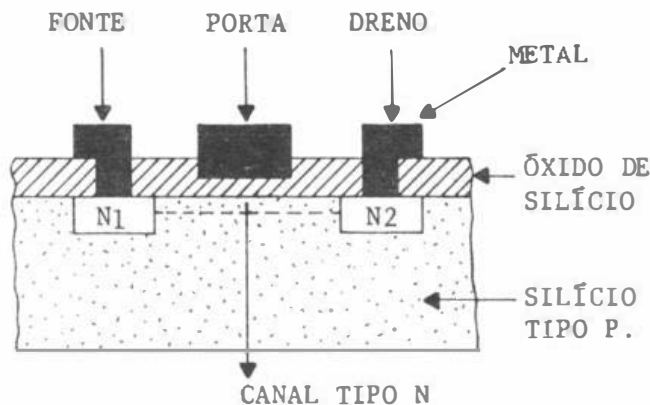
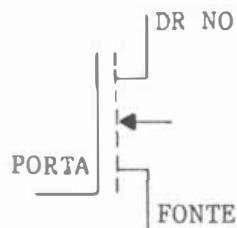


FIGURA 17



SÍMBOLO PARA UM TRANSISTOR NMOS

Note que o substrato é do tipo P, enquanto que a fonte e o dreno são do tipo N. A aplicação de um potencial positivo no terminal de porta irá formar um canal de condução tipo N entre a fonte e o dreno, dando lugar a uma corrente que dependerá do potencial aplicado ao terminal de porta.

- Estrutura CMOS: Tal estrutura apresenta, em um mesmo substrato, um transistor de canal P e um de canal N. Caracteriza-se pelo seu baixo consumo, excelente imunidade a ruídos (sinais parasitas), podendo operar em uma ampla gama de tensões de alimentação. Apesar de sua operação ser mais lenta - que a bipolar, a tecnologia CMOS está apta a realizar circuitos complexos de alta densidade de integração.

Na estrutura CMOS, forma-se um transistor PMOS em um substrato do tipo N, ao lado de um transistor NMOS, cujo canal está formado em uma difusão tipo P, que isola o dreno (N^+) e a fonte (N^+) do substrato de silício (N). A aplicação de uma tensão positiva na porta do transistor NMOS irá acarretar o aparecimento de um canal N no interior da região tipo P, difundida logo abaixo da região de porta e entre as regiões de fonte e dreno (veja a figura 18).

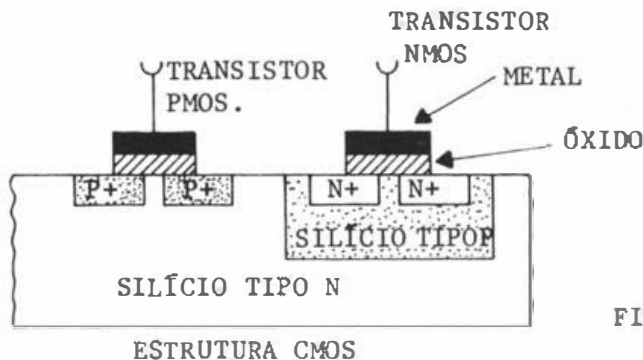


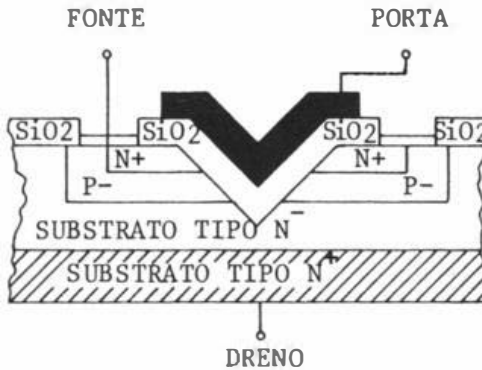
FIGURA 18

Uma outra característica muito importante da família C.MOS é que ela conduz em ambos os sentidos, permitindo, por exemplo, que um bloco multiplexador opere como um demultiplexador e vice-versa.

- Estrutura VMOS: Obtida através do processo de "Corrosão Anisotrópica Vertical" (CAV), trata-se de um dispositivo MOS especial, no qual a corrente do transistor circula perpendicularmente em relação ao substrato, ao invés de circular paralelamente, como ocorre numa estrutura MOS básica. Uma característica importante dos transistores VMOS é a relação linear entre corrente de dreno e a tensão de fonte, para uma faixa relativamente ampla de corrente de dreno. A figura 19 nos mostra uma estrutura VMOS.

As principais vantagens apresentadas por esta tecnologia são:

- maior densidade de corrente;
- menores valores de capacitância parasita, principalmente entre a porta e a fonte;
- resistência de saturação reduzida, uma vez que o próprio substrato (N^+) constitui o dreno.



ESTRUTURA VMOS

FIGURA 19

- Estrutura MOS com porta de silício: Neste tipo de estrutura, a região de porta é formada por silício policristalino altamente dopado, em lugar do alumínio. A região de porta pode ser obtida através de um processo de fotomáscara, executado após a etapa de difusão de material tipo P, o qual forma as regiões de fonte e dreno. Desta maneira, a isolamento da região de porta, com relação às regiões de fonte e dreno é feita automaticamente, resultando em uma estrutura menor em tamanho. A figura 20 nos mostra uma estrutura MOS com porta de silício.

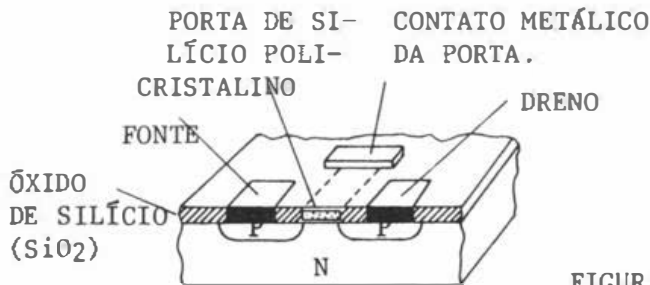


FIGURA 20

ESTRUTURA MOS COM
PORTA DE SILÍCIO

O fato de obtermos a região de porta com dimensões menores tem como consequência uma velocidade de comutação mais e-

levada e um barateamento no custo de fabricação.

Dando continuidade ao nosso estudo, passaremos agora a uma breve análise sobre os demais processos de fabricação - de circuitos integrados.

C.I. DE PELÍCULA FINA (OU FILME FINO)

Nos CIs de película fina, os resistores e capacitores - são formados a partir de camadas extremamente finas de metais e óxidos, depositados sobre um substrato de cerâmica ou de vidro. As interligações são colocadas sobre o substrato como finas tiras de metal (ouro, platina ou alumínio). Já os diodos, transistores e outros componentes semicondutores são formados como dispositivos separados e depois fixados permanentemente ao substrato, nos locais apropriados. Os resistores são formados de tiras finíssimas (0,0002 cm de espessura) sobre a superfície do substrato. Essa técnica permite produzir valores de resistência de extrema precisão. As tolerâncias nos valores dos resistores podem ser tão baixas como $\pm 0,01$ por cento, com valores de resistência entre alguns ohms a mais de 1 M Ω .

Os capacitores, por sua vez, são formados por uma camada de metal depositada sobre o substrato, a qual é revestida por uma camada de óxido que serve como dielétrico. Em seguida, a placa superior do capacitor é formada pela deposição de uma película metálica fina sobre o dielétrico. As placas metálicas normalmente são de tântalo, platina ou de ouro, enquanto que o dielétrico pode ser de óxido de silício ou óxido de alumínio.

Os materiais usados na formação dos componentes de película fina e dos condutores são normalmente depositados no substrato isolante, através de um processo de evaporação ou por pulverização. Para garantir que as películas sejam depositadas nas regiões pré-determinadas do substrato, podemos utilizar várias máscaras, expondo apenas as regiões que necessitamos.

Os CIs de película fina geralmente são empregados em circuitos de microondas e em circuitos onde se exigem componentes de alta precisão, como, por exemplo, conversores digi-

tais/analógicos e analógicos/digitais. A figura 21 nos mostra alguns aspectos construtivos de um C.I. de película fina.

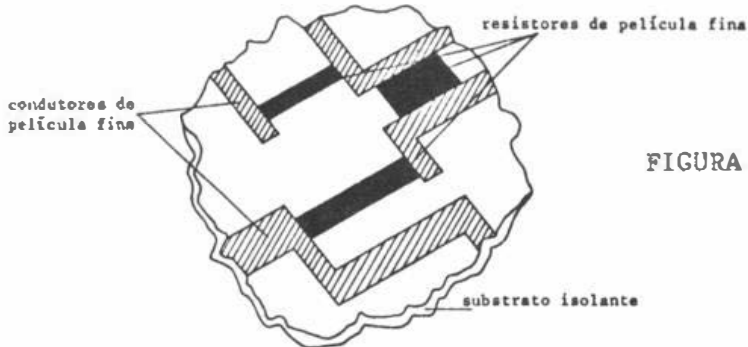


FIGURA 21

C.I. DE PELÍCULA ESPESSA (OU FILME GROSSO)

Neste processo, uma tela de fio muito fino (máscara) é colocada sobre o substrato. A tela é então recoberta por uma tinta metalizada (tinta condutora) a qual é forçada a atravessar as janelas da tela por um rolo de borracha (semelhante ao processo de silk-screen, utilizado na fabricação de painéis). Em seguida, os buracos remanescentes são preenchidos por uma emulsão. Temos, a seguir, uma secagem natural ao ar. Após a secagem natural, todo o conjunto é aquecido a uma temperatura em torno de 600°C , de modo que as superfícies gravadas em endurecem formando-se, por exemplo, condutores de baixa resistência. Este mesmo processo é utilizado para formar os resistores e os capacitores. Os diodos e os transistores são formados separadamente (de acordo com as técnicas utilizadas para a constituição dos dispositivos semicondutores) e depois fixados no substrato, da mesma forma que se faz para os CIs de película fina. Geralmente o substrato é de alumina (Al_2O_3), porém quando se deseja uma dissipação de potência elevada, pode-se utilizar o óxido de berílio (BeO) como substrato, pois este possui uma condutividade térmica seis vezes maior do que a alumina.

O ajuste dos valores dos resistores é feito através de raios "laser" (que irão queimar o excesso de material dos resistores) ou através de "jatos de areia". Desta forma conseguem-se obter resistores com tolerância em torno de $\pm 0,5\%$ - (meio por cento), para uma faixa de resistores de 5Ω a $100\text{M}\Omega$. Já, os capacitores obtidos através desta técnica possuem valores relativamente baixos, podendo alcançar até alguns milha-

res de picofarads. Quando necessitarmos de valores maiores de capacitância, é preciso utilizarmos capacitores discretos miniaturizados, fixando-os permanentemente ao substrato.

Os CIs de película espessa são mais utilizados que os CIs de película fina. Isto se deve ao fato de que o processo de obtenção dos CIs de película espessa é mais fácil de ser automatizado. O processo de película espessa é largamente utilizado em calculadoras e relógios digitais.

C. I. HÍBRIDOS

Os CIs híbridos nada mais são do que uma combinação das técnicas monolíticas, película fina e película espessa, podendo ainda conter componentes discretos. Desta forma, podem-se produzir diversos tipos de arranjo de circuitos híbridos. Um exemplo de um circuito híbrido típico é o mostrado na figura 22, onde um substrato isolante é utilizado para sustentar os diversos componentes do circuito. Este CI consiste em um circuito monolítico, montado no substrato ao lado de resistores de película espessa e de um pequeno capacitor discreto. Os condutores de interligação são formados no substrato utilizando-se as técnicas de película fina e espessa.

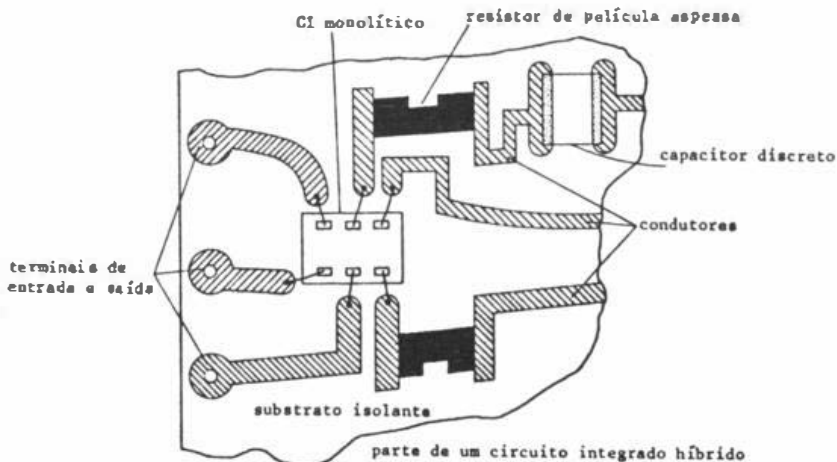


FIGURA 22

A técnica híbrida permite um elevado grau de complexidade dos circuitos, ou seja, podemos integrar um grande número de componentes através do uso de circuitos monolíticos, aliados à vantagem da precisão dos valores e tolerâncias dos componentes que se pode obter com as técnicas de película. Componentes discretos tais como diodos, transistores e capacitores são frequentemente utilizados, tendo em vista sua capacidade de controlarem quantidades relativamente grandes de potência e também por possuírem certas características elétricas, difíceis de se conseguirem através de processos monolíticos. Na figura 23 temos um exemplo de circuito híbrido.

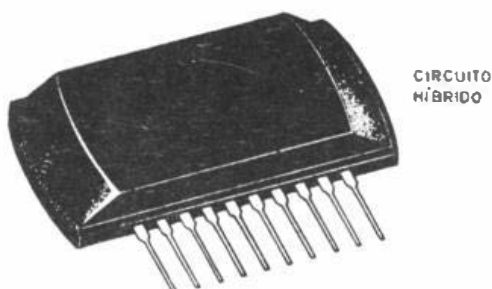


FIGURA 23

Uma das desvantagens apresentada pela técnica do circuito híbrido reside no fato de ser impossível a substituição de qualquer componente, que por ventura venha a se danificar, - pois o invólucro não pode ser removido. Por outro lado, uma das vantagens dos CIs híbridos é que estes contribuem para o barateamento do custo de equipamentos eletrônicos, pois podem ser mais facilmente montados e encapsulados para aplicações especiais. Finalizando, podemos dizer que a hibridização dos circuitos nos proporcionou ganho de espaço e redução do custo total dos referidos circuitos.

Até o presente momento, descrevemos as principais técnicas empregadas na fabricação de circuitos integrados, utilizadas até meados da década de 60. Dentre esses processos, o único utilizado em escala mais ampla, em IME (integração em média escala), foi o planar/epitaxial que, com a ajuda de alguns melhoramentos, é empregado até hoje na fabricação de CIs. Hoje dispomos de uma série de outros processos, sendo que muitos deles são derivações das técnicas já descritas. So- mente a título de informação, citaremos algumas técnicas mais recentes.

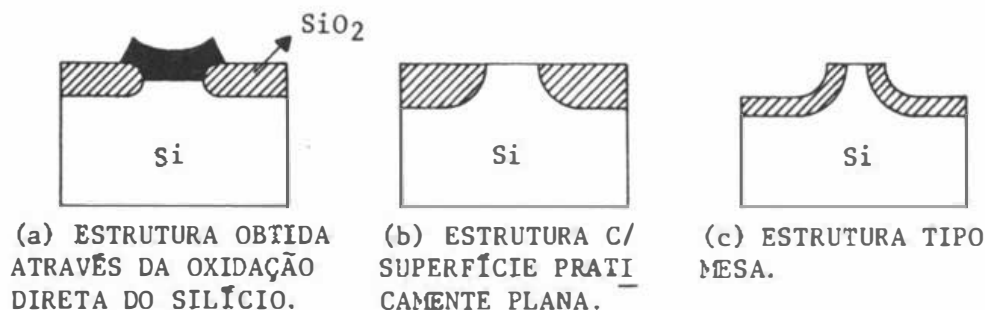
TÉCNICA LOCOS-ISOPLANAR:

A principal diferença com relação à técnica planar/epitaxial está no fato de que nesta utiliza-se o nitreto de silício (Si_3N_4) como material alternativo na elaboração de máscaras para deter a difusão sólida de impurezas. A remoção do nitreto de silício é feita através do uso de ácido fosfórico, o qual ataca o nitreto de silício muito mais rapidamente do que o ácido fluorídrico, utilizado na remoção do óxido de silício.

O processo LOCOS foi inicialmente desenvolvido com vistas à fabricação de circuitos integrados MOS, permitindo a construção de dispositivos com elevado grau de isolamento, bem como a obtenção de superfícies de CI., relativamente planas, evitando-se assim problemas relativos ao rompimento das conexões internas dos dispositivos do CI. Outra grande vantagem apresentada pelo processo LOCOS está no fato de que o nitreto de silício (Si_3N_4) também pode ser utilizado como máscara de difusão de impurezas, uma vez que existem impurezas que se difundem bem através do óxido e são bloqueadas pelo nitreto. Desta forma conseguem-se estruturas de dispositivos bastante diferentes das estruturas planares convencionais. A figura 24 nos mostra algumas formas geométricas possibilitadas pelo processo LOCOS.

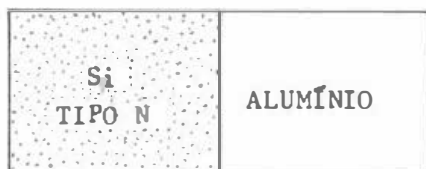
Esta técnica também pode ser empregada na fabricação de CIs monolíticos bipolares, quando então passa a ser denominada de Isoplanar.

FIGURA 24



DIODO SCHOTTKY (TÉCNICA STL):

Também conhecido por diodo de portadores quentes, resultou do esforço empreendido no sentido de se melhorarem as características dinâmicas dos circuitos integrados. Um diodo schottky é constituído, basicamente, por uma heterojunção metal-semicondutor (silício + alumínio). A figura 25 nos mostra o esquema básico de uma junção metal-semicondutor, bem como o símbolo utilizado para representá-lo.



DIODO SCHOTTKY



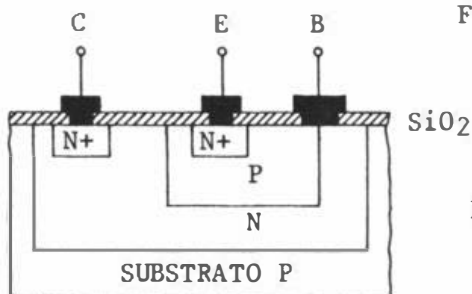
FIGURA 25

O alumínio (Al), quando colocado em contato com o silício, comporta-se como uma impureza tipo P. Baseado neste fato, se depositarmos, diretamente, o alumínio sobre uma barra de silício tipo N, obteremos um excelente diodo metal-semicondutor. Note que em termos de fabricação, o diodo schottky é bem mais simples de ser obtido do que um diodo "PN" comum. Por outro lado, a característica volt-ampère externa deste tipo de diodo é praticamente a mesma apresentada por uma junção "PN", muito embora os mecanismos físicos envolvidos sejam outros e bem mais complicados.

Se polarizarmos diretamente o diodo schottky, ou seja, se tornarmos a região metálica (Al) mais positiva em relação à região semicondutora (Si tipo N), obteremos um aumento de corrente através da junção, devido à diminuição da barreira de potencial, caracterizando-o assim, como um dispositivo de portadores majoritários. Os elétrons que passam da região de material semicondutor para a de metal (Al) possuem, em geral, energia maior que os elétrons livres do metal. Daí o fato do diodo schottky receber o nome de diodo de portadores quentes.

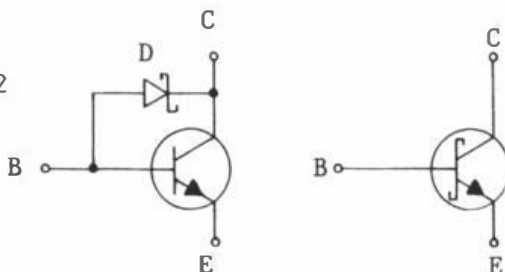
Quando diretamente polarizado, a corrente é predominantemente devida aos portadores majoritários. Isto nos leva a um pequeno tempo de armazenamento e conseqüentemente teremos ausência de cargas do lado oposto da junção (devido à difusão de portadores), uma vez que os portadores são injetados diretamente na região metálica.

Normalmente, o diodo schottky apresenta velocidade de comutação muito elevada podendo, portanto, ser empregado em equipamentos de microondas. Uma outra característica importante é que para uma mesma corrente direta, a queda de tensão no diodo schottky é muito menor que em um diodo "PN" comum, ou seja, enquanto que o diodo schottky necessita de uma tensão de limiar em torno de 0,3V para conduzir, um diodo "PN" comum necessita de uma tensão de limiar em torno de 0,6V. Uma das aplicações dos diodos schottky é na otimização das características de comutação dos transistores. Por exemplo, para se diminuir o tempo de atraso na propagação de uma porta lógica, é necessário eliminarmos o tempo de armazenamento em todos os transistores, ou seja, os transistores não devem entrar em saturação. Para que o transistor não entre em saturação, podemos utilizar um diodo schottky ligado entre a base e o coletor do transistor (veja a figura 26). Nestas condições, assim que ocorrer um aumento da corrente de base, o diodo schottky



TRANSISTOR SCHOTTKY

FIGURA 26



SIMBOLOGIA

passará a conduzir, drenando a corrente de base para o coletor do transistor, evitando assim que este entre em saturação.

O diodo schottky pode ser fabricado ao mesmo tempo que o transistor, sem acrescentar nenhuma etapa a mais no processo, uma vez que a metalização de alumínio, utilizada para o terminal de base, também é utilizada para estabelecer o contato com a região semicondutora de tipo N. O conjunto transistor mais diodo schottky, representado na figura 26, recebe o nome de transistor schottky. Com base na lógica de transistor schottky é que são concebidos os circuitos STL.

I²L (OU IIL):

Esta técnica permite níveis de integração compreendidos entre 150 e 250 portas lógicas/mm² com frequência de trabalho de 5 MHz. Alguns fabricantes, como a "Signetics" utilizam diodos schottky de isolamento na saída. A "Siemens", por sua vez, apresenta o modelo S430B com tempo de propagação de 15ns (15×10^{-9} segundos) por porta e com um consumo em torno de 15mW (15×10^{-3} W) por porta. Recentemente esse mesmo fabricante lançou um chip (C.I.) contendo 1584 portas.

I³L (OU IIIL):

Sinônimo de "Lógica de Injeção Integrada Isoplanar". Trata-se de uma tecnologia utilizada na "Integração em larga escala" (ILS) que permite alta densidade de integração, compatível com o bipolar, apresentando baixo consumo e baixos níveis de tensão de alimentação. Esta técnica se baseia em uma porta inversora de uma entrada e múltiplas saídas. A maioria dos terminais da porta compartilha de uma mesma região semicondutora.

Como exemplo, podemos citar o modelo F9480 da "Fairchild", o qual, por meio dessa técnica, integra 4000 portas em uma só pastilha.

FAST (FAIRCHILD ADVANCED SCHOTTKY TTL):

Trata-se basicamente de uma técnica para se obter transistores com elevada velocidade de comutação, capacitância parasita relativamente limitada e frequência de corte em torno de 5 GHz (5×10^9 hertz). Com essa técnica (técnica Isoplanar da Fairchild), consegue-se uma pequena capacitância para-

sita, devido às reduzidas dimensões dos elementos que a constituem. Bem como elevada velocidade de comutação, devido às reduzidas distâncias das interconexões.

Com relação à família TTL-Schottky, a família de dispositivos FAST apresenta a vantagem de um maior nível de tensão de limiar de entrada, maior capacidade de controle de saída, maior imunidade a ruído e quatro diodos schottky de aceleração em vários pontos do chip. O tempo de propagação por porta é de 3 ns (3×10^{-9} segundos) e o consumo é da ordem de 4 mW (4×10^{-3} watts). O fabricante apresenta três (3) versões, ou melhor, uma família formada por três (3) chips com densidades de 200, 500 e 2000 portas lógicas.

TÉCNICA SOS (SILÍCIO SOBRE SAFIRA OU SSS):

A técnica SOS (em inglês, Silicon on Sapphire) foi proposta, inicialmente, para a construção de componentes discretos (transistores bipolares) para operarem na faixa de microondas (16 GHz). Hoje, a tecnologia SOS pode ser utilizada com a maioria das tecnologias aplicadas aos semicondutores como a PMOS, NMOS e CMOS.

Essa técnica consiste em depositar finas camadas cristalinas de silício sobre um substrato de safira (Al_2O_3) ou alumina. Além de possuir orientação cristalina semelhante ao silício, é um ótimo elemento dielétrico.

A técnica SOS, além de proporcionar maiores densidades de componentes, necessita de um menor número de máscaras, se comparada, por exemplo, ao processo padrão CMOS. Uma outra vantagem desse processo reside no fato dele apresentar elevada velocidade de operação, se comparada com a dos componentes CMOS (3 a 5 vezes maior em se tratando de integração em média escala). Os dispositivos SOS também apresentam a vantagem de possuírem baixos valores de capacitância, daí ser essa técnica muito empregada em integração em larga escala. Na figura 27, mostramos parte de um circuito integrado, montado de acordo com a técnica SOS e, em seguida, comparamos esse circuito com o equivalente, montado sobre um substrato de silício de grande capacidade.

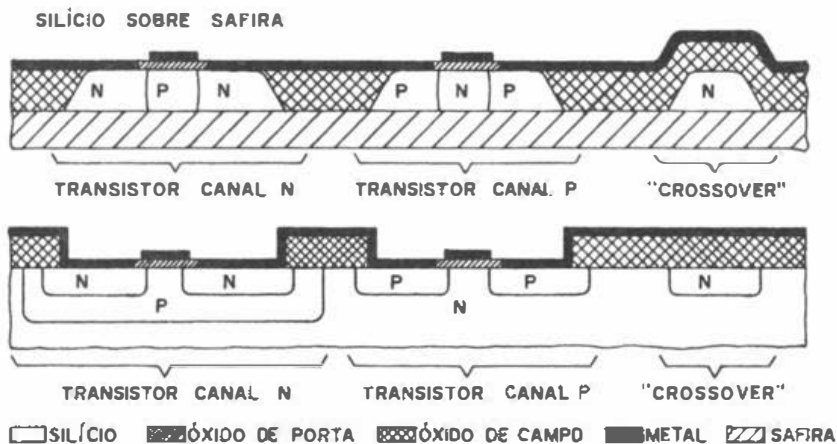
Devido ao fato da área das junções ser bastante reduzida, teremos uma baixa capacitância de junção. Além disso, a

isolação dielétrica dos componentes silício sobre safira (SOS) elimina a capacitância entre os condutores e o substrato.

Hoje em dia a técnica SOS tem sido muito empregada na confecção de memórias ROM e RAM, bem como em microprocessadores, geralmente projetados com tecnologia CMOS.

A principal desvantagem do emprego da técnica SOS reside no alto custo da safira, porém quando se deseja um CI com alta qualidade, a técnica SOS não poderá deixar de ser lembrada. Por outro lado o alto custo da safira não constituirá problema quando se pretende um volume elevado de produção.

FIGURA 27



CI's DIGITAIS E CI's LINEARES

De uma forma geral, os CI's podem ser classificados em duas grandes categorias: os Digitais e os Lineares.

Os CI's digitais são simplesmente circuitos de comutação que manipulam informações, empregados na construção de circuitos lógicos e computadores digitais. A figura 28A nos mostra um CI digital bipolar TTL, conhecido por porta lógica "NÃO-E" (OU NAND). Já a figura 28B nos mostra a simbologia utilizada para representar a porta lógica "NÃO-E".

Por outro lado, os CI's lineares caracterizam-se por fornecerem um sinal de saída proporcional ao sinal de entrada a eles aplicado. Esse tipo de C.I. é facilmente encontrado em aparelhos de TV, fontes de alimentação, receptores de FM e ou

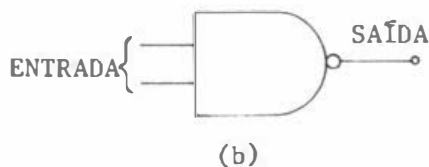
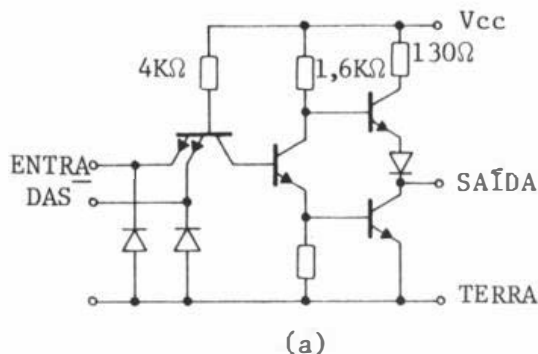


FIGURA 28

tros equipamentos onde esses CIs são usados para desempenham funções como amplificação e regulação. Na figura 29 apresentamos o esquema básico de um amplificador operacional o qual serve como exemplo típico de um CI linear.

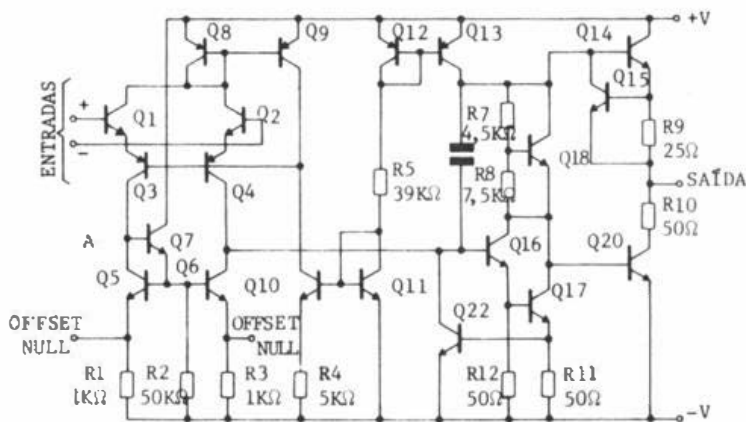


FIGURA 29

Conclusão:

Apresentamos nesta lição as principais técnicas utilizadas na fabricação de circuitos integrados, com o objetivo de transmitir ao aluno alguns aspectos de fabricação sem dar muita importância aos aspectos particulares. Alguns materiais, bem como algumas técnicas, não foram citadas por estarem em fase de estudo em laboratório.

Para finalizar, queremos dizer que esse estudo terá continuidade no decorrer do curso, principalmente com relação aos CIs utilizados em nossas lições, pois forneceremos todas as informações que julgarmos necessárias ao aluno.



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-14

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) O arsênio(As) é utilizado como impureza, pois o valor da sua constante de difusão é:
 - a) maior que a constante de difusão do fósforo;
 - b) os itens a e c estão corretos;
 - c) maior que a constante de difusão do boro;
 - d) N.R.A.
- 2) O tipo de encapsulamento mais comum é conhecido por:

a) dual-in-line-package;	c) metal cans;
b) flat-pack;	d) N.R.A.
- 3) Os dispositivos de cerâmica suportam melhor a temperatura, operando numa faixa de:

a) -55°C a $+55^{\circ}\text{C}$;	c) -125°C a $+125^{\circ}\text{C}$;
b) -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$;	d) 0° a 70°C .
- 4) O encapsulamento do tipo Metal Cans é adequado para:
 - a) aplicações ordinárias;
 - b) aplicações onde a temperatura é superior a 280°C ;
 - c) aplicações espaciais e militares;
 - d) temperaturas próximas a 0°K (Kelvin);

- 5) É característica de um circuito MOS.
- a) alta impedância de entrada e baixo ganho de tensão;
 - b) alta impedância de entrada e elevado ganho de tensão;
 - c) baixa impedância de entrada e elevado ganho de tensão;
 - d) N.R.A.
- 6) Na estrutura MNOS, a região de porta é formada:
- a) sobre a camada de nitreto de silício a qual se encontra depositada sobre uma camada de SiO_2 ;
 - b) sobre o silício tipo P^+ ;
 - c) sobre a camada de óxido de silício;
 - d) sobre o substrato de safira.
- 7) Uma das características mais importantes de uma estrutura CMOS é que:
- a) possui um único sentido de condução;
 - b) não conduz em nenhum sentido;
 - c) conduz em ambos os sentidos;
 - d) N.R.A.
- 8) Uma estrutura VMOS apresenta:
- a) resistência de saturação reduzida;
 - b) menor densidade de corrente;
 - c) maior valor de capacitância parasita;
 - d) resistência de saturação elevadíssima.
- 9) Para construir os CIs de película espessa, utiliza-se o processo conhecido por:
- a) of set null;
 - b) flat-pack;
 - c) silk-screen;
 - d) SOS.
- 10) Os CIs digitais podem ser considerados:
- a) simples circuitos de comutação;
 - b) circuitos reguladores;
 - c) circuitos amplificadores;
 - d) os itens b e c estão corretos.

LIÇÃO E-15

MÁQUINAS ELÉTRICAS

INTRODUÇÃO:

Já vimos em lições anteriores que um condutor, conduzindo uma corrente elétrica, produz um campo magnético. O efeito inverso também é possível, isto é, um campo magnético pode produzir uma corrente em um circuito fechado, desde que o fluxo magnético que enlaça o circuito esteja variando, tais fenômenos referentes ao estudo da indução eletromagnética foram estudados na lição E-6. A partir destes princípios iremos realizar um estudo básico das máquinas elétricas, englobando os principais tipos de motores e geradores.

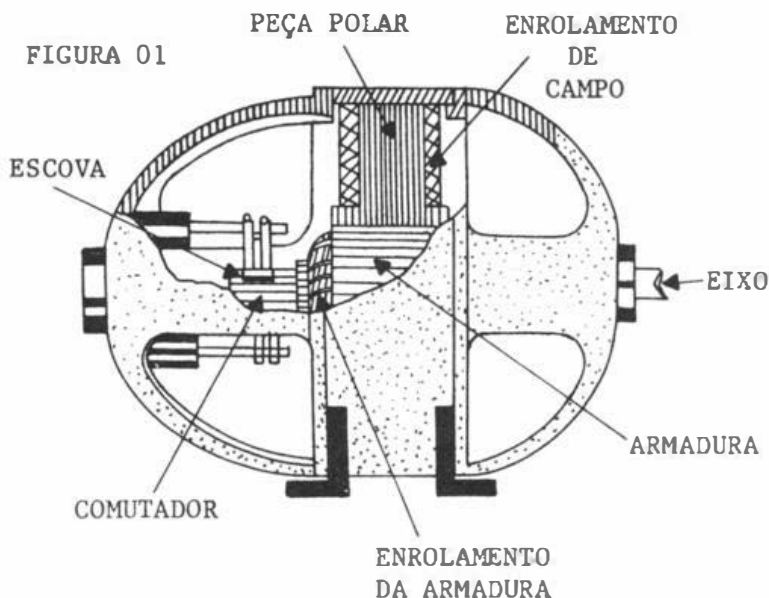
GERADORES DE ELETRICIDADE

São máquinas que transformam energia mecânica em energia elétrica. Podemos classificar os geradores em dois tipos: os geradores de corrente contínua, como é o caso dos dínamos e os geradores de corrente alternada, ou simplesmente alternadores.

A figura 1 ilustra o aspecto de um gerador de corrente contínua.

Carcaça, eixo, peça polar, enrolamento de campo, rotor,

armadura, estator, comutador, escovas e enrolamento da armadura são seus principais componentes.



A seguir, descreveremos cada um desses componentes, bem como sua função específica.

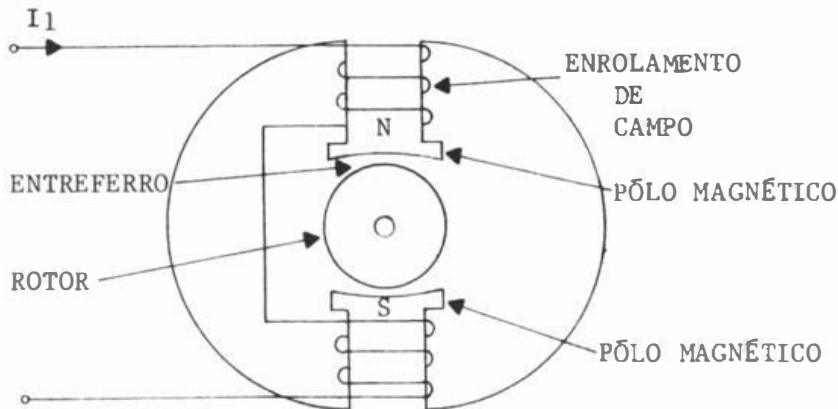
Enrolamento de campo - É o enrolamento que recebe a corrente contínua. Este circuito pode ter muitas espiras de fio fino por onde circulará uma pequena corrente, chamada de corrente de campo. Pode ser ainda composto de várias bobinas de fio grosso. Neste caso, teremos a circulação de correntes elevadas. Dependendo da finalidade, utiliza-se um ou outro embo-
binamento.

Enrolamento da armadura - É o enrolamento pré-montado, isto é, enrolado na forma definitiva, antes de ser encaixado no núcleo de ferro. Consiste de grupos de bobinas interligadas - entre si e enroladas sobre núcleos de ferro para facilitar o caminho do fluxo magnético. É fixado no rotor da máquina.

Existem máquinas com o enrolamento de campo separado do enrolamento de armadura, conhecidas por máquinas de excitação independente.

Peças polares - As peças polares ou pólos magnéticos de um gerador são geralmente usadas aos pares, fixadas à carcaça por meio de parafusos. São elas que irão sustentar os enrolamentos do campo, de tal forma a produzir um pólo norte e um pólo sul. Abaixo, temos a ilustração de um gerador de dois pólos (figura 2).

FIGURA 02



Para se obter um campo magnético de maior intensidade, - costuma-se utilizar mais que um par de pólos. Estes, porém, devem estar dispostos alternadamente norte e sul (fig. 3).

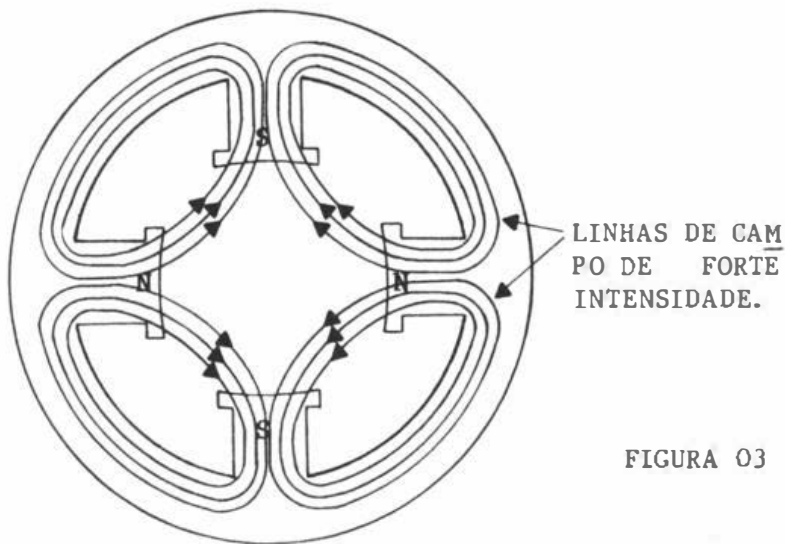
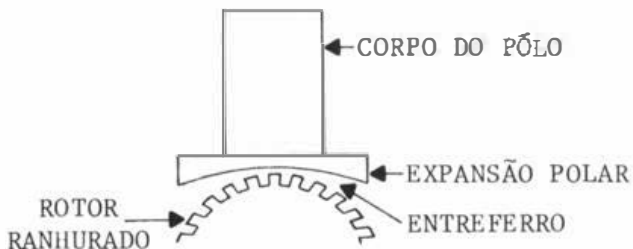


FIGURA 03

Os pólos são geralmente construídos de ferro, com uma pequena quantidade de carbono. Em máquinas de porte grande - compreendem duas partes fundamentais, conforme ilustra a figura 4.

FIGURA 04



O corpo do pólo, é construído de chapas grossas de ferro-carbono.

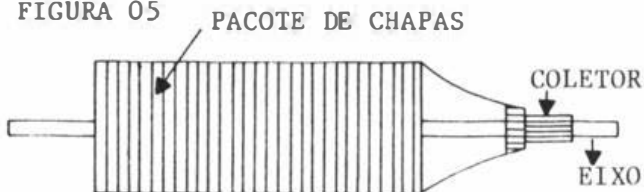
A expansão polar é construída de chapas magnéticas, finas, de ferro silício. Sua finalidade é inibir correntes induzidas na cabeça dos pólos, quando as ranhuras do rotor fizerem "flutuar" o fluxo magnético.

Rotor - É a parte girante das máquinas elétricas. Nas máquinas de corrente contínua o rotor compreende:

a) Induzido ou armadura - É constituído de chapas magnéticas de ferro silício ranhuradas (formando um pacote) e colocadas sob pressão no eixo da máquina. Nas ranhuras do induzido estão alojados os condutores elétricos, isolados por verniz, lã de vidro, amianto, etc.

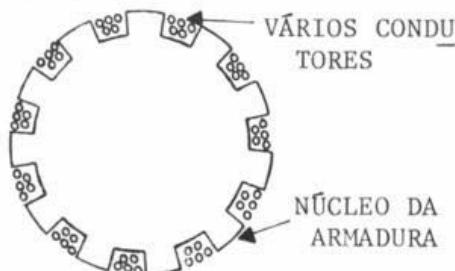
O induzido juntamente com as bobinas e com o coletor formam o rotor da máquina (figura 5).

FIGURA 05



Cortando o pacote de chapas, notamos que pelas ranhuras passam diversos condutores, conforme mostra a figura 6.

FIGURA 06



b) Coletor ou comutador - O coletor nada mais é do que um conjunto de anéis divididos em várias partes iguais, isolados entre si e do eixo. A extremidade de cada bobina é ligada a um dos segmentos do anel e a outra extremidade ao outro segmento. Os lados opostos do comutador são apoiados por duas escovas, fixadas no estator da máquina. Estas escovas, dependendo da finalidade da máquina, podem ser: de grafite, de carbono ou de grafite metalizado (figura 7).



Carcaça - É uma estrutura cilíndrica de aço ou ferro fundido. Além de servir como suporte da máquina é um ótimo condutor das linhas magnéticas de força. A carcaça de um gerador inclui também uma base ou um suporte de apoio.

O estator da máquina de corrente contínua inclui: a carcaça, os enrolamentos de campo, os pólos e as escovas.

A figura 8 mostra outro corte de uma máquina de corrente contínua, visto em ângulo diferente daquele da figura 1.

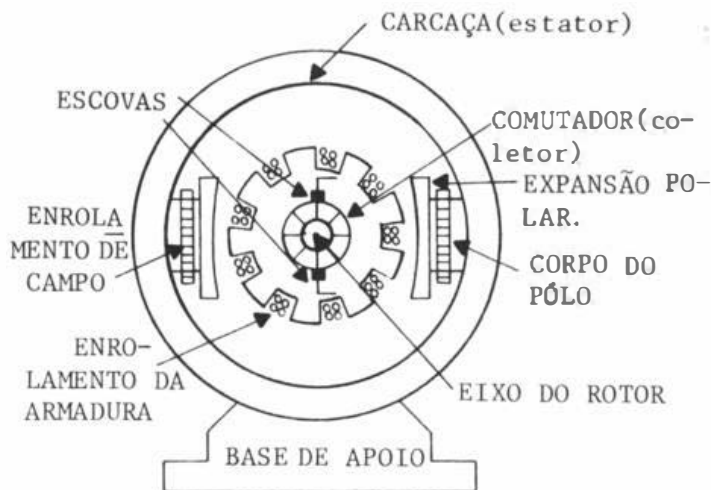


FIGURA 08

Da mesma forma que os geradores de corrente contínua, os dínamos são máquinas rotativas que convertem energia mecânica em energia elétrica. A construção dos dínamos é análoga à dos geradores que acabamos de ver, colocam-se vários anéis em sequência, ao redor do rotor, cada extremidade destes anéis é ligada a segmentos individuais de um coletor e a seguir são colocadas duas escovas em lados opostos do comutador, de tal forma que, ao girar o rotor, teremos um contato elétrico com as duas extremidades de um único anel de cada vez.

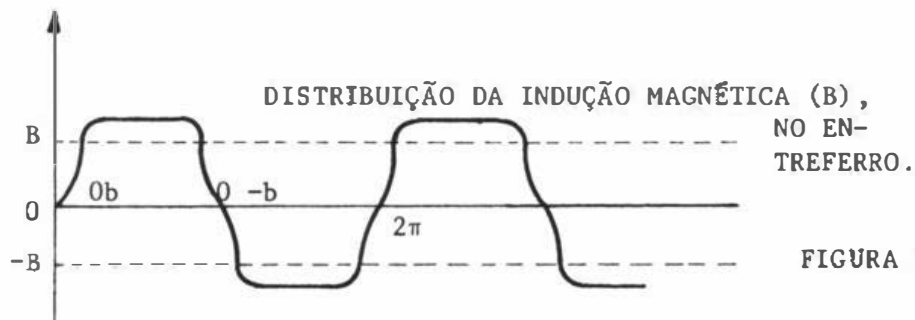
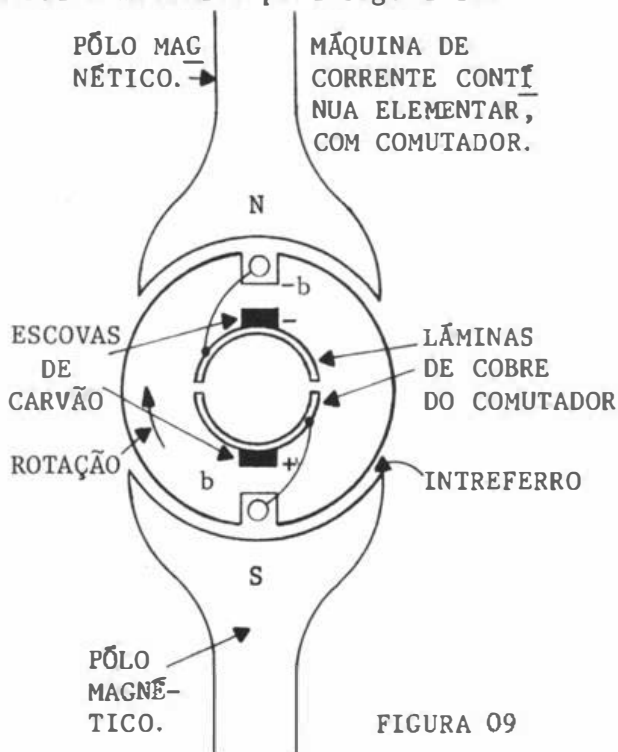
DETALHES E FUNCIONAMENTO DE UM GERADOR DE CORRENTE CONTÍNUA.

Já vimos que o enrolamento de armadura de um gerador de corrente contínua está no rotor. A corrente é conduzida até este enrolamento por meio das escovas. O enrolamento de campo está no estator e é excitado por correntes contínuas.

A figura 9 ilustra um gerador elementar de dois polos, onde o enrolamento de armadura consiste de uma única bobina com N espiras. Indicamos os dois lados da bobina pelas letras b e $-b$ colocados em pontos opostos diametralmente sobre o rotor

e os condutores paralelos ao eixo.

Através de uma fonte de potência mecânica que pode ser um motor, o rotor é girado à velocidade constante. A distribuição de fluxo no entreferro é parecida com uma onda com o topo achatado, diferente da onda senoidal, encontrada em máquinas de corrente alternada. O aspecto da distribuição da indução magnética é mostrado pela figura 10.



A tensão induzida em uma bobina individual da armadura é do tipo alternada, precisando, portanto, ser retificada. Há

casos em que essa retificação é feita por meio de retificadores externos.

Nas máquinas convencionais de corrente contínua, a retificação é feita pelo comutador. Já vimos que o mesmo é um cilindro formado por lâminas de cobre, isoladas entre si e do eixo do rotor, através de um isolante.

As escovas, são apoiadas sobre a superfície do comutador e fazem a conexão do enrolamento com os terminais externos da armadura. Os enrolamentos da armadura das máquinas de corrente contínua são colocadas sobre o rotor devido à necessidade de comutação.

De acordo com a figura 9, se considerarmos o sentido de rotação mostrado, o comutador estará ligando o lado da bobina que está no pólo sul à escova positiva e o lado da bobina que está no pólo norte à escova negativa. Quando a corrente contínua circular pelo circuito externo às escovas, teremos o aparecimento de um conjugado*, devido à interação dos campos magnéticos do estator e do rotor.

* Conjugado - Também chamado de torque, é a medida do "esforço" necessário para girar um eixo: Este "esforço" é medido pelo conjugado.

Para o caso da máquina funcionar como um gerador, o conjugado eletromagnético será oposto à rotação. Se estiver agindo como um motor, o conjugado estará no mesmo sentido da rotação.

TIPOS DE GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA

Existem três tipos básicos de geradores de corrente contínua: o tipo série, shunt e composto. A diferença entre eles reside na maneira como é produzida a excitação do enrolamento de campo. A finalidade do gerador, independentemente do seu tipo, é produzir uma tensão CC pela conversão da energia mecânica em elétrica, porém uma parte desta tensão é empregada para excitar o enrolamento de campo. Não iremos tratar dos vários tipos de geradores de CC, pois este assunto não é o objetivo desta lição, apenas abordamos os conceitos básicos.

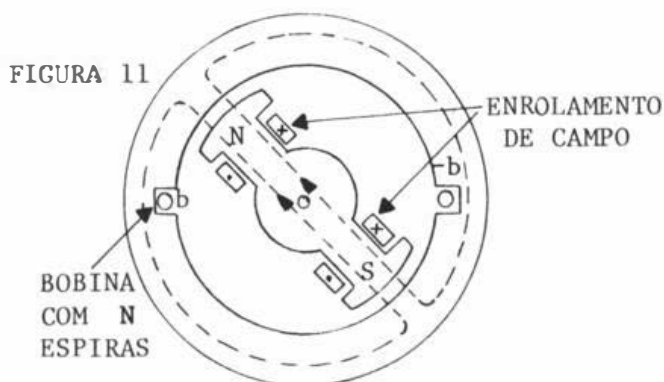
GERADORES DE CORRENTE ALTERNADA

Os geradores de corrente alternada, também conhecidos como alternadores, consistem de uma armadura, parte do gerador onde a tensão de saída é induzida. O processo de indução nos alternadores é idêntico ao dos geradores de corrente contínua. A armadura compõe-se de uma série de bobinas enroladas sobre núcleos de ferro laminado com a finalidade de minimizar as correntes de foucault.

Enrolamento de campo - O enrolamento de campo dos geradores de corrente alternada de até 50 Kw encontra-se geralmente no estator. Em máquinas de maior porte, o enrolamento de campo está no rotor (parte móvel).

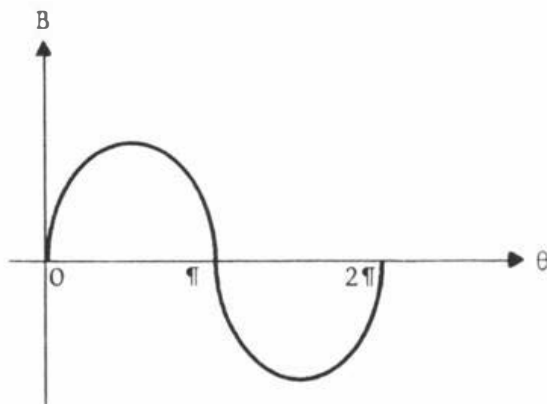
O campo exige tensões e correntes relativamente pequenas, se comparadas com as correntes e tensões geradas na armadura de um gerador de porte elevado. A excitação do enrolamento de campo é feita por corrente contínua, levada até ele por meio das escovas de carvão, apoiadas sobre anéis coletores.

A figura 11 ilustra um gerador de C.A. do tipo síncrono. O enrolamento da armadura consiste de uma bobina de N espiras. É indicado em secção transversal pelos lados da bobina b e $-b$, colocadas diametralmente ao estator. O enrolamento de campo é colocado sobre o rotor, que gira a uma velocidade constante, acionado por fonte mecânica, acoplada ao eixo que pode ser: uma turbina a água, um motor a gasolina ou a diesel, etc. As linhas tracejadas indicam os caminhos do fluxo magnético.

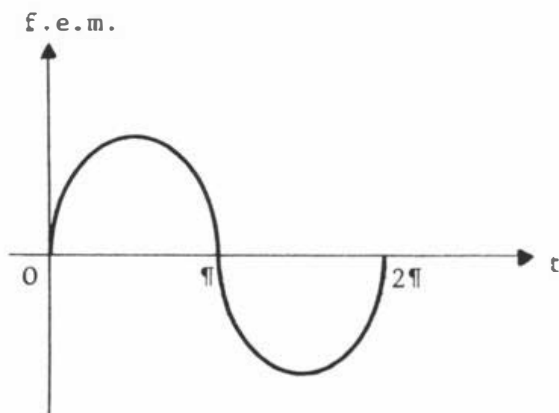


O aspecto da distribuição de indução magnética é aproximadamente igual a uma distribuição senoidal. Conforme o rotor gira, a onda de fluxo magnético passa pelos lados da bobina b e $-b$ e a tensão resultante na bobina (f.e.m.) em função do tempo, terá a mesma forma de onda da distribuição da indução magnética. Os gráficos a e b mostram este aspecto.

- (a) distribuição da indução magnética.



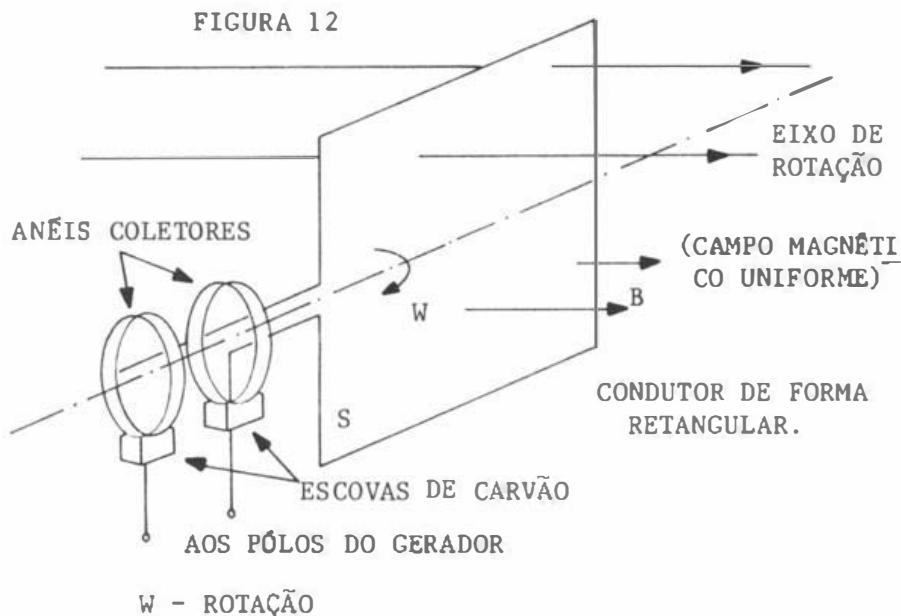
- (b) forma de onda correspondente à tensão gerada na bobina.



Para entendermos melhor esta variação de f.e.m., vamos supor um condutor de forma retangular, conforme indica a figura 12.

Se considerarmos o condutor da figura 12 ligado a um circuito R qualquer que irá utilizar a corrente gerada e que nesse condutor estejam conectados os anéis coletores, fazendo com

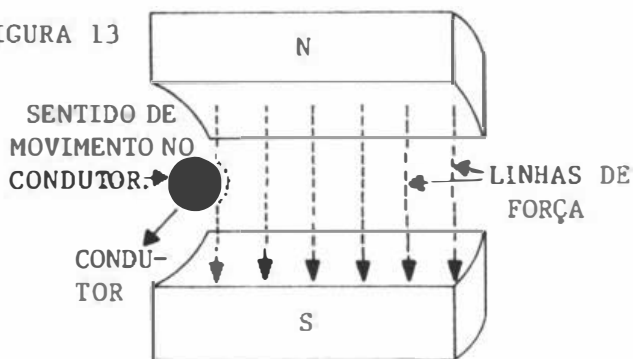
tato com as escovas de carvão ou grafite, quando colocarmos - este quadro condutor no interior de um campo magnético e fizermos com que este quadro gire sobre um eixo de rotação, notaremos que será induzida uma força eletromotriz (f.e.m.) no condutor e, conseqüentemente, teremos a circulação da corrente



através do mesmo. Esta corrente produzida, transportada para as escovas, percorrerá o circuito R. Como o quadro condutor é atravessado por um campo magnético uniforme, nota-se que as linhas de força, que cortam o condutor em uma volta, não são constantes e, com isto, haverá uma variação na força eletromotriz. Isto ocorre toda vez que um condutor cortar as linhas de força, gerando uma fraca tensão no mesmo, ocasionando, com isso, a circulação da corrente elétrica. Observe na figura 13, os pólos de um ímã e um condutor que está começando a cortar uma linha de força.

É claro que será necessário uma certa força para se cortar definitivamente a linha de força. Vamos imaginar que a energia mecânica necessária para vencer a resistência que as linhas de força apresentam, seja um impulso dado ao condutor no sentido da seta indicada pela figura 13.

FIGURA 13



Analisando a figura 14, temos uma linha de força sendo cortada pelo condutor e logo em seguida, pela figura ao lado, vemos que a linha de força foi cortada e se encontra ao redor do condutor. Devemos ter em mente que as linhas de força magnética que rodeiam o condutor de cobre, representam uma energia e impõem a cada elétron livre um movimento definido em uma determinada direção.

FIGURA 14

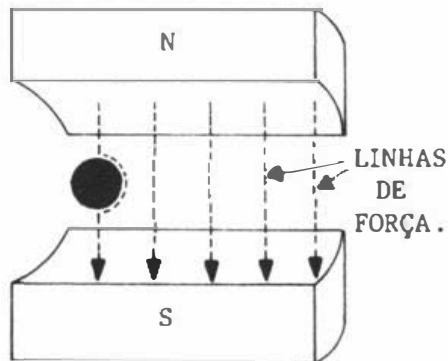
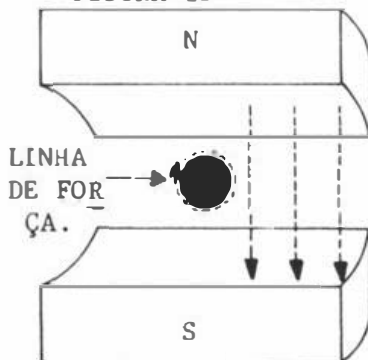


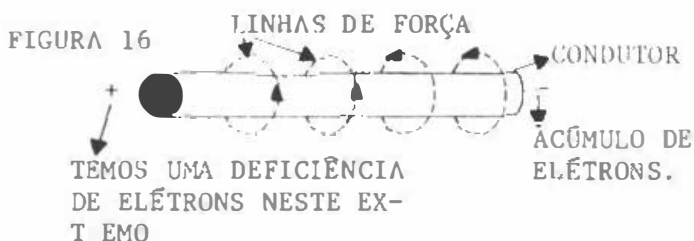
FIGURA 15



O condutor não corta somente uma linha de força, e sim, várias delas, conforme a densidade de campo e o comprimento do condutor. Portanto a tensão gerada (f.e.m.) depende do nú-

mero de linhas de força que são cortadas. Este fenômeno que - estamos analisando é diferente daquele obtido, quando produ- zimos magnetismo pela eletricidade, pois, quando há o movimen- to dos elétrons através de uma bobina (corrente elétrica), te- mos o aparecimento das linhas de força, enquanto que na indu- ção eletromagnética, caso que estamos estudando, são as li- nhas de força que, atuando sobre o condutor, produzirão o movi- mento de elétrons, ou seja, a corrente elétrica.

O corte de várias linhas de força, produz um desequilí- brio caracterizado pelo movimento dos elétrons no condutor, o- casionando o aparecimento de uma força eletromotriz (f.e.m.) nas extremidades do mesmo. A figura 16 mostra tal efeito.



Existe uma relação entre o número de linhas de força que são cortadas por segundo e a tensão gerada pelo condutor, isto é, se forem cortadas 100.000.000 de linhas por segundo, será induzida neste condutor uma força eletromotriz (f.e.m.) de 1 volts.

Podemos aumentar a tensão gerada (f.e.m.) pela indução eletromagnética da seguinte maneira:

a) aumentando-se a velocidade do condutor, pois assim ele cortará um número maior de linhas de força por segundo;

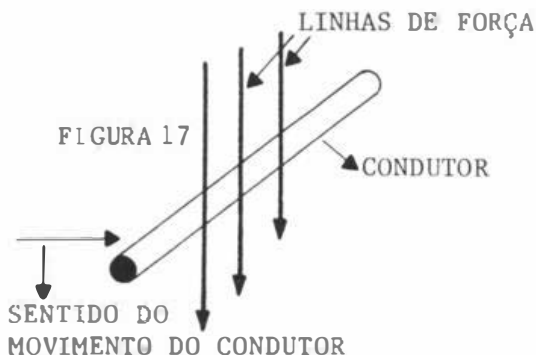
b) aumentando-se a densidade de campo magnético, isto é, o número de linhas de força por centímetros quadrado da superfície;

c) aumentando-se o comprimento do condutor, a fim de cortar um número maior de linhas de força ao mesmo tempo.

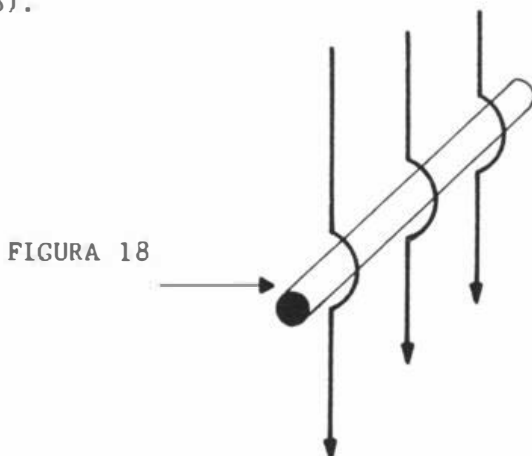
DETERMINAÇÃO DA POLARIDADE DA TENSÃO GERADA

Com uma simples aplicação chamada regra da mão esquerda, podemos determinar a polaridade da tensão gerada no condutor.

Observe a figura 17, indicada abaixo. O condutor está quase para cortar as linhas de força, neste instante ainda não temos circulação de corrente.



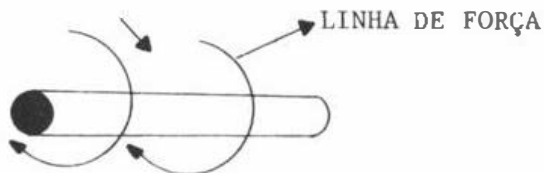
Conforme o condutor se movimenta em direção às linhas de força, teremos uma movimentação de elétrons em seu interior (corrente elétrica) devido ao corte das linhas de força (figura 18).



Após o corte das linhas de força, teremos o aparecimento da corrente elétrica. O pólo negativo onde se acumulam os elétrons pode ser indicado da seguinte forma: com os quatro de-

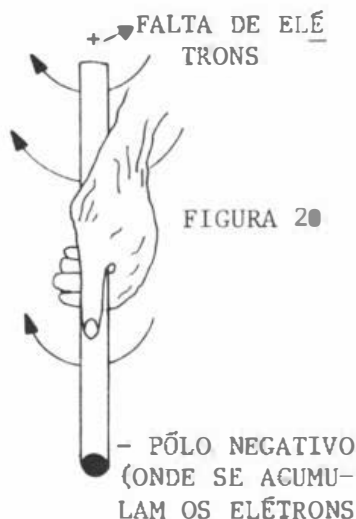
dos da mão esquerda enlaçamos o condutor na direção das linhas de força e o polegar irá indicar o pólo negativo. A outra extremidade do fio é denominada de pólo positivo (falta de elétrons), figura 19 e 20.

Figura 19



Condutor após o corte das linhas de força

Figura 20



Já vimos como se manifesta a f.e.m.. Vamos, agora, voltar ao nosso condutor da figura 12, para verificarmos a variação da força eletromotriz. Para isto, vamos girar o quadro em 360°.

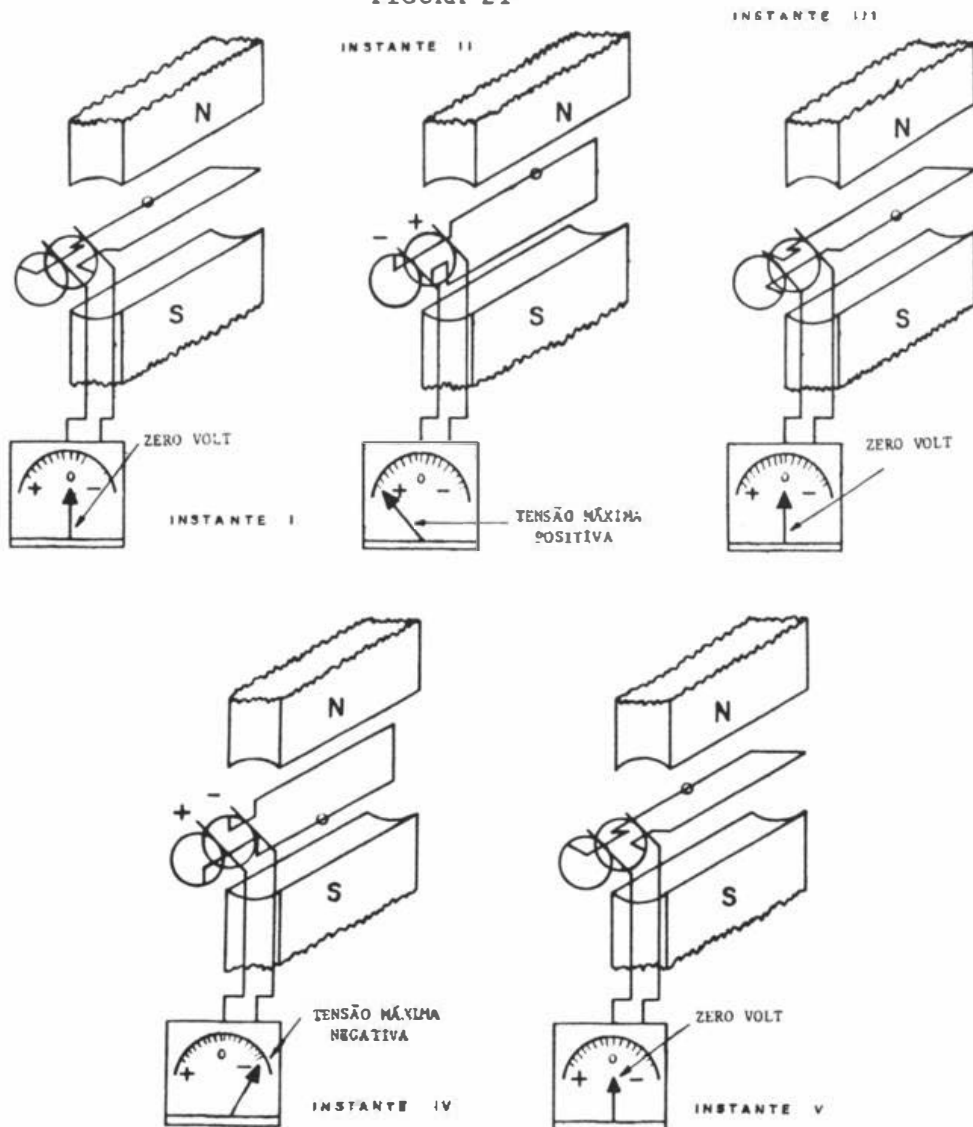
Considerando o instante I da figura 21, notamos que as linhas de força não estão sendo cortadas pelo quadro condutor, portanto não teremos tensão gerada e o galvanômetro indica zero volt.

Iniciando-se o movimento do quadro condutor, este começa a cortar as linhas de força e haverá a deflexão do ponteiro do galvanômetro. No instante II, quando atingidos os primeiros 90° a f.e.m. será máxima, pois, neste caso, o número de

linhas de força cortado pelo quadro é o maior possível.

Prosseguindo-se com a rotação, após complementar a primeira volta, o quadro condutor passará a cortar cada vez menos linhas de força. Em consequência disso, a tensão gerada - irá diminuindo cada vez mais, até atingir zero volts. Quando então o quadro condutor estará totalmente na horizontal (instante III).

FIGURA 21



Os instantes I, II e III correspondem à primeira meia volta, quando a armadura girou em 180° . E a tensão aumentou - de zero até o seu valor máximo encontrar a bobina na posição vertical, cortando, portanto, o maior número de linhas magnéticas, para depois diminuir gradativamente, até zero, atingindo novamente a posição horizontal, deixando, portanto, de cortar linhas de força. Nesta primeira fase, podemos dizer que foi gerado o primeiro ciclo de corrente alternada (C.A.).

Voltando à figura 21, verificamos que, nos instantes IV e V, o quadro condutor corta novamente as linhas de força, porém em sentido contrário. Desta forma, o galvanômetro acusa a tensão máxima negativa. Nesta segunda fase, gerou-se o segundo ciclo da corrente alternada (C.A.), quando a armadura girou também em 180° (de 180° a 360°). As figuras 22 e 23 ilustram as formas de onda entre os instantes I, II, III, IV e V.

FIGURA 22

Forma de onda das tensões geradas, entre os instantes I, II e III.

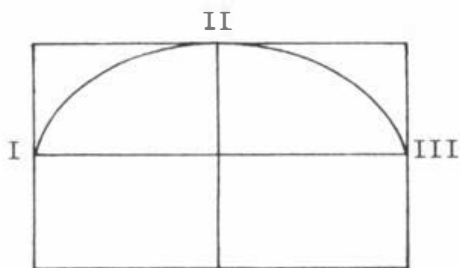
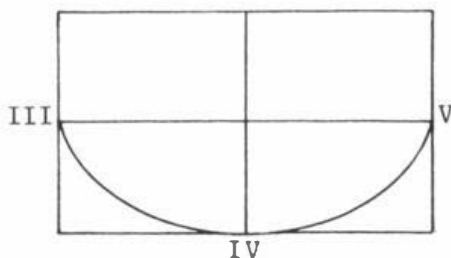


FIGURA 23

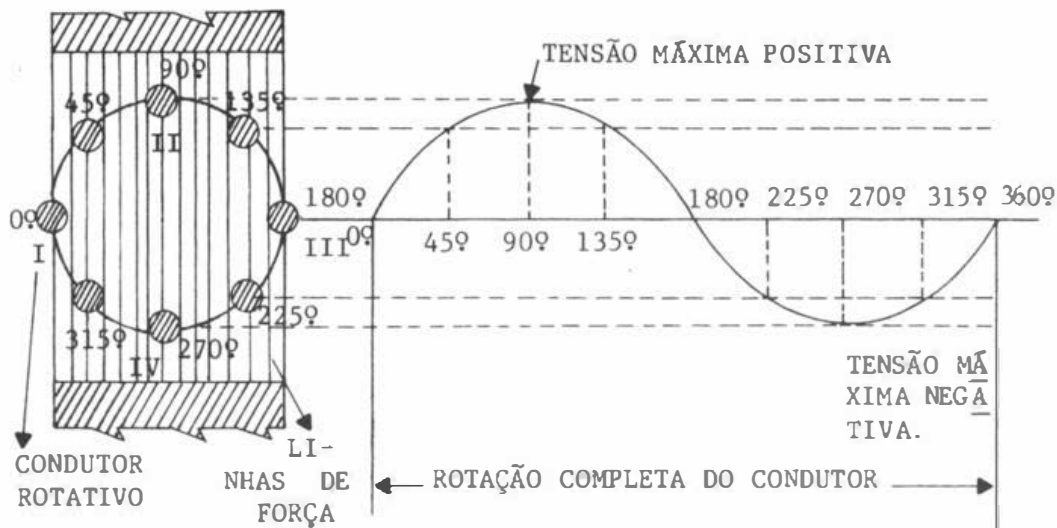
Forma de onda das tensões geradas, entre os instantes III, IV e V.



A figura 24 mostra as várias posições de um condutor rotativo (ao completar uma volta) e a forma de onda gerada.

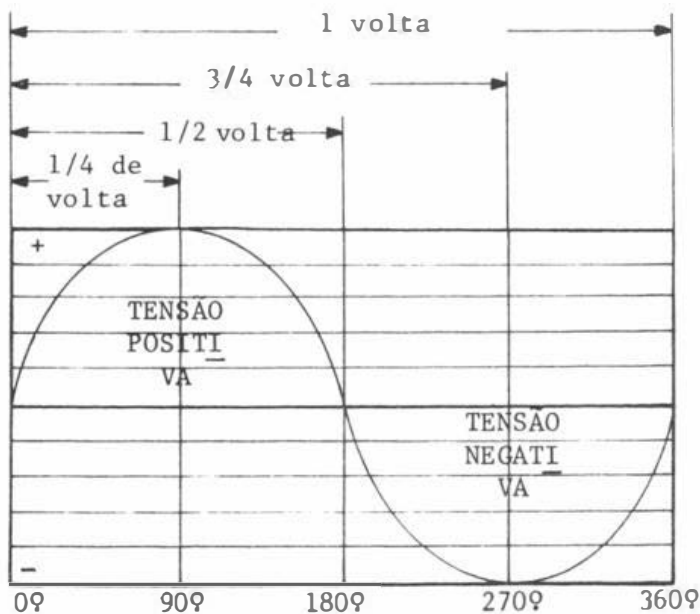
Assim que a armadura de um gerador de C.A. completar uma rotação, será gerada uma tensão, cuja grandeza (em vários instantes) está representada no gráfico da figura 25).

FIGURA 24



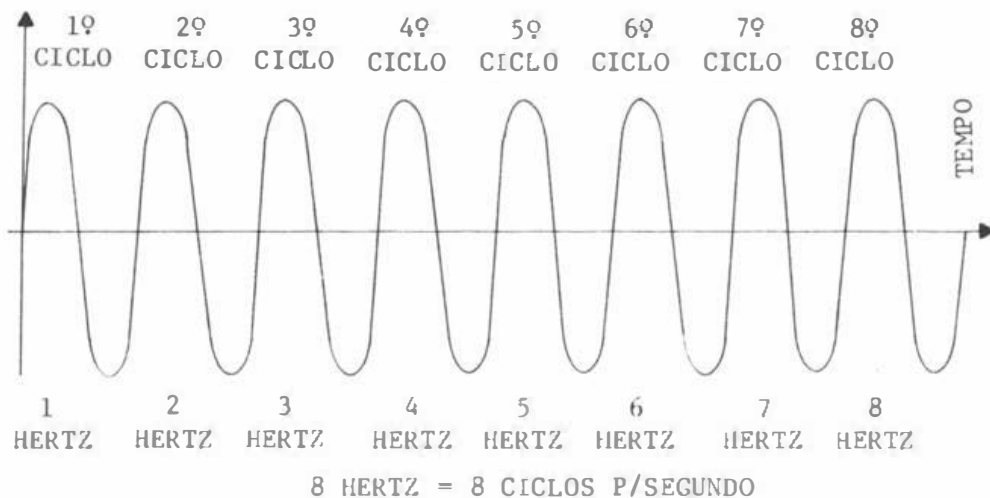
Quando o gerador realiza uma rotação completa por segundo, dizemos que a frequência da corrente elétrica gerada será de um ciclo por segundo, ou seja, um hertz. No Brasil, as companhias de energia elétrica adotam para a corrente alternada, a frequência de 60 hertz, ou seja, 60 ciclos por segundo. Isso significa que a tensão mudará de polaridade ou de direção

FIGURA 25



120 vezes por segundo. Há países, por exemplo, como o Paraguai, que adotam a frequência de 50 hertz. A figura 26 ilustra o aspecto de uma corrente de 8 hertz. Podemos notar que a mesma muda de direção 16 vezes por segundo.

FIGURA 26



Visualizada a variação da força eletromotriz, bem como a forma de onda da tensão gerada, veremos, agora, os vários tipos de geradores de corrente alternada. Antes, porém, iremos definir os sistemas de corrente monofásica e trifásica.

SISTEMA DE CORRENTE ALTERNADA MONOFÁSICA

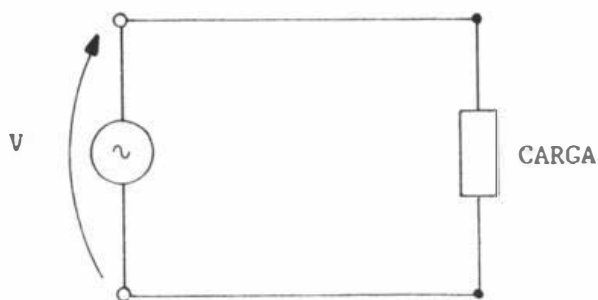
A corrente alternada, caracteriza-se pelo fato de variar com o tempo, mudando de sentido alternadamente. O número de vezes em que a tensão muda de sentido e volta à sua condição inicial, chamamos de frequência, expressa em ciclos por segundo ou hertz (Hz), como já acabamos de ver.

Para entendermos o sistema monofásico, vamos considerar dois fios paralelos entre si, alimentados por uma tensão alternada V (volts), cujos terminais estão conectados a uma carga que absorve uma corrente I (Ampêres), veja a figura 27.

Este modelo mostrado na figura 27 caracteriza um sistema monofásico. Se plotarmos um gráfico com os valores da ten-

FIGURA 27

I



são V e da corrente I a cada instante, obteremos o gráfico da figura 28.

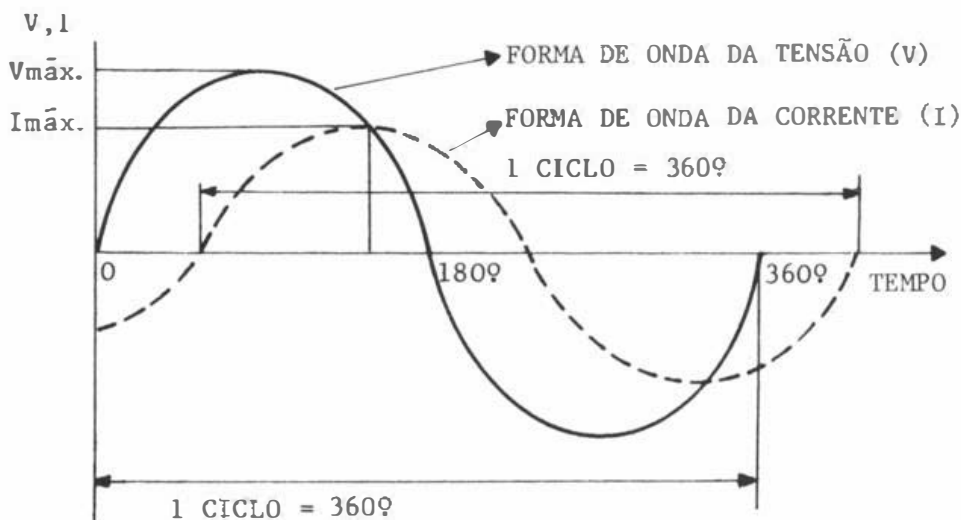


FIGURA 28

Podemos notar, pela figura 28, que as ondas de tensão e corrente não estão em "fase", isto é, não passam pelo valor zero ao mesmo tempo, apesar de terem a mesma frequência.

SISTEMA DE CORRENTE ALTERNADA TRIFÁSICA

O sistema trifásico como o próprio nome sugere, consiste na associação de três sistemas monofásicos de tensões: V_1 , V_2 e V_3 , de tal forma que a defasagem entre elas seja de 120° . A defasagem resulta do atraso que uma onda apresenta com relação à outra. Este atraso é medido em graus. Ligando-se três sistemas monofásicos entre si, teremos um trifásico, isto é, três tensões que chamaremos de V_1 , V_2 e V_3 , equilibradas, defasadas entre si em 120° e aplicadas entre os fios do sistema. Veja, na figura 29, as formas de onda das três tensões.

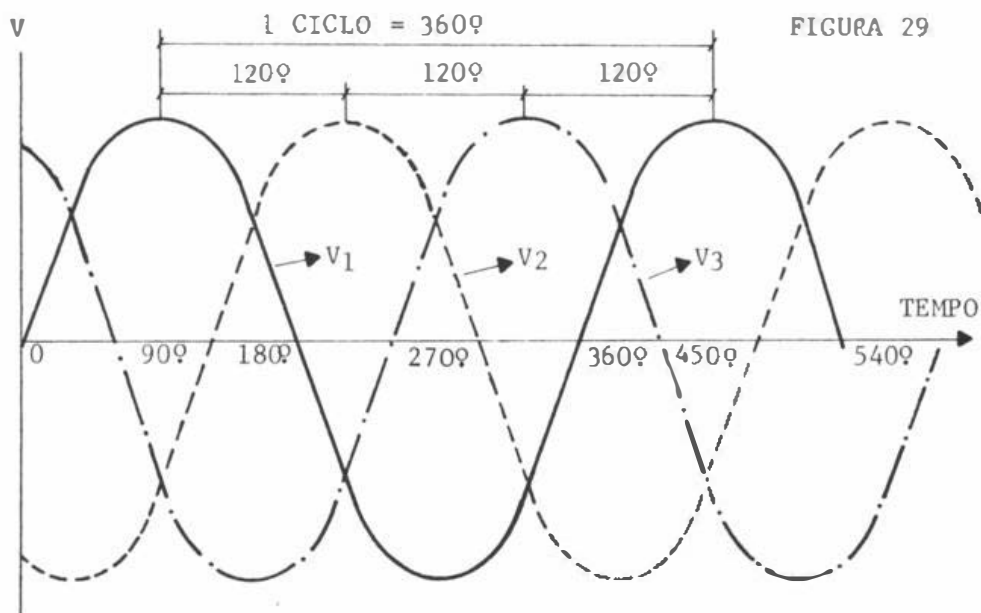


FIGURA 29

GERADORES SÍNCRONOS

São os alternadores mais comuns. A figura 11 ilustra um gerador de C.A. de 2 pólos. Porém, veremos a seguir, um alternador elementar de 4 pólos, monofásico. As bobinas de campo são ligadas de modo a obtermos pólos norte e sul alternados entre si, veja a figura 30.

Notamos através da figura 30 que o enrolamento de armadura consiste de duas bobinas $b_1, -b_1$ e $b_2, -b_2$ ligadas em se

rie. Para uma máquina com mais de dois pólos é conveniente concentrar a atenção sobre um único par de pólos, onde as condições elétricas serão válidas para o outro par.

GERADOR SÍNCRONO, ELEMENTAR DE 4 PÓLOS

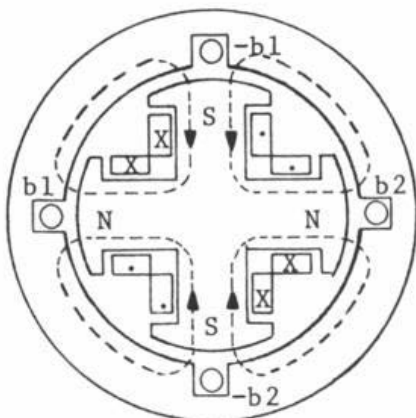


FIGURA 30

O número de pólos e a velocidade das máquinas elétricas estão intimamente ligadas à frequência, através da seguinte relação:

$$\omega = \frac{120 f}{P}$$

Onde:

ω → velocidade em rotações por minuto (rpm);

P → número de pólos;

f → frequência em hertz.

É interessante compararmos as frequências comerciais de uso mais comum, com o número de pólos e as velocidades necessárias. Para tanto, temos na página ao lado, uma tabela comparativa para três frequências distintas entre si, 25 Hz, 50 Hz e 60 Hz.

TABELA QUE RELACIONA VELOCIDADE-FREQUÊNCIA PARA VÁRIOS NÚMEROS DE PÓLOS EM MÁQUINAS SÍNCRONAS.

Nº DE PÓLOS	FREQUÊNCIA 25 Hz	FREQUÊNCIA 50 Hz	FREQUÊNCIA 60 Hz
2	1500 rpm.	3000 rpm.	3600 rpm.
4	750 rpm.	1500 rpm.	1800 rpm.
6	500 rpm.	1000 rpm.	1200 rpm.
8	375 rpm.	750 rpm.	900 rpm.
10	300 rpm.	600 rpm.	720 rpm.

Para máquinas que trabalham com baixa velocidade, como, por exemplo, uma turbina hidráulica (utilizada em usinas hidrelétricas) é necessário um grande número de pólos. Em casos onde se utilizam turbinas a vapor ou a gás, as máquinas trabalham com velocidades elevadas, neste caso, requerem um pequeno número de pólos.

Em geral, os geradores síncronos são máquinas trifásicas. Isto porque os sistemas trifásicos apresentam vantagem para a geração, transmissão e a utilização para potências elevadas. Já vimos que o sistema trifásico é um conjunto de três tensões monofásicas, defasadas em 120 graus entre si. Uma máquina elementar trifásica, de dois pólos e uma bobina por fase é apresentada na figura 31.

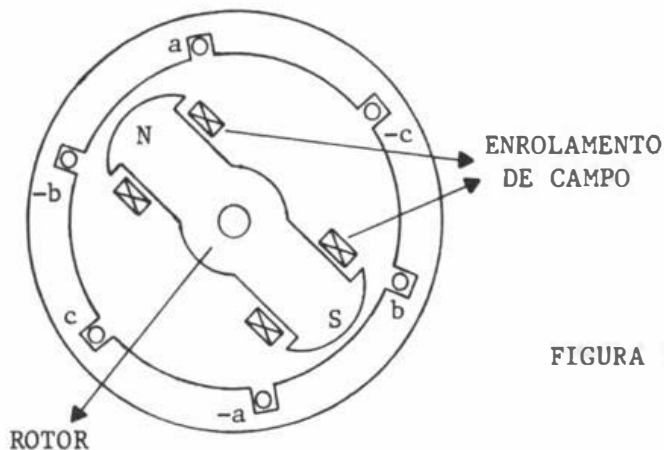


FIGURA 31

FUNCIONAMENTO BÁSICO DE UM GERADOR SÍNCRONO

Quando um gerador síncrono fornece potência elétrica para uma carga qualquer, a corrente na armadura criará uma onda de fluxo magnético (no entreferro) que irá girar em velocidade síncrona (velocidade de rotação do campo magnético na máquina). A corrente de campo também irá criar um campo magnético, reagindo com o fluxo criado pela corrente de armadura, onde obtemos um conjugado eletromagnético, oposto à rotação. A máquina motriz, que pode ser uma turbina a vapor, um motor, etc., deve aplicar um conjugado mecânico, de forma a sustentar a sua rotação. O conjugado eletromagnético, fisicamente, é o mecanismo pelo qual uma maior potência elétrica de saída exige maior potência mecânica de entrada.

MÁQUINAS DE INDUÇÃO

As máquinas síncronas de corrente alternada, que acabamos de ver, são excitadas com corrente contínua no enrolamento de campo e tensão alternada, aplicada ao enrolamento de armadura. São máquinas chamadas de dupla excitação, pois necessitam de duas fontes de tensão para operar normalmente. A máquina de indução difere das outras, pois os enrolamentos do estator e do rotor são excitados por meio de tensão alternada. A tensão aplicada ao enrolamento de armadura é de frequência constante e a tensão aplicada ao rotor é do tipo induzida, porém variável.

As máquinas de indução, raramente, são utilizadas como geradores, pois seu desempenho como gerador não é satisfatório para maioria das aplicações.

Vamos, a seguir, estudar os motores de indução.

MOTORES ELÉTRICOS

Fundamentos - Motores elétricos são máquinas destinadas a transformar energia elétrica em energia mecânica. Os tipos mais comuns de motores elétricos são: de indução, síncrono e de corrente contínua.

A seguir, faremos uma explanação básica sobre as principais características de cada um deles, como: detalhes de cons

trução, funcionamento básico, aplicações, etc.

MOTORES DE INDUÇÃO

Um dos tipos de motores mais usados é o de indução. Sob o ponto de vista de operação e trabalho é o mais simples de todos. O enrolamento de armadura do estator é idêntico ao de uma máquina síncrona C.A. e não requer nenhuma elaboração adicional. O rotor, porém, pode ser de dois tipos: gaiola de esquilo e rotor bobinado, mas o princípio de funcionamento de ambos é idêntico. A corrente alternada é fornecida diretamente ao estator e por indução ao rotor. Por este importante aspecto, as máquinas de indução são consideradas como transformadores generalizados, pois ocorre transformação de potência elétrica entre estator e rotor.

ROTOR GAIOLA DE ESQUILO

No rotor tipo gaiola de esquilo, os condutores do rotor são formados por barras de cobre e curto-circuitadas em cada terminal por anéis condutores contínuos, daí o nome de "gaiola de esquilo". As barras do rotor, tipo gaiola de esquilo, podem ser paralelas ao eixo do rotor ou ainda serem deslocadas segundo um pequeno ângulo com relação a ele. Este rotor que apresenta as vantagens de exigir pouca manutenção e de custar bem menos que um rotor bobinado, encontra-se ilustrado na figura 32.

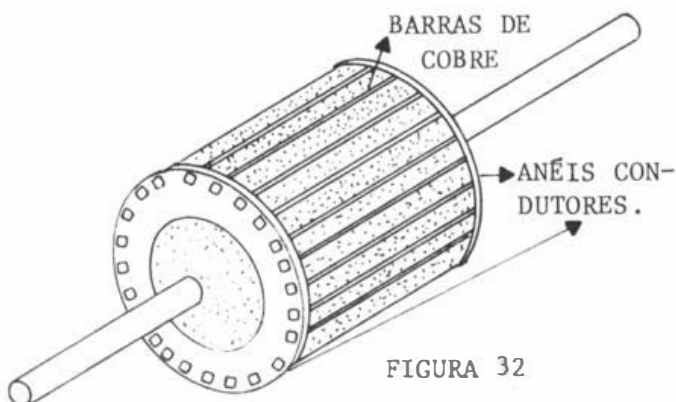
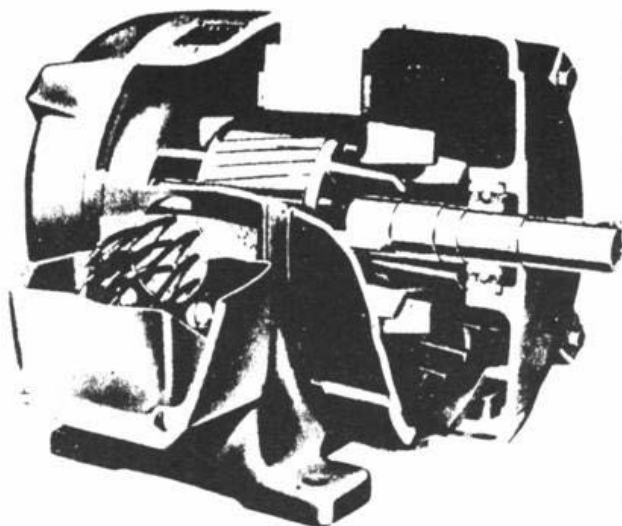


FIGURA 32



Vista em corte de um motor de indução com rotor em gaiola de esquilo.

FIGURA 33

ROTOR BOBINADO

Motores de rotor bobinado são aqueles cujos condutores de cobre são colocados em diversas ranhuras, isolados do núcleo de ferro. Cada terminal dos enrolamentos é levado a anéis coletores, isolados do eixo do rotor. Geralmente, um resistor variável é ligado aos anéis coletores por meio das escovas, de maneira a variar a resistência total do rotor por fase. São rotores que requerem manutenção periódica e de elevado custo, se comparado com o de gaiola de esquilo. Seu uso é próprio para os casos em que se exige elevado torque de partida, controle de velocidade, etc.

A figura 34 ilustra um esquema de um rotor bobinado.

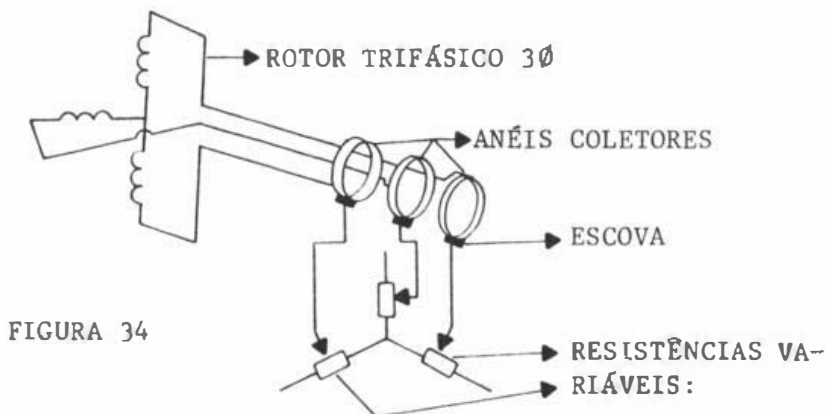


FIGURA 34

Na figura 35 temos um corte de um motor de indução trifásico a rotor bobinado (Genral Electric Company).

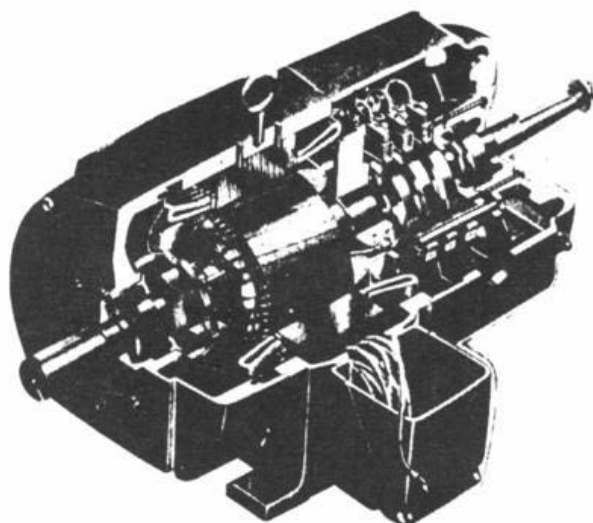


FIGURA 35

PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO

Ligando-se um motor de indução a uma rede trifásica, teremos o aparecimento de um campo magnético trifásico no estator, que irá induzir no rotor uma tensão. Esta tensão, por sua vez, cria correntes no circuito do rotor. Estas correntes induzidas pelo enrolamento do estator possuem valores elevados. São elas que geram no rotor um segundo campo magnético - que, juntamente com o campo do estator, produzem um conjugado, fazendo girar o eixo da máquina.

VIDA ÚTIL DO MOTOR

Sendo os motores de indução de construção simples, sua vida útil depende exclusivamente da isolação dos enrolamentos. Fatores como: vibrações, umidade, ambientes corrosivos, etc. podem afetar bastante o motor. A temperatura de trabalho é um fator preponderante, pois um aumento de 7 a 10 graus na temperatura de isolação é suficiente para reduzir sua vida pela metade. Daí a necessidade da manutenção constante, para evitar

a destruição do isolante e, conseqüentemente, vir a queimar-se o enrolamento.

O limite de temperatura para um motor é com relação ao ponto mais quente da isolação e não necessariamente ao enrolamento todo. Basta que haja um ponto mais fraco no interior de uma bobina para que o enrolamento fique inutilizado.

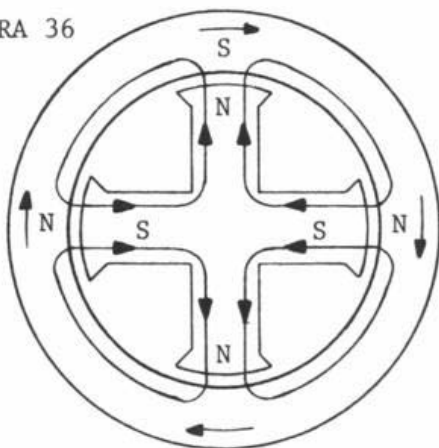
MOTORES SÍNCRONOS

A construção de um motor síncrono é semelhante à do gerador síncrono trifásico. O estator possui um enrolamento trifásico e o rotor um enrolamento de campo alimentado com corrente contínua.

DETALHES E FUNCIONAMENTO DO MOTOR SÍNCRONO

Uma corrente trifásica, percorrendo os condutores da armadura do estator, produz um campo magnético uniforme que gira a uma velocidade W_s (velocidade síncrona). Esta velocidade é determinada pelo número de pólos e pela frequência da corrente de armadura, expressa pela seguinte equação: $W_s = 120f/P$, fórmula idêntica, como já vimos, à dos geradores síncronos. A relação existente entre o campo magnético do estator e os pólos do rotor é mostrada pela figura 36.

FIGURA 36

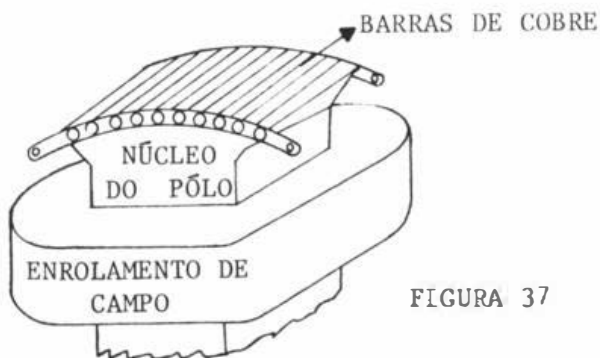


$\overrightarrow{S}$ e $N \downarrow$ indicam a polaridade do campo magnético do estator.

Os pólos norte e sul do rotor, girando a uma velocidade síncrona, entram em sincronismo com o campo magnético, produzido pela corrente trifásica da armadura do estator. Desta forma, um pólo norte (N) do rotor estará em sincronismo com um pólo sul do campo magnético do estator e vice-versa. Ambos girando em sincronismo no sentido horário, à velocidade síncrona.

Se colocarmos uma carga no eixo do motor síncrono, um contratorque será criado de forma a atrasar o rotor momentaneamente, mas ainda continuará girando na mesma velocidade do campo magnético do estator. Todavia, se ocorrer um torque muito elevado que supere o torque máximo desenvolvido, o rotor sairá de sincronismo e o motor síncrono irá parar. Portanto, um motor deste tipo só irá funcionar à velocidade síncrona, do contrário, não funcionará.

Um motor síncrono, por si, não tem partida própria, exigindo, então, outros meios para levá-lo à velocidade síncrona. Para isto, geralmente, é inserido nas faces polares do rotor um enrolamento em gaiola, chamado de enrolamento amortecedor. A figura 37 ilustra um enrolamento amortecedor com barras de cobre embutidas na superfície da face polar e curto-circuitadas nas extremidades por meio de anéis.



Desta forma, o rotor, com o enrolamento de campo não excitado, irá próximo à velocidade síncrona, como se fosse um motor de indução. Se a carga acoplada não for muito grande, o motor entrará em sincronismo, logo que o enrolamento de campo for energizado por uma fonte de corrente contínua.

Este é o método de partida mais comum para os motores -

síncronos, pois é simples e não requer o uso de máquinas auxiliares. Outros métodos existem, porém, não iremos abordá-los, por tratar-se de assunto específico dos motores síncronos.

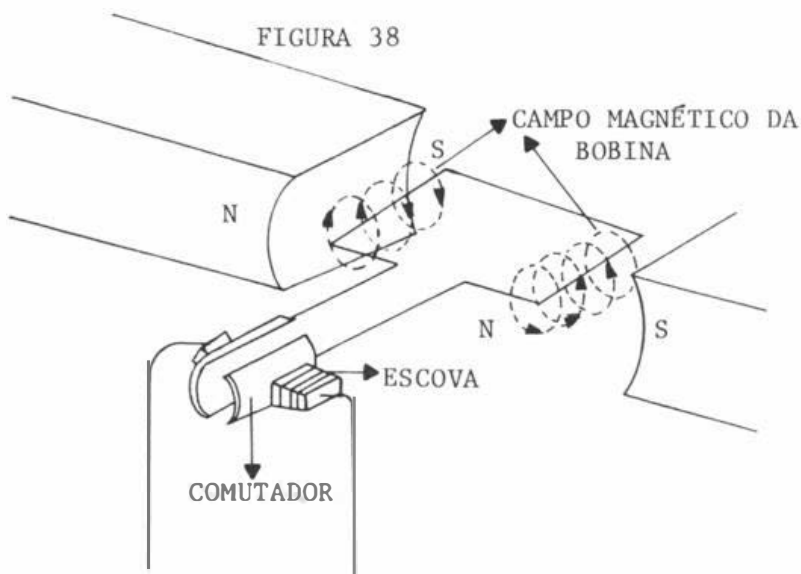
MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

A construção dos motores de corrente contínua é idêntica à dos geradores de CC, descritos anteriormente.

A corrente alternada é fornecida ao enrolamento de armadura e a corrente contínua, ao enrolamento de campo. Para que se produza um conjugado eletromagnético, tanto o campo do estator como o do rotor devem ser constantes e estarem parados um com relação ao outro. A velocidade em rpm (rotação por minuto) é determinada em função do número de pólos e da frequência da corrente de armadura (como a dos geradores síncronos).

Em um motor, o conjugado eletromagnético está na direção de rotação de máquina.

Vamos considerar um motor C.C. elementar, como indica a figura 38.



Vamos supor que na figura 38 haja a circulação de corrente contínua percorrendo a bobina, gerando um campo magnético nos extremos da mesma. Haverá, então, uma atração entre os pólos norte da bobina e sul do campo magnético, fazendo com que a bobina gire.

Observando a figura 39, onde as escovas, estão tocando os dois segmentos do comutador ao mesmo tempo, notaremos que não há circulação de corrente pela bobina, portanto não ocorrerá força de rotação. Como a bobina está em movimento, a sua inércia faz com que a mesma continue girando, de tal forma que a bobina passe para outra posição e o comutador irá inverter o sentido da corrente que a atravessa. A polaridade do campo magnético da bobina se inverte e ela continua girando e a cada giro de mais de 180°, o mesmo processo de comutação é repetido. A perspectiva de um motor de C.C. com um simples comutador é ilustrada na figura 40. Em motores maiores, o ímã permanente extremo é substituído por eletroímãs. Quando a bobina do rotor gira, sua corrente é invertida periodicamente pela ação dos segmentos do comutador, mantendo, assim, um giro constante.

FIGURA 39

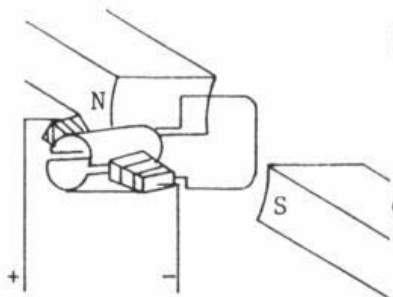
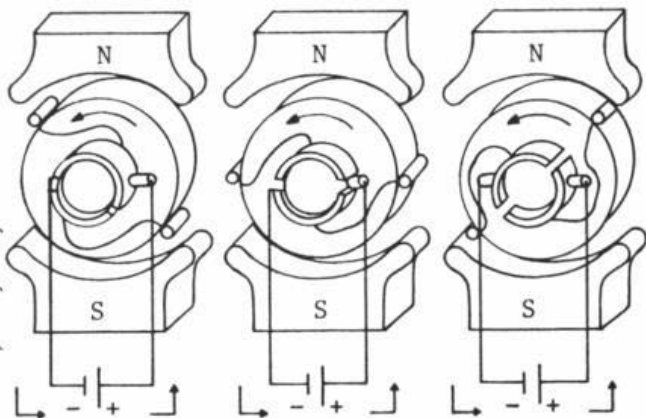


FIGURA 40



Este é o princípio básico de comutação dos motores de corrente contínua.

A figura 41 ilustra o corte de motor de C.C. típico de média potência.

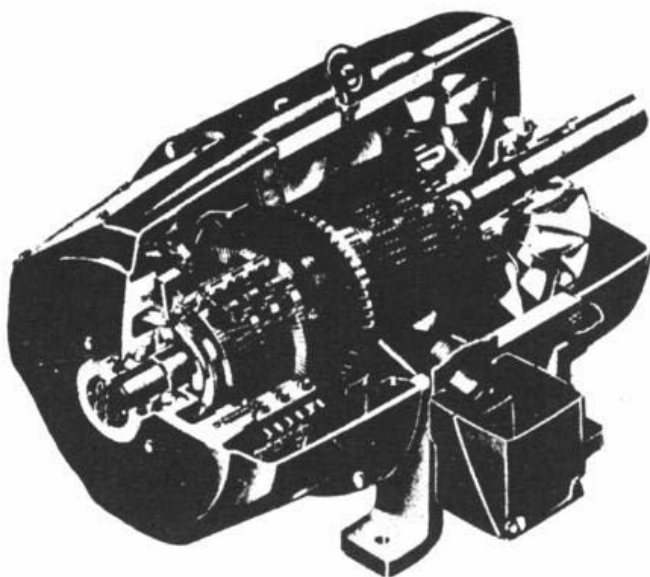


FIGURA 41

MOTORES SÉRIE

São tipos de motores que pode funcionar tanto em corrente alternada como em corrente contínua, desde que os núcleos do estator e do rotor sejam laminados. Um motor série monofásico é comumente chamado de motor universal. Este tipo de motor é próprio para aparelhos leves e que exigem alta velocidade, como: liquidificador, aspirador de pó, ferramentas portatéis, etc.

Os motores-série CA. monofásicos, de potência mais elevada, foram quase que totalmente superados pelos motores de indução e síncronos, por serem mais simples. Todavia, nas locomotivas elétricas, ainda se usam os motores-série. A capacidade de dos motores deste tipo varia desde algumas centenas até acima de mil HP.

Para que os motores-série funcionem em corrente alternada, são projetados com alguns requisitos importantes, como:

a) Estrutura do campo constituída de laminações mais finas, para reduzir as perdas por correntes parasitas que são

bem elevadas em C.A.

b) Mais condutores na armadura e mais segmentos no comutador, de forma a compensar o decréscimo que ocorre com o fluxo magnético do campo.

c) Um número maior de pólos para que haja um torque mais elevado.

d) Um número menor de espiras no campo, para que se reduzam as perdas e a queda de tensão reativa.

Existem ainda outras modificações que podem ser efetuadas nos motores-série, quando funcionam à C.A. e o funcionamento será idêntico à C.C.

MOTOR STEPPER

Muitas vezes, em computação, há necessidade de controlar o movimento de algum objeto pelo computador. Trata-se de um sistema altamente sofisticado e oneroso. Uma maneira simples e barata de se conseguir isto é através de um motor stepper.

Devemos, portanto, entender como trabalham os motores stepper e a maneira de operá-los corretamente. As suas aplicações geralmente se resumem em dois tipos de motores: o de magneto permanente e o de relutância variável (relutância vem a ser a oposição que um material apresenta à passagem de linhas de força).

FUNDAMENTOS BÁSICOS

Um motor stepper difere da maioria dos motores que estudamos até agora, pois possui algumas características específicas: tem a capacidade de girar em ambas as direções, para a excitação de entrada, o eixo se movimenta a incrementos angulares precisos. Em cada passo, ou movimento, o eixo do rotor vai para uma posição conhecida. Desta forma, permite o controle da posição, velocidade, distância e direção.

Os motores stepper são construídos de acordo com um ângulo de passo particular, podendo operar com a metade do ângulo de passo, porém com torque reduzido.

A cada movimento preciso do eixo do rotor determinando uma posição bem definida, chamamos passo do rotor.

Os motores stepper, em geral, são controlados por uma fonte de potência CC e por circuitos lógicos.

MOTOR STEPPER DE MAGNETO PERMANENTE

Os motores stepper de magneto permanente têm seu princípio de funcionamento baseado na lei do magnetismo, onde pólos iguais se repelem e pólos diferentes se atraem. O rotor deste tipo de motor consiste de ímãs orientados axialmente em cada uma de suas extremidades, de forma que o lado norte superior estará sempre defasado de 180°, em relação ao lado sul inferior do rotor. O estator também possui polaridade que é gerada através de eletroímãs. O número de pólos do rotor é diferente do número de pólos do estator. Desta forma, em nenhuma posição poderão estar alinhados entre si. Devido a este fato, temos uma previsão precisa do movimento do rotor, mesmo em baixa rotação.

Para entendermos e visualizarmos a sequência de giro e a energização do motor, vamos, inicialmente, considerar a figura 42, mostrada logo, a seguir.

Para compreendermos a sequência de energização, vamos considerar, como sul, as extremidades do rotor, como indica a figura 42. Se o pólo A do estator for energizado como norte e o pólo C como sul (ver sequência I) e, com os pólos B e D desenergizados, o rotor se alinhará com o pólo A do estator, como mostra a sequência I. A seguir, o pólo B é energizado como pólo norte e o pólo D, como sul. E os pólos A e C do estator desativados. Assim, o rotor irá girar no sentido horário, alinhando-se com o pólo B do estator, como indica a sequência II.

Para darmos continuidade à rotação do rotor, invertamos a corrente dos pólos A e C e desativamos os pólos B e D. Com isto, o rotor se alinhará com o pólo C do estator, como na sequência III. Para o próximo passo ou giro do rotor, a corrente aplicada aos pólos B e D deverá ser de polaridade contrária à anterior, como mostra a sequência IV.

A próxima etapa será a aplicação de corrente aos pólos A e C, como mostramos na sequência I. Repetindo-se continuamente o processo, teremos o giro do motor no sentido horário.

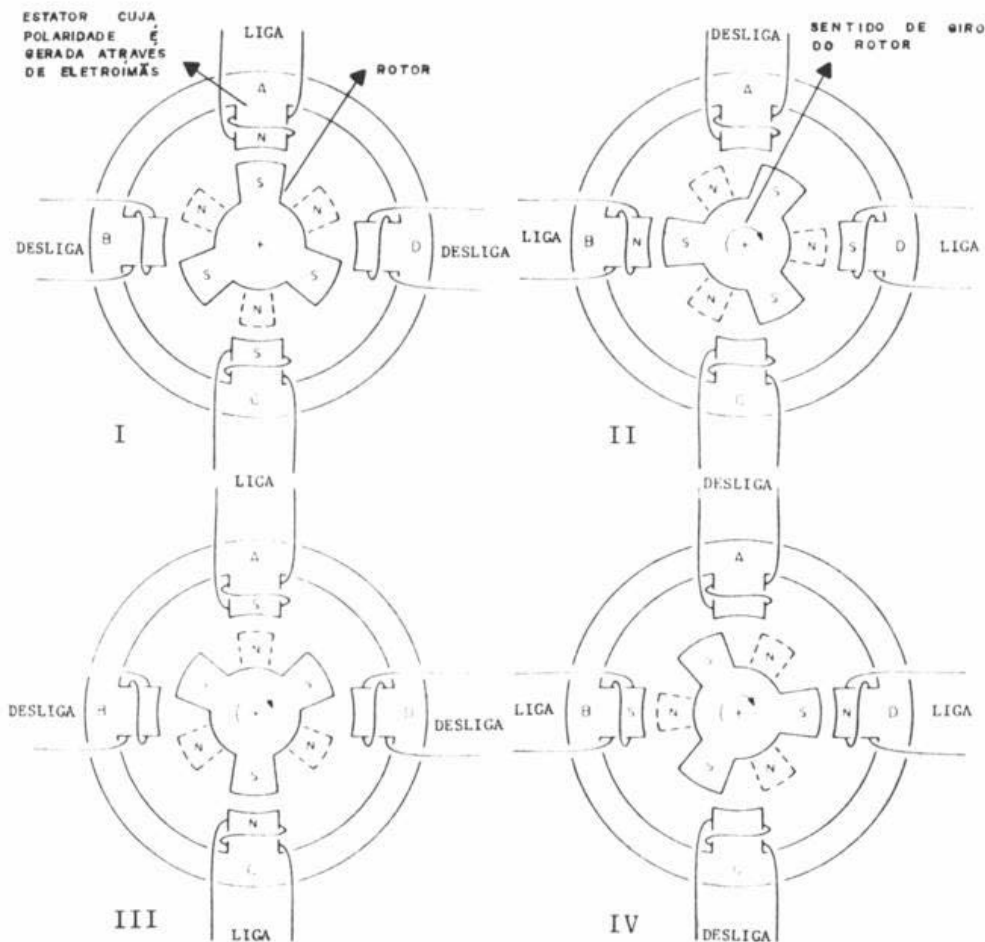


FIGURA 42

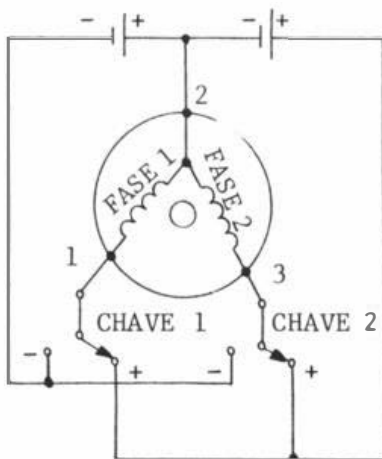
Se quisermos que o rotor gire no sentido anti-horário, basta invertermos o processo descrito anteriormente.

O número de passos, ou giros do rotor, depende do número de enrolamentos dos pólos do estator. Estes enrolamentos estão ligados internamente, mas três a oito terminais são leva-

dos para fora, de maneira que possamos efetuar a ligação externa. Um diagrama simplificado para um motor com três terminais externos, com a sequência de passos para rotação horária e anti-horária, é mostrado na figura 43.

PASSO OU POSIÇÃO	SENTIDO HORÁRIO		SENTIDO ANTI- HORÁRIO	
	CHAVE 1	CHAVE 2	CHAVE 1	CHAVE 2
1	desligada	-	desligada	-
2	+	desligada	-	desligada
3	desligada	+	desligada	+
4	-	desligada	+	desligada

FIGURA 43



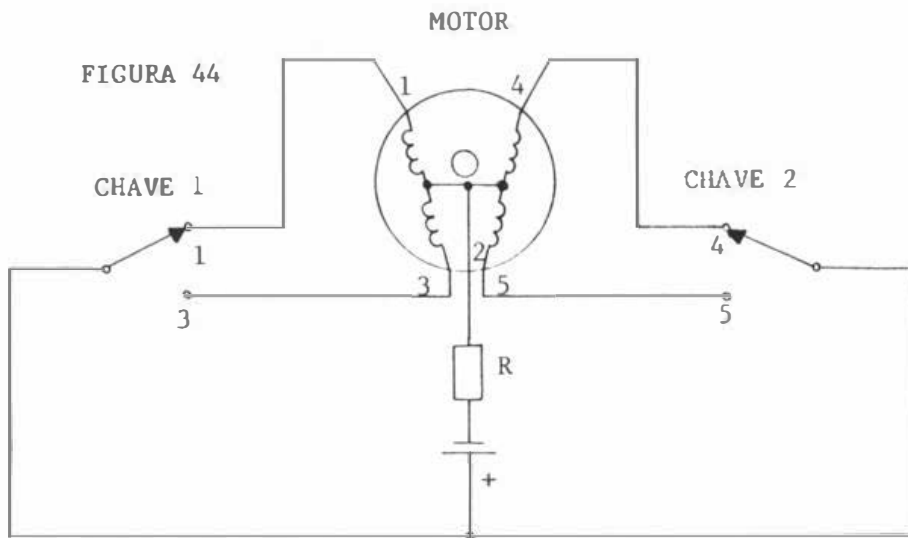
MOTOR STEPPER BIFILAR

O motor stepper bifilar é uma variação especial do stepper de magneto permanente. O bifilar possui em cada pólo dois enrolamentos, ao invés de um só como o motor stepper de magneto permanente (padrão).

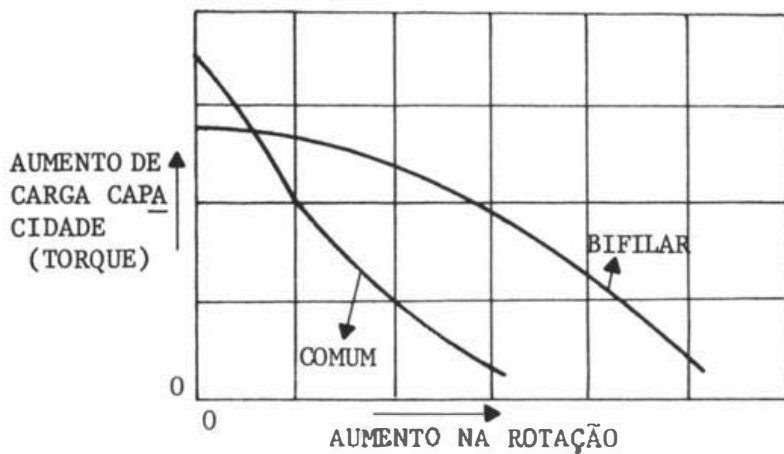
O fio é de bitola mais fina, resultando em uma resistência mais alta, desta forma, o motor terá uma constante de tempo mais baixa e um desempenho melhor nas altas velocidades.

O motor bifilar apresenta outra vantagem sobre o padrão: pode ser operado com uma única fonte. A figura 44 tra o diagrama de conexões do motor bifilar.

PASSO OU POSIÇÃO	CHAVE 1	CHAVE 2
1	1	5
2	1	4
3	3	4
4	3	5
1	1	5

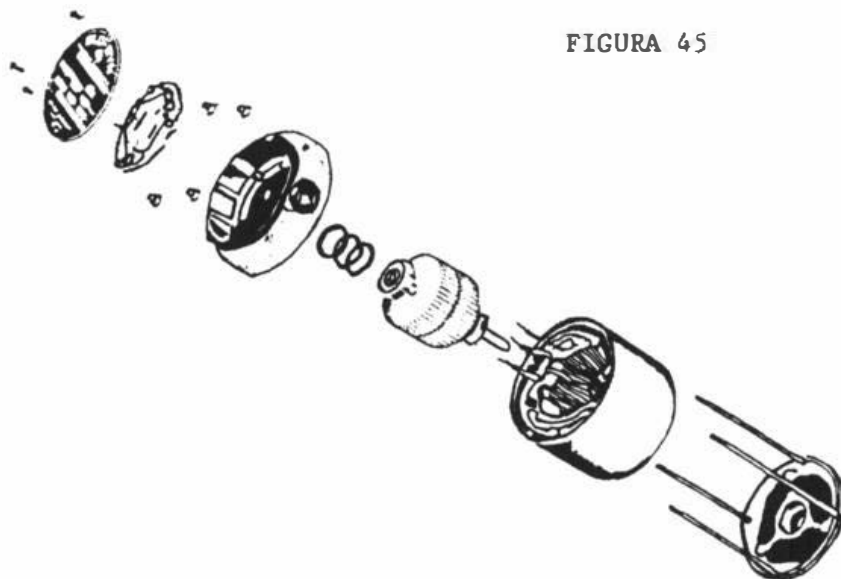


O gráfico, a seguir, ilustra o desempenho dos motores: bifilar e de 3 terminais (magneto permanente). O motor comum (3 terminais) tem maior capacidade nas baixas rotações, porém com o aumento de velocidade o torque cai rapidamente. Notamos também, pelo gráfico, que o motor bifilar pode girar em alta rotação para as mesmas condições de carga/giro.



A figura 45 ilustra um motor stepper de ímã permanente com suas partes principais.

FIGURA 45



MOTOR STEPPER DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

A principal diferença entre o motor de magneto permanente e o de relutância variável é que este último não tem magneto no rotor. Desta forma, o rotor não será magnetizado e sua posição não mais dependerá da polaridade de excitação do estator, como mencionamos anteriormente.

Conseqüentemente, é necessária uma única fonte de tensão. Como não temos magneto no rotor, após o desligamento do motor, não teremos magnetismo residual ou remanente para segurar o rotor em uma posição.

Uma comparação entre os motores stepper tipo relutância variável e o magneto permanente mostra que este último possui magnetismo residual, devido ao magneto no rotor. E, quando - desligado, permanece em uma posição bem definida. Possui ainda uma resposta em corrente mais rápida que o tipo relutância variável, devido a sua indutância que é menor. Apesar dessas características, possui uma inércia mais alta e, em conseqüência disso, uma resposta mecânica mais vagarosa. Dependendo da aplicação, ambos os motores têm suas vantagens, o que determina o tipo e o tamanho do motor stepper a ser utilizado.



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-15

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

1) Denomina-se gerador de eletricidade:

- a) a máquina que transforma corrente contínua em corrente alternada;
- b) a máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica;
- c) a máquina que transforma energia mecânica em energia e-létrica;
- d) a máquina que transforma corrente alternada em corrente pulsante.

- b) geralmente, as máquinas de indução não são utilizadas - como geradores, devido a um desempenho não satisfatório;
 - c) nos motores tipo gaiola de esquilo, os condutores do rotor são formados por barras de silício;
 - d) os motores-série, também conhecidos, como motores universais, só trabalham em corrente contínua.
- 6) Um gerador síncrono de 20 pólos, foi projetado para operar na Usina Hidrelétrica de Itaipu, sabendo-se que a freqüência que vai ser utilizada é de 50 hz. Pede-se o valor da velocidade síncrona (W_s) em rpm:
- a) $W_s = 300$ rpm;
 - b) $W_s = 3000$ rpm;
 - c) $W_s = 48$ rpm;
 - d) $W_s = 480$ rpm.
- 7) Os motores de indução são de simples construção e sua vida útil depende de muitos fatores. Assinale a alternativa abaixo que indica alguns fatores que afetam a vida útil de um motor de indução:
- a) enrolamento distribuído, baixo consumo;
 - b) vibrações, umidade, ambiente corrosivos e temperatura - de trabalho acima do normal;
 - c) vibrações, baixo consumo, temperatura de trabalho abaixo da temperatura ambiente;
 - d) todas as alternativas anteriores estão incorretas.
- 8) Aponte uma das vantagens que o motor bifilar apresenta, com relação ao de magneto permanente:

- a) não pode ser utilizado em alta velocidade;
 - b) pode ser operado com uma única fonte;
 - c) não pode ser operado com uma só fonte;
 - d) as alternativas a e b estão corretas.
- 9) O fato do motor stepper de relutância variável não possuir magneto no rotor, implica que:
- a) o rotor não será magnetizado e sua posição não dependerá da polaridade de excitação do estator;
 - b) o rotor sempre permanece em uma dada posição desejada;
 - c) o motor adquire altas velocidades com frequência relativamente baixa;
 - d) todas as alternativas anteriores estão corretas.
- 10) Assinale a alternativa incorreta com relação aos tipos de motores stepper:
- a) o rotor dos motores stepper de magneto permanente consiste de bobinas, ligadas entre si e não possuem núcleo;
 - b) em geral são controlados por uma fonte de potência CC e circuitos lógicos;
 - c) o motor stepper bifilar é uma variação especial do tipo magneto permanente;
 - d) o motor stepper tipo magneto permanente tem maior torque nas baixas rotações.

LIÇÃO E-16

TRANSFORMADORES

Vamos estudar nesta lição a teoria dos circuitos acoplados magneticamente, dando ênfase especial ao funcionamento dos transformadores. Podemos definir o transformador como sendo o conjunto de dois circuitos eletricamente distintos e concatenados magneticamente entre si. Os transformadores utilizam o fenômeno da mútua indução para realizar a transferência de potência elétrica de um circuito para outro. Os fenômenos da indução eletromagnética foram estudados na lição E-6. Convém, ao aluno, recordar rapidamente os conceitos já abordados. Os transformadores são amplamente utilizados em circuitos eletrônicos que exigem potência e corrente baixas para casamento de impedância de uma fonte à carga, de forma a permitir a máxima transferência de potência, para o isolamento entre circuitos, etc.

Os transformadores são dispositivos simples que incluem dois ou mais enrolamentos, acoplados por um núcleo de material ferromagnético, como indica a figura 1.

Os enrolamentos, que ligamos à rede de corrente alternada, chamamos de enrolamento primário, ao outro, chamamos de enrolamento secundário. O núcleo representa o meio de concatenação entre os dois enrolamentos.

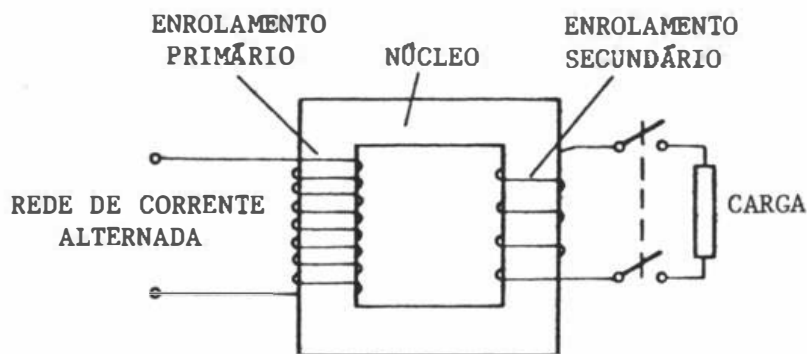
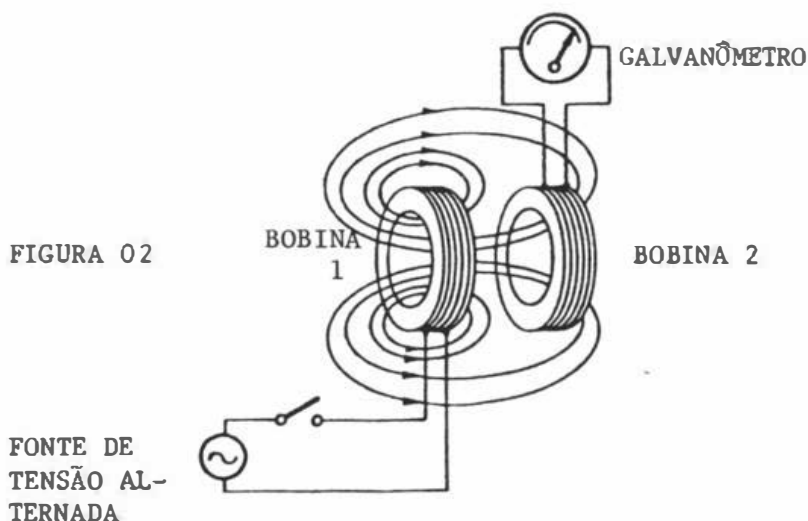


FIGURA 01

Estudamos, na lição sobre indução eletromagnética, que, quando colocávamos duas bobinas próximas uma da outra e fazíamos percorrer corrente alternada por uma delas, tínhamos o aparecimento de um campo magnético variável que induzia na outra bobina uma corrente elétrica, denominada de corrente induzida (ver figura 2). A partir deste fenômeno é que se baseia o funcionamento de um transformador.



Para analisarmos o seu princípio de funcionamento, é necessário considerarmos um transformador ideal, no qual sejam

nulas as resistências elétricas dos enrolamentos e as perdas no ferro. Além disso, o concatenamento magnético deve ser perfeito, isto é, sem dispersões.

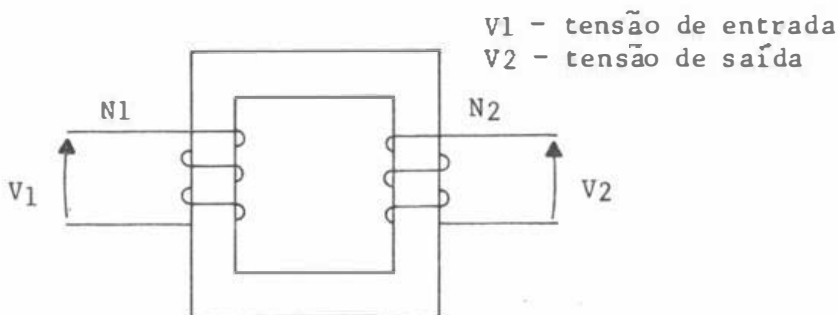
O enrolamento primário recebe energia de uma fonte alternativa que pode ser um gerador ou a rede de corrente alternada. E, dependendo do grau de acoplamento magnético, esta energia é transferida do enrolamento primário para o secundário. Se os dois circuitos estiverem fracamente acoplados, como é o caso de um transformador com núcleo de ar, somente uma pequena quantidade de energia será transferida do primário para o secundário. Se as duas bobinas ou circuitos estiverem enrolados sobre um núcleo de ferro, ou sobre outro material ferro magnético, neste caso, estarão fortemente acoplados, devido à alta permeabilidade do ferro. E quase toda a energia recebida pelo enrolamento primário é transferida ao secundário. O funcionamento do transformador é simplesmente uma utilização do conceito de indutância mútua.

EFEITO DA CORRENTE NO SECUNDÁRIO.

TRANSFORMADOR IDEAL

Vamos considerar um transformador ideal com um enrolamento primário de N_1 espiras e um enrolamento secundário de N_2 espiras, mostrado na figura 3.

FIGURA 03



Um transformador ideal transforma as tensões na relação direta do número de espiras dos respectivos enrolamentos. Po-

demos então definir a seguinte relação:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

É através desta relação que, a partir da tensão V_1 aplicada no primário, determinamos a tensão do secundário de um transformador. Para isso devemos conhecer a relação de espiras do mesmo.

APLICAÇÃO

Podemos ainda simular um transformador ideal pelo esquema da figura 4.

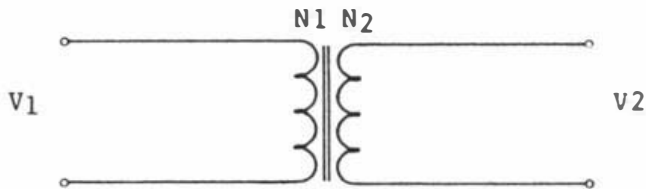


FIGURA 04 •

Considere um transformador ideal com núcleo de ferro, com 200 espiras no enrolamento primário e 1000 espiras no enrolamento secundário. A tensão de entrada é $V_1 = 110 \text{ V}$.

Deseja-se conhecer o valor da tensão de saída no transformador.

$$N_1 = 200 \text{ esp.}$$

$$N_2 = 1000 \text{ esp.}$$

$$V_1 = 110 \text{ volts}$$

Sabemos que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

logo:

$$V_2 N_1 = V_1 N_2$$

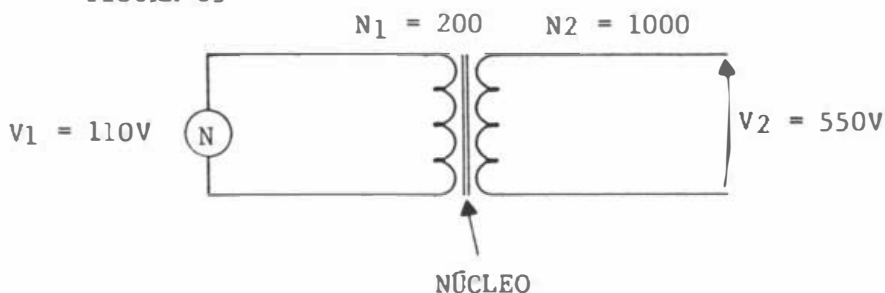
$$V_2 = \frac{V_1 N_2}{N_1}$$

substituindo os valores, temos:

$$V_2 = \frac{110 \times 1000}{200} = 550 \text{ volts}$$

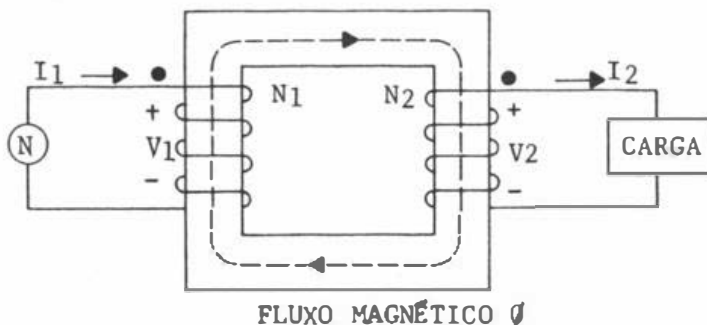
O nosso transformador será aquele apresentado pela figura 5.

FIGURA 05



Vamos considerar uma carga ligada aos terminais do transformador, conforme indica a figura 6.

FIGURA 06



Os pontos em negrito indicam os terminais de polaridade, isto é, se seguirmos ao longo dos enrolamentos primário e se

cundário, começando pelos seus terminais marcados, verificaremos que ambos os enrolamentos envolvem o núcleo na mesma direção, com respeito ao fluxo magnético Φ .

Isto significa que as tensões V_1 e V_2 estão em fase.

Ao ligarmos a carga, teremos a circulação de uma corrente I_2 no secundário. Esta corrente elétrica é determinada pela tensão do secundário e pelo valor da impedância de carga. A relação das correntes do primário e do secundário depende diretamente das tensões de entrada e de saída do transformador e, conseqüentemente, da relação de espiras do mesmo. Como estamos tratando de transformadores ideais, a potência instantânea de entrada $V_1 I_1$ se iguala à potência instantânea de saída $V_2 I_2$.

Portanto:

$$P_1 = P_2$$

Teremos então:

$$P_1 = V_1 I_1 = P_2 = V_2 I_2$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad \text{(I)}$$

Temos ainda a seguinte relação, deduzida há pouco:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{(II)}$$

Igualando I e II, obteremos:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{(III)}$$

Com as relações I, II e III podemos calcular parâmetros importantes de um transformador.

APLICAÇÃO

Considere, por exemplo, o transformador ideal esquematizado na figura 7, onde o secundário alimenta uma carga resis-

tiva R_2 . Sabe-se que $N_1 = 500$ espiras, $N_2 = 50$ espiras, $I_1 = 1$ ampère e $V_1 = 220$ volts. Pede-se o valor da corrente I_2 que circula pelo enrolamento secundário, assim como a tensão do secundário V_2 .

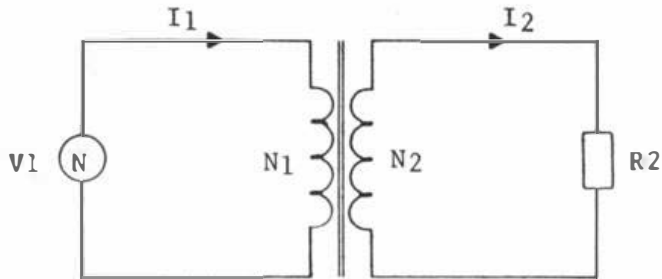


FIGURA 07

Dados :

$$N_1 = 500 \text{ esp.}$$

$$N_2 = 50 \text{ esp.}$$

$$V_1 = 220 \text{ volts}$$

$$I_1 = 1 \text{ ampère.}$$

Pede-se:

$$I_2, V_2$$

Da relação II, temos:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \rightarrow V_2 = \frac{V_1 N_2}{N_1} \rightarrow V_2 = \frac{220 \times 50}{500} \rightarrow V_2 = 22 \text{ volts (tensão no secundário do transformador ideal).}$$

Da relação III, temos:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \rightarrow I_2 = \frac{N_1 I_1}{N_2}$$

$$I_2 = \frac{500 \cdot 1}{50} = 10A$$

Podemos conferir os cálculos efetuados, utilizando a relação I.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} + \frac{220}{22} = \frac{10}{1} + 10 = 10,$$

o que comprova a exatidão dos cálculos.

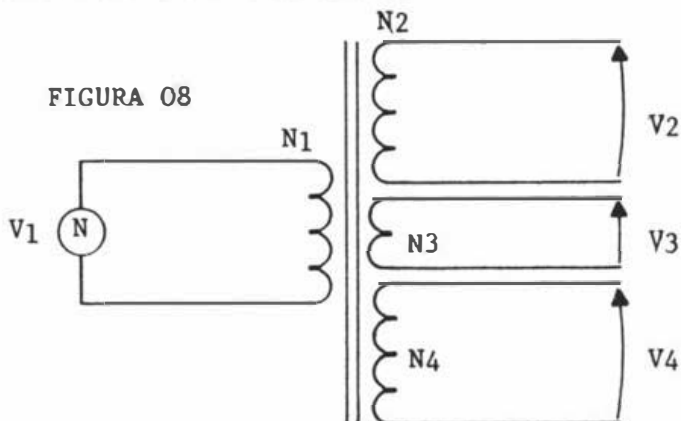
TRANSFORMADORES DE MÚLTIPLOS ENROLAMENTOS

Até agora, vimos transformadores de dois enrolamentos, porém é muito comum também o uso do transformador de 3 ou mais bobinas, para interligar vários circuitos, que podem ter diferentes níveis de tensão. Além do mais, o emprego de um transformador de múltiplos enrolamentos é mais eficiente e torna-se mais econômico do que empregar vários transformadores de dois enrolamentos para a mesma função.

Transformadores de distribuição, utilizados para alimentar residências, geralmente possuem dois secundários de 120 volts, ligados em série. Desta forma, circuitos de iluminação, em geral, são ligados através de cada um dos enrolamentos de 120 volts, enquanto que chuveiros elétricos, aquecedores de água e outras cargas similares, são supridas com os 240 volts dos secundários do transformador, ligados em série.

Em equipamentos eletrônicos, utilizam-se freqüentemente, os transformadores com um primário e dois secundários.

Veremos, a seguir, um transformador com um primário e três secundários. Veja a figura 8.



Sabendo-se que $V_1 = 110V$, $V_3 = 220V$, $V_4 = 440V$, $N_1 = 100$ espiras e $N_2 = 200$ espiras, calcule o valor de V_2 , N_3 e N_4 .

O processo de cálculo é o mesmo descrito para o transformador de dois enrolamentos.

Parâmetros dados:

$$V_1 = 110V$$

$$V_3 = 220V$$

$$V_4 = 440V$$

$$N_1 = 100 \text{ espiras}$$

$$N_2 = 200 \text{ espiras}$$

Pede-se:

$$V_2$$

$$N_3$$

$$N_4$$

Sabemos que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \rightarrow \frac{110}{V_2} = \frac{100}{200} \rightarrow V_2 = \frac{110 \times 200}{100} = 220V$$

$$V_2 = 220V$$

Da mesma forma,

$$\frac{V_1}{V_3} = \frac{N_1}{N_3} \rightarrow N_3 = \frac{N_1 V_3}{V_1} = \frac{100 \times 220}{110} = 200$$

$$N_3 = 200 \text{ espiras.}$$

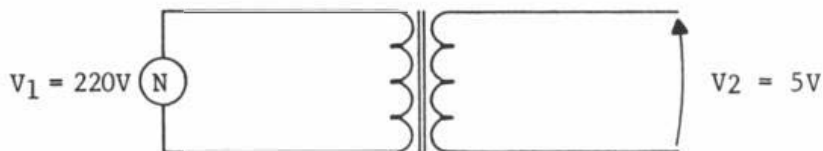
$$\frac{V_1}{V_4} = \frac{N_1}{N_4} \rightarrow N_4 = \frac{N_1 V_4}{V_1} = \frac{100 \times 440}{110} = 400$$

$$N_4 = 400 \text{ espiras.}$$

Às vezes, conhecemos a tensão de saída e de entrada de um transformador, mas não temos o número de espiras do primário nem do secundário. Para resolver problemas dessa natureza, vamos propor e resolver o seguinte caso:

Deseja-se enrolar um transformador que vai ser utilizado em um circuito eletrônico, com tensão de 5 volts na saída. Sabe-se que a rede local é de 220 volts. Pede-se o número de espiras de ambos os enrolamentos primário e secundário.

O desenho esquemático deste transformador está mostrado na figura a seguir.



Vamos, inicialmente, determinar a relação de espiras entre o primário e o secundário, assim:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{220}{5} = 44$$

Temos então a relação do número de espiras do transformador:

$$\frac{N_1}{N_2} = 44.$$

Caso se queira 1000 espiras no primário, devemos ter no secundário:

$$N_1 = 1000 \text{ esp.} \quad \frac{N_1}{N_2} = 44 \rightarrow N_2 = \frac{1000}{44} = 22,7$$

Aproximando, temos:

$$N_2 \approx 23 \text{ espiras.}$$

TRANSFORMADOR REAL

Em um transformador real, levamos em conta uma teoria - mais completa, incluindo os efeitos das resistências dos enrolamentos, da dispersão magnética e da corrente de excitação. A corrente de excitação é a responsável pelas perdas no ferro do transformador (Foucault e histerese). As capacitâncias dos enrolamentos têm efeitos acentuados, principalmente em transformadores que operam em frequência acima da faixa de áudio, ou em condições transitórias, onde temos variações bruscas e rápidas, tais como os transformadores de pulso. A análise dos problemas em alta frequência, que acabamos de expor, está - além dos nossos objetivos, assim como as capacitâncias dos

enrolamentos que mencionamos há pouco. Na lição E-6 (Indução Eletromagnética), tratamos de várias perdas ocorridas nas bobinas. Vamos fazer o mesmo para os transformadores.

PERDAS NO COBRE

Sabemos que todo condutor apresenta uma resistência à passagem de corrente elétrica. O mesmo ocorre nos enrolamentos do transformador. Esta resistência à passagem de corrente faz com que parte da potência, entregue ao transformador, seja dissipada em forma de calor (efeito joule). Tais perdas, designadas como perdas no cobre, podem ser calculadas da seguinte maneira:

$$P = R.I^2.$$

onde:

P = potência perdida sob a forma de calor;

I = corrente elétrica que passa pelo fio;

R = resistência do fio.

Esta potência perdida nos enrolamentos do transformador depende do valor da resistência do fio que, por ser de cobre (resistividade baixa), deve colaborar para a diminuição da resistência, pois quanto maior a resistividade (ρ), maior o valor da resistência do fio.

A resistência elétrica do fio pode ser calculada através da fórmula abaixo:

onde:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

ρ - resistividade (letra grega Rô)

l - comprimento do fio

S - seção reta do fio.

A potência perdida sob a forma de calor varia com o quadrado da corrente elétrica. Por isto, é necessária a escolha adequada do fio para enrolar a bobina. A potência dissipada no cobre representa desperdício de energia e pode reduzir a permeabilidade magnética do material empregado no núcleo, feito, geralmente, de ferro, devido ao aquecimento que lhe é transferido, quando o fio é percorrido pela corrente, elevando assim as perdas no ferro. Como todo transformador tem, no míni

mo, dois enrolamentos (com exceção do auto-transformador que estudaremos mais adiante), devem-se considerar tais perdas em todos os enrolamentos.

PERDAS NO FERRO

Com relação aos transformadores, as perdas no ferro podem ser subdivididas em quatro:

- a) perdas devido à relutância do núcleo;
- b) perdas por histerese;
- c) perdas por correntes parasitas (perdas foucault);
- d) perdas por saturação do núcleo.

RELUTÂNCIA DO NÚCLEO

Devido à relutância existente nos materiais ferromagnéticos, que dificulta a passagem das linhas de fluxo magnético, ocorre uma perda de energia através do núcleo.

Para reduzirmos estas perdas, basta colocarmos, como núcleo, um material de permeabilidade magnética bem elevada, de modo a facilitar a passagem do fluxo magnético o máximo possível, reduzindo, assim, as perdas, visto que é impossível eliminá-las.

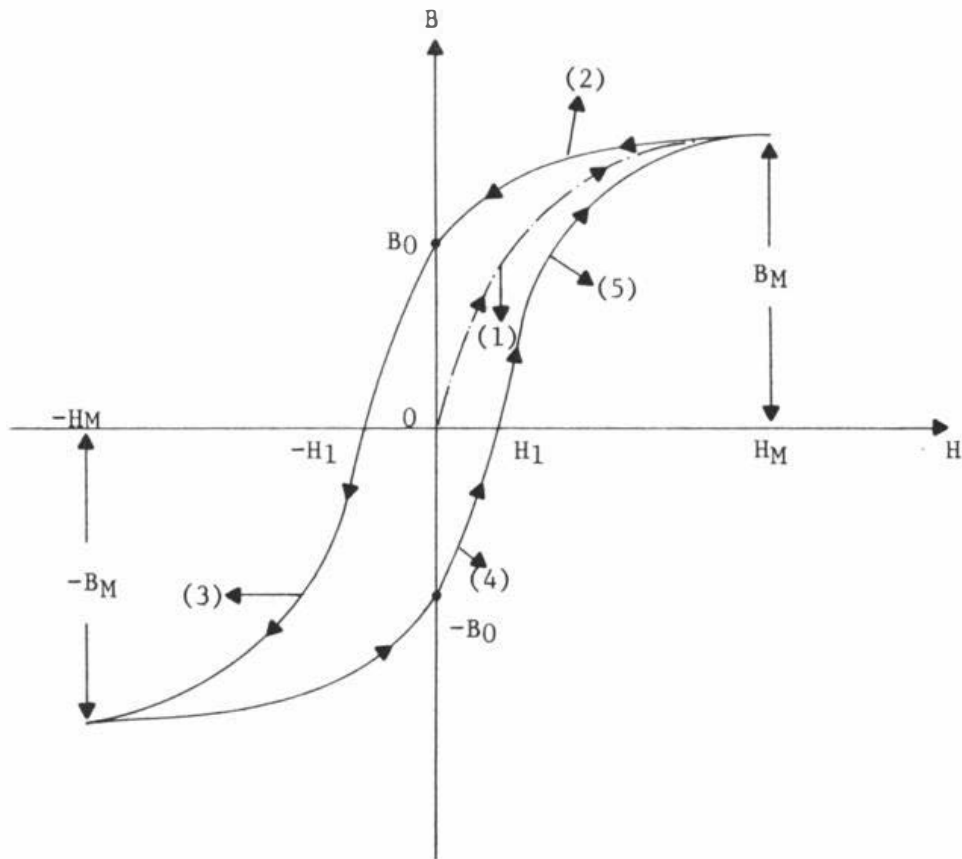
HISTERESE

As características dos materiais ferromagnéticos não podem ser descritas apenas por constantes numéricas, mas precisam ser descritas por um conjunto de curvas, relacionando as variáveis de interesse. A informação básica das propriedades magnéticas de cada material é dada pelo ciclo B-H ou curva de histerese. Esta curva (fig. 9) mostra a relação instantânea entre a indução magnética B e a intensidade de campo magnético H, para um ciclo completo de funcionamento.

A curva de histerese é construída experimentalmente, magnetizando-se progressivamente uma peça de prova. No diagrama, são marcados os valores da indução magnética B e da intensidade de campo magnético H, que o corpo adquire, quando o campo

magnetizante varia, segundo uma determinada sucessão de valores.

FIGURA 09



Vamos considerar, inicialmente, que a peça de prova não possua magnetização alguma. Neste caso, os valores de B e H são nulos, correspondendo à origem dos eixos, conforme a figura 9. Se o fluxo magnético estiver crescendo (veja lição E-6), o material vai se magnetizando aos poucos, variando os valores de B (conforme indica a curva tracejada 1) até alcançar o va-

lor máximo, dado por B_M . A partir daí, mesmo aumentando-se a intensidade de campo magnético H , o valor de B não varia mais de forma apreciável. Nestas condições, dizemos que o material alcançou a saturação magnética.

A seguir, faremos o campo magnético diminuir desde H_M até zero. Notaremos que o retorno não será pelo caminho anterior (1) e sim pela curva acima, conforme mostra a linha (2). Quando o valor da intensidade de campo magnético H atinge o valor zero, a peça ainda possui uma certa imantação, a que chamamos magnetização residual, designada por B_0 . Verificaremos que, na fase de descida, os valores da indução magnética B variam com um certo atraso em relação aos valores alcançados na fase de subida. Daí o nome histerese, que no grego quer dizer atraso.

Para invertermos o magnetismo residual, é necessário invertermos a corrente, de forma que a intensidade de campo magnético H inverta seu sentido. O valor da intensidade de campo H_1 , necessário para anular o magnetismo residual, chama-se - força coercitiva.

Variando-se a intensidade de campo magnético até o valor $-H_M$, a indução magnética aumenta conforme a linha (3) até alcançar o valor $-B_M$, valor este igual e contrário a B_M , onde ocorre a saturação do material. A partir deste ponto, levando o valor de H até zero, a indução magnética diminui até o valor $-B_0$ (igual e contrário a B_0), conforme notamos através da linha 4. Se invertermos o valor de H , fazendo-o crescer até o valor H_M , a indução magnética irá aumentar desde $-B_0$ até B_M , conforme se vê através do trecho 5.

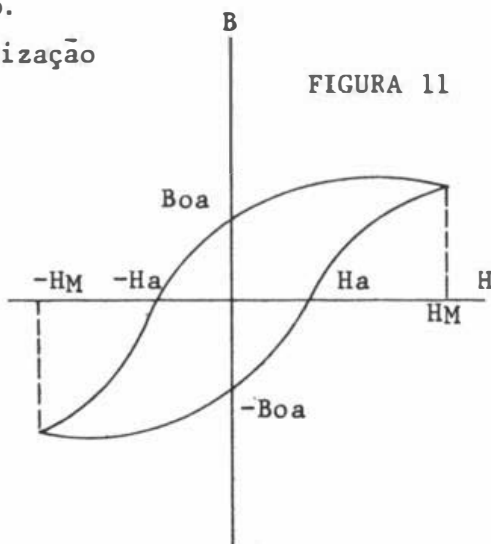
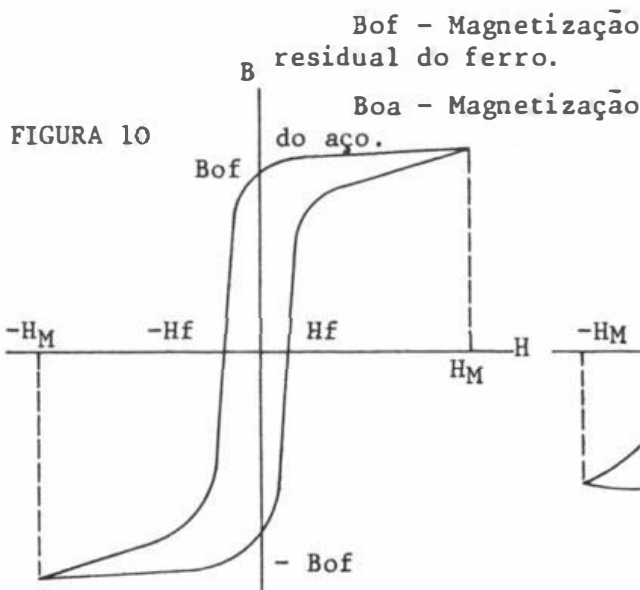
A curva assim construída recebe o nome de ciclo de histerese. Para cada material utilizado em um núcleo, temos uma curva de histerese característica. A curva que mostramos é simplesmente para compreensão, pois é genérica.

Podemos fazer algumas considerações práticas, consideramos, por exemplo, os ciclos de histerese mostrados nas figuras 10 e 11, que correspondem ao ferro doce e ao aço temperado.

Analisando as duas curvas podemos tirar as seguintes conclusões:

FERRO DOCE

AÇO TEMPERADO



H_f - Força coercitiva do ferro

H_a - Força coercitiva do aço

O ferro doce possui uma magnetização residual maior que a do aço temperado, pois $B_{of} > B_{oa}$, porém possui força coercitiva pequena. Isto significa que o ferro doce guarda uma magnetização residual elevada que desaparece com muita facilidade.

O aço temperado, por sua vez, possui magnetização residual menor que a do ferro, porém, com força coercitiva maior. Desta forma, guarda mais facilmente a magnetização residual. Por esta razão, os aços temperados são muito utilizados na fabricação de ímãs permanentes. Para os núcleos dos transformadores costuma-se utilizar materiais que possuam força coercitiva baixa.

CORRENTES PARASITAS

A circulação de corrente alternada, em núcleos de material metálico, corresponde a correntes circulantes na própria massa metálica, e à geração de forças eletromotrizes na mesma, conforme vimos na lição E-6. A essas correntes, correspondem as perdas, segundo a lei de joule. Para minimizá-las, os núcleos dos transformadores são laminados e as lâminas isoladas entre si, de modo a aumentar a resistência à passagem das correntes. (veja figura 12).

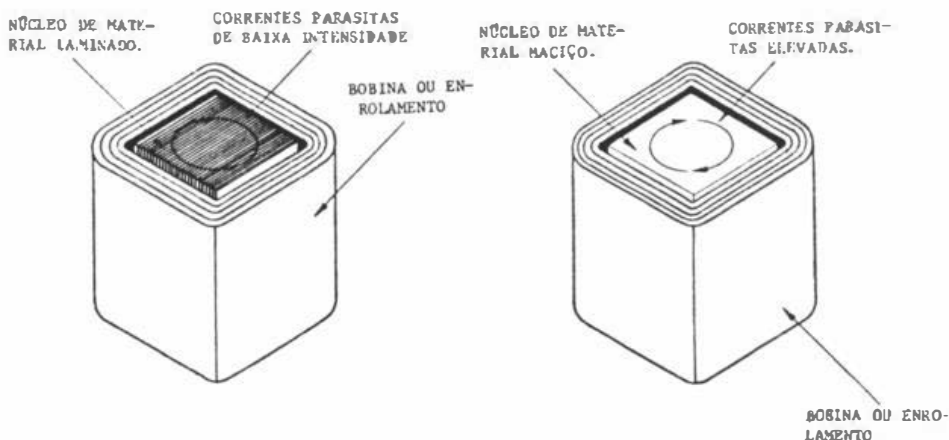


FIGURA 12

SATURAÇÃO NO NÚCLEO

Todo material ferromagnético possui seu ponto de saturação, ou seja, o ponto onde não haverá mais condições de passar linhas de força. Nos transformadores, o caso é análogo e ao chegar a este ponto, é necessário elevar a corrente do primário a níveis bem altos para se conseguir um pequeno aumento na magnetização do núcleo. Costuma-se fazer um cálculo exato da corrente máxima no primário, de forma compatível com o ponto de saturação do material empregado no núcleo. Assim, o transformador poderá trabalhar normalmente, sem che-

gar ao ponto de saturação, pois nesta faixa, o seu rendimento é baixo, não sendo interessante utilizá-lo neste intervalo.

CIRCUITOS MAGNÉTICOS PRÁTICOS

Na prática, os circuitos magnéticos têm a finalidade de produzir fluxos magnéticos intensos. Dependendo da utilidade a que se destinam os circuitos, têm as formas mais variadas possíveis. Por razões construtivas ou de utilização, os circuitos magnéticos possuem espaços de ar, chamados entreferros. Embora a maioria das linhas de força fiquem concatenadas nos núcleos magnéticos, algumas que se encontram próximas ao enrolamento da bobina se fecham pelo ar e não pelo núcleo, constituindo assim o que chamamos fluxo disperso, acarretando perdas, pois uma parcela da energia magnética, produzida será dispersa pelo ar. Veja figura 13. O fluxo disperso é difícil de ser avaliado. Em projetos de transformadores, costuma-se multiplicar o fluxo a ser gerado por fatores chamados de coeficientes de dispersão, os quais variam entre 1 e 1,25.

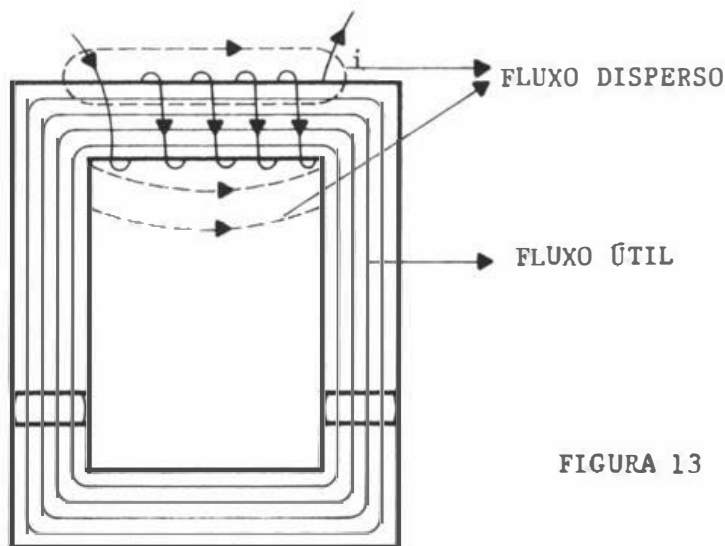


FIGURA 13

AUTOTRANSFORMADOR

Teoricamente um autotransformador é definido como um transformador com um único enrolamento. Um transformador de múltiplos enrolamentos, como vimos anteriormente, também pode ser considerado como um autotransformador se todos os seus enrolamentos forem ligados em série, de forma a obtermos um único enrolamento. O desempenho de um autotransformador é regido pelos mesmos princípios já vistos com relação aos transformadores convencionais de dois enrolamentos separados. Possuem algumas vantagens como: menor reatância de dispersão, diminuição do núcleo magnético, perdas menores e custam menos que os transformadores de dois enrolamentos, quando a relação de tensões não difere muito de 1 para 1.

Podemos ter dois tipos de autotransformadores: o abaixador e o elevador de tensão, conforme ilustram as figuras 14 e 15, respectivamente.

Autotransformador tipo abaixador de tensão.

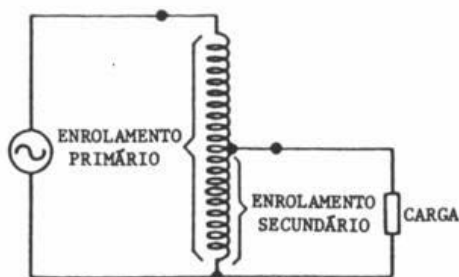


FIGURA 14

Autotransformador tipo elevador de tensão.

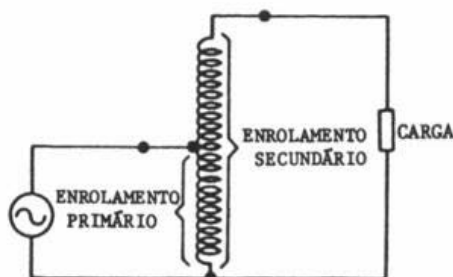


FIGURA 15

O autotransformador, do tipo abaixador de tensão, utiliza, para o enrolamento primário, toda a bobina e, para o enrolamento secundário, somente uma parte da mesma. Se for utilizado como elevador de tensão, ocorre o inverso, isto é, o enrolamento primário utiliza parte da bobina, enquanto que o secundário, toda a bobina. Como utiliza um só enrolamento, leva o nome de autotransformador.

Para efeitos de cálculo, as relações vistas para o transformador convencional são válidas para o autotransformador. Considere, por exemplo, um autotransformador tipo abaixador - que possui tensão disponível, no primário, de 120 volts. Sabe-se que o enrolamento primário possui 400 espiras. Deseja-se obter, no secundário, uma tensão de 9 volts. Qual deve ser o número de espiras do enrolamento secundário?

Solução:

$$V_1 = 120V$$

Sabemos que:

$$V_2 = 9V$$

$$N_1 = 400 \text{ esp.}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}, \text{ logo: } N_2 = \frac{N_1 V_2}{V_1}$$

$$\rightarrow N_2 = \frac{400 \times 9}{120} = 30 \text{ espiras.}$$

Qual será a corrente I_1 no enrolamento primário, caso tenhamos uma resistência de 3 ohms acoplada aos terminais do secundário?

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \rightarrow I_1 = \frac{N_2 I_2}{N_1}$$

Vamos calcular o valor da corrente I_2 do secundário.

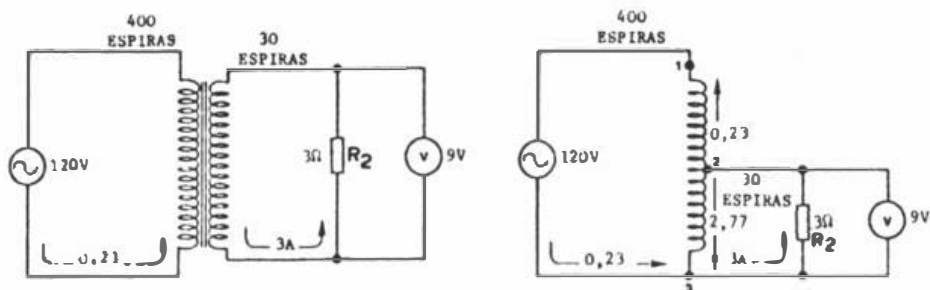
$$V_2 = R_2 I_2 \rightarrow I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{9}{3} = 3A$$

$$\text{mas, } I_1 = \frac{N_2 I_2}{N_1} = \frac{30 \times 3}{400} = 0,23A$$

$$I_1 = 0,23A$$

A figura 16 ilustra os dois tipos de transformador, comparando-os.

FIGURA 16



COMPARANDO O AUTOTRANSFORMADOR COM O TRANSFORMADOR CONVENCIONAL.

Analisando a figura 16, notamos que o autotransformador, utiliza uma só bobina com 400 espiras no primário e possui uma derivação na altura da 30ª espira do secundário. O transformador convencional, por sua vez, necessita de dois enrolamentos, para o mesmo efeito. A corrente do primário para ambos os tipos permanece a mesma, ou seja, 0,23A, mas no secundário do autotransformador, há uma leve mudança, pois enquanto, na carga passam os 3A desejados, na parte da bobina correspondente ao secundário, passam somente 2,77A. Isto porque, no autotransformador, a corrente do secundário tem sentido contrário ao de corrente do primário, logo:

No autotransformador teremos:

$$I_c = I_1 + I_2 = 0,23 + 2,77 = 3A.$$

I_c = corrente carga

I_1 = corrente no enrolamento primário

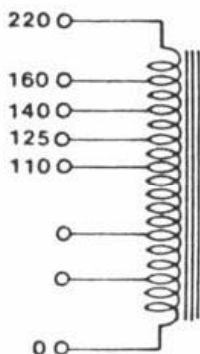
I_2 = corrente no enrolamento secundário

A partir do problema que acabamos de resolver, podemos verificar que o autotransformador possui as vantagens que já mencionamos, por exemplo, no transformador convencional necessitamos de 430 espiras para os enrolamentos primário e secundário; no autotransformador são necessárias 400 espiras para ambos os enrolamentos, onde obtemos uma razoável economia em

fio de cobre. Temos também uma redução da corrente em uma parte da bobina no autotransformador, como vimos há pouco. Consequentemente, teremos uma redução das perdas, pois a parcela $R \cdot I^2$ (perdas no cobre) será menor.

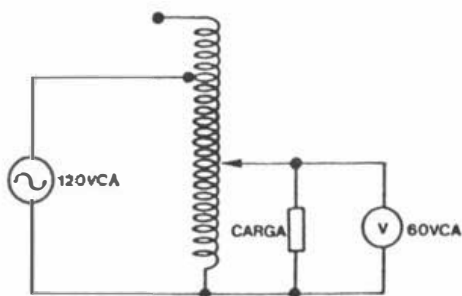
De acordo com a necessidade, certos equipamentos exigem alimentação em vários valores de tensão. Para isso, é comum a utilização de um autotransformador com várias derivações na bobina. As figuras 17 e 18 ilustram o seu aspecto.

FIGURA 17



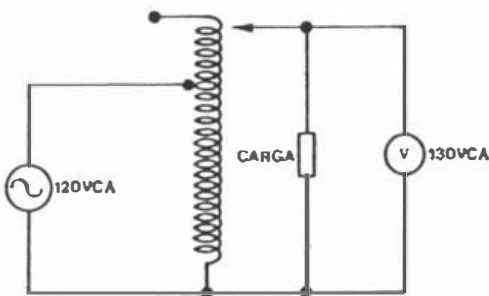
Representação do autotransformador com as tomadas fixas de tensão.

Autotransformador cujo enrolamento secundário está com uma tensão fixa de 60V.



Autotransformador cujo enrolamento secundário está com uma tensão fixa de 130V.

FIGURA 18



Os autotransformadores podem ainda ser variáveis, consistem de um simples enrolamento, feito sobre um núcleo de ferro toroidal, como ilustra a figura 19. São denominados variacs. Estes autoransformadores possuem uma escova de carvão presa a um eixo, que faz o contato com as espiras do enrolamento do transformador. Os variacs são extremamente úteis em laboratórios, onde é necessária uma larga faixa de ajuste de tensão com pequena perda de potência.

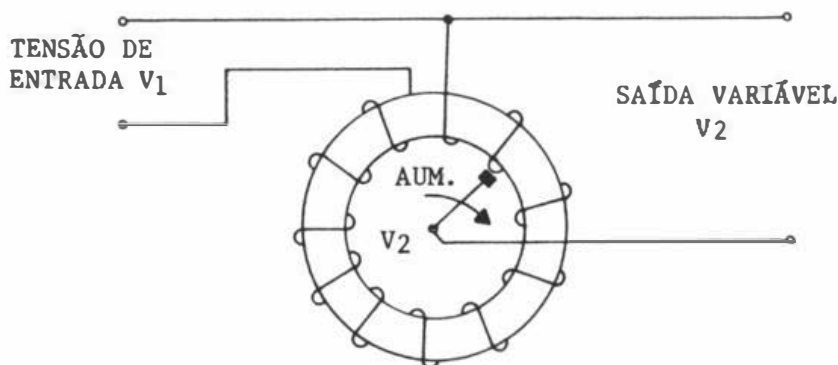


FIGURA 19

Uma desvantagem que apresentam os autotransformadores é que, se parte do enrolamento se abrir, a carga poderá ficar ligada diretamente à rede. Por este fato, os autotransformadores têm sua aplicação limitada. Não se costumam projetar autotransformadores fora do intervalo:

$$0,25 < \frac{V_1}{V_2} < 4$$

CLASSES DE TRANSFORMADORES

De acordo com a aplicação, os transformadores possuem os mais variados tipos e suas técnicas de construção variam de acordo com a finalidade deles.

Para a construção de um transformador, devemos ter o cuidado na escolha do material a ser utilizado no núcleo, pois,

dependendo da finalidade, este material pode mudar. Em transformadores que trabalham em baixas frequências, o núcleo é formado por chapas de ferro silício, isoladas eletricamente - uma das outras, de forma a reduzir as perdas, devido às correntes de foucault, conforme já vimos em tópicos anteriores. Os transformadores que trabalham na faixa de frequência de 60 Hz são incluídos nesta classe. Existem também os núcleos de ferrite que possuem boas propriedades ferromagnéticas, porém são péssimos condutores de eletricidade. Estes núcleos são utilizados em transformadores que vão trabalhar em frequências mais altas. Para as frequências mais elevadas, são utilizados os núcleos de ar. Dependendo da finalidade, caracterizamos o tipo de transformador.

TRANSFORMADORES DE NÚCLEO DE AR

São muitas as diferenças entre os transformadores de núcleo de ferro e os de núcleo de ar, pois não é possível a utilização das mesmas fórmulas para o cálculo de ambos os tipos. O grau de acoplamento para os transformadores de núcleo de ar é bem menor que o de núcleo de ferro. Outra diferença é que os transformadores de núcleo de ar são geralmente projetados para ressonar em uma determinada frequência, ao passo que os enrolamentos de núcleo de ferro, raramente são sintonizados. No ponto de ressonância, as correntes são altas nos enrolamentos sintonizados. A figura 20 ilustra o aspecto e o símbolo de um transformador de núcleo de ar.

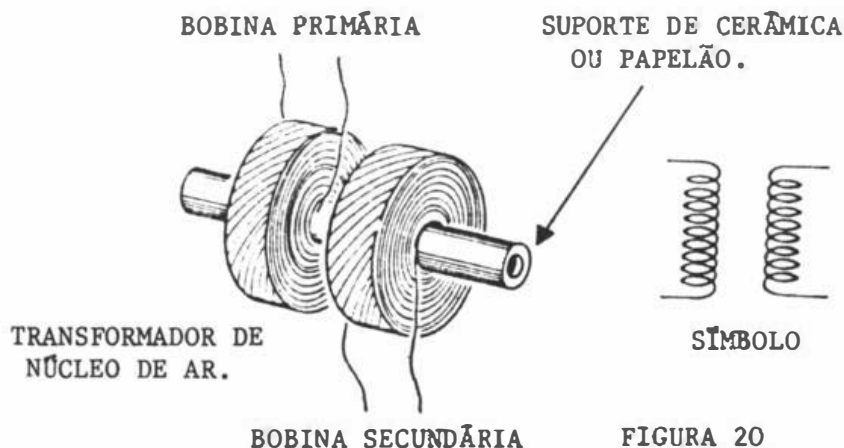


FIGURA 20

TRANSFORMADORES DE PULSO

Muitos circuitos encontrados em aplicações com computadores digitais são chamados circuitos de pulsos, pois as formas de onda de tensões e correntes são pulsos. Para estes tipos - de circuitos são utilizados os transformadores de pulso que têm as seguintes finalidades: mudar a amplitude de um pulso de tensão, mudar níveis de impedância, acoplar estágios sucessivos de amplificadores de pulsos, etc.

É muito importante que o transformador reproduza o pulso de entrada, o mais fiel possível, nos terminais do secundário. A figura 21 ilustra um pulso de entrada em forma de onda quadrada. A forma de onda de tensão de saída correspondente é mostrada na figura 22.

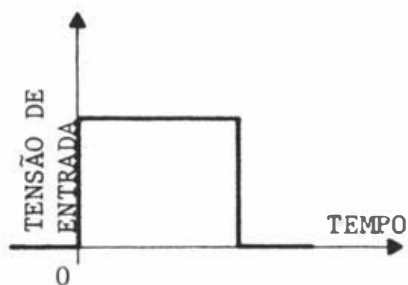


FIGURA 21



FIGURA 22

O tempo de subida é aquele necessário para a tensão subir até o valor desejado. A indutância de dispersão é mantida no valor mínimo, para minimizar o tempo de subida.

A tensão de saída não permanece plana, pois seria equivalente à transmissão em corrente contínua pelo transformador. Por este fato, temos uma inclinação para baixo, como mostra a figura 22. A parte alta do pulso é mantida entre limites bem definidos, desde que se tenha uma alta indutância de magnetização. Isto é conseguido, construindo o núcleo do trans

formador com material de alta permeabilidade. Desta forma, teremos uma baixa relutância.

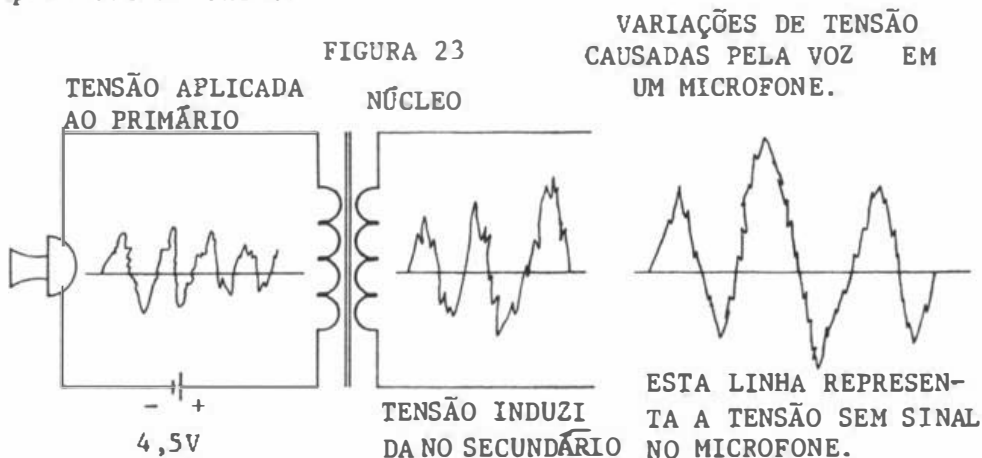
Os transformadores de pulso, em geral, são de pequeno porte e possuem poucas espiras de fio. Para minimizar a indutância de dispersão, os núcleos, por sua vez, são de ferrite ou de ligas de alta permeabilidade, tais como: permalloy ou hiper-sil (um aço-silício especial que possui ótima permeabilidade), enroladas em forma de fita. Comparado com a duração dos pulsos, o intervalo de tempo entre eles é alto. Consequentemente, um transformador de tamanho físico pequeno pode trabalhar a níveis altos de potência de pulsos.

TRANSFORMADORES DE AUDIOFREQUÊNCIA

É comum a utilização de pequenos transformadores de núcleo de ferro, operando na faixa de frequência de áudio, atuando como dispositivos de acoplamento em circuitos eletrônicos, como amplificadores de tensão, contribuindo, desta forma, para o ganho em tensão dos amplificadores.

A diferença entre um transformador de corrente alternada e um transformador de audiofrequência está nos enrolamentos. Este último possui um número maior de espiras e a bitola do fio é menor que a dos transformadores de força.

Na figura 23, ilustramos uma maneira de se elevar a tensão do sinal produzido por um microfone, utilizando-se um transformador de A.F. (audiofrequência) com a finalidade de amplificar a tensão.



Existem muitos casos em que os transformadores de A.F. são utilizados somente para casamento de impedância, como ocorre, por exemplo, entre o circuito de saída (etapa de potência de A.F. e os alto-falantes). Osciladores e amplificadores, por exemplo, apresentam ótimo desempenho, quando a impedância de carga tem uma ordem de carga bem definida. Costuma-se, então, fazer o acoplamento através de um transformador de A.F., de maneira a levar a impedância ao valor desejado. Um transformador assim utilizado leva o nome de transformador de saída.

FORMATOS DE NÚCLEOS

Dependendo da aplicação, os núcleos dos transformadores, podem ter vários formatos. O mais utilizado é o núcleo formado por três colunas, onde as bobinas são enroladas na perna central. A figura 24 ilustra o seu aspecto.

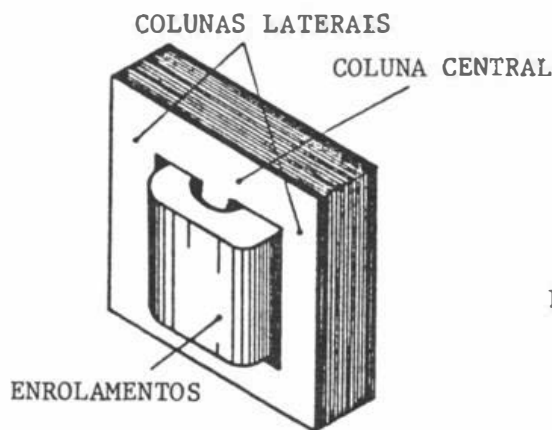


FIGURA 24

Com relação aos transformadores trifásicos, temos três núcleos para o enrolamento primário e três para o enrolamento secundário.

Existem também os núcleos toroidais, que possuem aplicação especial, devido ao fato da maior concentração do fluxo magnético. A figura 25 ilustra um transformador deste tipo.

A maneira de enrolar as bobinas pode também sofrer alteração. Uma aplicação típica é mostrada pela figura 26, onde a bobina do secundário é enrolada sobre a bobina do primário.



FIGURA 25

NÚCLEO TOROIDAL

Temos casos em que as bobinas se apresentam separadas, como o do transformador de núcleo de ar, onde o enrolamento do primário fica separado do enrolamento secundário. A figura 27 ilustra várias disposições de núcleos e enrolamentos.

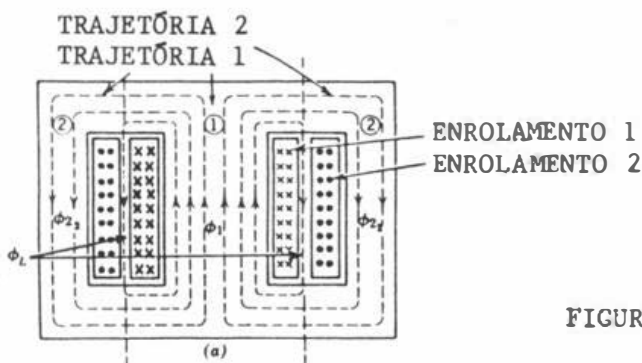


FIGURA 26

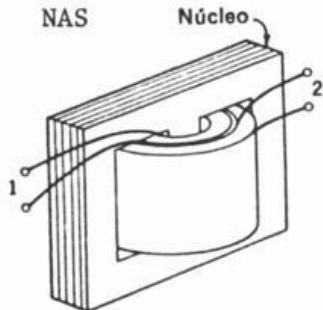
Citamos, há pouco, o acoplamento que, às vezes, se faz necessário entre circuitos de saída e uma carga qualquer, para obtermos o melhor rendimento possível. Um exemplo prático deste caso é o problema que ocorre entre um amplificador de potência e os alto-falantes de um conjunto de som. Considere um amplificador que tenha uma impedância de 160Ω e a caixa de som possua uma impedância de 8Ω . Se fizermos a ligação direta entre os dois, teremos uma perda de potência considerável. Para sanarmos tal problema, usaremos um transformador que terá a finalidade de "casar" ou acoplar as impedâncias. Seu enrolamento pode ser determinado pela seguinte fórmula:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad \text{onde: } Z_1 - \text{representa a impedância do primário-}$$

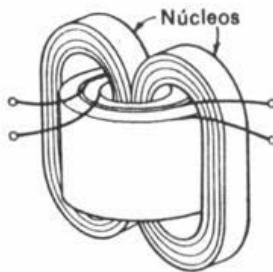
rário-

Z_2 - representa a impedância do secundário.

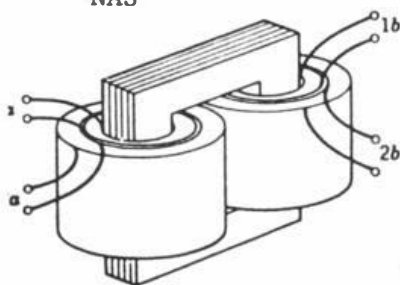
TIPO CONCHA COM
NÚCLEO DE LÂMI-
NAS



TIPO CONCHA COM
NÚCLEO ENROLADO



TIPO NÚCLEO COM
NÚCLEO DE LÂMI-
NAS



TIPO NÚCLEO COM
NÚCLEO ENROLADO

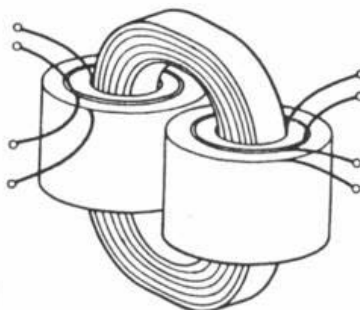
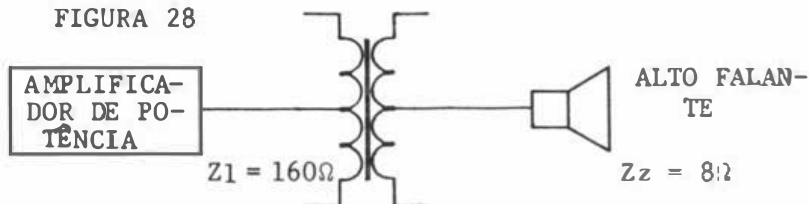


FIGURA 27

A figura 28 ilustra o aspecto da ligação a ser efetuada.

FIGURA 28



Colocaremos 100 espiras no primário.

$N_1 = 100$ esp. Vamos calcular o número de espiras no se-
 $Z_1 = 160\Omega$ cundário do transformador.

$Z_2 = 8\Omega$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \rightarrow \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{(N_1)^2}{(N_2)^2} \rightarrow (N_2)^2 = \frac{(N_1)^2}{\frac{Z_1}{Z_2}} =$$

$$N_2 = \sqrt{\frac{(N_1)^2}{\frac{Z_1}{Z_2}}} = \sqrt{\frac{(100)^2}{\frac{160}{8}}} = 22,3 = 22 \text{ esp.}$$

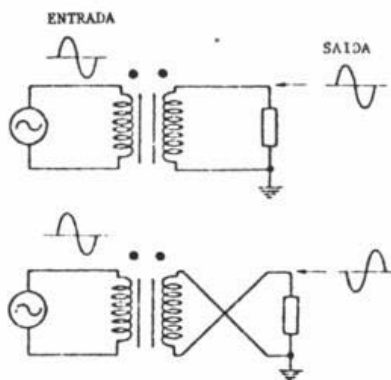
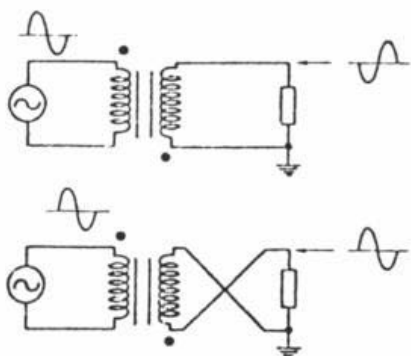
$N_2 = 22$ espiras.

O transformador deve ter o enrolamento primário com 100 espiras e o secundário com 22 espiras.

DEFASAMENTO

Com a inversão do sentido de enrolamento das bobinas de um transformador, podemos obter defasagens de tensão (entre o primário e secundário de um transformador) de 180° . Estas defasagens, em certos casos, tornam-se necessárias e importantes em determinados circuitos eletrônicos.

A relação de fase entre as bobinas de um transformador é geralmente indicada por meio de um ponto em seus diagramas funcionais. (vide figura 29)



DEFASAGEM NO TRANSFORMADOR.

FIGURA 29

DIVISÃO DE FASE:

Para obtermos, nos terminais de um transformador, tensões de mesma amplitude e defasadas de 180° uma da outra, bas

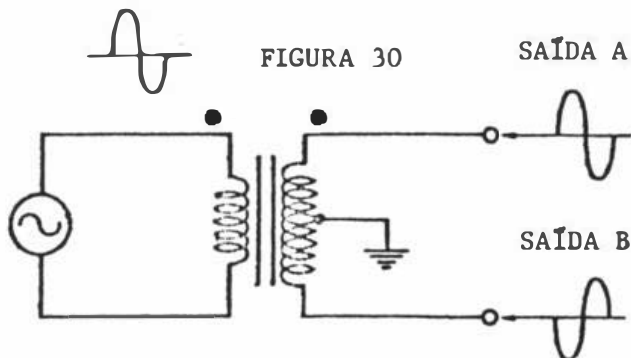


FIGURA 30

ta aterrarmos o enrolamento de um transformador bem no meio deste. Desta forma, teremos duas saídas, a saída A em fase com a tensão aplicada no enrolamento primário, e a saída B, uma tensão defasada de 180° com a tensão de entrada (ver figura 30).

DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica nem sempre é produzida nos níveis de tensão desejados, criando um sério problema nos centros de distribuição e cuja solução está na utilização dos transformadores.

A energia é produzida nas estações geradoras e, é transportada por linhas de transmissão até o ponto onde é convertida em energia mecânica, calor, etc, na forma desejada. As linhas de transmissão proporcionam uma perda razoável de energia, devido ao efeito joule que ocorre nos condutores. Esta perda, como já sabemos, é proporcional ao quadrado da corrente e à resistência do condutor ($P = RI^2$). Para se reduzir estas perdas é necessário a transmissão de energia em alta tensão, pois, neste caso, a corrente será mais baixa e as perdas serão menores. Devido a este aspecto, são utilizados transformadores elevadores de tensão. Para entendermos o porquê da utilização destes transformadores, vamos expor um exemplo prático sem o uso deles e, a seguir, usando um transformador elevador.

Aplicação

1) Deseja-se transmitir 100 KW de potência, através de uma linha de transmissão monofásica que possui uma impedância de 200Ω . Sabe-se que a tensão nos terminais do gerador é de 10KV. Calcule a potência perdida em forma de calor (perda joule).

Dados: $P = 100 \text{ KW}$
 $R = 200\Omega$
 $V = 10 \text{ KV}$

Cálculo da corrente na linha de transmissão:

$$P = V \cdot I \rightarrow I = \frac{P}{V} = \frac{100 \times 10^3}{10 \times 10^3} = 10 \text{ A}$$

Cálculo da potência perdida.

$$P = R \cdot I^2 = 200 \times 10^2 = 200 \times 100 = 20 \text{ KW.}$$

Sem o uso de um transformador, a perda joule será de 20 KW.

2) Considere o mesmo problema anterior, porém nos terminais do gerador é colocado um transformador do tipo elevador de forma a elevar a tensão de 10 KV ao nível de 100 KV. Calcule a nova potência perdida em forma de calor.

Cálculo da corrente na linha de transmissão.

$$P = 100 \text{ KW}$$

$$R = 200\Omega$$

$$V = 100 \text{ KV}$$

$$P = V \cdot I \rightarrow I = \frac{100 \times 10^3}{100 \times 10^3} = 1 \text{ A (a corrente diminuiu)}$$

Cálculo da potência perdida.

$$P = R \cdot I^2 = 200 \times 1^2 = 200 \text{ W.}$$

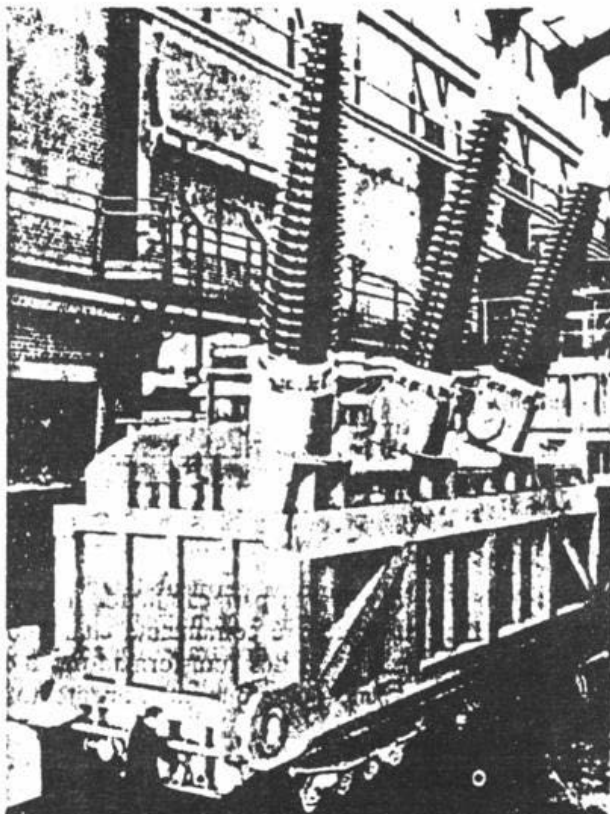


FIGURA 31

Comparando ambas as situações, percebemos que com o uso do transformador elevador, as perdas no condutor são bem menores. Por este fato é que a transmissão de energia elétrica é feita a níveis altos de tensão. No fim das linhas de transmissão são colocados transformadores tipo abaixador de tensão para reduzir a tensão a níveis compatíveis de utilização, como por exemplo 127V, 220V, etc. A figura 31 mostra o aspecto de um transformador de potência trifásico, utilizado para levar a tensão do gerador de 20 KV à tensão de transmissão de 450KV.

Na figura 32, temos a vista em corte de um transformador de distribuição autoprotegido, típico para potências de 2 a 25 KVA, 7200: 240/ 120 volts. É utilizado em sistemas de distribuição para fornecer a tensão apropriada ao consumidor.

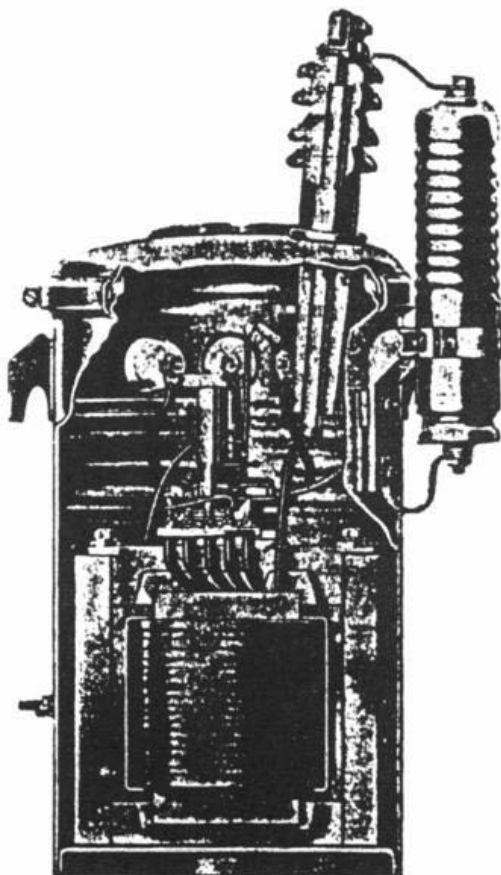
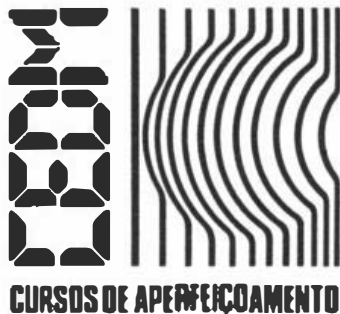


FIGURA 32



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-16

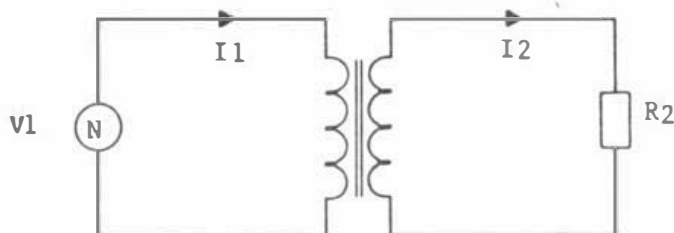
OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Denominamos enrolamento primário de um transformador:
 - a) ao enrolamento onde é conectada a carga;
 - b) ao enrolamento de um autotransformador;
 - c) ao enrolamento que ligamos à rede de corrente alternada;
 - d) todas as alternativas anteriores estão incorretas.

- 2) Definimos, como transformador ideal aquele que apresenta a seguinte relação:
 - a) $\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} + \text{perdas}$
 - b) $\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$
 - c) $\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_2}{E_1}$
 - d) $\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_2}{E_1} + \text{perdas}$

- 3) Tem-se o seguinte transformador ideal conforme ilustra a figura abaixo:



Sabe-se que:

- $V_1 = 120$ volts.
 $N_1 = 1000$ espiras
 $N_2 = 100$ espiras
 $R_2 = 6$ ohms.

Os valores das correntes I_2 e I_1 valem respectivamente:

- a) 2A e 0,5A;
b) 2A e 0,2A;
c) 0,2A e 4A;
d) 2A e 0,05A.

- 4) Assinale a alternativa correta:

- a) para realizar a transferência de potência elétrica, os transformadores não utilizam o fenômeno da mútua indução;
b) um transformador ideal é aquele em que consideramos todas as suas perdas;
c) os transformadores de múltiplos enrolamentos são utilizados para interligar vários circuitos que podem ter diferentes níveis de tensão;
d) a curva de histerese é única para todos os materiais ferromagnéticos.

- 5) O aço temperado é muito utilizado na fabricação de ímãs permanentes, porque:
- a) é um material condutor e possui uma alta relutância magnética;
 - b) possui baixa força coercitiva e alta magnetização residual;
 - c) o aço temperado possui uma alta força coercitiva, de forma a "segurar" a magnetização residual;
 - d) possui um campo magnético sempre constante.
- 6) Assinale a alternativa incorreta:
- a) um autotransformador é aquele que possui um único enro-lamento;
 - b) os autotransformadores possuem alta reatância de dis-persão e custam mais que os transformadores convencio - nais;
 - c) as relações vistas com relação aos transformadores con- vencionais são válidas para os autotransformadores;
 - d) um transformador de múltiplos enrolamentos pode ser considerado um autotransformador, desde que todos os seus enrolamentos estejam ligados em série.
- 7) Existem as perdas no cobre dos enrolamentos de um transfor- mador devido:
- a) ao efeito Joule;
 - b) à alta relutância do núcleo;
 - c) às correntes de Foucault;
 - d) à relação de espiras.
- 8) Um transformador alimenta uma carga resistiva de 4Ω . Sabe-se que:
- $V_1 = 120$ volts
 - $N_1 = 1000$ espiras
 - $N_2 = 100$ espiras.

Qual é o valor da corrente no primário do transformador?

- a) 0,4A;
- b) 3A;
- c) 0,3A;
- d) 2A.

9) Quais serão as perdas em uma linha de transmissão que possui $R = 100\Omega$, para transmitir uma potência de 120 kW, sabendo-se que a tensão gerada é de 12000 V, e a relação de espiras do transformador é $N_1/N_2 = 1/10$?

- a) 10 KW;
- b) 100 W;
- c) 1000 W;
- d) 1 KW.

10) Deseja-se utilizar um transformador para acoplar duas impedâncias distintas Z_1 e Z_2 . Sabe-se que a impedância do primário vale $Z_1 = 4\Omega$ e a impedância do secundário vale $Z_2 = 100\Omega$. Qual deve ser a relação de espiras do transformador?

- a) $\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{2}$
- b) $\frac{N_1}{N_2} = 5$
- c) $\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{5}$
- d) $\frac{N_1}{N_2} = 2$

LIÇÃO E-17

SÍMBOLOS E DIAGRAMAS

Nesta lição, iremos estudar os símbolos para assim podermos interpretar os diagramas dos aparelhos eletrônicos.

Estes símbolos são os mais usados em diagramas esquemáticos de aparelhos eletrônicos. Vamos abranger a maioria deles para facilitar ao aluno a tirar suas dúvidas quando houver a necessidade de analisar diagramas esquemáticos.

CAPACITORES - São componentes que têm a propriedade de armazenar corrente elétrica mediante a ação das placas e de seu dielétrico.

Temos dois tipos de capacitor a analisar:

CAPACITORES FIXOS - O símbolo é dado na Fig. 1 abaixo, porém não se incluem os eletrolíticos que veremos mais adiante.

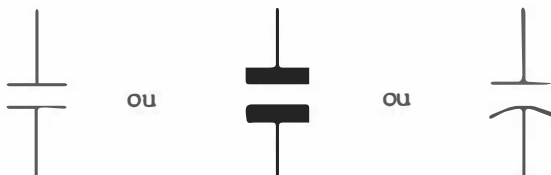


FIGURA 1

CAPACITORES VARIÁVEIS - A Fig. 2 engloba os símbolos dos capacitores variáveis. A Fig. 2A indica o símbolo dos capacitores variáveis, a 2B se refere aos trimmers (muito usados em rádios hoje em dia) e a 2C indica os capacitores variáveis ou condensadores.

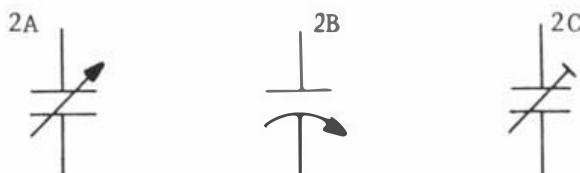


FIGURA 2

Na Fig. 3 temos o aspecto dos capacitores eletrolíticos. O símbolo da Fig. 3A é o mais usado, porém o da Fig. 3B também é indicado.



FIGURA 3

CAPACITORES VARIÁVEIS DE DUAS OU MAIS SEÇÕES - Usados geralmente em rádios receptores e amadores. Consistem geralmente de duas ou três seções montadas na mesma armadura.

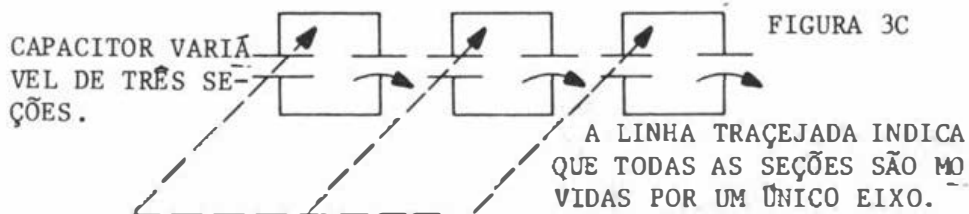


FIGURA 3C

RESISTORES - São os componentes mais usados na eletrônica e a maioria dos alunos já deve tê-los visto algumas vezes.

Na Fig. 4, temos os símbolos mais usados, podendo englobar os resistores de carvão e resistores de fio.



FIGURA 4A



FIGURA 4B

O símbolo da Fig. 4A é o mais usado.

BATERIAS - Na Fig. 5, temos o aspecto da pilha e da bateria que é a combinação de duas ou mais pilhas secas ligadas entre si.

5A (PILHA)



5B (BATERIA)



FIGURA 5

OBS.: O eletrodo positivo é sempre representado pelo traço maior e mais fino.

INDUTÂNCIA - Um circuito elétrico tem indutância quando nele há um condutor ou uma bobina que tem a propriedade de induzir em suas próprias espiras uma tensão de polaridade oposta à tensão aplicada.

Na Fig. 6, temos vários tipos de bobina e seus símbolos.



BOBINA DE SINTONIA POR PERMEABILIDADE E SEU NÚCLEO É COMPOSITO CILÍNDRICO DE NÚCLEO DE FERRITE.



SÍMBOLO DE UMA BOBINA COMUM.



SÍMBOLO DE UMA BOBINA CUJA INDUTÂNCIA É VARIÁVEL.

FIGURA 6

AUDÍFONOS - São os chamados fones de ouvido que convertem as tensões de A.F. (audiofrequência) em sons.

Na Fig. 7A, indicamos o tipo mais simples (com um só diafragma). Na Fig. 7B, temos o símbolo dos fones de cabeça (head fones) ou fones duplos.

FIGURA 7A



FIGURA 7B



ANTENAS - São utilizados nos receptores para se obter melhor recepção do sinal transmitido.

Símbolos:

Este é o mais utilizado.



FIGURA 7C

FUSÍVEIS - A Figura 8 mostra vários símbolos utilizados nos diagramas esquemáticos para indicar os fusíveis.

O fusível é um dispositivo de proteção que contém uma pequena extensão de fio especial que se funde ou se rompe quando a corrente, que o percorre, excede, durante um determinado período de tempo, ao valor para o qual foi construído.

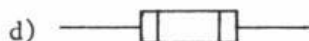


FIGURA 8

INTERRUPTORES - Existem hoje em dia vários tipos de interruptores.

Na Fig. 9, temos os símbolos mais comuns.

Na Fig. 9A, temos o símbolo de um interruptor simples de um pólo. Na Fig. 9B, o símbolo de um interruptor duplo (2 pólos), enquanto que na Fig. 9C, temos um interruptor de dupla posição. Os símbolos se aplicam a quaisquer tipos de chave que executam as funções descritas.

Na Fig. 9D, temos um símbolo que é uma combinação de interruptor e potenciômetro onde a linha tracejada indica que o interruptor é movido pelo mesmo braço do potenciômetro.

Na Fig. 9E, temos o símbolo de um interruptor de contato múltiplo.

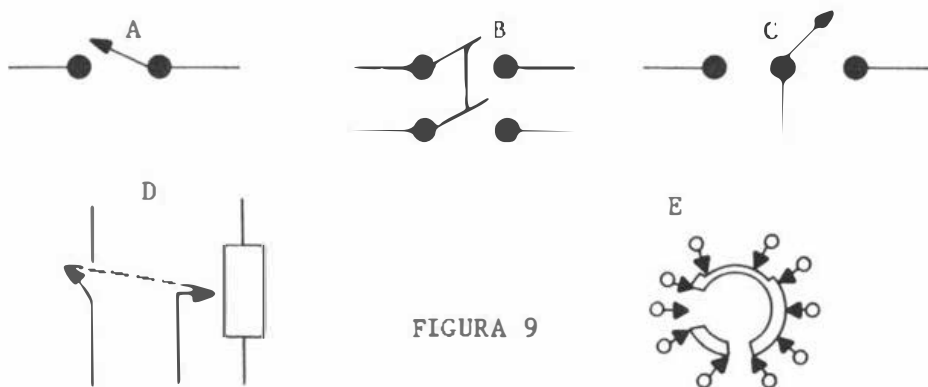


FIGURA 9

PLUGUES E TOMADAS - A conexão entre um aparelho e um dispositivo externo (microfone, fones de ouvido, manipuladores - telegráficos, etc.) é normalmente feita por meio de jaques (tomadas) e plugues (conectores).

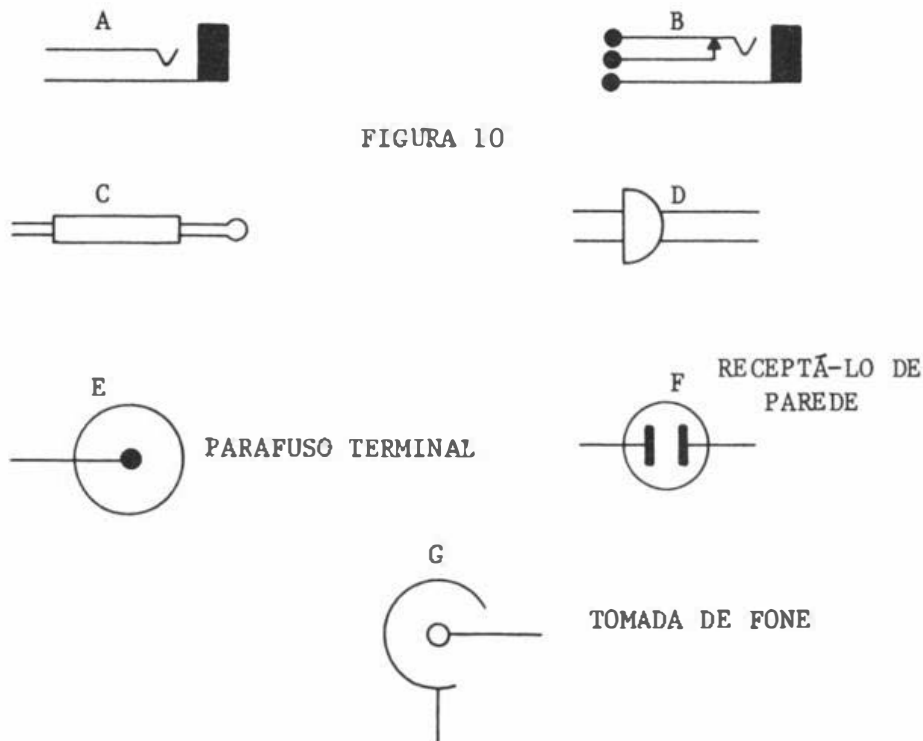
Na Fig. 10A, temos o símbolo dos jaques simples; na Fig. 10B, o de circuito fechado. O símbolo de um plugue para jaque é mostrado na Fig. 10C.

E finalmente, na Fig. 10D, temos o símbolo dos plugues para as tomadas de energia elétrica, servindo tanto para os plugues de pinos chatos como para os plugues de pinos redondos.

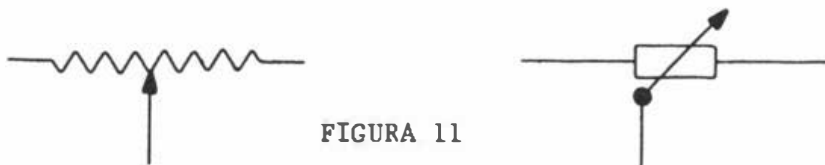
Em 10E, temos o símbolo dos bornes ou terminais de ligação.

Na Fig. 10F, temos o símbolo de uma tomada de energia elétrica, servindo tanto para as tomadas de pinos chatos, como para as tomadas de pinos redondos.

O símbolo de uma tomada de "pick-up" é representada na Fig. 10G. Esta tomada é comumente conhecida como "tomada RCA".



POTENCIÔMETROS - Na Fig. 11, mostramos o símbolo dos potenciômetros utilizados nos aparelhos eletrônicos para controlar a intensidade de volume, amplificação, etc.



REOSTATOS - Na Fig. 12, temos o símbolo de um reostato - que é muito semelhante à do potenciômetro, divergindo apenas quanto aos terminais. O reostato só tem dois, pois um dos extremos não é ligado.

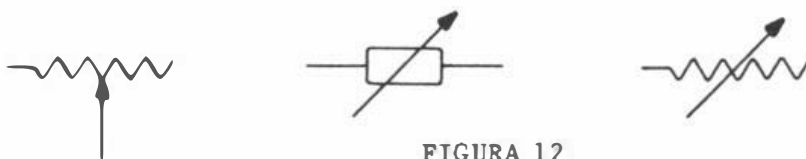


FIGURA 12

MICROFONE - São dispositivos que convertem as ondas sonoras em sinais de audiofrequência, isto é, transformam as vibrações mecânicas em vibrações elétricas.

Na Fig. 13, temos os símbolos dos vários tipos de microfones.

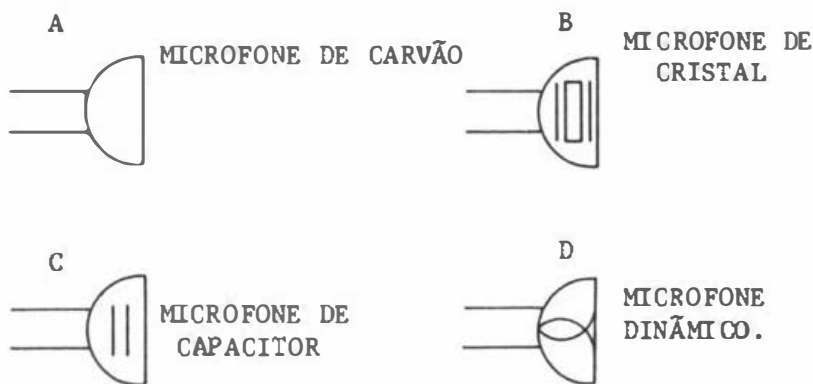


FIGURA 13

ALTO-FALANTES - Têm a finalidade contrária à dos microfones, pois transformam as pulsações elétricas (tensões de A.F) em vibrações mecânicas (ondas sonoras). Na Fig. 14A, temos os dois símbolos correspondentes a um alto-falante dinâmico. Na Fig. 14B, temos o símbolo de um alto-falante eletrodinâmico, mas não iremos discutir aqui seus princípios de funcionamento, pois não é esta a finalidade desta apostila.

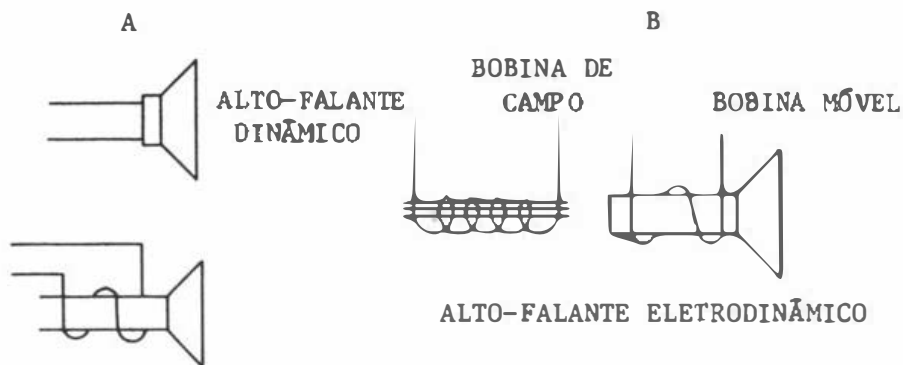


FIGURA 14

DIVISORES DE TENSÃO ~ Na Fig. 15, temos os símbolos correspondentes a um resistor especial, chamado divisor de tensão (resistor com derivação). É formado por inúmeras espiras de fio com derivações fixas que permitem obter diferentes tensões entre um extremo e as diversas derivações.

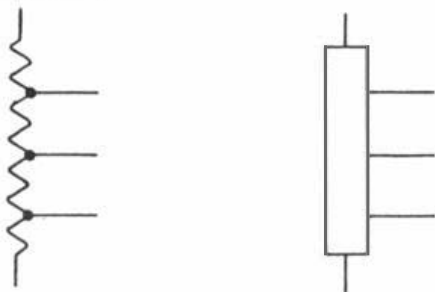


FIGURA 15

GERADORES DE ELETRICIDADE E MOTORES - Na indicação abaixo, temos os símbolos utilizados que representam geradores de eletricidade e motores elétricos.

Se o gerador for de corrente contínua, a indicação é C.C., colocada no interior do círculo, como indicado abaixo. Se for de corrente alternada, temos C.A. no interior do círculo ou então uma pequena onda senoidal.

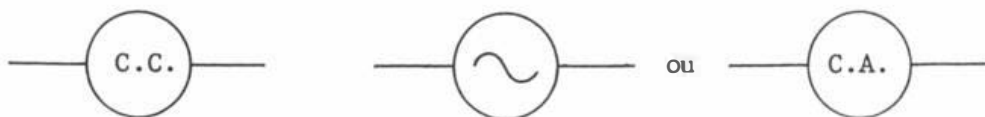


FIGURA 15A

LÂMPADAS PILOTO - Abaixo temos o símbolo das pequenas - lâmpadas utilizadas para várias finalidades. Estas lâmpadas são comumente conhecidas como lâmpadas-piloto.



SÍMBOLO

FIGURA 15B



APARÊNCIA EXTERIOR

TRANSFORMADORES DE A.F. - São utilizados para acoplar os sinais de amplificação à bobina móvel de um alto-falante.

No símbolo, a presença do núcleo de ferro é representada por linhas verticais, colocadas entre duas espiras que representam os 2 enrolamentos do transformador (primário e secundário).

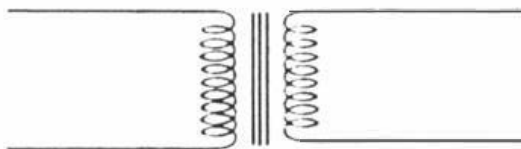


FIGURA 15C

TRANSFORMADOR DE R.F. (Rádio-freqüência) - Se o transformador de R.F. for do tipo sem núcleo, o símbolo é dado pela Fig. 16.

Se este possuir núcleo ajustável de ferrite, então será apresentado entre o primário e o secundário por 3 linhas tracejadas, conforme indica a Fig. 17.

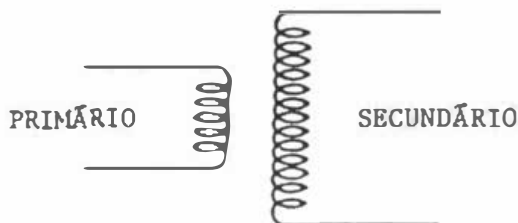


FIGURA 16

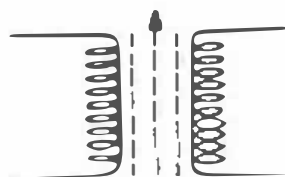


FIGURA 17

TRANSFORMADORES DE FORÇA - Note-se abaixo o símbolo correspondente aos transformadores de força, isto é, dispositivos utilizados para elevar ou baixar a tensão de C.A.

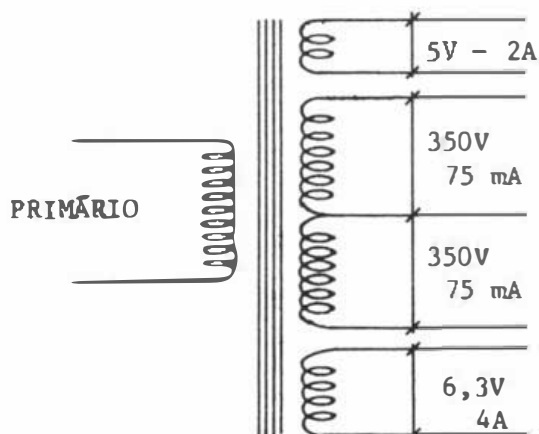


FIGURA 17A

INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO - Na Fig. 18, indicamos os tipos comuns de aparelhos de medição (amperímetro, miliamperímetro e voltímetro), porém há vários outros.

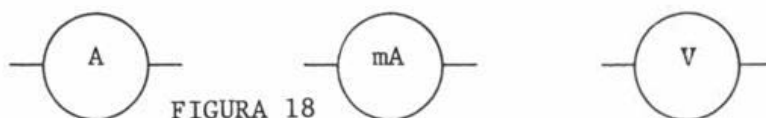


FIGURA 18

LIGAÇÃO À TERRA - Na Fig. 19, temos os dois símbolos usados para indicar ligação à terra, o mais usado é o da Fig. 19A.

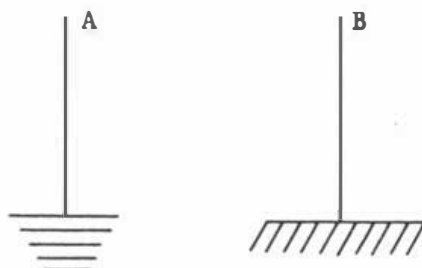


FIGURA 19

REPRODUTORES FONOGRÁFICOS - Na Fig. 20, vemos os símbolos de dois tipos mais comuns de reprodutores fonográficos. Na figura 20A, vemos o símbolo de um fonocaptor magnético.

Na Fig. 20B, temos o símbolo correspondente a um fonocaptor de cristal no qual a bobina é substituída por cristais especiais.



FIGURA 20

TRANSISTOR BIPOLAR - Para o transistor, adotaremos as seguintes convenções de corrente:

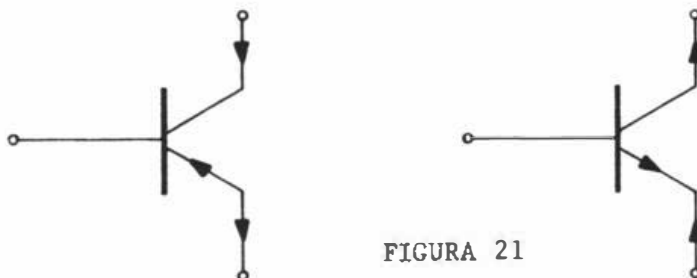


FIGURA 21

REED-SWITCH - Conhecido como chave de lâminas, o qual na da mais é do que duas lâminas de uma liga especial de níquel, colocadas dentro de uma ampola de vidro e cheia de gás inerte, para não termos oxidação.

Símbolo:

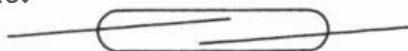


FIGURA 22

AMPLIFICADOR OPERACIONAL - Frequentemente denominado OP AMP. É um amplificador inversor, de alto ganho de tensão, alta impedância de entrada e ampla largura de faixa.

Possui dois terminais de entrada:
um inversor (-)
e outro não inversor (+)



FIGURA 23

AMPLIFICADOR OPERACIONAL DE ISOLAÇÃO - Possui praticamente a mesma característica de um OP AMP, porém com isolação.

Seu símbolo é:

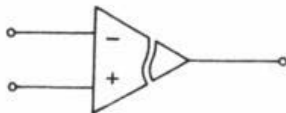


FIGURA 23A

OUTROS COMPONENTES:

Tiristores - SCR, TRIAC, DIAC

A palavra tiristor (tiratron + transistor) é a designação genérica, dada aos dispositivos de estado sólido que possuem características semelhantes às válvulas tiratron, usadas em circuitos de controle de potência.

Os tiristores mais usados no controle eletrônico de potências são: o SCR, o TRIAC e o DIAC.

SCR - O diodo controlado de silício unidirecional.

O retificador controlado de silício ou SCR é um diodo retificador de junção "P-N" cujo ponto de início da condução pode ser controlado externamente.

Representação esquemática e símbolo:

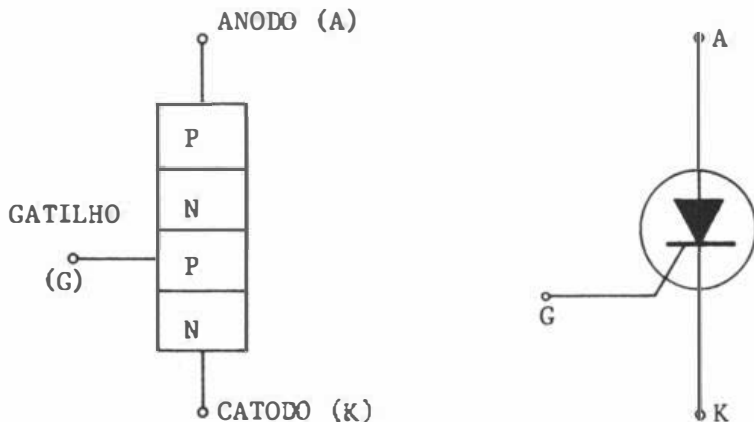
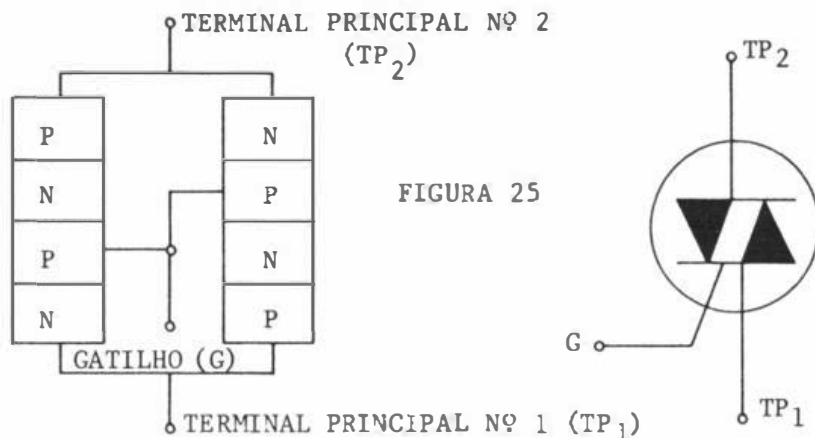


FIGURA 24

TRIAC - Diodo controlado de silício bidirecional

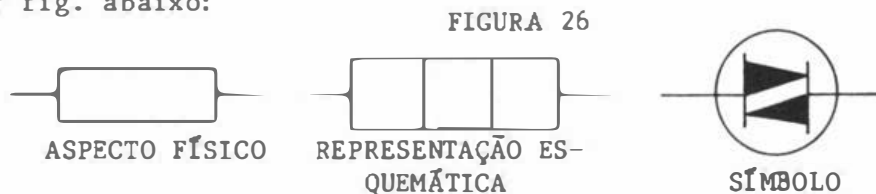
Um triac pode ser considerado como dois SCR ligados em paralelo e em oposição, mas com um só eletrodo de controle.

Na Figura abaixo, temos a representação esquemática de um TRIAC e o símbolo usado para representá-lo:



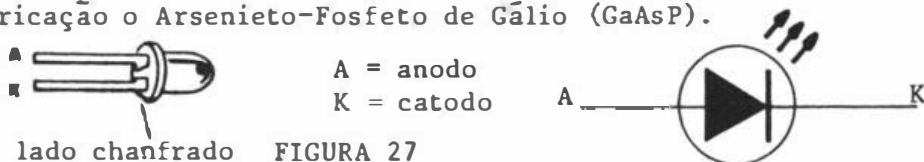
DIAC - Diodo de avalanche bidirecional

Um DIAC (do inglês: Diode Alternative Current) é um dispositivo de dois terminais, constituído de três cristais semicondutores de silício, de modo a formar uma estrutura "P-N-P", ver fig. abaixo:



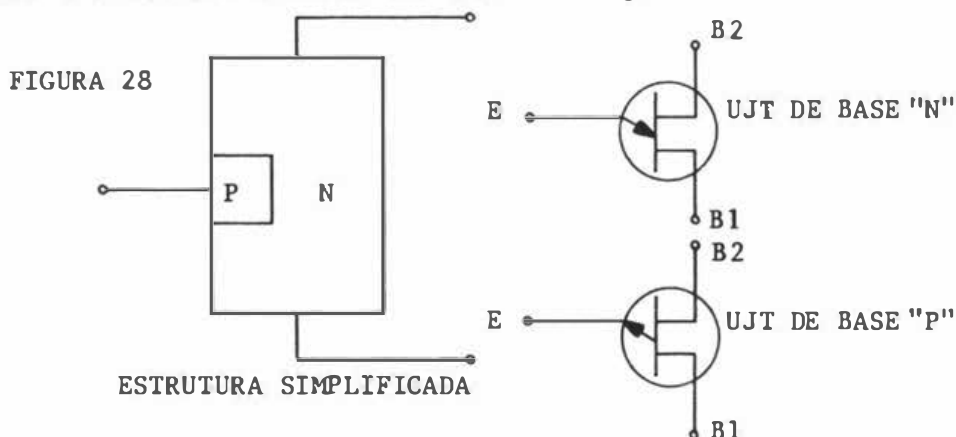
LED - Diodo emissor de luz

O LED (do inglês: Light Emithier Diode) é um diodo semicondutor comum de junção, tendo como material usado na sua fabricação o Arsenieto-Fosfeto de Gálio (GaAsP).



UJT - O transistor unijunção

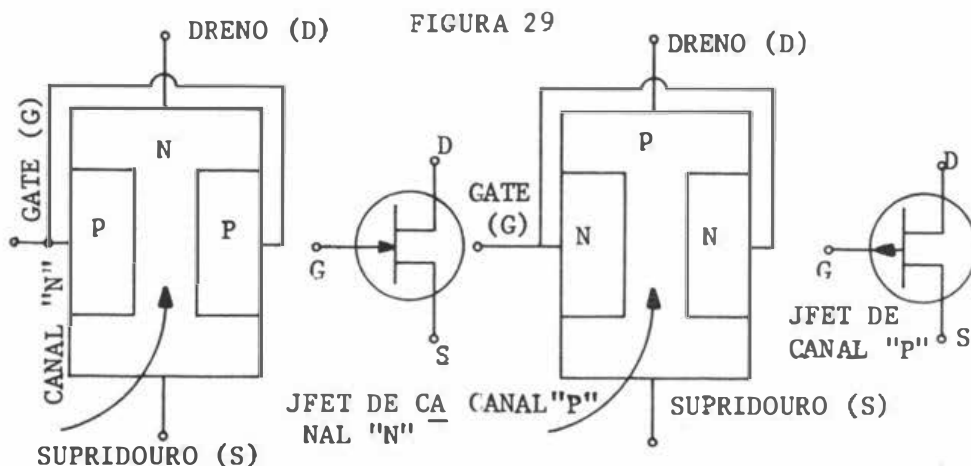
O UJT (do inglês: Unijunction Transistor) é um tipo especial de dispositivo semiconductor, cujo princípio de funcionamento é bastante diferente daquele do transistor bipolar. A sua estrutura e símbolo são dados na figura abaixo:



JFET - O transistor de efeito de campo de junção

O JFET (do inglês: Junction Field Effect Transistor) é constituído de uma barra de material semiconductor (silício tipo "N" ou silício tipo "P"). Nos extremos dessa barra de silício temos os terminais: DRENO (D) e o SUPRIDOURO (S) (ou fonte).

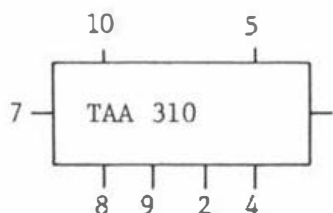
Representações esquemáticas e símbolos do JFET de Canal "N" e do JFET canal "P":



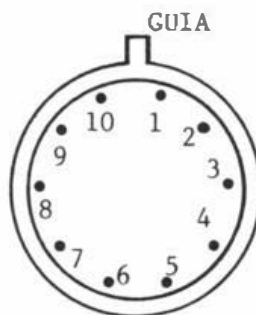
CIRCUITOS INTEGRADOS - A invenção do transistor revolucionou o campo da Eletrônica, entretanto o transistor foi apenas o início de uma nova era. O atual desenvolvimento da Eletrônica foi causado, sem dúvida, pela invenção do circuito integrado (CI).

Vamos ilustrar com o integrado TAA 310 que emprega um invólucro metálico do tipo TO, cuja vista inferior da sua base, para identificação dos terminais, está ilustrada na figura abaixo:

FIGURA 30



SÍMBOLO PARA REPRESENTAR OS
CIRCUITOS INTEGRADOS LINEA-
RES.



VISTA INFERIOR DA BASE DO
CI TAA 310 PARA IDENTIFICA-
ÇÃO DOS TERMINAIS.

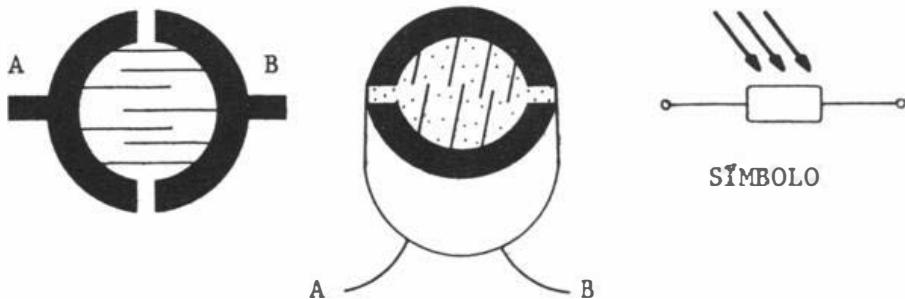
DISPOSITIVOS FOTOSSENSÍVEIS - São componentes eletrônicos, cujo funcionamento é influenciado pela intensidade da luz que neles incide.

Entre os dispositivos semicondutores, cujo princípio de funcionamento baseia-se no fenômeno de fotocondutividade, temos: os fotoresistores, os fotodiodos e os fototransistores.

FOTORESISTORES

Também chamado de resistor dependente de luz ou simplesmente LDR (do inglês: Light Dependent Resistor).

Detalhes construtivos e símbolo são dados na figura a seguir:



DETALHES CONSTRUTIVOS

FIGURA 31

FOTODIODOS

São constituídos, basicamente, da mesma forma que o diodo de junção. A diferença é que a junção "P-N" do fotodiodo é acondicionada em um invólucro metálico, em cuja parte superior existe uma pequena "janela" (de material transparente), por onde penetram os raios de luz.

Na figura abaixo, a estrutura e o símbolo de um fotodiodo:

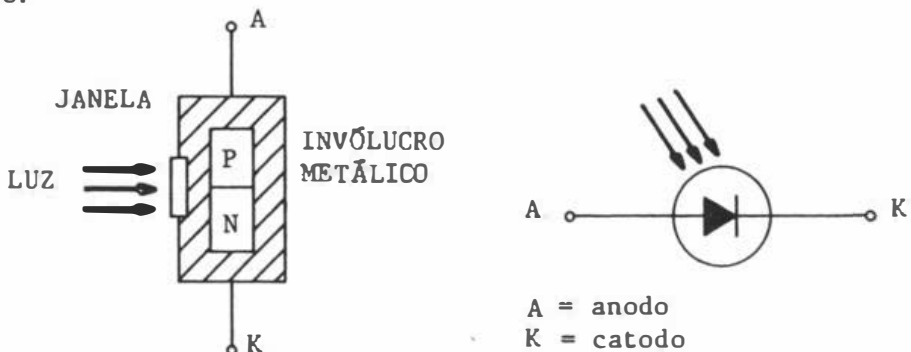


FIGURA 32

FOTOTRANSISTORES

São basicamente constituídos de duas junções "P-N" acondicionadas num invólucro metálico, havendo, em uma das extremidades do invólucro, uma pequena lente que concentra os raios

de luz sobre a junção base-coletor, chamada junção fotossensível do transistor.

A estrutura simplificada e símbolos são dados logo abaixo:

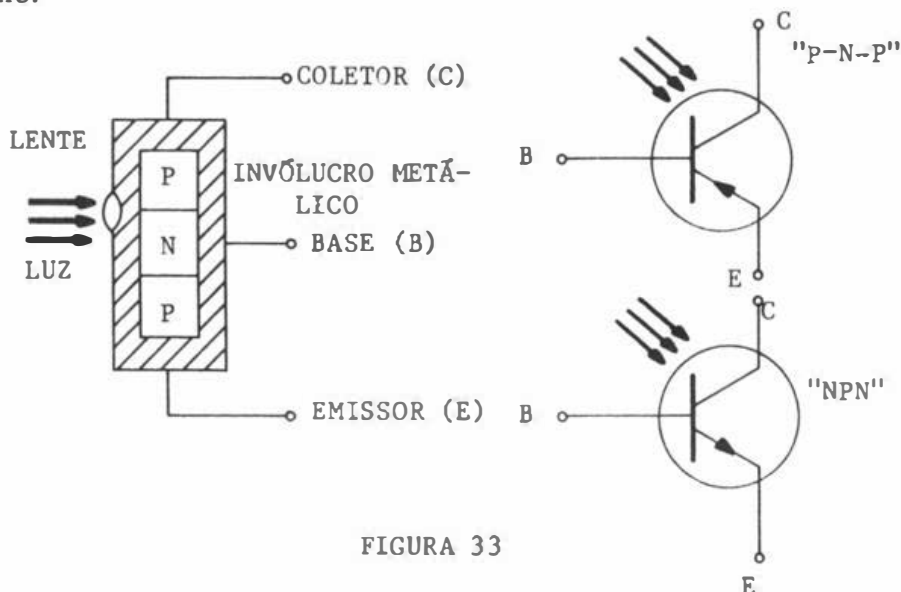


FIGURA 33

TERMISTORES

É um tipo especial de resistor de uso mais restrito, cuja resistência ôhmica varia de uma forma bastante acentuada com a temperatura.

Temos também os termistores com coeficiente positivo de temperatura, mais conhecidos por termistores do tipo PTC. E temos aqueles com coeficientes negativos de temperatura, mais conhecidos por termistores do tipo NTC.

Símbolos mais usados para representar os termistores (NTC e PTC)



FIGURA 34

CIRCUITOS DIGITAIS

Abaixo temos os principais significados usados em entra das e saídas dos circuitos digitais:

Entradas

- | Lógica 1(+) habilita o dispositivo ou circuito.
- | Lógica 0(-) não habilita o dispositivo ou circuito.
- | Lógica 0(~) habilita o dispositivo ou circuito.
- | Lógica 1(+) não habilita o dispositivo ou circuito.

Saídas

- | — Saída de um dispositivo ou circuito não invertida.
- | — Saída de um dispositivo ou circuito invertida.

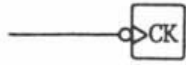
NOTA: Os termos "clocked", "strobe" e "sincronic" são freqüen temente usados no lugar de gatilhado.

Simbologias usuais das conexões do clock:

—  Dispositivo, cujas saídas seguem os estados de entrada, enquanto o clock está no nível lógico + (1)

—  Dispositivo, cujas saídas seguem os estados de entrada, quando o clock está no nível lógico -(0).

—  Dispositivo, cujas saídas mudam de estado na subida do pulso de clock (BORDO FRONTAL ALTÔ "EDGE POSITIVO").

—  Dispositivo, cujas saídas mudam de estado na descida do pulso de clock (BORDO FRO TAL BAÍXO "EDGE NEGATIVO").

Para saídas de dispositivos digitais e circuitos, aplicam-se as seguintes convenções:



Se existe um círculo na intersecção da linha de saída com o diagrama de bloco, significa que a saída do dispositivo ou circuito é invertida.



Se não existe um círculo na intersecção da linha de saída com o diagrama de bloco, significa que a saída do dispositivo ou circuito não é invertida.

PORTAS LÓGICAS BÁSICAS

PORTA E:

Pode ser definida como "saída 1, somente se todas as entradas forem 1" e a função lógica E funciona deste modo. E a saída será (+) (nível alto), somente quando todas as entradas estiverem no nível (+) (alto).

Símbolo:



FIGURA 35

PORTA OU:

A função OU é definida como aquela que tem saída 1, quando houver uma ou mais entradas 1.

Símbolo:



FIGURA 36

PORTA NÃO (INVERSOR)

Para invertermos os sinais em circuitos lógicos, usamos a PORTA NÃO, também conhecida como inversor. É a mais simples de todas as portas, tem somente uma entrada e uma saída.

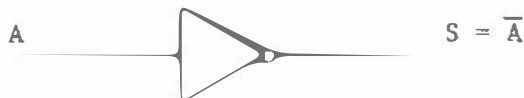


FIGURA 37

PORTA NÃO-E

A função NÃO-E pode ser definida como saída 0, somente se ambas as entradas forem 1.

A PORTA NÃO-E pode ser representada pelo símbolo de uma PORTA E, seguida de um pequeno círculo que indica a inversão (ou pode ser formada por um PORTA E seguido de um NÃO).

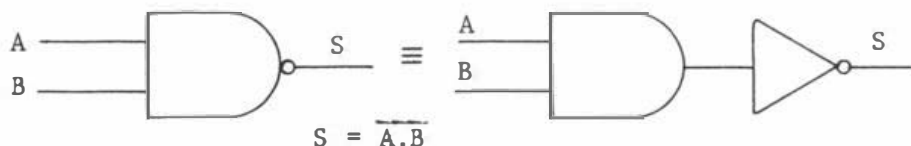


FIGURA 38

PORTA NÃO-OU

A função NÃO-OU é definida como saída 0, se pelo menos uma das entradas for 1.

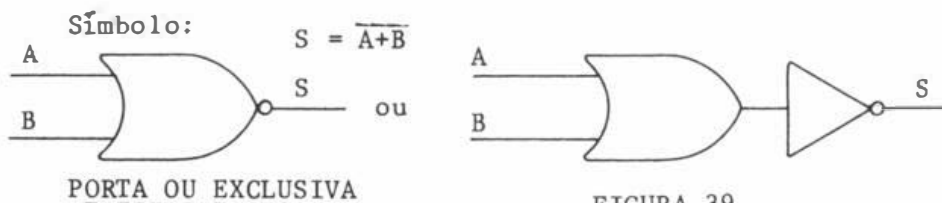
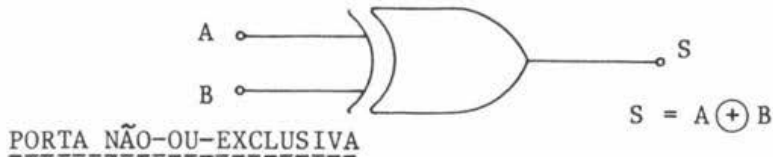


FIGURA 39

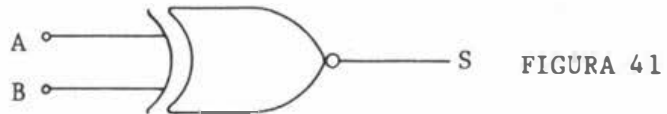
A função "OU EXCLUSIVA" é igual a "1", somente quando o número de bits 1 das variáveis forem ímpar, e caso contrário, a função "OU EXCLUSIVA" será igual a "0".

Seu símbolo é dado por:

FIGURA 40

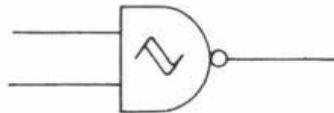


É representada por um bloco exclusivo-ou, seguido de um pequeno círculo que indica a inversão:



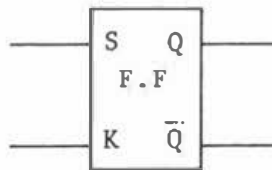
SCHMITT TRIGGER

Podemos usá-lo como quadrador de onda ou modelador de pulsos. A seguir, seu símbolo:



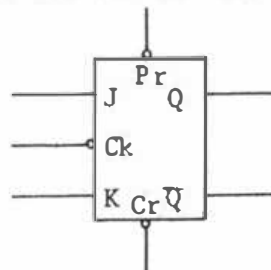
FLIP-FLOPS - São elementos que permitem o armazenamento temporário de dados, constituindo-se em peças muito importantes na realização de contadores binários e registros de dados.

Símbolo a seguir:



FLIP-FLOP RS - RS significa reset-set, ou seja, possui dois terminais de entrada que têm por função ativar (set) e desativar (reset) o FF.

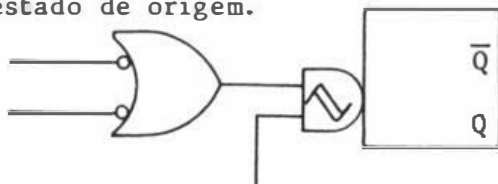
Seu símbolo:



MULTIVIBRADOR MONOESTÁVEL - O multivibrador monoestável, tem um estado estável, saturação ou corte, em qualquer das regiões. Um pulso externo de disparo quando corretamente aplicado, faz com que o mesmo passe de um estado a outro, mas sempre voltando ao seu estado de origem.

Símbolo:

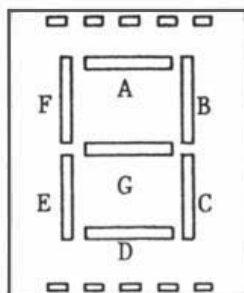
FIGURA 45



DISPLAYS - São muito usados em circuitos contadores, freqüencímetros, analisadores de circuitos, etc.

Seu símbolo básico é:

FIGURA 46



REGISTROS DE DESLOCAMENTO

Registros - São elementos encontrados onde quer que se deseje um armazenamento temporário de bits ou o seu deslocamento.

Veja abaixo o símbolo de um registro de deslocamento:

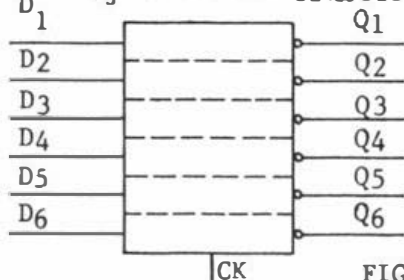


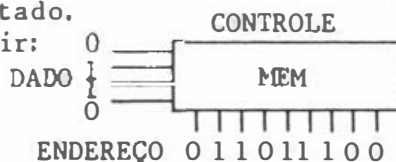
FIGURA 47

A vantagem dos registros de deslocamento está no nº de terminais de entrada e saída, que determina a quantidade de canais para a transmissão dos dados de entrada para os de saída.

MEMÓRIAS DE SEMICONDUTOR - As memórias implementadas com semicondutores se apresentam na forma de circuitos integrados e são, geralmente, constituídas por flip-flop's ou simplesmente por transistores ou diodos que se encontram em um outro estado de operação: conduzindo ou cortado.

Seu símbolo é dado logo a seguir:

FIGURA 48





CURSOS DE APERFEIÇOAMENTO

CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

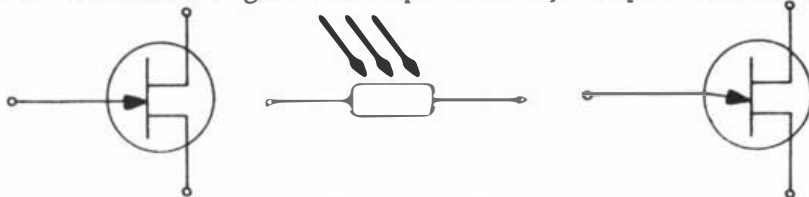
CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-17

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

1) Os símbolos seguintes representam, respectivamente:



- a) um mosfet, um NTN e um FET;
 - b) um CI, um LDR e um PTC;
 - c) um JFET, um LDR e um UJT;
 - d) um mosfet, um JFET e um LDR.
- 2) A sigla LDR significa:
- a) luz diretamente refletida;
 - b) resistor dependente da luz;
 - c) ligação de retorno;
 - d) diodo emissor de luz.
- 3) Supridouro, GATE e DRENO são os terminais do:
- a) transistor bipolar;
 - b) transistor de efeito de campo;
 - c) transistor unijunção;
 - d) fotodiodo.

4) A sigla SCR significa:

- a) simples circuito retificador;
- b) retificador sem controle;
- c) sistema controlado remotamente;
- d) retificador controlado de silício.

5) Os símbolos abaixo representam, respectivamente:

- a) um LED e um SCR;
- b) um CI e um transistor;
- c) um diodo Zener e um SCR;
- d) um LED e um diodo Zener.



6) O símbolo abaixo corresponde ao:

- a) capacitor variável;
- b) capacitor condensador;
- c) capacitor fixo;
- d) SCR.



7) Os símbolos lógicos abaixo correspondem respectivamente a:



- a) função E, função NÃO;
- b) função E, função OU;
- c) função E, função OU EXCLUSIVO;
- d) função E, função NÃO OU.

8) O símbolo  corresponde:

- a) função não E;
- b) função não OU;
- c) função OU;
- d) função NÃO.

9) O símbolo lógico  corresponde a uma função:

- a) OU EXCLUSIVO;
- b) E;
- c) NÃO E;
- d) NÃO.

10) O símbolo correspondente a uma pilha é:



LIÇÃO E-18

RETIFICADORES E ESTABILIZADORES

Com o desenvolvimento atual da tecnologia eletrônica, as fontes de alimentação dos equipamentos modernos (microcomputadores, amplificadores de som, receptores de TV, etc) utilizam, quase que exclusivamente, diodos semicondutores de junção, substituindo os diodos a vácuo (válvulas termoiônicas).

Nesse tipo de aplicação, são mais usados os diodos de silício.

Os diodos retificadores de silício apresentam uma série de vantagens com relação à válvula eletrônica: menor potência consumida, tamanho reduzido, baixa resistência direta e, portanto, pequena queda de tensão na condução, etc, motivos que justificam o seu grande uso.

Para uma melhor assimilação do assunto que passaremos a expor, vamos explicar o que é uma junção "PN".

A JUNÇÃO "PN"

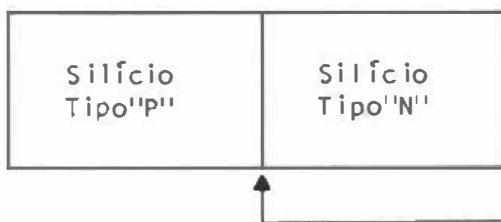


Figura 1

Junção "P-N"

Se um cristal de silício do tipo P estiver unido a um do tipo N, a região de contato entre esses dois cristais, semicondutores dopados, receberá o nome de junção P-N.

Quando uma junção "P-N" é polarizada diretamente, ou seja, quando o pólo positivo (+) da bateria é ligado ao cristal P e o pólo negativo (-) ao cristal N, verifica-se que uma corrente muito intensa atravessa a junção (Fig. 2), isso ocorre devido à polarização direta da junção.

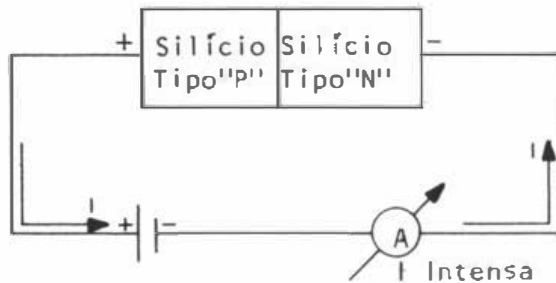


Figura 2

Quando, porém, uma junção "P-N" é polarizada inversamente (o pólo positivo (+) da bateria, ligado ao cristal N e o pólo negativo (-) ao cristal P), verifica-se que nenhuma corrente atravessa a junção (Fig. 3), assim sendo, concluímos - que a junção permite a passagem de corrente elétrica em um único sentido, correspondente à polarização direta.

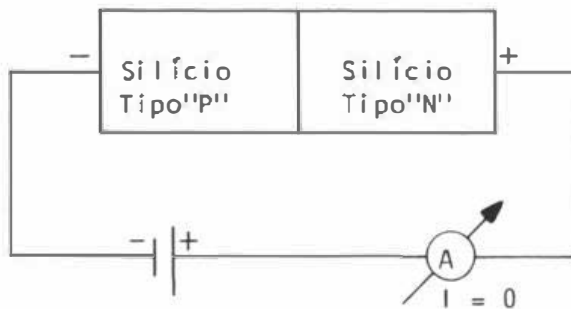


Figura 3

Na realidade, quando a junção "P-N" é polarizada no sentido inverso, verifica-se que uma corrente elétrica atravessa a junção (corrente inversa de saturação ou corrente de fuga). Como, porém, a intensidade dessa corrente inversa é muito pequena (alguns μA , $\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$), quando comparada com a corrente direta (dezenas ou centenas de $\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$), normalmente ela é desprezada.

CIRCUITOS RETIFICADORES COM DIODOS SEMICONDUCTORES DE JUNÇÃO.

Faremos uma comparação entre um diodo semicondutor e uma chave (ou interruptor simples). Esta analogia será muito útil para explicar o funcionamento dos diversos retificadores encontrados na prática.

Quando o diodo semicondutor é polarizado no sentido direto, a corrente que o atravessa é muito intensa. Nesse caso, o diodo pode ser entendido como uma chave fechada, pois a resistência oferecida à passagem da corrente elétrica é praticamente nula, (Fig. 4A).

Entretanto, quando o diodo semicondutor é polarizado no sentido inverso, praticamente, não há passagem de corrente e o diodo pode ser entendido como uma chave aberta porque a resistência oferecida é extremamente elevada, (Fig. 4B).

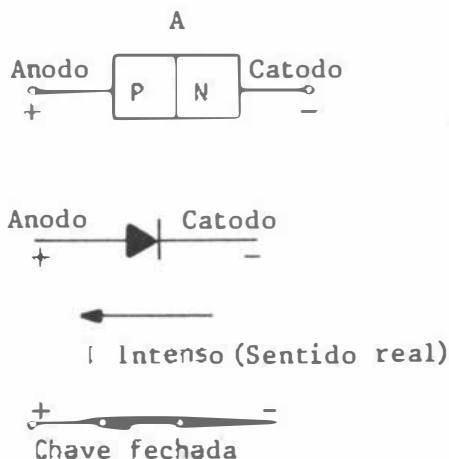


FIGURA 4A

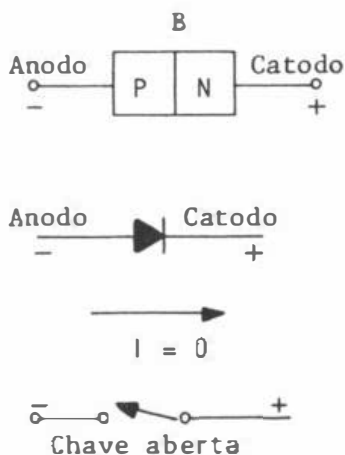


FIGURA 4B

Com base nesses conceitos, já podemos analisar o funcionamento dos circuitos retificadores, práticos com diodos semicondutores.

CIRCUITO RETIFICADOR MONOFÁSICO DE MEIA ONDA

Para convertermos uma corrente alternada em corrente contínua pulsante, utilizamos os diodos retificadores, mencionados há pouco. Na figura 5, temos representado o circuito retificador monofásico de meia onda, monofásico porque é alimentado por uma única fase da rede alternada (veja apostila E-15), onde explicamos detalhadamente os sistemas monofásicos e trifásicos.

O circuito da figura 5 consiste de um transformador, cujo enrolamento primário está ligado à rede, de tensão alternada. No enrolamento secundário temos um diodo semicondutor que chamamos de D e uma resistência R_c em série, conhecida como resistência de carga.

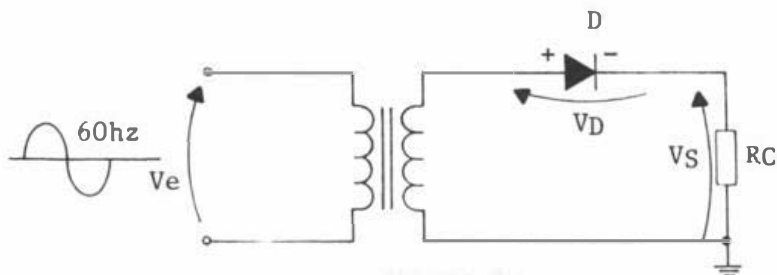


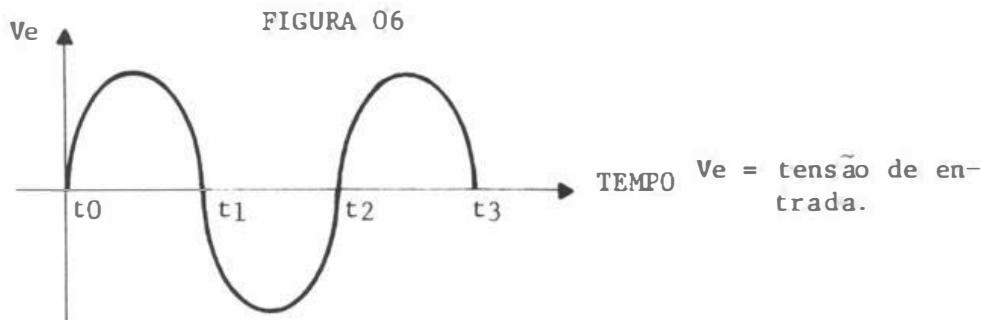
FIGURA 05

Considerando o semiciclo positivo da tensão de entrada, teremos no anodo do diodo uma tensão positiva em relação ao catodo, o diodo D estará polarizado no sentido direto, logo teremos a passagem de corrente, (D funciona como uma chave fechada). Durante este semiciclo, teremos a circulação de corrente pelo diodo e pela carga. Se o diodo for de silício, teremos uma queda de tensão V_d de 0,7 volts e, se for de germânio, essa queda será de 0,3 volts.

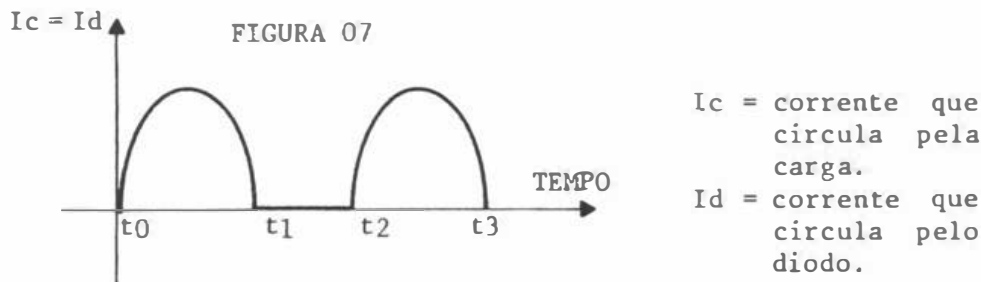
Já, no semiciclo negativo, o anodo do diodo D estará num potencial negativo em relação ao catodo. Nesse caso, o diodo D estará polarizado no sentido inverso, não permitindo a passagem de corrente, (D funciona como chave aberta).

Concluimos então que a corrente elétrica circula pelo resistor de carga R_c só durante os semiciclos positivos da tensão de entrada V_e .

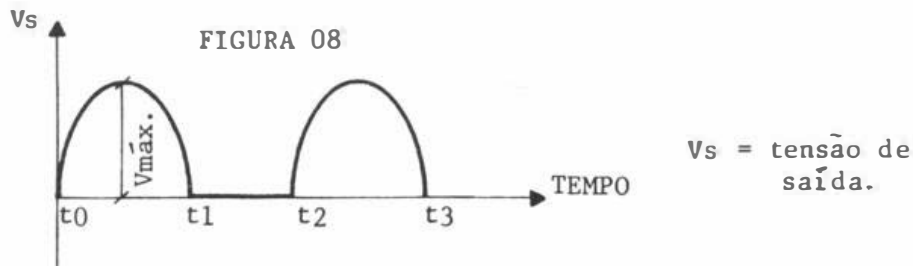
A figura 6 mostra a forma de onda da tensão aplicada à entrada do circuito.



A corrente que circula nos semiciclos positivos está indicada na figura 7.



Finalmente, temos a forma de onda e a tensão de saída obtida nos extremos do resistor R_c . Observe que os semiciclos negativos da tensão de entrada foram eliminados, figura 8.



Dizemos ser essa forma de onda final uma tensão contínua pulsante. Porém, a rigor, costuma-se chamá-la de tensão periódica, cujo período é o espaço de tempo compreendido de T_0 a T_2 (ciclo completo).

CIRCUITO RETIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA

Esse é o caso em que ambos os semiciclos positivo e negativo da entrada são retificados. Um dos circuitos retificadores de onda completa é apresentado pela figura 9, onde temos um transformador tipo "center tap", com o enrolamento primário, ligado à rede de alimentação e o enrolamento secundário com derivação central.

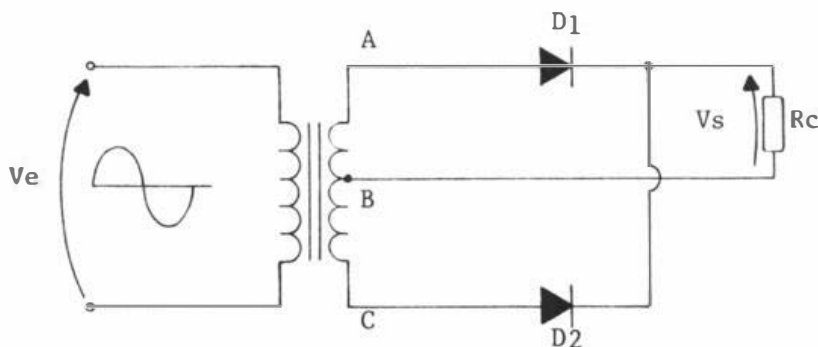
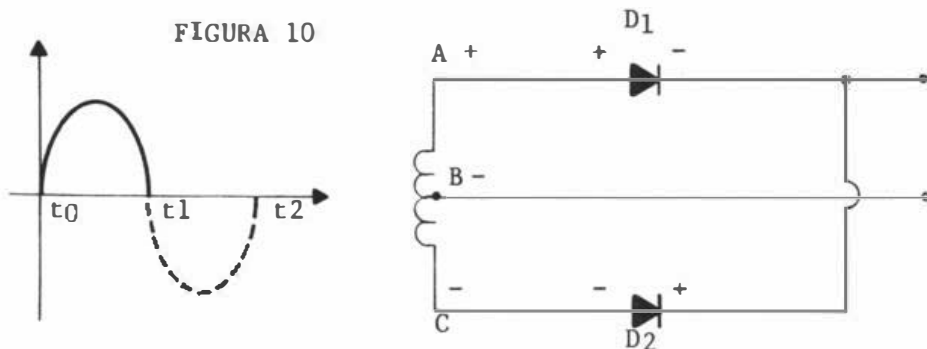


FIGURA 09

Vamos analisar inicialmente o comportamento da tensão no secundário, durante o semiciclo positivo. Tomando como referência a derivação central do transformador, o ponto A está a um potencial positivo e o ponto C, negativo, conforme a figura 10.

FIGURA 10



Dessa forma, o diodo D_1 estará conduzindo, comportando-se como uma chave fechada e o diodo D_2 estará no corte (chave aberta). Conseqüentemente, a corrente irá percorrer o caminho, conforme ilustra a figura 11.

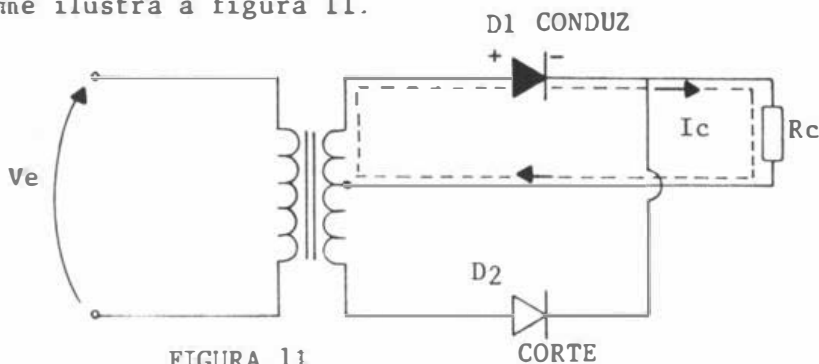


FIGURA 11

OBS. Corrente no sentido convencional.

Durante o semiciclo negativo, ocorre o inverso. Os pontos A e C terão as polaridades invertidas e os diodos D_1 e D_2 também, ver figura 12.

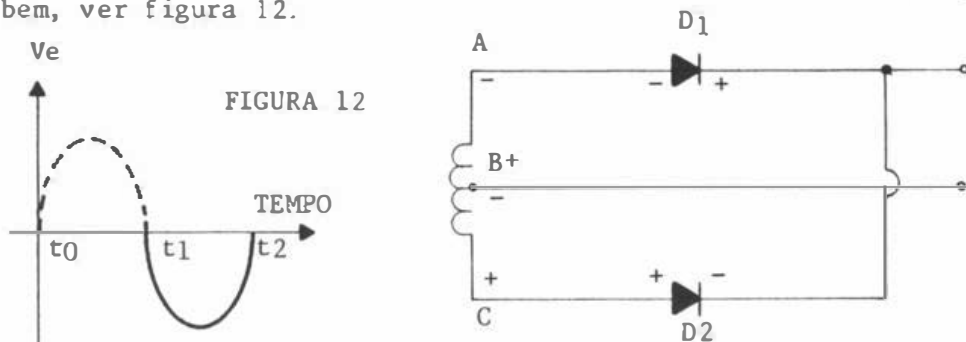


FIGURA 12

Agora, o diodo D_2 estará conduzindo, pois está polarizado diretamente, enquanto que D_1 estará cortado. E a corrente, então irá percorrer o caminho ilustrado na figura 13.

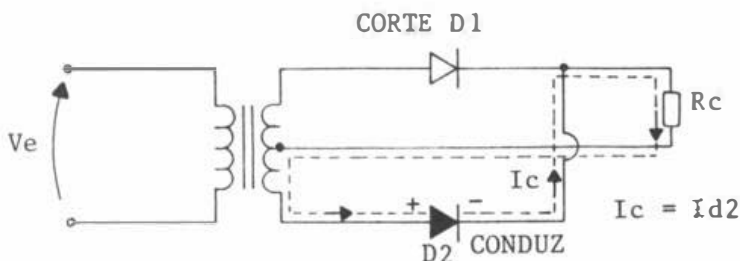
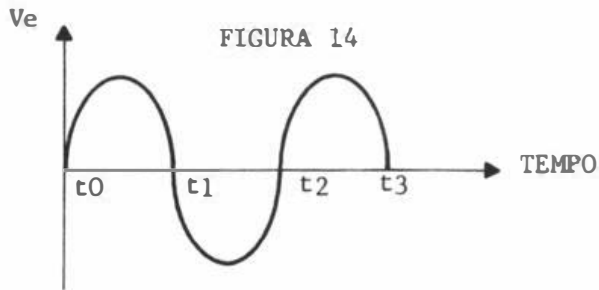


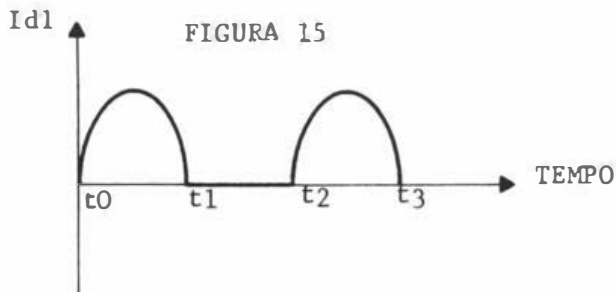
FIGURA 13

Deve-se notar que cada diodo conduz somente em cada semiciclo da tensão de entrada e, na carga, a corrente circula sempre em um único sentido.

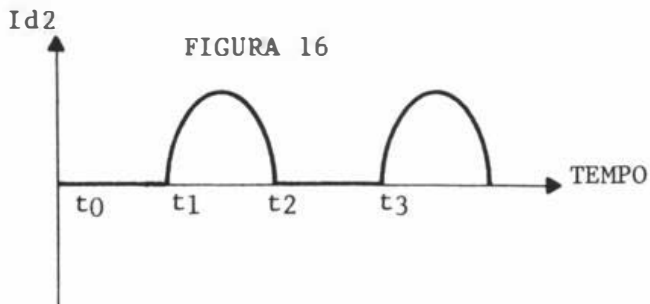
A figura 14 mostra a forma de onda da tensão de entrada.



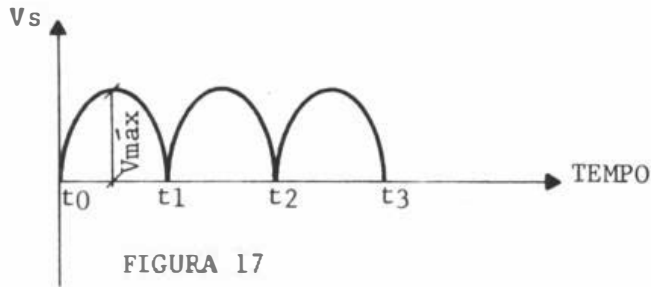
A corrente que circula nos semiciclos positivos é mostrada na figura 15.



A figura 16 mostra a corrente nos semiciclos negativos.



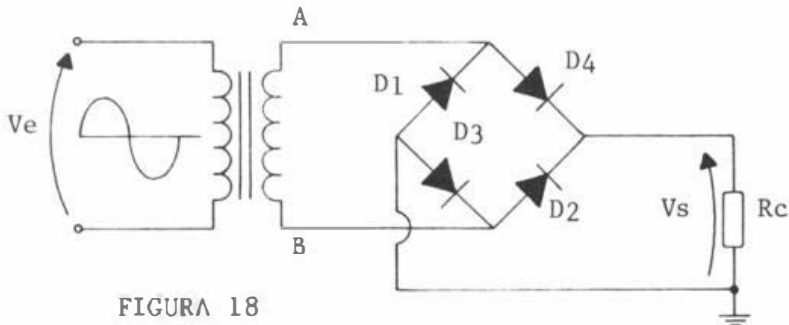
Finalmente, na figura 17, temos a forma de onda da tensão de saída nos extremos do resistor R_c .



É interessante notarmos que a frequência da onda de saída não é a mesma da onda de entrada. Com relação aos retificadores de onda completa, se a rede for de 60Hz, a frequência da onda de saída será de 120Hz.

CIRCUITO RETIFICADOR EM PONTE

O circuito retificador em ponte é um tipo de retificador de onda completa. É composto de quatro diodos semicondutores e o transformador não possui derivação central no secundário. Esse circuito é capaz de retificar altas tensões, uma vez que a tensão inversa, sobre cada diodo (D_1 e D_2 ou D_3 e D_4), é a metade da tensão total, aplicada (ver figura 18).



No semiciclo positivo de tensão de entrada, o ponto A estará com polaridade positiva em relação ao ponto B e os diodos

dos D3 e D4 irão conduzir (estarão em série), enquanto que os diodos D1 e D2 estarão polarizados inversamente, comportando-se como uma chave aberta, bloqueando a corrente (figura 19).

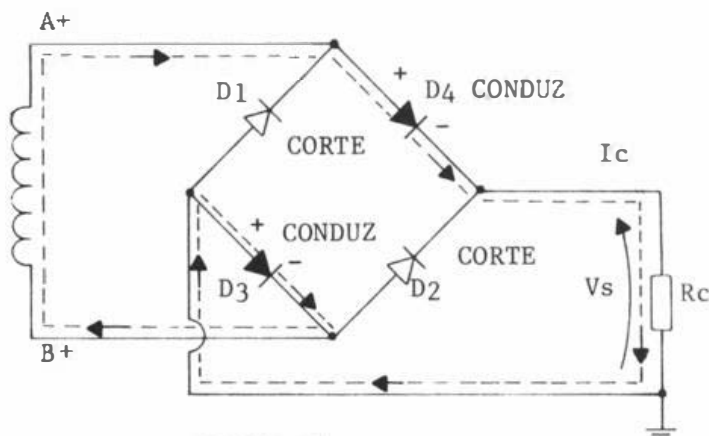
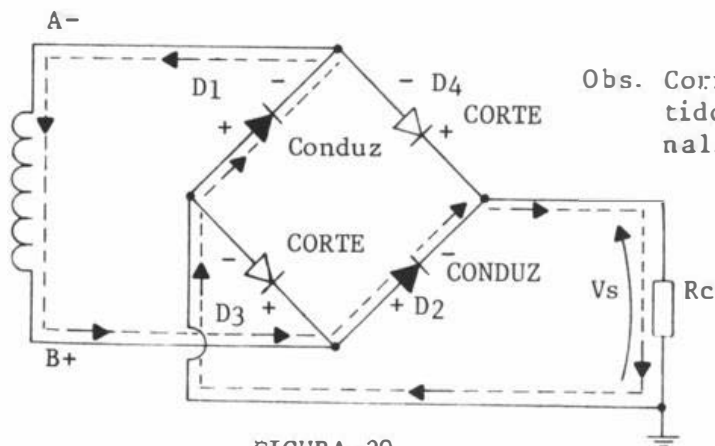


FIGURA 19

Obs. Corrente no sentido convencional.

No semiciclo negativo da tensão de entrada, ocorre o inverso (terminal A negativo e terminal B positivo). Os diodos D1 e D2 estarão polarizados diretamente e os diodos D3 e D4 estarão cortados, figura 20. Podemos concluir que: quando um par de diodo conduz, o outro estará cortado, (não conduz) e a corrente elétrica sempre atravessará o resistor R_c em um único sentido.

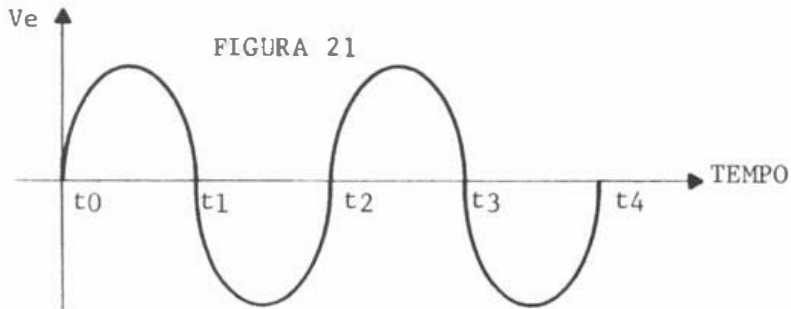


Obs. Corrente no sentido convencional.

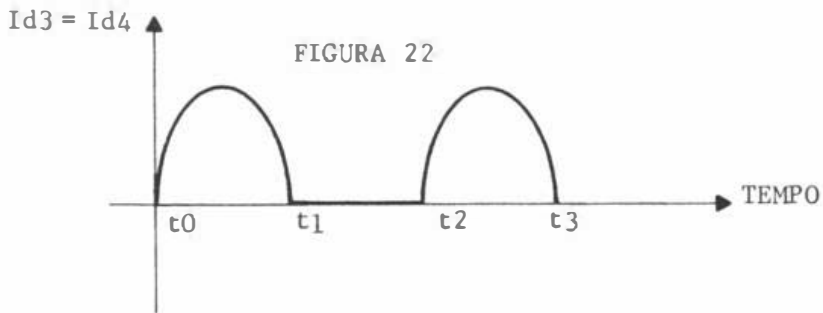
FIGURA 20

As formas de onda da tensão de entrada e da corrente que circula pelos diodos D_1 , D_2 , D_3 e D_4 são mostradas pelas figuras 21, 22 e 23.

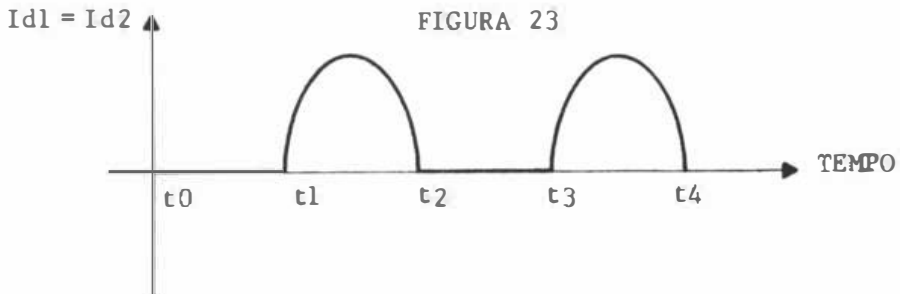
Forma de onda da tensão de entrada :



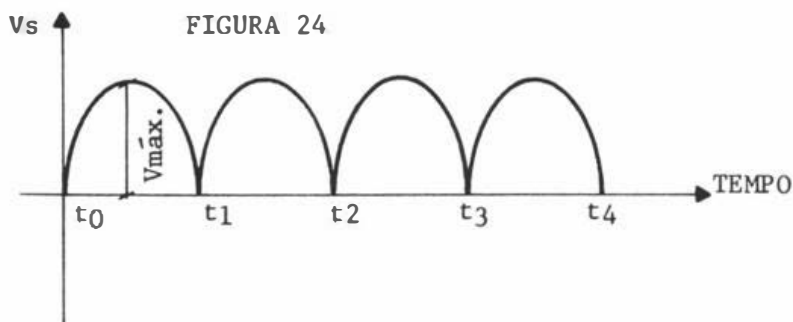
Forma de onda da corrente que circula por D_3 e D_4 :



Forma de onda da corrente que circula por D_1 e D_2 :



A forma de onda da tensão de saída nos extremos do resistor R_c é mostrada na figura 24.



PONTES RETIFICADORAS DE ONDA COMPLETA

Atualmente, a montagem de um circuito retificador em ponte é bastante simples e compacta, graças ao desenvolvimento das chamadas: pontes retificadoras de onda completa. Elas são simplesmente um conjunto de quatro diodos semicondutores, interligados, conforme o circuito retificador em ponte e acondicionados em um único invólucro.

FIGURA 25

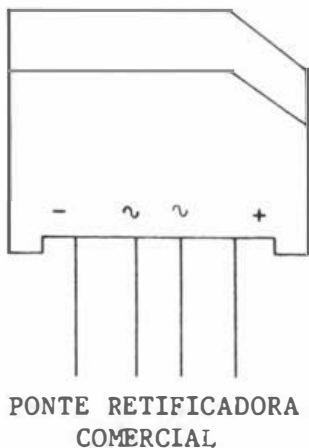
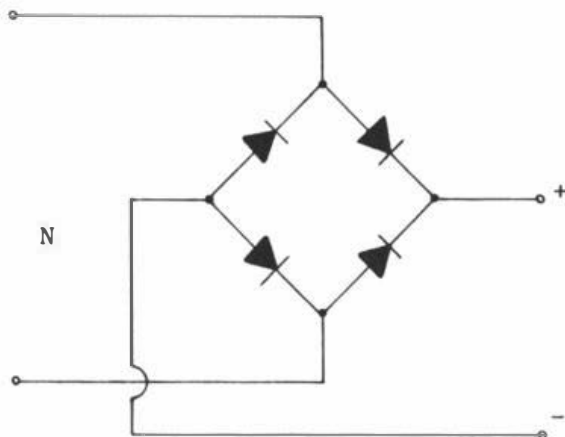


FIGURA 25A



Na figura 25, temos o aspecto de uma ponte retificadora de onda completa de silício, encontrada no comércio. Na figura 25A, temos o seu circuito equivalente, onde o sinal ($\sim$) são os terminais de entrada e os sinais (+) e (-) indicam os terminais de saída.

CIRCUITOS PARA FILTRAGEM

Em qualquer dos tipos de retificadores que descrevemos, a tensão de saída obtida ondulava entre um valor máximo e mínimo. Como necessitamos de um valor contínuo e constante, isento de quaisquer flutuações, é preciso elaborarmos alguns circuitos que impeçam essas flutuações. Esses circuitos recebem o nome de circuitos de filtragem, ou apenas filtros.

As expressões matemáticas mostram que as ondas de saída dos retificadores são bem complexas, pois constam de termos senoidais, além do termo contínuo. O que se pretende é que os termos senoidais não atinjam a carga. Devemos separar (filtrar) os termos alternandos do termo contínuo. Por essa razão, os circuitos que cumprem essa finalidade recebem o nome de filtros. As expressões que mostram a complexidade das ondas de saída, não serão por nós demonstradas, pois não é essa a finalidade deste curso.

Há dois tipos genéricos de filtros: os filtros de entrada capacitivos e os de entrada indutivos. Cada um possui as suas vantagens e inconveniências. Os filtros de entrada capacitivos fornecem tensões de saída mais altas, porém, quanto a regulação deixam muito a desejar.

Regulação de uma fonte vem a ser a maior ou menor flutuação da tensão de saída, de acordo com a carga de saída.

FILTRAGEM POR CAPACITOR

Consta somente de um simples capacitor, colocado em paralelo com a carga. As figuras 26 e 27 indicam os circuitos retificadores de meia-onda e de onda completa com o filtro capacitivo.

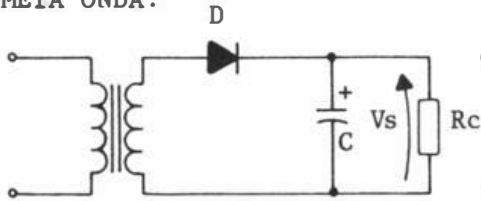
CIRCUITO RETIFICADOR DE
MEIA ONDA.

FIGURA 26

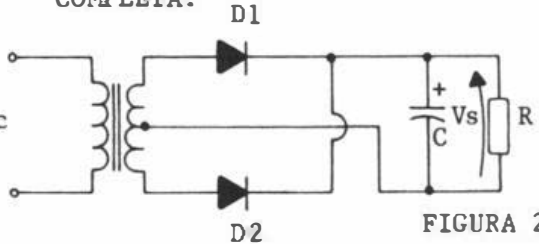
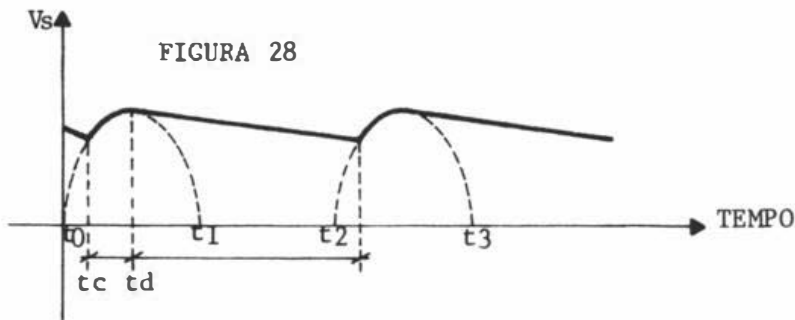
CIRCUITO RETIFICADOR DE ONDA
COMPLETA.

FIGURA 27

Com relação ao circuito da figura 26, notamos que, durante o semiciclo positivo, o diodo D estará conduzindo e o capacitor C irá se carregar com o valor da tensão de entrada. Durante o semiciclo negativo, o diodo estará cortado e o capacitor descarregar-se-á pela resistência R_c de carga, segundo uma exponencial. Se a corrente de carga fosse nula, isto é, se a carga ligada não absorvesse corrente, o capacitor não teria por onde se descarregar, visto que o diodo não conduz no sentido inverso (como se fosse uma chave aberta). Assim, teríamos um filtro perfeito com um fator nulo de ondulação (ripple) só que, na prática, isso não ocorre. A forma de onda da tensão de saída está ilustrada na figura 28.

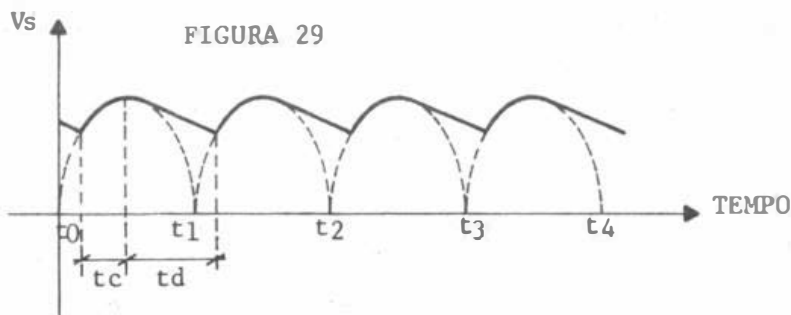


t_c - tempo de carga, instante em que o diodo está conduzindo e fornecendo carga para o capacitor.

t_d - tempo de descarga, instante em que o diodo não conduz, a tensão do catodo (fornecida pelo capacitor) é maior que sua tensão de anodo.

Para o retificador de onda completa (figura 27), o tempo de descarga será menor, visto que, quando um diodo não está conduzindo, o outro está. Logo, a reta correspondente a t_d não será tão prolongada. Com isso a tensão de saída não irá flutuar, reduzindo, desta forma, o fator de ondulação para os mesmos valores de C e R_c do retificador de meia onda.

A forma de onda da tensão de saída do retificador de onda completa (com filtro) está mostrada na figura 29.



A análise matemática dessas curvas, que acabamos de ver, é muito complexa, envolvendo muitos cálculos. Por esse motivo, não iremos realizar um estudo mais profundo, pois isso não é a finalidade deste curso.

FILTRO RC

Esse tipo de filtro permite maior passagem do valor contínuo da tensão V_1 que aparece nos terminais do capacitor C_1 , através de resistência R e do capacitor C_2 . Temos, assim, uma atenuação maior do fator de ondulação (ripple). Dessa forma, a filtragem é melhorada. A figura 30 indica o aspecto desse filtro. Os terminais A e B devem ser ligados à saída do re-

tificador que se deseja filtrar.

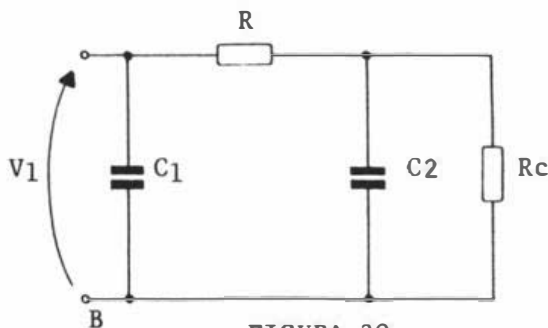


FIGURA 30

Esse tipo de filtro possui algumas desvantagens, como: custo maior, visto que a ele adicionamos um capacitor C_2 e uma resistência R_1 , além da tensão de saída ser menor, devido a inclusão do resistor R .

Considere, por exemplo, o circuito retificador de meia onda com filtro RC_1 , mostrado na figura 31.

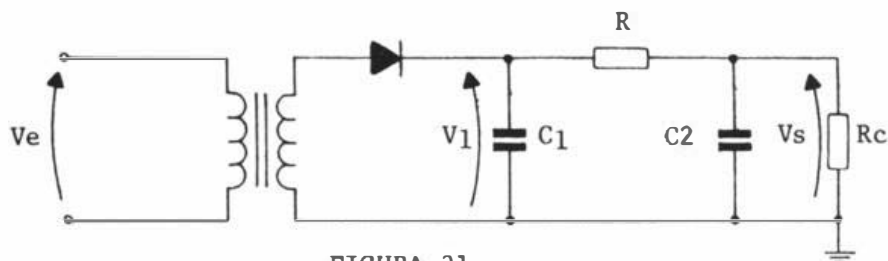
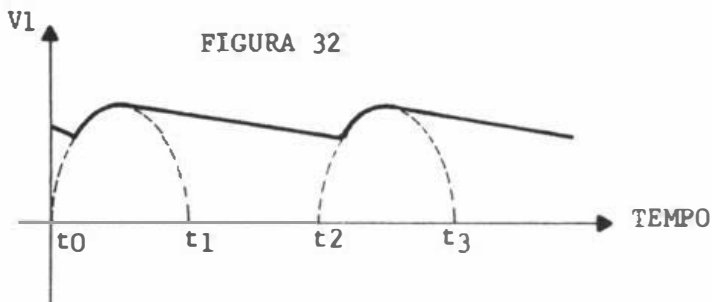
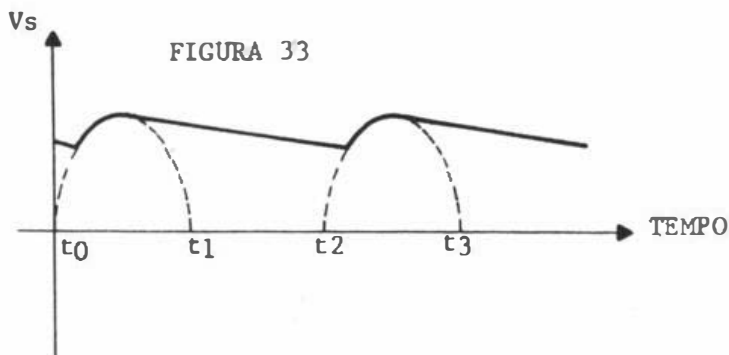


FIGURA 31

Nos semiciclos positivos, o capacitor C_1 se carrega com o valor da tensão de entrada V_e , apresentando um valor contínuo que iremos chamar de V_1 , conforme mostra a figura 32.



A seguir, a tensão V_1 é filtrada pelo conjunto RC2 e a tensão final irá apresentar uma ondulação menor do que a anterior, veja figura 33.



FILTRAGEM POR BOBINA

Trata-se de um filtro bem rudimentar, tal qual o filtro por capacitor. A bobina é ligada aos catodos de D1 e D2 e em série com a resistência de carga RC, conforme figura 34. Este é um filtro de entrada indutiva.

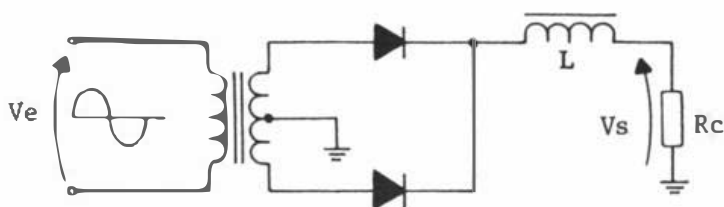


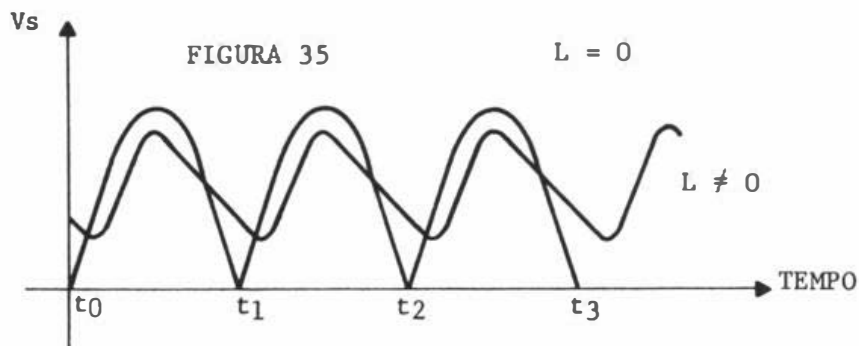
FIGURA 34

O coeficiente de auto-indução da bobina deve ter um valor elevado (algumas dezenas de Henrys), pois quanto mais elevado for esse coeficiente, menor flutuação teremos na tensão de saída.

As bobinas apresentam oposição à passagem de corrente alternada (veja lição E-6) e deixam passar a corrente contínua sem oposição. Porém, devido à resistência ôhmica da bobina, há uma diminuição da tensão contínua de saída.

Considerando o circuito da figura 34 em funcionamento, notaremos que, no instante t_0 , a tensão começará a crescer e,

consequentemente, ocorrerá a circulação da corrente elétrica através da bobina, acarretando, com isso, o aparecimento da força contra-eletromotriz (f.c.e.m.) que tende se opor à corrente. No entanto, à medida que a tensão vai se aproximando do seu valor máximo, a f.c.e.m. vai se enfraquecendo e a corrente adquirindo valores maiores (ver figura 35).



A tensão após ultrapassar o seu valor máximo, vai decrescendo. Então a f.c.e.m. inverte a polaridade e a corrente vai crescendo de valor, até a tensão se anular. Ao chegar no instante t_1 , a f.c.e.m. inverte de polaridade novamente e diminui o valor da corrente. Porém, conforme a tensão vai crescendo, ela vence a oposição da bobina e a corrente volta a se elevar indefinidamente.

Quanto maior o valor da indutância L , mais atrasados serão os picos da tensão de saída, em relação aos picos da tensão pulsante, aplicada.

Esse tipo de filtro não se utiliza em retificadores de meia onda, pois não é possível evitar que a corrente se anule, por maior que seja o valor da indutância L e a filtragem, nesse caso, seria muito ruim.

FILTRO EM L

Ambos os filtros com capacitor e bobina são bem rudimentares e não eliminam totalmente a flutuação da tensão de saída.

da. Para correntes de carga bem elevadas, costumam-se usar filtros constituídos de capacitores e de indutores. Quando as correntes de carga não são muito elevadas, podem-se substituir as indutâncias por resistências, para baratear o custo do filtro.

Um desses filtros utilizados é o filtro em L. Leva esse nome, devido ao fato de seus elementos L e C se disporem como uma letra L, porém invertida. A figura 36 mostra um retificador de onda completa com o filtro LC.

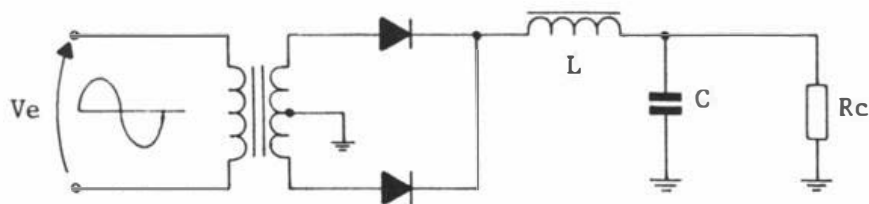


FIGURA 36

A indutância L do circuito acima (figura 36) diminui a ondulação, deixando o sinal contínuo passar sem modificar-se. O capacitor, por sua vez, atenua a flutuação restante e mantem a tensão a um valor constante.

FILTRO π

Este filtro é constituído de três elementos: dois capacitores e uma indutância. Leva esse nome, porque seus elementos constitutivos formam uma figura semelhante à letra grega π . A figura 37 ilustra um retificador de onda completa com filtro π .

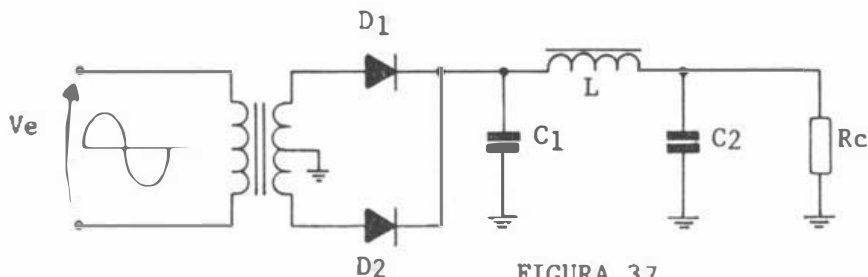


FIGURA 37

É um filtro de entrada capacitivo, pois o capacitor C_1 é ligado diretamente aos catodos dos diodos D_1 e D_2 . A tensão de saída tende a ser a de pico do sinal de entrada, pois o capacitor se carrega ao máximo. Porém um aumento na corrente de carga faz com que C_1 se descarregue mais rapidamente, diminuindo assim a tensão contínua na saída.

É utilizado quando se pretende um fator de ondulação inferior ao do filtro em L ou ao do tipo por capacitor, ou ainda, quando se requer uma tensão de saída mais elevada do que a do filtro em L. Todavia a regulação desse tipo de filtro não é boa.

Costuma-se, às vezes, por medida de economia, substituir o indutor por um resistor. Essa resistência não afeta a corrente de pico do diodo que fica sendo comandada, quase que exclusivamente pelo capacitor de entrada C_1 , porém a regulação será extremamente pobre.

A seguir, vamos enumerar algumas definições, comumente, atribuídas aos diodos semicondutores.

Tensão inversa de pico (V_{ip}) = É a máxima tensão que atua sobre o diodo, quando este não está conduzindo. Para o circuito retificador em ponte, $V_{ip} = V_{m\acute{a}x}$. Para o retificador de onda completa e meia onda, $V_{ip} = 2.V_{m\acute{a}x}$. Em projetos, esse valor é importante, pois o diodo deve suportar essa tensão aplicada sobre ele, no instante em que não conduz.

Corrente média de condução (I_{dc}) - É a corrente C.C. consumida pela carga.

Corrente de pico máxima - É o valor da corrente que flui pelo diodo, quando a tensão direta aplicada sobre ele, atinge seu valor máximo.

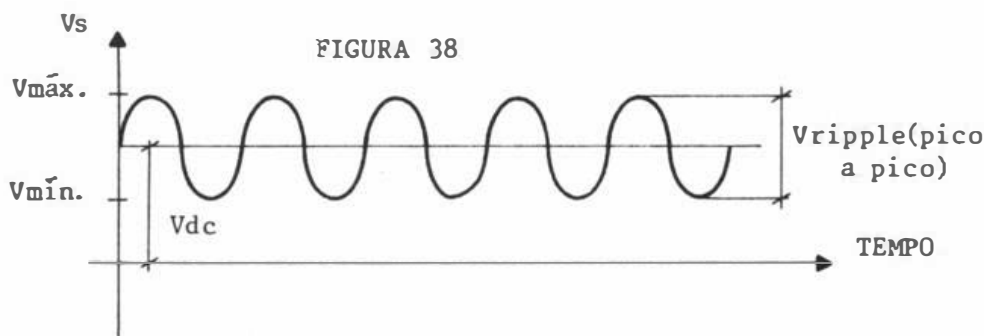
Corrente reversa (I_r) - É o restrito valor da corrente que flui pelo diodo semicondutor, quando este é submetido a uma polarização reversa.

Fator de ondulação (ripple) - É a relação entre o valor eficaz da tensão pelo seu valor médio ou contínuo, na saída do circuito. Em porcentagem, é dado por:

$$\%r = \frac{\text{tensão eficaz de ripple}}{\text{tensão contínua}} \times 100$$

$$\%r = \frac{V_{ef} \text{ (ripple)}}{V_{dc}} \times 100$$

Para melhor entendimento, verifique o gráfico da figura 38. Ele ilustra uma senóide com um sinal contínuo e constante (V_{dc}).



Se medirmos essa tensão com um voltímetro DC, obteremos o valor contínuo ou médio V_{dc} . Porém, se utilizarmos um voltímetro tipo AC, iremos obter o valor eficaz da senóide, V_{ef} (ripple), que será a ondulação indesejável.

Obs.: todos os valores mencionados nas folhas de especificações dos fabricantes variam com a temperatura. Em circuitos que trabalham sob temperaturas mais elevadas, deve-se tomar cuidado no dimensionamento dos diodos, devido a essa variação.

MÉTODO PRÁTICO PARA O CÁLCULO DE RETIFICADORES

Vamos, a seguir, mostrar um método prático para o cálculo dos retificadores vistos até agora. Trata-se de um método gráfico, onde são utilizados ábacos, conhecidos como curvas de Schade.

Antes de abordarmos o método, iremos esclarecer a nomenclatura utilizada nas curvas.

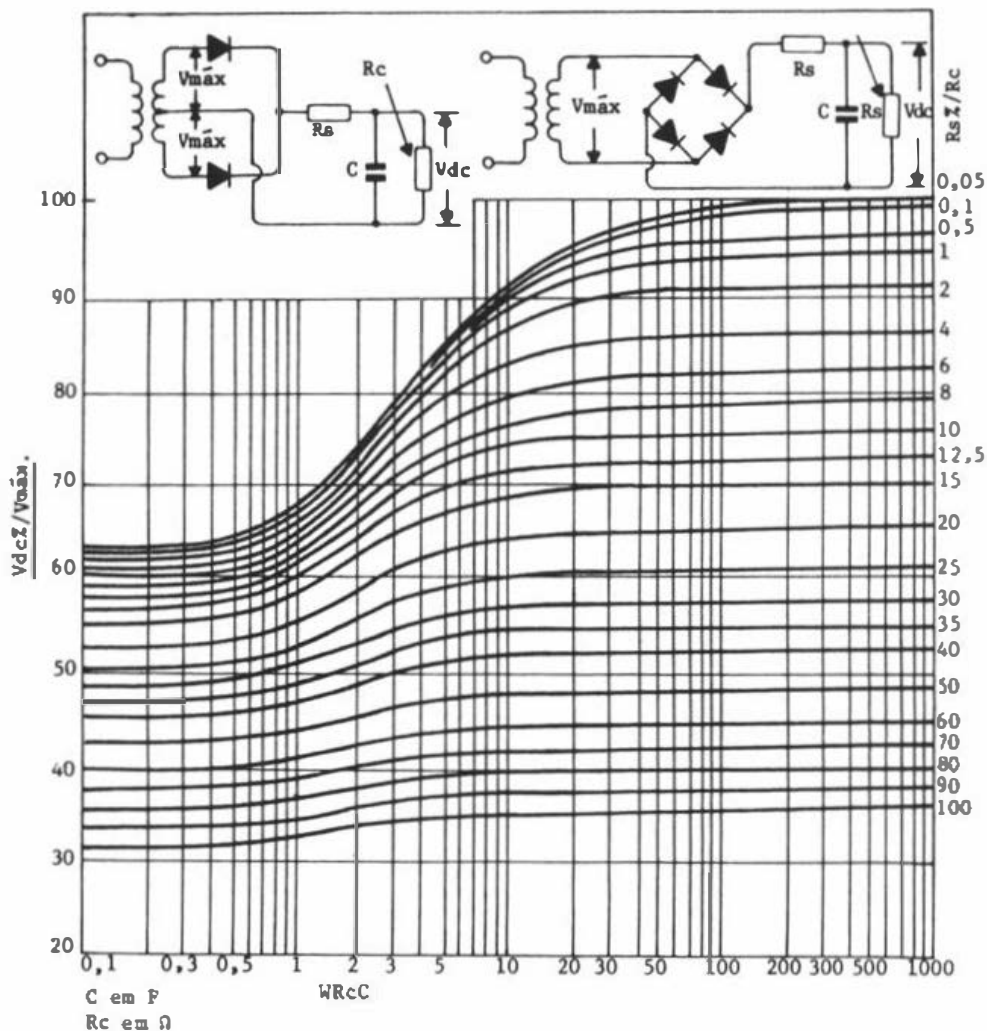
NOMENCLATURA:

V_{dc} = tensão média na carga;
 V_{ef} = tensão eficaz no secundário do transformador;
 $V_{m\acute{a}x}$ = tensão de pico no secundário do transformador;
 V_{ip} = tensão inversa de pico sobre o diodo;
 I_{dc} = corrente média no diodo (ou na carga);
 I_{pnr} = corrente de pico transitória (corrente de pico não repetitiva);
 I_{ef} = corrente eficaz no diodo;
 I_{pr} = corrente de pico repetitiva no diodo;
 f_r = frequência da rede ($\omega = 2\pi f_r$);
 $\%r$ = porcentagem de ripple.

A seguir, o roteiro de como utilizar as curvas das figuras 39, 40, 41, 42 e 43, de modo a obtermos os dados necessários para o cálculo de um retificador. As curvas são utilizadas para circuitos retificadores monofásicos de meia onda, de onda completa e em ponte.

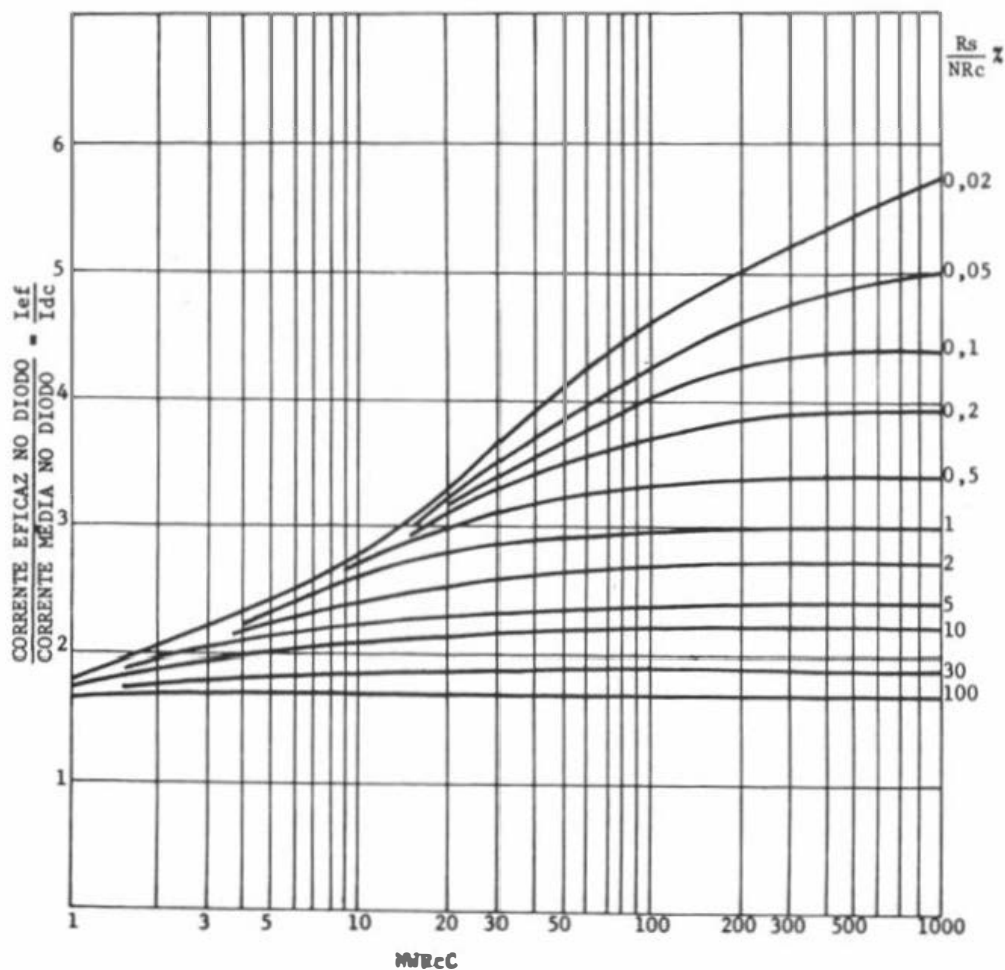
As figuras 39 e 40 fornecem a relação $V_{dc}/V_{m\acute{a}x}$ em função de $W R_c C$, para circuitos monofásicos de meia onda e monofásicos de onda completa. A relação $V_{dc}/V_{m\acute{a}x}$ depende do valor R_s/R_c . Para se ter uma boa regulação, deve-se escolher o valor de $W R_c C$, de tal forma que caia na parte plana das curvas 39 e 40.

FIGURA 40



A figura 41 permite obtermos o mínimo valor de $WRc.C$ a ser utilizado, para reduzirmos a ondulação a níveis aceitáveis.

FIGURA 42



$N = 1$ para retificadores monofásicos de meia onda.

$N = 2$ para retificadores monofásicos de onda completa.

$N = 0,5$ para dobradores de tensão.

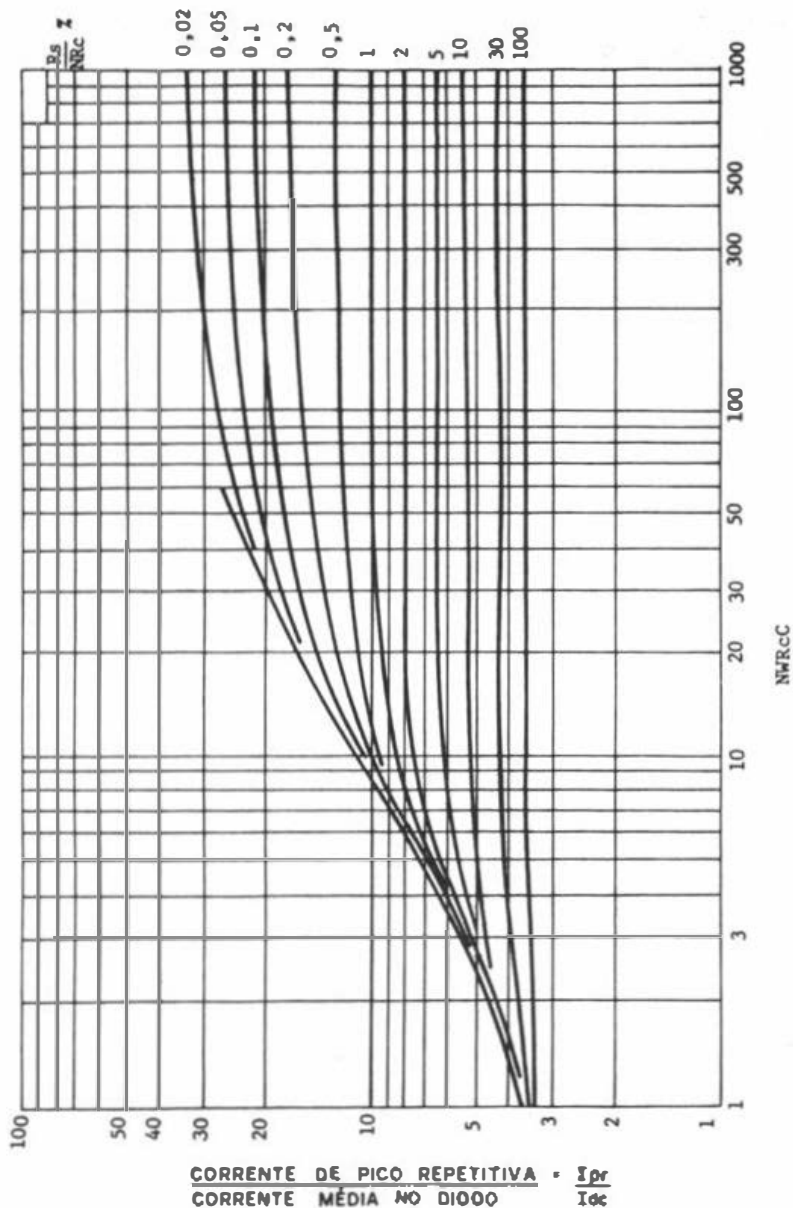


FIGURA 43

$N = 1$ para retificadores monofásicos de meia onda.
 $N = 2$ para retificadores monofásicos de onda completa.
 $N = 0,5$ para dobradores de tensão.

A seguir, vamos mencionar as diversas fases de cálculo e a seqüência a ser observada.

Roteiro:

- 1º - Determinar o valor de R_c (resistência de carga);
- 2º - Assumir um valor para R_s entre 1% e 10% do valor de R_c ;
- 3º - Calcular em porcentagem o valor R_s/R_c ;
- 4º - Com $R_s/R_c\%$, fixar um fator de ondulação para o circuito, também em porcentagem e, através do gráfico da figura 41, ($\% \text{ ripple} \times R_s/R_c\%$), determinar $W_{R_c.C}$;
- 5º - Calcular o capacitor necessário e aproximá-lo de um valor comercial;
- 6º - De posse dos valores $R_s/R_c\%$ e $W_{R_c.C}$ e com as curvas das figuras 39 ou 40 (dependendo do tipo de retificador), determinar o valor $V_{dc}/V_{m\acute{a}x.}$ e, a partir daí, o valor de $V_{m\acute{a}x.}$, pois a tensão V_{dc} é conhecida;
- 7º - Com os valores R_s/NR_c e $N W_{R_c.C}$, determinar o valor da relação I_{ef}/I_{dc} através da figura 42 e encontrar o valor de I_{ef} , pois I_{dc} é conhecido;
- 8º - De posse dos valores R_s/NR_c e $N W_{R_c.C}$, determinar a relação I_{pr}/I_{dc} e, entrando no gráfico da figura 43, encontrar o valor de I_{pr} , pois I_{dc} é conhecido;
- 9º - Dimensionar os diodos, considerando sempre aquele que possuir características superiores às calculadas, para operar com margem de segurança.

Este roteiro que estamos fornecendo é muito prático para o cálculo de retificadores, por ser um método gráfico e aproximado, na prática, conduz a valores aceitáveis e dispensa cálculos complicados.

Daremos a seguir um exemplo, detalhando cada passo.

Aplicação:

- 1) Considere o retificador de onda completa em ponte, mostrado na figura 44. Dele deseja-se obter uma tensão média na saída de 60 volts, sabendo-se que sua resistência de carga m

nima é de $1K\Omega = 1000 \text{ ohms}$.

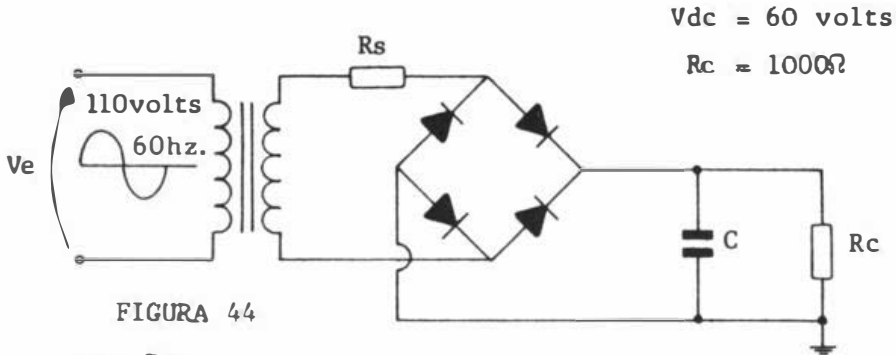


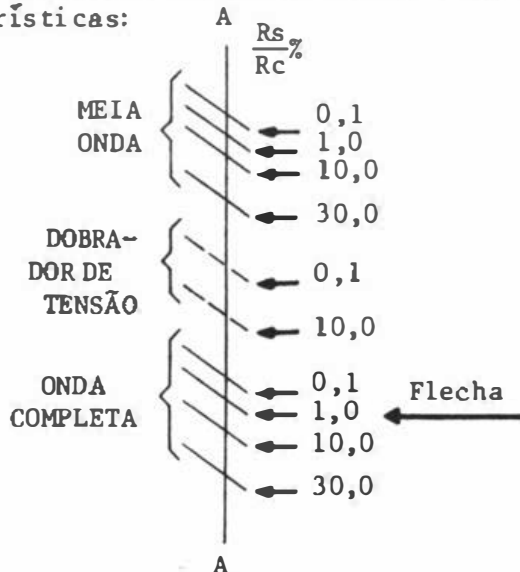
FIGURA 44

Solução:

No projeto, deve-se considerar sempre a resistência mínima, pois, nesta condição, a corrente média será máxima para o circuito.

- 1) $R_c = 1000\Omega$
- 2) R_s deve estar entre 1 a 10% de R_c , admitindo 1% de R_c .
 $R_s = 1\% \cdot R_c = 10\Omega$
- 3) $\frac{R_s}{R_c} = \frac{10}{1000} \times 100 = 1\%$
- 4) $\frac{R_s}{R_c} = 1\%$, admitindo um fator de ondulação (ripple) máximo de 5%.

No gráfico da figura 41, temos uma legenda com as seguintes características:



A flecha está apontando para a curva que irá ser utilizada, pois $R_s/R_c = 1\%$.

Para determinarmos $WR_c.C$, entramos com o valor ripple $= r = 5\%$ no gráfico da figura 41 e traçamos uma reta paralela ao eixo $WR_c.C$, até encontrarmos a reta de $1,0\%$ (terceira de baixo para cima). A partir daí, descemos até encontrarmos o eixo de $WR_c.C$ e teremos o valor procurado, que em nosso caso, é 15.

$$WR_c.C = 15$$

5) Podemos obter o valor do capacitor C :

$$WR_c.C = 15 \quad \left\{ \begin{array}{l} W = 2\pi f = 2\pi \times 60 = 377 \text{ rd/s.} \\ R_c = 1000\Omega \end{array} \right.$$

Logo:

$$377 \times 1000 \times C = 15$$

$$C = \frac{15}{377 \times 1000} = 39,78 \times 10^{-6} \text{ F} = 40\mu\text{F}$$

$$C \geq 40\mu\text{F}$$

O valor do capacitor deve ser maior ou igual a $40\mu\text{F}$, pois o valor de R_c é mínimo e o ripple é no máximo 5% . Para um fator de ondulação (ripple) menor o valor de C deverá ser maior.

6) Vamos determinar $V_{dc}/V_{m\acute{a}x.}$

Entrando no gráfico da figura 40 (para retificadores monofásicos de onda completa) com os valores $WR_c.C = 15$ de $R_s/R_c = 1\%$, achamos a relação: $V_{dc}/V_{m\acute{a}x.}$, que, em nosso caso, vale 91% . Veja detalhes na figura 45 abaixo.

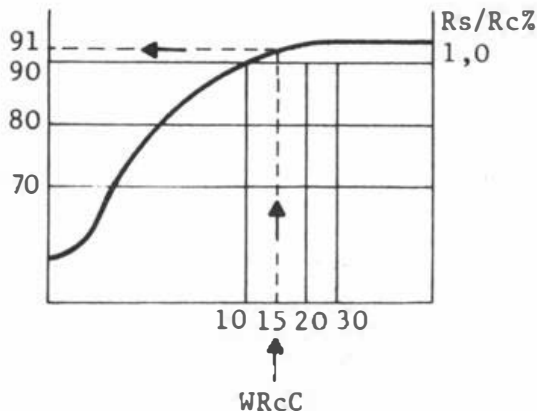


FIGURA 45

Cálculo de $V_{m\tilde{a}x}$. (valor de pico da tensão no secundário).

$$\frac{V_{dc}}{V_{m\tilde{a}x}} = 91\% \rightarrow \frac{V_{dc}}{V_{m\tilde{a}x}} = 0,91$$

$$V_{m\tilde{a}x} = \frac{V_{dc}}{0,91} = \frac{60}{0,91} = 65,93 \approx 66 \text{ volts}$$

O valor eficaz será:

$$V_{ef} = \frac{66}{\sqrt{2}} = 46,67 = 46,7 \text{ volts}$$

Os diodos devem suportar uma tensão de pico inversa, máxima, maior que 66 volts, que é o valor de pico da tensão no secundário.

7) Cálculo de I_{ef} → corrente eficaz em cada diodo:

$$\frac{R_s}{NR_c} = \frac{10}{2 \times 1000} = 5 \times 10^{-3} \quad N = 2, \text{ pois o retificador é de onda completa.}$$

$$\% \frac{R_s}{NR_c} = 100 \times 5 \times 10^{-3} = 0,5\%$$

$$N.WR_c.C = 2 \times 15 = 30$$

Com os valores $\%R_s/NR_c = 0,5\%$, $NWR_c.S = 30$ e através do gráfico da figura 42, encontramos $I_{ef}/I_{dc} = 3,2$.

A corrente média na carga será:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R_c} = \frac{60}{1000} = 0,06A.$$

Como o retificador é de onda completa, a corrente média para cada diodo é a metade da corrente média na carga, logo:

$$I_{dc} = \frac{0,06}{2} = 0,03A = 30mA.$$

Conseqüentemente:

$$\frac{I_{ef}}{I_{dc}} = 3,2 \rightarrow I_{ef} = 3,2 \times 0,03 = 0,096A = 96mA.$$

$$I_{ef} = 96mA.$$

8) Cálculo da corrente de pico repetitiva no diodo.

Sabemos que:

$$\% \frac{R_s}{N R_c} = 0,5 \quad \text{e} \quad N W R_c.C = 30$$

entrando no gráfico da figura 43, encontramos:

$$\frac{I_{pr}}{I_{dc}} = 12. \quad \text{mas, } I_{dc} = 0,03A.$$

$$\frac{I_{pr}}{0,03} = 12 \rightarrow I_{pr} = 12 \times 0,03 = 0,36A$$

$$I_{pr} = 360mA.$$

9) A escolha do diodo deve ser feita através de: I_{pr} , I_{dc} , I_{ef} , I_{pnr} e V_{ip} .

Em nosso caso, o diodo deve suportar:

$$I_{dc} > 30mA$$

$$I_{ef} > 96mA$$

$$V_{ip} > 66volts$$

$$I_{pr} > 360mA$$

10) Cálculo da corrente de pico transitória (I_{pnr})

$$I_{pnr} = \frac{V_{m\acute{a}x.}}{R_s} = \frac{66}{10} = 6,6A \quad I_{pnr} > 6,6A$$

Caso os valores calculados para os diodos sejam maiores que os limites do diodo escolhido, então devemos aumentar o valor de R_s e repetir o processo de cálculo.

Por exemplo, se para um determinado diodo, a corrente de pico repetitiva for de 300mA, não poderemos utilizá-lo, pois o nosso valor calculado é 360mA.

CÁLCULO DO TRANSFORMADOR

Vamos, a seguir, dar um roteiro bem prático para o cálculo de transformadores. As perdas por dispersão, histerese, etc, serão consideradas através de fatores de correção. Convém ao aluno recordar os princípios básicos dos transformadores (aposta E-16). Observe que todas as perdas possíveis serão levadas em consideração.

Roteiro:

1) Calcular a corrente eficaz no secundário do transformador (I_{efsec}).

Com relação aos retificadores de meia onda, a corrente eficaz do secundário é igual a corrente eficaz no diodo, pois só temos um diodo no circuito.

Com relação aos retificadores de onda completa com transformador, tipo "center tap" (derivação central), para cada metade do secundário, a corrente eficaz será a mesma de cada diodo.

Com relação aos retificadores de onda completa em ponte, a corrente eficaz do secundário será dada pelo produto de $\sqrt{2}$ pela corrente eficaz no diodo.

2) Calcular a potência consumida no secundário do transformador (P):

$$P = V_{efsec} \cdot I_{efsec}.$$

3) Calcular a área do núcleo de ferro (S):

$$S = 1,2\sqrt{P}$$

4) Calcular o número de espiras por volt (n):

$$n = \frac{108}{4,44 \cdot B \cdot f \cdot S}.$$

Onde:

B = indução magnética em Gauss (geralmente entre 8000 e 15000);

f = frequência em hz;

S = área do núcleo de ferro em cm^2 .

5) Calcular o número de espiras em ambos os enrolamentos.

a) número de espiras do enrolamento primário (N_p)

$$N_p = V_{rede}(eficaz) \cdot n$$

n = número de espiras por volts.

b) número de espiras do enrolamento secundário (N_s)

$$N_s = V_{efsec} \cdot n$$

n = número de espiras por volt.

Para compensar as perdas nos enrolamentos, vamos utilizar um fator de correção de 5 a 10% no número de espiras do secundário. Logo:

$$N_s = V_{efsec} \cdot n \cdot 1,05$$

6) Calcular a área dos fios.

Para transformadores pequenos, médios e grandes, pode-se utilizar a seguinte tabela (figura 46):

POTÊNCIA (W)	DENSIDADE DE CORRENTE (A/mm ²)
até 50W	3,5
de 50 a 100W	2,5
de 100 a 500W	2,2
de 500 a 1000W	2,0

FIGURA 46

d = densidade de corrente.

a) Primário:

$$S_{fio} = \frac{I_{efp}}{d}$$

$$I_{efp} = \frac{N_s}{N_p} \cdot I_{efsec} \cdot \underbrace{1,15}_{\text{fator de correção para compensar as perdas no transformador.}}$$

fator de correção para compensar as perdas no transformador.

b) Secundário:

$$S_{fio} = \frac{I_{efsec}}{d}$$

Vamos dar continuidade ao problema anterior e calcular os parâmetros do transformador.

Cálculo da corrente eficaz no secundário do transformador (I_{efsec}).

I_{efsec} . é o produto de $\sqrt{2}$ pela corrente eficaz no diodo.

$$I_{efsec} = I_{ef} \sqrt{2} = 96 \times 10^{-3} \times \sqrt{2} = 135,76 \text{ mA}$$

$$I_{efsec} = \underline{135,76 \text{ mA}}$$

Cálculo da potência consumida no secundário do transformador (P).

$$P = V_{efsec} \cdot I_{efsec}$$

$$V_{efsec} = \frac{V_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{66}{\sqrt{2}} = 46,67 \text{ volts}$$

$$P = 46,67 \times 135,76 \times 10^{-3} = 6,34 \text{ watts}$$

$$\underline{P = 6,34 \text{ W}}$$

Cálculo da área do núcleo de ferro (S).

$$S = 1,2 \sqrt{P}$$

$$S = 1,2 \sqrt{6,34} = 3,02 \text{ cm}^2$$

$$\underline{S = 3,02 \text{ cm}^2}$$

Cálculo do número de espiras por volts.

$$n = \frac{10^8}{4,44 \cdot B \cdot f \cdot S}$$

vamos adotar um valor de $B = 12.000$ gauss

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$S = 3,02 \text{ cm}^2$$

$$n = \frac{10^8}{4,44 \cdot 12000 \cdot 60 \cdot 3,02} = 10,36 \text{ espiras/volt}$$

$$\underline{n = 10,36 \text{ espiras/volt}}$$

Cálculo do número de espiras nos enrolamentos.

No enrolamento primário:

$$N_p = V_{\text{rede(eficaz)}} \cdot n = 110 \cdot 10,36 = 1139,6 \approx 1140 \text{ espiras}$$

$$\underline{N_p = 1140 \text{ espiras}}$$

No enrolamento secundário:

$$N_s = V_{efsec} \cdot n \cdot 1,05 = \frac{66}{\sqrt{2}} \cdot 10,36 \cdot 1,05 = 507,67$$

$N_s = 508$ espiras

Cálculo da área dos fios.

Primário:

$$S_{fio} = \frac{I_{efp}}{d}$$

$$I_{efp} = \frac{N_s}{N_p} \cdot I_{efsec} \cdot 1,15 = \frac{508}{1140} \cdot 135,76 \cdot 10^{-3} \cdot 1,15 = 69,57 \text{ mA}$$

De acordo com a tabela, para potência até 50W $\rightarrow d = 3,5 \text{ A/mm}^2$.

$$S_{fio} = \frac{I_{efp}}{d} = \frac{69,57 \cdot 10^{-3}}{3,5} = 19,87 \cdot 10^{-3} = 0,0198 \text{ mm}^2$$

$S_{fio} = 0,0198 \text{ mm}^2$ (enrolamento primário)

Secundário:

$$S_{fio} = \frac{I_{efsec}}{d} = \frac{135,76 \cdot 10^{-3}}{3,5} = 38,78 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$$

$S_{fio} = 0,0388 \text{ mm}^2$ (enrolamento secundário)

Para ambos os enrolamentos, cada área corresponde a uma bitola AWG, conforme ilustramos na tabela da figura 47.

TABELA AWG PARA CONDUTORES DE COBRE

BITOLA AWG	DIÂMETRO mm.	SEÇÃO mm ² .
36	0,127	0,0126
34	0,160	0,0201
32	0,201	0,0320
30	0,254	0,0509
28	0,321	0,0809
26	0,404	0,1287
24	0,510	0,2047
22	0,643	0,3255
20	0,811	0,5176
18	1,023	0,8230
16	1,290	1,3086
14	1,627	2,0809
12	2,052	3,3087

FIGURA 47

Para o enrolamento primário $S_{fio} = 0,0198 \text{ mm}^2$, corresponde de aproximadamente ao fio # 34 AWG.

Para o enrolamento secundário $S_{fio} = 0,038 \text{ mm}^2$, corresponde de ao fio # 32 AWG.

Este é o projeto completo para o retificador de onda completa em ponte, mostrado na figura 44.

Considere o seguinte problema:

2) Deseja-se projetar um filtro capacitivo, bem como o transformador para um circuito retificador de meia onda, que alimenta uma carga resistiva com uma tensão média na saída de 150 volts e uma corrente média de 1,5A. O fator de ondulação deve ser da ordem de 1%. O circuito será ligado a uma rede de 220 volts (ver figura 48).

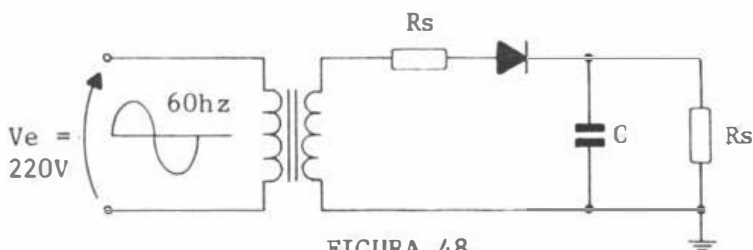


FIGURA 48

$$V_{dc} = 150V$$

$$I_{dc} = 1,5A$$

$$\%r = 1\%$$

$$V_{rede} = 220V$$

Solução:

De acordo com o roteiro temos:

$$1) R_c = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{150}{1,5} = 100\Omega$$

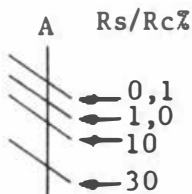
2) Vamos adotar R_s como sendo 5% de R_c .

$$R_s = 5\% \cdot R_c = 5\Omega$$

$$3) \frac{R_s}{R_c} = \frac{5}{100} = 0,05 = 5\%$$

$$4) r = 1\% \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{gráfico figura 41} \\ \frac{R_s}{R_c} = 5\% \end{array} \right. \quad W R_c \cdot C =$$

No gráfico, temos os seguintes valores:



Tome um valor intermediário entre as retas de 1,0 e 10, para o valor de 5%.

Aproximadamente, teremos:

$$W R_c \cdot C \approx 150$$

$$5) W R_c \cdot C \approx 150 \rightarrow C = \frac{150}{W R_c} = \frac{150}{2\pi 60 \times 100} \approx 3,98 \times 10^{-3} F$$

$$C \approx 3,98 mF$$

$$\text{Valor comercial } C = 4,0 mF$$

$$6) \frac{R_s}{R_c} = 5\% \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{gráfico figura 39} \\ \frac{V_{dc}}{V_{max.}} = 75\% \end{array} \right.$$

$$W R_c \cdot C = 150$$

Como a curva de $R_s/R_c = 5\%$ não se encontra no gráfico, tome um valor intermediário entre as curvas de 4% e 6%, (figura 49).

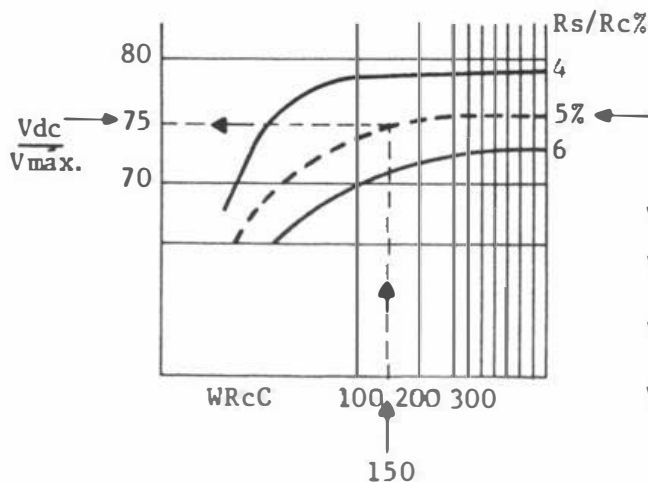


FIGURA 49

$$\frac{V_{dc}}{V_{max.}} = 0,75$$

$$V_{max.} = \frac{150}{0,75} = 200V.$$

Valor eficaz.

$$V_{ef} = \frac{200}{\sqrt{2}} = 141,42V$$

A tensão inversa de pico sobre o diodo será: $V_{ip} = V_{m\acute{a}x.} = 200V$.

$$7) \frac{R_s}{N R_c} = \frac{5}{1 \times 100} = 0,05$$

$$N = 1 \text{ (meia onda)}$$

$$\frac{\%R_s}{N R_c} = 100 \times 0,05 = 5\% \quad \left\{ \text{gráfico figura 42 } \frac{I_{ef}}{I_{dc}} = 2,4 \right.$$

$$N W R_c.C = 150$$

$$\frac{I_{ef}}{1,5} = 2,4 \rightarrow I_{ef} = 3,6A \text{ (corrente eficaz no diodo)}$$

Nesse caso, a corrente média no diodo será igual a corrente média na carga, pois só temos um diodo.

$$8) \frac{\% R_s}{N R_c} = 5\% \quad \left\{ \text{gráfico figura 43 } \frac{I_{pr}}{I_{dc}} \cong 6,4 \right.$$

$$N W R_c.C = 150$$

$$\frac{I_{pr}}{1,5} = 6,4 \rightarrow I_{pr} = 9,6A$$

9) A escolha do diodo deve ser feita através de: I_{pr} , I_{dc} , I_{ef} , I_{pnr} e V_{ip} .

O diodo deve ter a seguinte característica:

$$I_{pr} > 9,6A$$

$$I_{ef} > 3,6A$$

$$I_{dc} > 1,5A$$

$$I_{pnr} > 40A$$

$$V_{ip} > 400V.$$

$$I_{pnr} = \frac{V_{m\acute{a}x.}}{R_s} = \frac{200}{5} = 40A$$

Cálculo do transformador:

- 1) Corrente eficaz no secundário do transformador:

$$I_{efsec.} = 3,6A \quad (\tilde{\text{é igual a corrente eficaz no diodo)})$$

- 2) Potência consumida (secundário)

$$P = V_{efsec} \cdot I_{efsec} = \frac{200}{\sqrt{2}} \cdot 3,6 = 509,12W$$

- 3) Área do núcleo de ferro (S)

$$S = 1,2\sqrt{P} = 1,2 \sqrt{509,12} = 27,08cm^2$$

$$S = 27,08cm^2$$

- 4) Número de espiras por volt (n)

$$n = \frac{10^8}{4,44 \cdot B \cdot f \cdot S}$$

$$B = 8000 \text{ Gauss (adotado)}$$

$$n = \frac{10^8}{4,44 \cdot 8000 \cdot 60 \cdot 27,08} = 1,73 \text{ espiras/volt}$$

- 5) Número de espiras em ambos os enrolamentos.

Enrolamento primário (Np)

$$N_p = V_{rede} (\text{eficaz}) \cdot n$$

$$N_p = 220 \cdot 1,73 = 380,6 \approx 381$$

$$N_p = 381 \text{ espiras}$$

Enrolamento secundário (Ns)

$$N_s = V_{efsec.} \cdot n \cdot 1,05$$

$$N_s = \frac{200}{\sqrt{2}} \cdot 1,73 \cdot 1,05 = 256,89 \approx 257$$

$$N_s = 257 \text{ espiras.}$$

6) Área dos fios.

Primário.

$$S_{fio} = \frac{I_{efp.}}{d}$$

$$I_{efp.} = \frac{N_s}{N_p} \cdot I_{efsec.} \cdot 1,15 = \frac{257}{381} \times 3,6 \times 1,15 = 2,79A$$

Como:

$$P = 509,12W \rightarrow d = 2,0A/mm^2 \quad (\text{tabela da figura 46})$$

$$S_{fio} = \frac{2,79}{2,0} = 1,395mm^2$$

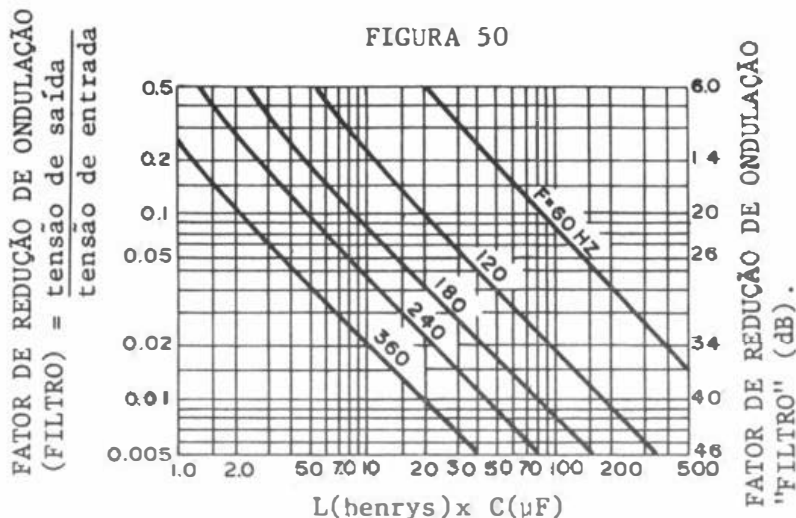
A esta seção de 1,395mm², corresponde o fio ~~#~~ 16 secundário.

$$S_{fio} = \frac{I_{efsec.}}{d} = \frac{3,6}{2} = 1,80mm^2$$

A esta seção corresponde o fio ~~#~~ 14.

FILTROS ADICIONAIS

Às vezes, é necessário empregar-se um filtro adicional para reduzir o fator de ondulação (ripple). Quando isso é feito, uma seção de filtro LC é associada em cascata com o filtro a capacitor, já projetado. A redução do ripple adicional pode ser determinada através da figura 50, onde, na escala horizontal, temos o valor da indutância (Henrys) x capacitor (μF).



Geralmente a tensão inversa de pico dos diodos retificadores deve ser maior que o valor encontrado, como vimos anteriormente, devido a transientes que possam ocorrer na linha. Quando estes transientes ocorrem no primário do transformador, devido a cargas que trabalham com correntes muito altas, uma das soluções seria usar diodos com V_{ip} (tensão inversa de pico) bem elevada, porém é um recurso muito oneroso.

Existem vários métodos que podem ser aplicados para proteção dos diodos retificadores. Tais métodos visam dissipar a energia transiente para o circuito de proteção. A seguir vamos enumerá-los:

- a) uma resistência em série com o enrolamento primário e um capacitor paralelo ao mesmo; veja figura 51.

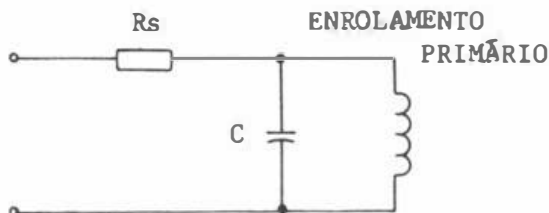


FIGURA 51

- b) Uma indutância em série com o primário e um capacitor em paralelo, veja figura 52.

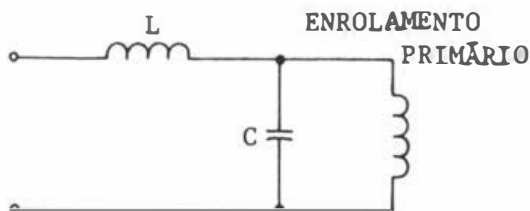


FIGURA 52

- c) Um capacitor em paralelo com o diodo retificador, como mostra a figura 53.



FIGURA 53

- d) Um método de custo mais elevado, constituído de uma resistência, um capacitor e um diodo é mostrado na figura 54.

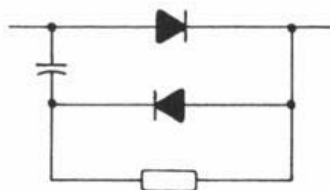


FIGURA 54

- e) Um diodo zener em paralelo com o diodo retificador também traz bons resultados; podendo-se ainda incluir

uma resistência em série (figura 55).



FIGURA 55

Dos vários circuitos práticos que apresentamos até agora, os referentes aos itens a, b e c são os mais baratos, porém não protegem totalmente. Os dois últimos d e e, são mais caros e oferecem maior proteção, principalmente em fontes onde a carga exige altas correntes e a tensão de pico inversa nos diodos é elevada.

REGULADORES DE TENSÃO

Um dos requisitos mais comuns em uma fonte de potência é a de manter a tensão de saída a um nível constante, não levando em conta as variações que possam ocorrer na tensão de entrada ou na corrente de carga. O diagrama de blocos, que apresentamos na figura 56, ilustra uma fonte completa estabilizada.



FIGURA 56

Existem vários tipos de reguladores. Nesta apostila, iremos estudar a regulação de tensão através do diodo zener. Convm ao aluno repassar os conceitos já estudados sobre o zener, vistos na lição E-10.

Considere o circuito da figura 57, onde os pontos C e D

são a saída de uma fonte de alimentação com retificação e filtragem.

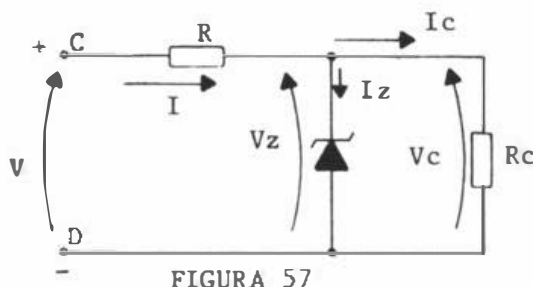


FIGURA 57

A tensão V é uma tensão contínua, porém não é totalmente isenta de flutuações. Nas fontes de alimentação, podemos ter dois tipos de flutuações: a) lentas (devido a variação da tensão da rede a que está ligada a fonte. Eliminadas estas variações, o diodo zener funciona como um regulador) b) rápidas (devido à filtragem imperfeita dos 60hz ou 120hz, dependendo do retificador, provenientes da fonte. Neste caso, o diodo funciona como estabilizador, provenientes da fonte. Neste caso, o diodo funciona como estabilizador). O diodo zener atua simultaneamente sobre as duas espécies de variações, porém, na prática, existem dispositivos que atuam sobre uma ou outra destas flutuações.

Em nosso caso, a carga ficará isenta de qualquer flutuação. Para isso, colocamos um diodo zener em paralelo com a carga e uma resistência R com a função de limitar a corrente.

Note que a tensão V_c , que queremos invariável, é menor do que V , devido à queda de tensão na resistência R .

Quanto ao funcionamento do circuito, quando a tensão V subir indevidamente, a corrente, no diodo zener, elevar-se-á, aplicando em R uma maior queda de tensão. O fenômeno é tão rápido que a tensão, sobre o diodo, não tem possibilidade de subir para um valor significativo.

Se ocorrer o inverso, isto é, a tensão V diminuir, a tensão, através do zener, também irá cair e a ação do diodo zener será tão eficaz que fará com que o elemento que sofrer qualquer variação seja sempre a resistência R , deixando a

tensão sobre a carga (V_c) praticamente sem variação alguma.

Alguns cuidados devem ser tomados com relação a este tipo de regulador. O diodo zener deve funcionar sempre entre dois limites de correntes: um mínimo e um máximo, ambos fornecidos pelo fabricante. Abaixo do valor mínimo perde a função do regulador e acima do máximo corre o risco de fundir-se. Dessa forma, para proteger a carga, deve-se escolher o diodo zener adequado e a resistência limitadora correta. Para melhor fixação por parte do aluno desses importantes detalhes, vamos propor e resolver a seguinte questão:

Qual deverá ser o valor da resistência limitadora do circuito da figura 58, para se obter, em uma carga de 500Ω , uma tensão regulada de 30V? Sabe-se que a tensão de saída da fonte de alimentação é de 220V e será utilizado um diodo zener com uma tensão de trabalho de 30V, que corresponde a uma corrente de 15mA, de acordo com o fabricante.

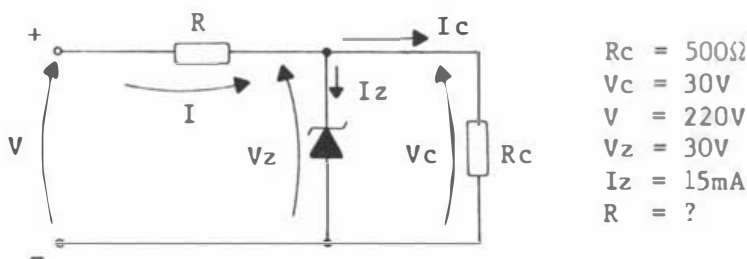


FIGURA 58

$$I = I_z + I_c \quad I_c = \frac{V_c}{R_c} = \frac{30}{500} = 0,06A$$

$$I = 0,015 + 0,06 = 0,075 = 75mA$$

$$V = R \cdot I + V_z + R \cdot I = V - V_z = 220 - 30 = 190V$$

$$R \cdot I = 190 \rightarrow R = \frac{190}{0,075} \approx 2534\Omega$$

$$\underline{\underline{R = 2534\Omega}}$$

Podemos utilizar vários diodos em série a fim de obtermos diversos valores de tensão para alimentar cargas que necessitam de valores diferentes. Observe a figura 59, onde temos 5 diodos zener de 30 volts cada um, proporcionando valo-

res diferentes de tensão regulada, a partir de uma mesma fonte de tensão contínua.

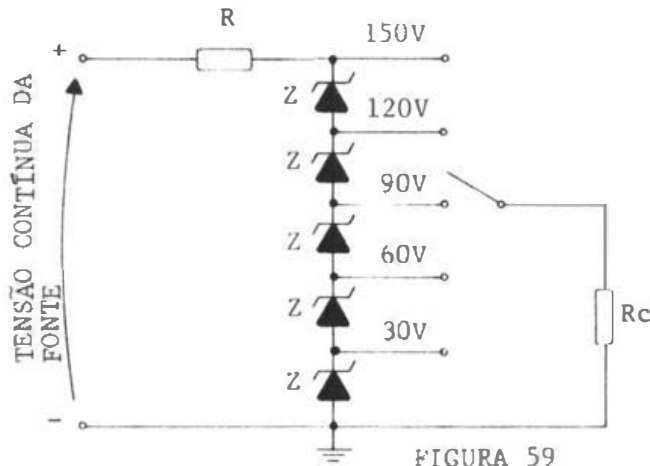


FIGURA 59

Há casos em que precisamos alimentar um circuito, a partir da fonte de alimentação de um outro circuito. Como exemplo, podemos citar um circuito que possui tensão de entrada de 30 volts e desejamos aproveitar a mesma fonte para uma carga que necessita de apenas 6 volts. Muitas vezes costuma-se solucionar esse problema, utilizando um outro transformador, às vezes, desnecessariamente. Para solucionarmos essa questão, basta idealizarmos um redutor de tensão, conforme indica a figura 60.

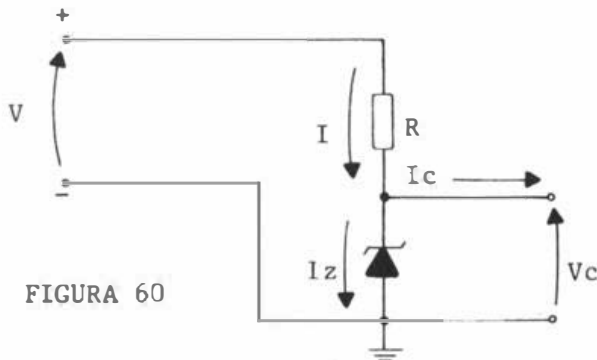


FIGURA 60

Supondo que a tensão que obtemos diretamente, a partir da saída de uma fonte de alimentação, seja 30 volts e desejamos ligar uma carga que necessita de apenas 6 volts. Precisa-

mos então dimensionar os elementos desse redutor e, para isso, é necessário conhecermos o valor da corrente máxima $I_{cm\acute{a}x.}$ que a nossa carga vai consumir.

A partir da lei de Kirchhoff, vamos calcular o valor da resistência R.

$$V = R.I. + V_c$$

$$V - V_c = R.I.$$

$$R = \frac{V - V_c}{I}$$

Acompanhando o circuito da figura 60, tiramos a seguinte expressão:

$$\underline{I = I_{cm\acute{a}x.} + I_z}$$

O valor da corrente de carga I_l varia entre um valor máximo e um valor mínimo que pode ser zero. Quando a carga é desligada, a corrente irá fluir totalmente através do diodo zener, por esse motivo a escolha do diodo deve ser bem rigorosa.

Devemos considerar a pior situação, isto é, quando a corrente que flui pelo zener é máxima, vamos chamar essa corrente de $I_{zm\acute{a}x.}$

A máxima potência que o diodo zener pode suportar é calculada pela seguinte equação:

$$\underline{P_{z.m\acute{a}x} = V_z.I_{zm\acute{a}x.}}$$

Em qualquer projeto desse tipo, necessitamos saber qual a máxima corrente que a carga consome ($I_{cm\acute{a}x.}$), para se ter uma idéia do valor de $I_{zm\acute{a}x.}$ A corrente necessária para manter a tensão (V_z) fixa nos terminais do zener, geralmente, é fornecida pelos manuais dos fabricantes pela designação I_z (corrente do zener).

Supondo que o aluno não tenha acesso a tais manuais, estamos fornecendo uma tabela com a média dos valores de I_z de vários diodos em função da potência máxima que eles podem suportar (figura 61).

Vz (diodos zeners)	Pz m̄x. (watts)	Iz (mA)
3,3 a 24 volts	0,4W	8mA
25 a 75 volts	0,4W	8mA
3,3 a 24 volts	1W	15mA
25 a 75 volts	1W	10mA

FIGURA 61

Necessitamos de mais uma equação para calcularmos o valor da máxima potência dissipada pela resistência R, dada por:

$$PR_{m\bar{x}.} = R \cdot I^2$$

Estamos até aqui com quatro equações. Vamos enumerá-las a seguir:

$$R = \frac{V-V_c}{I} \quad (1)$$

$$I = I_{cm\bar{x}.} + I_z \quad (2)$$

$$Pz_{m\bar{x}.} = Vz \cdot Iz_{m\bar{x}.} \quad (3)$$

$$PR_{m\bar{x}.} = R \cdot I^2 \quad (4)$$

Para elucidar melhor a aplicação das quatro fórmulas acima, vamos voltar ao início do nosso problema. Desejamos reduzir uma tensão de 30 volts para 6 volts, considerando que nos sa carga tenha um consumo máximo de 30mA.

Os dados do problema são:

$$V = 30 \text{ volts}$$

$$V_c = Vz = 6 \text{ volts}$$

$$I_{cm\bar{x}.} = 30mA.$$

Desprezando, por exemplo, da equação 2 o valor de Iz, então $I = I_{cm\bar{x}.}$ levando em 3, temos:

$$Pz_{m\bar{x}.} \approx Vz \cdot I_{cm\bar{x}.} = 6 \times 0,03 = 0,18W.$$

Com o valor de $P_{zm\bar{a}x.}$ encontrado, vamos à tabela da figura 61 e encontramos o valor de $I_z = 8mA$, mas:

$$I = I_{cm\bar{a}x.} + I_z$$

$$I = 0,03 + 0,008 = 0,038 = 38mA$$

$$I = 38mA.$$

Agora temos condições de saber qual a verdadeira potência máxima que o diodo irá dissipar, assim:

$$P_{zm\bar{a}x.} = 6 \times 0,038 = 0,23W$$

$$P_{zm\bar{a}x.} = 0,23W$$

O diodo zener que escolhemos, suporta até 0,4 watts, logo está dimensionado. Se o valor de $P_{zm\bar{a}x.}$ ultrapassasse o valor de 400mW do zener escolhido, escolheríamos um outro mais potente e calcularíamos o valor de $P_{zm\bar{a}x.}$ com o novo I_z , como acabamos de fazer.

Temos condições de calcular o valor de R, de 1 vem:

$$R = \frac{V - V_c}{I} = \frac{30-6}{0,038} = 631,5 \text{ ohms}$$

$$R = 631,5\Omega$$

A potência máxima dissipada pela resistência R será:

$$P_{rm\bar{a}x.} = R \cdot I^2 = 631,5 \times (0,038)^2 = 0,91W.$$

$$P_{rm\bar{a}x.} = 0,91W$$

Já temos todos os valores do circuito calculados. O esquema da figura 62 é uma versão prática do nosso circuito. Por motivos de segurança, colocamos mais um diodo zener em paralelo. A dissipação de potência dos zeners deve ser bem superior àquela calculada teoricamente. O valor da resistência R pode ser de 630 Ω (1W). O capacitor C em paralelo tem a finalidade de atenuar o fator de ondulação (ripple) e não precisa ter um valor muito exato. Para nosso caso, um C = 500 μ F/12 volts é suficiente.

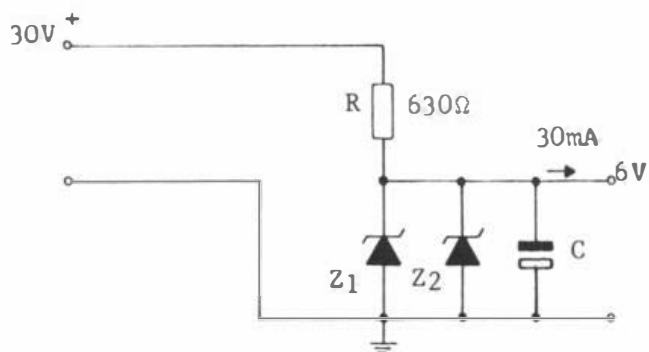


FIGURA 62



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-18

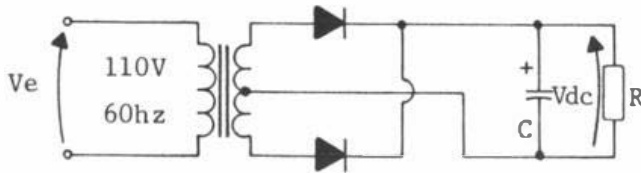
OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

1) Assinale a alternativa correta:

- a) as alternativas b e c estão corretas;
- b) a tensão inversa de pico é a máxima tensão que atua sobre o diodo, quando este não está conduzindo;
- c) o circuito retificador em ponte é composto de 5 diodos semicondutores e um transformador com derivação central;
- d) os retificadores monofásicos de onda completa não necessitam de circuitos de filtragem na saída.

2) Sabe-se que a tensão média na saída (V_{dc}) do circuito retificador monofásico de onda completa da figura 63 é de 12 volts e que o circuito será ligado a uma rede de 110 volts e 60hz. Utilizando-se os âbacos de Schade, calcule os valores de $W_{Rc.C}$ e de $V_{m\acute{a}x.}$, para $R_s/R_c = 10\%$ e um ripple máximo de 3%.



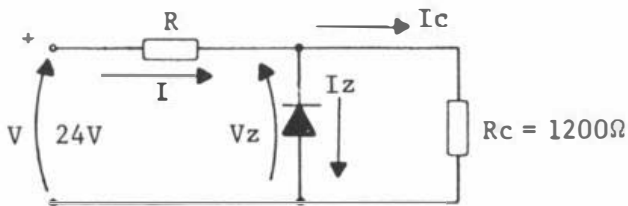
$$V_{dc} = 12V$$

$$\frac{R_s}{R_c} = 10\%$$

$$r = 3\%$$

FIGURA 63

- a) $W_{Rc.C} = 60$ e $V_{m\acute{a}x.} = 18$ volts;
 b) $W_{Rc.C} = 40$ e $V_{m\acute{a}x.} = 16$ volts;
 c) $W_{Rc.C} = 20$ e $V_{m\acute{a}x.} = 16$ volts;
 d) $W_{Rc.C} = 20$ e $V_{m\acute{a}x.} = 10$ volts.
- 3) Considerando os mesmos dados do problema anterior, para uma resist\^encia de carga m\^inima igual a 200 ohms, qual o valor do capacitor C?
- a) $C \geq 265\mu F$;
 b) $C \geq 15\mu F$;
 c) $C = 200mF$;
 d) $C = 150\mu F$.
- 4) Sabe-se que o circuito da figura 64 ser\^a usado para alimentar um sintonizador que possui imped\^ancia de 1200Ω , trabalhando com uma tens\~ao de 12 volts e o diodo zener utilizado como estabilizador possui tens\~ao de trabalho de 12V, o que corresponde a uma corrente $I_z = 8mA$. Qual o valor da resist\^encia limitadora?



$$V_c = V_z = 12V$$

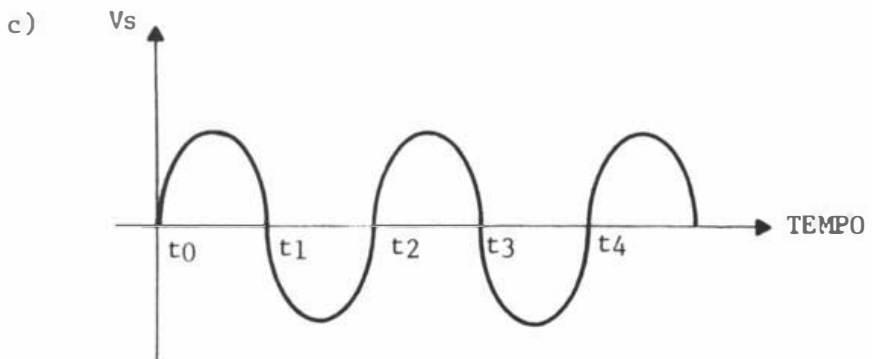
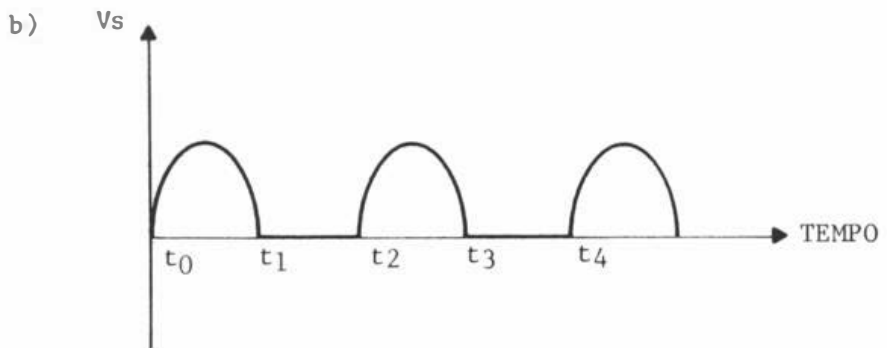
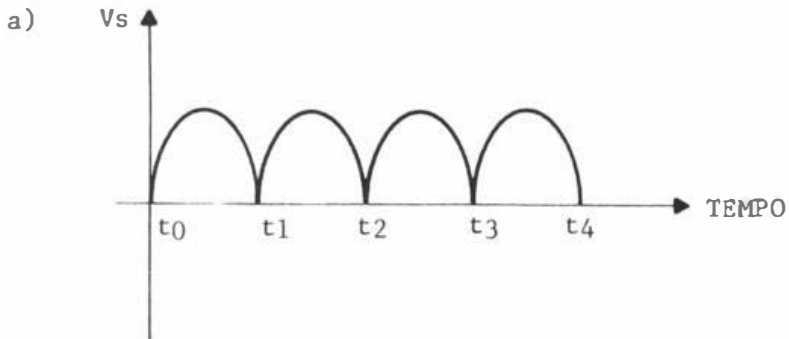
$$I_z = 8mA$$

FIGURA 64

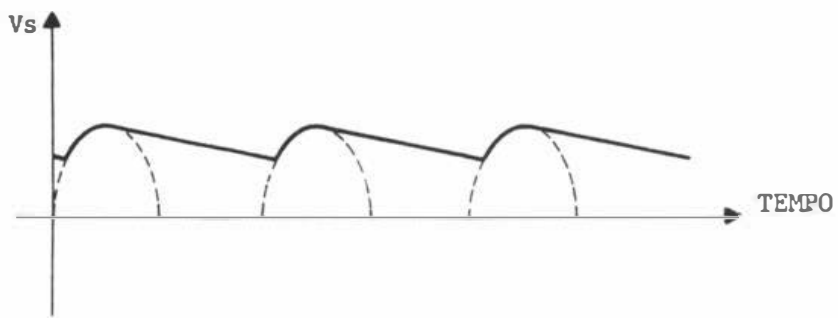
- a) $R \approx 200\Omega$;
 b) $R \approx 666,7\Omega$;
 c) $R \approx 350\Omega$;
 d) $R \approx 93,5\Omega$.

- 5) Os diodos zeners são utilizados em fontes de alimentação e têm a função de:
- a) retificar e estabilizar a tensão;
 - b) filtrar a tensão de saída;
 - c) regular e estabilizar a tensão;
 - d) limitar a corrente.
- 6) Se não houvesse os filtros nos retificadores, obteríamos uma tensão de saída:
- a) contínua e pulsante;
 - b) quadrada;
 - c) contínua e constante;
 - d) alternada.
- 7) O filtro tipo Π é utilizado quando:
- a) se deseja uma ótima regulação;
 - b) se pretende um fator de ondulação inferior ao filtro em L e uma tensão de saída mais elevada que o mesmo;
 - c) é necessário uma tensão de saída menor que a do filtro em L;
 - d) se necessita de um ripple na ordem de 8%.
- 8) No cálculo de um retificador monofásico de meia onda obtemos os seguintes valores: $R_s/NR_c = 1\%$ e $NWR_c.C = 500$, - qual deve ser o valor de I_{ef}/I_{dc} ?
- a) impossível o cálculo de I_{ef}/I_{dc} ;
 - b) $\frac{I_{ef}}{I_{dc}} = 4$
 - c) $\frac{I_{ef}}{I_{dc}} = 1,5$
 - d) $\frac{I_{ef}}{I_{dc}} = 3$
- 9) O símbolo  representa:
- a) um diodo semiconductor;
 - b) um transistor;
 - c) um diodo zener;
 - d) nenhuma das alternativas anteriores está correta.

- 10) Um circuito retificador monofásico em ponte (sem filtro) fornece a seguinte forma de onda para a tensão de saída:



d)



LIÇÃO E-19

DOBRADORES DE TENSÃO

MULTIPLICADORES DE TENSÃO E CONVERSORES

Os circuitos multiplicadores de tensão são encontrados nas versões: multiplicadores de meia onda e multiplicadores de onda completa (sendo também encontrados com a denominação de dobradores e triplicadores de tensão, etc.).

MULTIPLICADORES DE MEIA ONDA

Se ligarmos uma unidade retificadora e um capacitor em série a uma fonte de corrente alternada, como é ilustrado na figura 1, a tensão de saída de C.C. será duplicada. As setas, nos circuitos multiplicadores, indicam o anodo e a circulação de corrente que se produz na direção oposta às flechas.

Quando a tensão de entrada for a indicada na figura 1A, o capacitor se carregará ao valor de pico da tensão de entrada. No outro meio ciclo, a condição será a que se indica na figura 1B.

O capacitor retém o valor de pico da tensão, devido à inversão de polaridade da fonte. Conseqüentemente o retificador já não conduz e, como resultado disso, a tensão, sobre o capacitor, agrega-se à da fonte.

Logo, a tensão total, sobre o retificador, tem um valor de pico duas vezes maior que o da fonte. Então a tensão de saída varia entre zero e o dobro da tensão de entrada, durante cada ciclo.

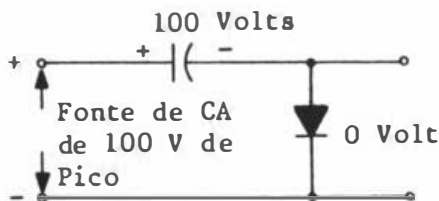
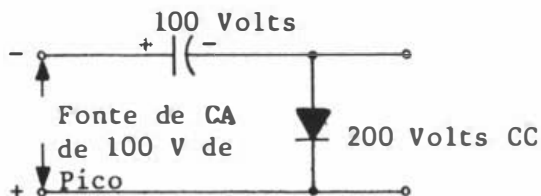


FIGURA 01



Os circuitos multiplicadores admitem diversos arranjos , como por exemplo, o ilustrado na fig. 2.

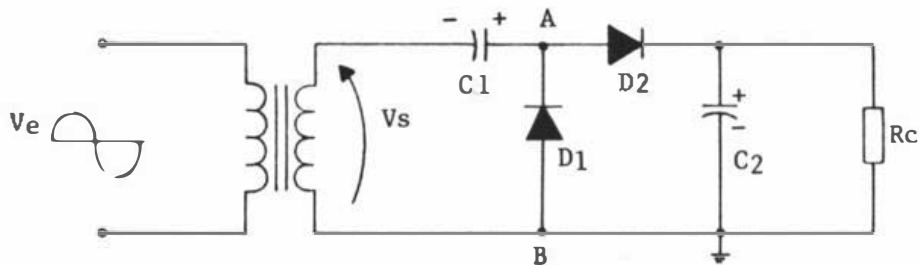


FIGURA 02

No semiciclo positivo da tensão de entrada, o ponto A está a um potencial positivo com relação ao ponto B. O diodo D_1 se comportará como uma chave aberta, inversamente polarizado e entre os pontos A e B, teremos uma tensão que será em todo

instante, igual à soma da tensão do capacitor C_1 com o valor de pico da tensão no enrolamento secundário (V_p).

Quando a tensão de entrada estiver no semiciclo negativo, o ponto A estará a um potencial negativo com relação ao B. O diodo D_1 , então, conduzirá e, rapidamente, carregará o capacitor C_1 (com a polaridade indicada).

Se designarmos de V_p a tensão de pico do secundário, podemos dizer que a tensão entre os pontos A e B varia entre 0 e $2 V_p$. E essa tensão de valor máximo $2 V_p$ será aplicada ao diodo D_2 , de forma a carregar o capacitor C_2 .

Devemos ainda levar em conta que C_1 se descarrega através de D_2 , quando este conduz.

MULTIPLICADORES DE ONDA COMPLETA

Vejam os um outro arranjo, através da figura 3. Esse circuito apresenta dois diodos retificadores D_1 e D_2 , 3 capacitores eletrolíticos C_1 , C_2 e C_3 e uma indutância L , que juntamente com C_3 , formam o circuito de filtragem. A resistência R_c tem a finalidade de proteger os diodos contra picos de corrente.

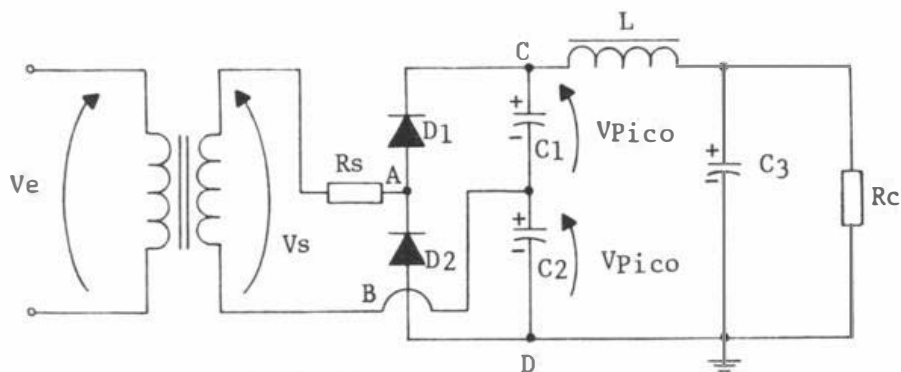


FIGURA 03

V_s - valor eficaz da tensão no secundário.

V_p - valor de pico da tensão no secundário.

No primeiro semiciclo da tensão do secundário, o terminal A será positivo e o diodo D_1 ficará polarizado diretamente

(comporta-se como uma chave fechada), permitindo a passagem da corrente elétrica, enquanto D2 não estará conduzindo. Então o capacitor C1 carregar-se-á com o valor de pico da tensão do secundário (V_p). E no semiciclo seguinte, o ponto A será negativo, conseqüentemente, o diodo D2 estará conduzindo, enquanto que D1 estará bloqueando a passagem da corrente elétrica. Agora é o capacitor C2 que irá se carregar com o valor de pico da tensão do secundário (V_p). Após um ciclo completo, ambos os capacitores estarão carregados e, como estão em série, suas cargas serão somadas. Entre os pontos C e D teremos uma tensão equivalente ao dobro do valor de pico da tensão do secundário ($2V_p$). A qual será filtrada pela forma já vista pelo aluno na lição E-18. Nesse circuito a frequência do ripple é de 120 Hz (considerando a rede elétrica com frequência de 60 Hz), pois cada diodo carrega um dos capacitores em cada semiciclo da tensão de entrada.

TRIPLICADOR

Vamos mostrar agora um circuito que fornece o triplo da tensão de pico do secundário ao transformador. Esse triplicador é constituído de três diodos retificadores D1, D2 e D3 e de três capacitores eletrolíticos, veja figura 4.

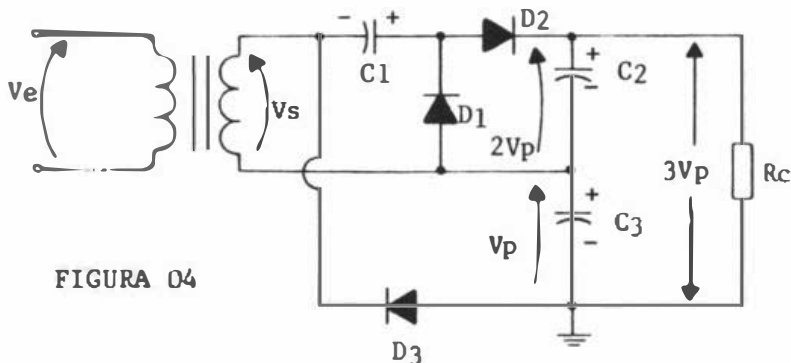


FIGURA 04

Analisando o esquema apresentado na fig. 4, veremos que se trata de um circuito semelhante ao da fig. 2, diferenciado

apenas quanto ao nº de diodos e de capacitores, pois o circuito da fig. 4 possui um diodo e um capacitor a mais do que o da fig. 2. Todavia o princípio de funcionamento de ambos os circuitos é o mesmo.

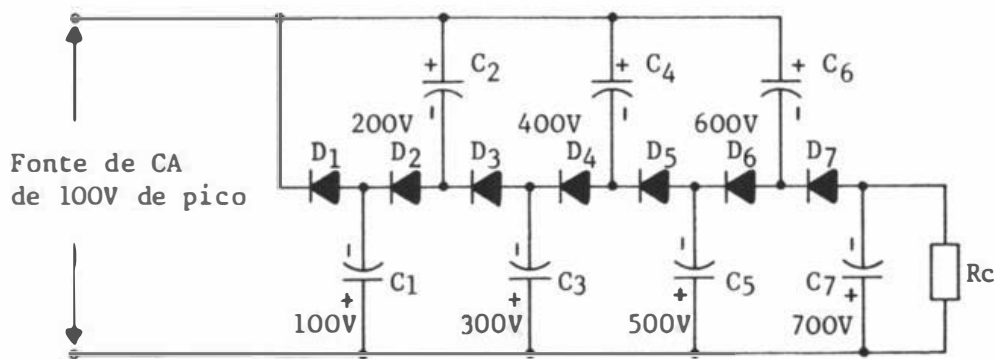
Por meio do dobrador de meia onda, formado pelos diodos 01 e 02, o capacitor C2 carregar-se-á com uma tensão igual a duas vezes a tensão de pico do secundário (V_p), enquanto que, no semiciclo negativo, o diodo 03 estará conduzindo e carregará o capacitor C3 com a tensão de pico do secundário (V_p). Como os capacitores C2 e C3 estão em série, a tensão aplicada sobre a resistência de carga R_c será de $3 V_p$.

TENSÕES MAIORES

O processo de incrementar a tensão pode se elevar a níveis mais altos de multiplicações, (Triplicador foi um exemplo). Teoricamente, a tensão poderia ser multiplicada infinitas vezes por meio desse processo. Os aspectos práticos, entretanto, limitam, geralmente, a multiplicação a quatro ou cinco vezes.

Na figura 5, temos um diagrama esquemático, no qual se obtém uma tensão de saída igual a sete vezes o valor de pico da tensão de entrada.

FIGURA 05



O circuito atua como um multiplicador de meia onda e, por conseguinte, devem ser empregados grandes capacitores para manter a circulação de corrente, durante os meios ciclos alternados.

A operação desse circuito pode ser assim explicada: quando o terminal superior é negativo, a corrente circula através de todos os diodos, carregando C1, C3, C5 e C7.

Quando o terminal superior é positivo, as cargas acumuladas, sobre esses capacitores, atuam em série com a tensão de entrada, para carregar C2, C4 e C6 com o dobro do valor da tensão de entrada.

Esse raciocínio pode continuar ao longo dos primeiros sete meios ciclos e, nesse tempo, a tensão, sobre C7, tornará elevada sete vezes com relação à tensão de entrada.

A tensão inversa de pico, sobre cada retificador, é o dobro do valor de pico da tensão de entrada, independentemente da sua posição no circuito.

DIODOS RETIFICADORES LIGADOS EM SÉRIE

Quando não dispomos de diodos retificadores que suportem tensões inversas de pico muito elevadas, a única solução é associar, em série, dois ou mais diodos com uma tensão inversa menor.

Na figura 6, indicamos um circuito dobrador de onda completa, com diodos semicondutores de junção, ligados em série (BY 127).

Se ligarmos os diodos em série, eles irão conduzir a mesma corrente, embora a distribuição inversa das tensões seja feita proporcionalmente às resistências inversas dos diodos.

Ou melhor dizendo, o diodo, que apresentar maior resistência inversa, ficará submetido a uma maior tensão inversa de pico.

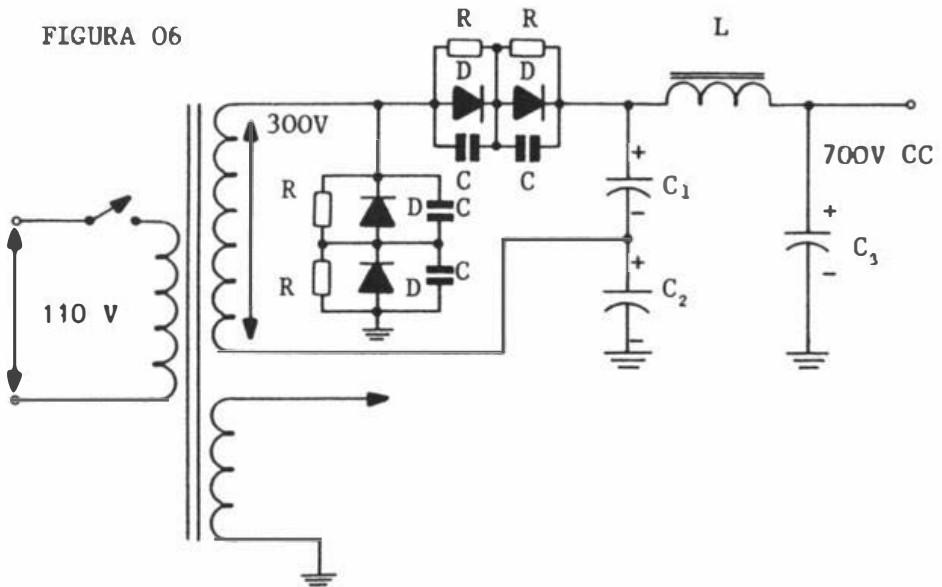
Assim, se o conjunto de diodos ligados, em série, dispuser de uma pequena margem de segurança, com referência às máximas tensões inversas de pico admissíveis, poderá ser ultra-

passado o limite de tensão de algum diodo, que, conseqüente
mente, entrará em curto ou se abrirá.

Se um diodo ficar em curto, os demais diodos do conjunto ficarão submetidos a uma maior tensão inversa de pico, ocorrendo, então, a destruição quase que instantânea, "em cadeia", dos demais diodos da série.

Para solucionar este problema, os projetistas de circuitos eletrônicos costumam associar, em paralelo, a cada diodo, um resistor de alto valor (entre $100K\Omega$ e $1M\Omega$), conforme ilustra a figura 6.

FIGURA 06



A função desses resistores é "equalizar" (ou igualar) a queda de tensão inversa sobre os diodos, daí o nome de resistores de equalização. Os capacitores têm a função de atenuar transientes que possam ocorrer na linha. (Veja detalhes na lição E-18).

CÁLCULO DOS CAPACITORES

Para calcularmos a capacitância dos capacitores de filtro, torna-se necessário determinarmos, primeiramente, a resistência de carga pela equação:

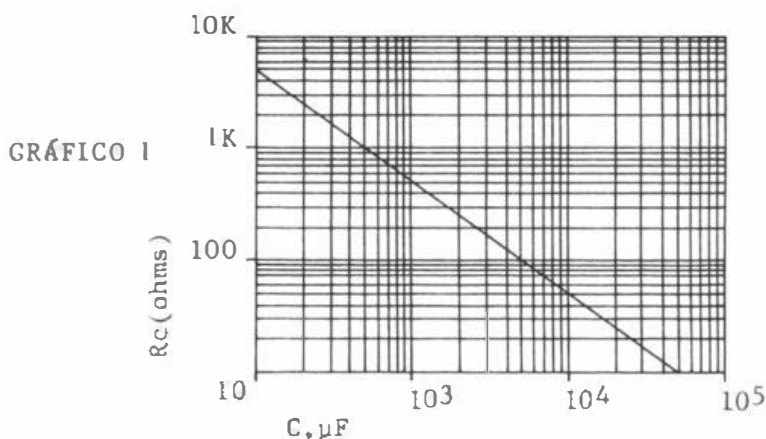
$$R_c = \frac{V_r}{I_{dc}}$$

R_c = resistência de carga;

V_r = tensão real de saída;

I_{dc} = corrente de carga

Para uma maior facilidade, pode-se consultar um gráfico da resistência de carga pela capacitância, como mostra o gráfico 1.



Esse gráfico permite a determinação da capacitância, dos capacitores de filtro, com uma ondulação de 1% para circuitos dobradores de tensão, de meia onda e de onda completa.

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO E REGULAÇÃO DE SAÍDA

Com a ausência de carga, a tensão de saída de uma fonte multiplicadora de tensão é dada por:

$$V_o = N \cdot \sqrt{2} \cdot V_{ef}$$

V_o = tensão de saída sem carga;

Onde,

N = o número de multiplicação (para dobradores (2), para triplicadores (3) e assim por diante).

V_{ef} = tensão eficaz no secundário do transformador.

Com a carga, a tensão de saída de uma fonte multiplicadora de tensão cai. Para se calcular essa queda de tensão, usa-se a seguinte fórmula:

$$V_{dc} = N \times 1,25 \times V_{ef}$$

Além disso, deveremos levar em consideração as quedas de tensão em cada diodo retificador. Sendo de silício os diodos, cada um apresentará uma queda de tensão de 0,7V. Dessa forma, a queda total da tensão dos diodos será:

$$V_d = N \times 0,7V.$$

Devemos subtrair, da tensão de saída V_{dc} , a queda de tensão dos diodos retificadores, para obtermos a tensão de saída real (V_r), assim:

$$V_r = V_{dc} - V_d$$

Exemplo: Projetar um triplicador, utilizando um transformador com 9V de saída.

Inicialmente, devemos calcular a tensão de pico no secundário do transformador ($V_{m\acute{a}x.}$):

$$V_{m\acute{a}x.} = \sqrt{2} \cdot V_{ef} = \sqrt{2} \cdot 9 = 12,73V$$

Dessa forma, os capacitores, ligados ao transformador, deverão ter uma tensão mínima de trabalho de 12,73V cada. E os capacitores da saída do triplicador deverão ter uma tensão de trabalho três vezes maior.

A seguir, calculamos a tensão de saída com carga:

$$V_{dc} = N \times 1,25 \times V_{ef} = 3 \times 1,25 \times 9 = 33,75V$$

Agora, calculamos a queda de tensão nos diodos conside
rados de silício:

$$V_d = N \times 0,7 = 3 \times 0,7 = 2,1V$$

Dessa forma, a tensão real de saída será:

$$V_r = V_{dc} - V_d = 33,75V - 2,1V = 31,65V.$$

Para uma corrente de saída (I_{dc}) de 155mA, a carga será:

$$R_c = V_r / I_{dc} = 31,65 / 155 \times 10^{-3} = 204,19\Omega, \text{ portanto: } 200\Omega.$$

Dessa forma, de acordo com o gráfico 1, a capacitância a ser empregada em cada um dos capacitores será de $2.700\mu F$, se adotarmos um circuito dobrador de tensão de onda completa. Co
mo, no exemplo, adotamos um triplicador de onda completa, usa
remos três capacitores de 2.700×3 ou $8.100\mu F$ em cada capaci
tor do triplicador. Observamos que, quando o valor do capaci-
tor calculado não se enquadrar com o valor encontrado no co-
mércio, deve-se adotar um valor imediatamente superior ao cal
culado.

Na lição E-18, apresentamos um método prático para o cálculo dos retificadores monofásicos de meia onda e de onda completa. Vamos dar continuidade ao assunto, porém, agora, pa
ra os circuitos dobradores de tensão. É o seguinte o roteiro a ser seguido:

Roteiro:

- 1º - Determinar o valor de R_c (resistência de carga).
- 2º - Assumir um valor para R_s entre 1% e 10% do valor de R_c .
- 3º - Calcular em porcentagem o valor R_s/R_c .
- 4º - Com $R_s/R_c\%$, fixar um fator de ondulação para o circuito, também em porcentagem e através do gráfico da figura 7, ($\% \text{ ripple} \times R_s/R_c\%$), determinar $WR_c.C$.
- 5º - Calcular o capacitor necessário e aproximá-lo de um valor comercial.
- 6º - De posse dos valores $R_s/R_c\%$ e $WR_c.C$ e com a curva da figura 8, determinar o valor de $V_{dc}/V_{m\acute{a}x.}$ e a partir dessa relação, encontrar o valor de $V_{m\acute{a}x.}$, pois a tensão V_{dc} é

conhecida.

7º - Com os valores R_s/NR_c e $NWR_c.C$, determinar o valor da relação I_{ef}/I_{dc} através da figura 9, encontrar o valor de I_{ef} , pois I_{dc} é conhecido.

8º - De posse dos valores R_s/NR_c e $NWR_c.C$, determinar a relação I_{pr}/I_{dc} e, com o gráfico da figura 10, encontrar o valor de I_{pr} , pois I_{dc} é conhecido.

9º - Dimensionar os diodos, considerando sempre aquele que possuir características superiores às calculadas, para operar com margem de segurança.

$$\% \text{ ripple} = \frac{\text{tensão eficaz de ripple}}{\text{tensão contínua}} \cdot 100 = \frac{V_{ef} (\text{ripple})}{V_{dc}} \cdot 100.$$

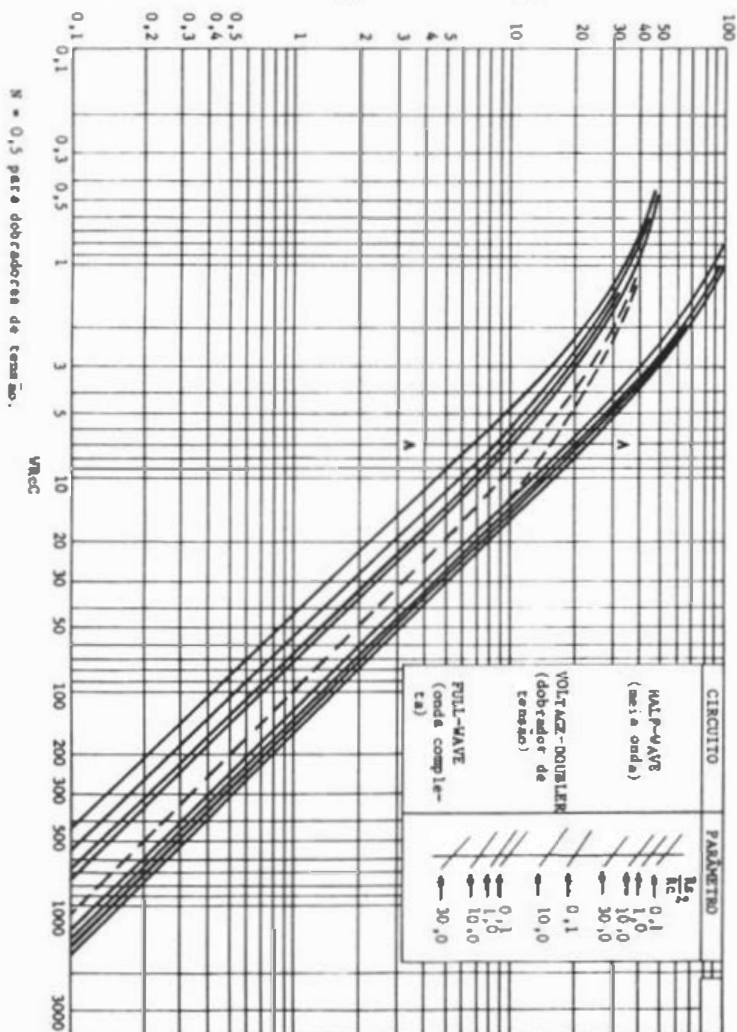
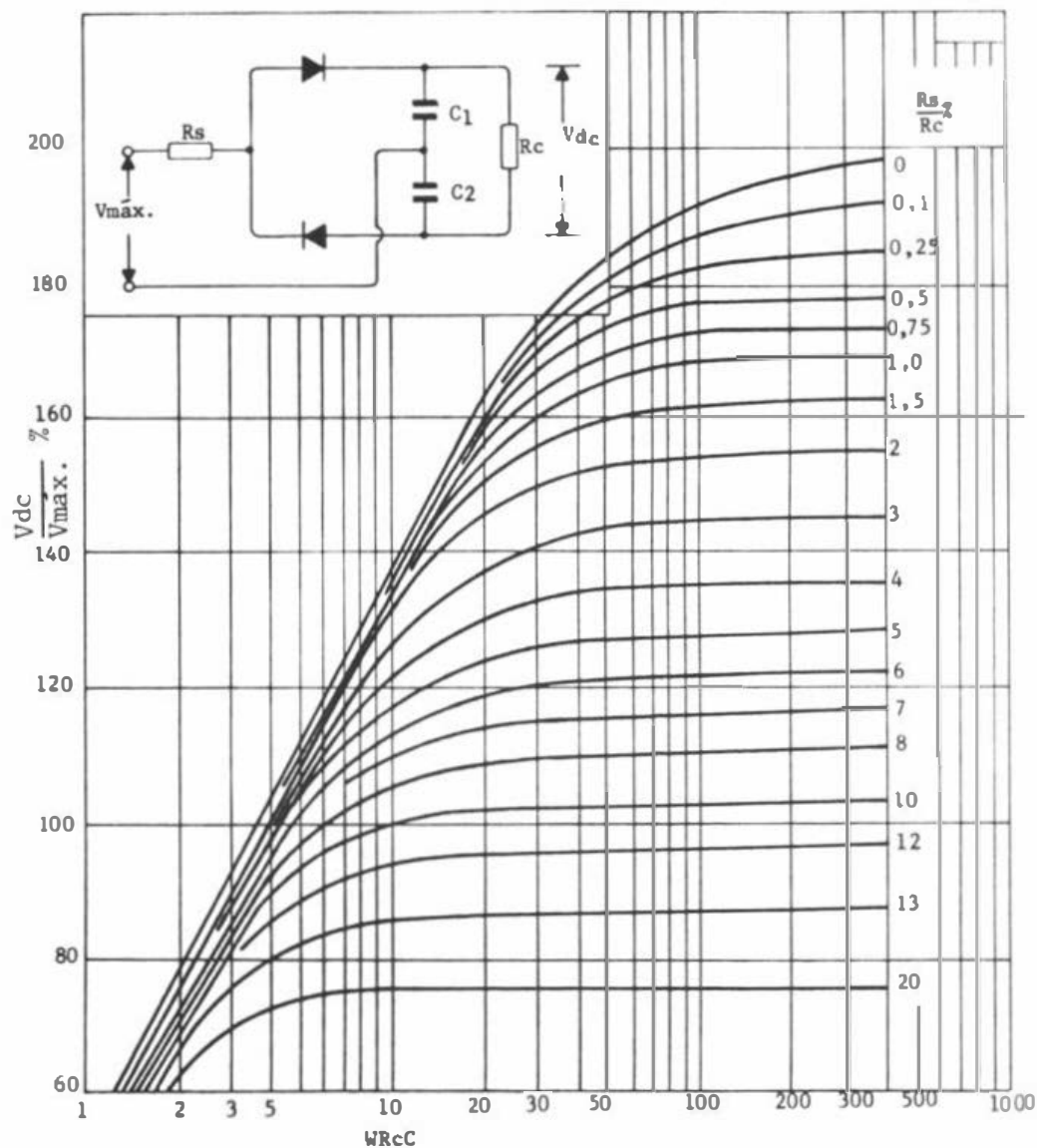


FIGURA 08



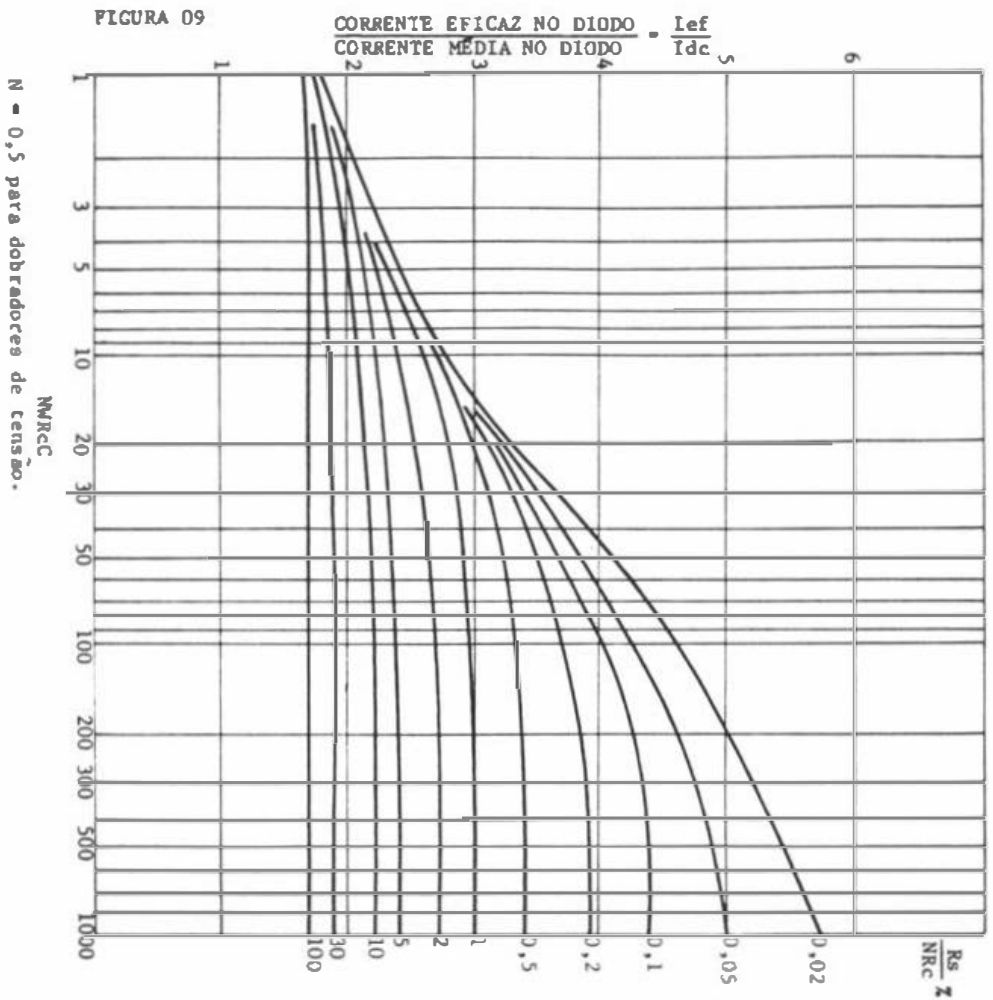
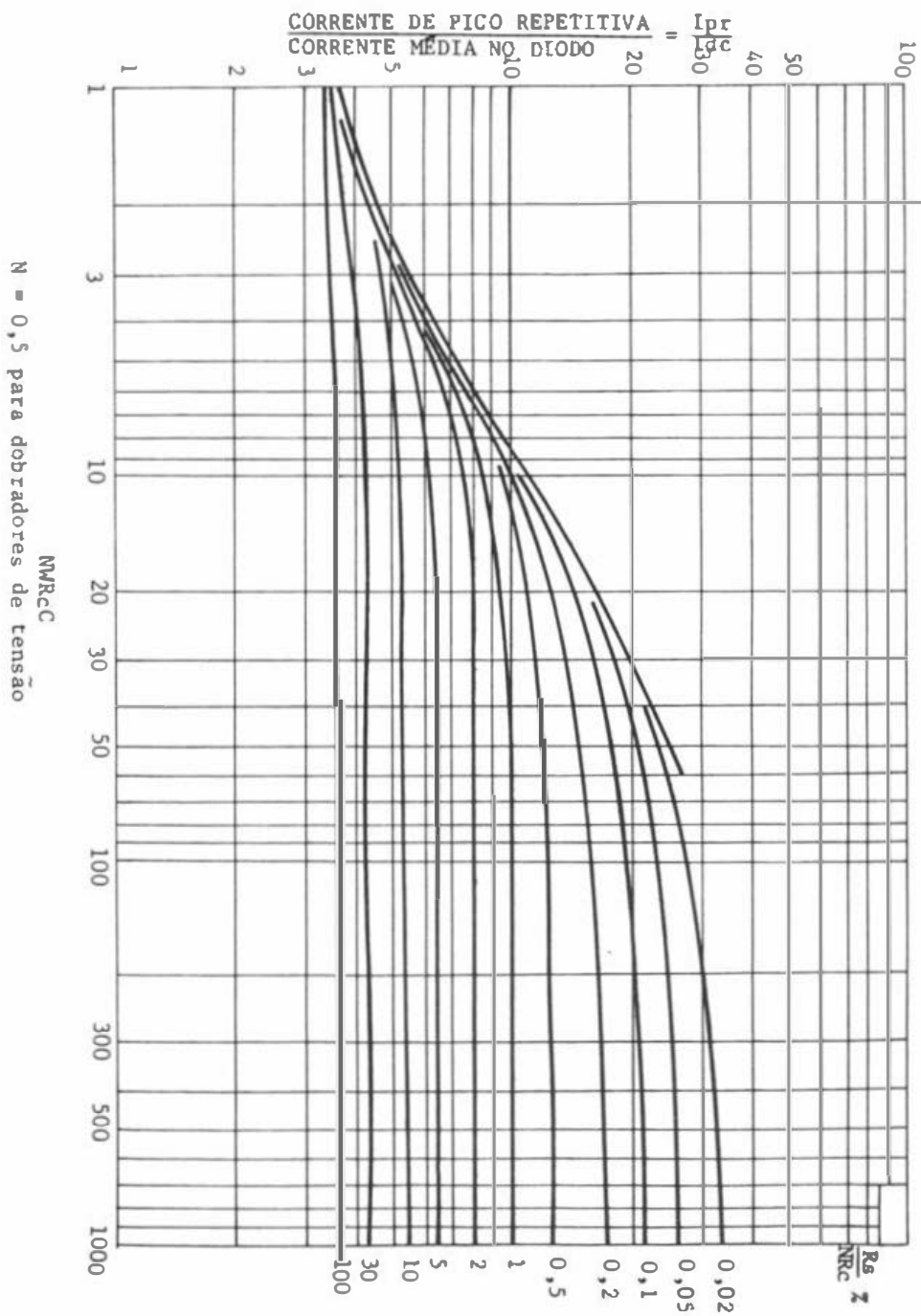


FIGURA 10



Aplicação:

1) Calcular os parâmetros necessários para o circuito da figura 11, sabendo-se que o fator de ondulação é de 1% e a tensão média de saída, igual a 60 volts para $R_c = 12K\Omega$.

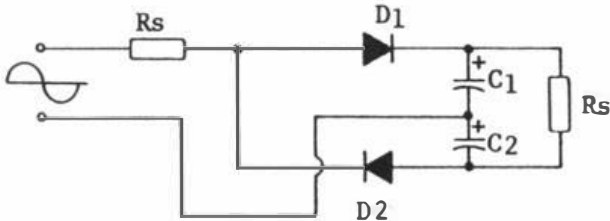


FIGURA 11

- a) $R_c = 12K\Omega$
 b) Vamos assumir R_s como sendo 10% de R_c .

$$R_s = 10\% R_c \rightarrow \frac{R_s}{R_c} = 10\%$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{R_s}{R_c} = 10\% \\ r = 1\% \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{gráfico figura 7}} W R_c \cdot C = 110$$

$$C = \frac{110}{W R_c} = \frac{110}{2\pi 60 \cdot 12 \cdot 10^3} = 24,3 \mu F$$

$$C = C_1 = C_2 = 25 \mu F$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{R_s}{R_c} = 10\% \\ W R_c \cdot C = 110 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{gráfico figura 8}} \frac{V_{dc}}{V_{\max}} = 103\%$$

$$V_{dc} = 60V \quad \frac{V_{dc}}{V_{\max}} = 1,03 \rightarrow V_{\max} = \frac{60}{1,03} = 58,2V$$

$$V_{\max} = 58,2V$$

Os diodos devem suportar uma tensão de pico inversa, maior que $2 V_{m\tilde{a}x.} = 116,4V$.

$$e) \frac{R_s}{NR_c} = \frac{1200}{0,5 \times 12000} = 0,2$$

$N = 0,5$ (para dobradores de tensão)

$$\left. \begin{array}{l} \% \frac{R_s}{NR_c} = 100 \times 0,2 = 20\% \\ NWR_c.C = 0,5 \cdot 110 = 55 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{gráfico figura 9}} \frac{I_{ef}}{I_{dc}} = 2,2$$

A curva referente à $R_s/NR_c = 20\%$ não há no gráfico, tome um valor intermediário entre as curvas de 10% e 30%.

A corrente média na carga será:

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R_c} = \frac{60}{12 \times 10^3} = 5mA.$$

A corrente média em cada diodo é a metade da corrente média na carga.

$$I_{dc} = \frac{5 \times 10^{-3}}{2} = 2,5mA$$

assim:

$$\frac{I_{ef}}{I_{dc}} = 2,2 \rightarrow I_{ef} = 2,2 \times 2,5 \times 10^{-3} = 5,5 \times 10^{-3}$$

$$I_{ef} = 5,5mA$$

$$\left. \begin{array}{l} f) \frac{R_s}{NR_c} = 20\% \\ NWR_c.C = 55 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{gráfico da figura 10}} \frac{I_{pr}}{I_{dc}} = 4,5$$

Da mesma forma, como no item "e", tome um valor intermediário entre as curvas de $R_s/NR_c = 10\%$ e $R_s/NR_c = 30\%$.

Como $I_{dc} = 2,5mA$

$$I_{pr} = 4,5 \times 2,5 \times 10^{-3} = 11,2mA.$$

A corrente de pico transitória (I_{pnr})

$$I_{pnr} = \frac{V_{m\bar{a}x.}}{R_s} = \frac{58,2}{1200} = 48,5 \text{ mA.}$$

$$I_{pnr} = 48,5 \text{ mA}$$

g) Devemos escolher os diodos com os seguintes valores:

$$I_{dc} > 2,5 \text{ mA}$$

$$I_{pr} > 11,2 \text{ mA}$$

$$I_{pnr} > 48,5 \text{ mA}$$

$$I_{ef} > 5,5 \text{ mA}$$

$$V_{ip} > 116,4 \text{ V}$$

DOBRADOR DE TENSÃO 12V-24V

Em alguns casos, deparamos com equipamentos que requerem alimentação de 12V e ao mesmo tempo de -24V ou mais. Em casos como esses a solução seria o uso de pilhas. Estas porém, dependendo do consumo, poderão não ter capacidade suficiente, além do mais, seria oneroso devido à troca constante das mesmas.

Temos ainda outros casos, como: toca-fitas de 12 volts que precisam ser instalados em veículos mais antigos, com bateria de 6 volts.

A solução mais viável, para esses e outros casos semelhantes, será o uso de um dobrador de tensão. O seu circuito, e funcionamento analisaremos a seguir.

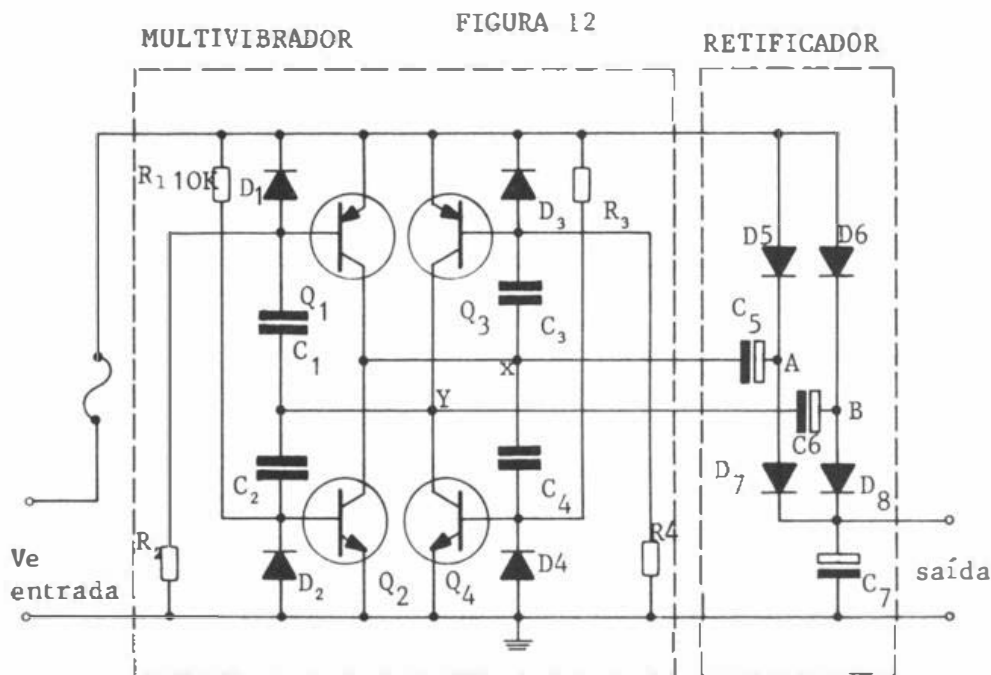
FUNCIONAMENTO

O circuito dado na figura 12 consiste, basicamente, de duas partes: um multivibrador que produz ondas quadradas e um retificador. Analisaremos, cada um deles separadamente.

MULTIVIBRADOR

É do tipo convencional, onde os resistores de coletor foram substituídos por transistores, cujo princípio de operação passaremos a expor.

Vamos supor que os transistores Q1 e Q4 estejam saturados, que os transistores Q2 e Q3 estejam cortados e que os capacitores C1 e C4 estejam carregados.



Pela figura 13, vemos que o ponto X está no potencial V_e (tensão de entrada), enquanto que o ponto Y está no potencial zero. O capacitor C2 começa a se carregar através de R1 e Q4, o mesmo acontecendo com o capacitor C3, através de Q1 e R4.

Assim que a tensão, nesses dois capacitores, chegar aos 0,7V, os transistores Q2 e Q3 entrarão em condução, fazendo com que C4 se descarregue por Q2, C1 e Q3, levando os transistores Q1 e Q4 ao corte. Dessa forma, o ponto X passa para

zero volt e o ponto Y, para V_e .

Em seguida, o capacitor C_1 inicia a sua carga, através - de Q_3 e R_2 e o capacitor C_4 , através de R_3 e Q_2 . Quando a tensão nesses capacitores alcançar os 0,7V, Q_1 e Q_4 começarão a conduzir, descarregando, assim, C_2 e C_3 , o que levará Q_2 e Q_3 ao corte. Logo, volta-se ao estágio inicial.

A função dos diodos D_1 , D_2 , D_3 e D_4 no circuito é evitar o surgimento de tensões inversas nas junções base emissor dos transistores, evitando que as mesmas os danifiquem.

RETIFICADOR

É formado por uma ponte de diodos, tendo como entrada os pontos "X" e "Y", uma tensão igual a $2V_e$, pico a pico, (figura 12).

Supondo que, em um determinado instante, o ponto X esteja em 0V e o ponto Y em V_e , o capacitor C_5 vai se carregar através de D_5 , a uma tensão $V_e - 0,7$, logo que o ponto "X" for para o nível de V_e e o ponto Y para zero. A tensão no ponto A da figura 12 será:

$$V_e + (\text{tensão sobre } C_5) \rightarrow V_e + (V_e - 0,7) = 2V_e - 0,7$$

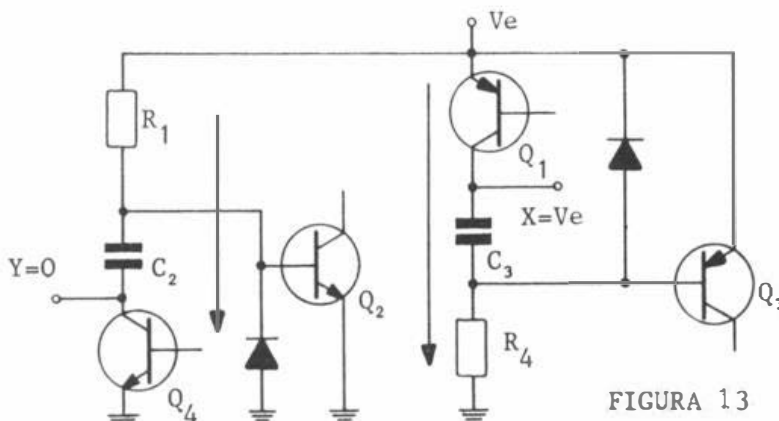


FIGURA 13

Ao mesmo tempo, o capacitor C_6 carrega-se por meio de D_6 a uma tensão $V_e - 0,7$ (obs. 0,7V é a queda de tensão sobre os diodos).

Se, agora, voltarmos ao estado anterior, ou seja, com o ponto X em zero volt e o ponto Y em V_e , o ponto B da figura 12 irá para o nível: $V_e + (V_e - 0,7)$.

$V_e - 0,7$ = tensão sobre o capacitor C6. Enquanto isso, o capacitor C5 volta a carregar-se a uma tensão $V_e - 0,7$.

Dessa maneira, o capacitor C7 permanece carregado a uma tensão de $2 V_e - 1,4$, pois os diodos D7 e D8 evitam que o mesmo se descarregue.

Pelas explicações dadas, vemos que o circuito se assemelha muito a um retificador de onda completa, que nos fornece, permanentemente, uma tensão igual a $2 \times (V_e - 0,7)$.

Empregam-se, no circuito, transistores darlington de potência, de modo a se obter uma elevada corrente de saída.

Podem-se ainda ligar, em série, vários dobradores, formando multiplicadores de tensão (mas sempre respeitando a tensão máxima permissível na entrada de cada estágio dobrador).

Obs.: A máxima potência de saída, com 12 volts na entrada, é de 22 watts.

CONVERSOR CC/CC COMPACTO PRODUZ $\pm 15V$ A PARTIR DE $\pm 5V$

Muitos sistemas digitais usam amplificadores operacionais que requerem tensões de $+15V$ e $-15V$, quando todos os demais elementos requerem apenas $5V$.

Tanto os $+15V$ como os $-15V$ podem ser supridos pelo uso de um conversor CC/CC de $10mA$, suficientemente compacto, para ser montado sobre uma placa de circuito impresso.

O multivibrador, nesse circuito, é feito basicamente pelo NE555 que opera a $100 KHz$. O valor da frequência não precisa ser muito exato, porém a forma de onda dada abaixo, figura 14, deve ser encontrada para otimizar a operação do circuito.

O trem de pulsos do multivibrador comanda a base do transistor Q1, para chavear a corrente na bobina primária do transformador T.

Quando a corrente é interrompida, um pico de aproximadamente $20V$ ocorre no coletor de Q1. Essa tensão é retificada

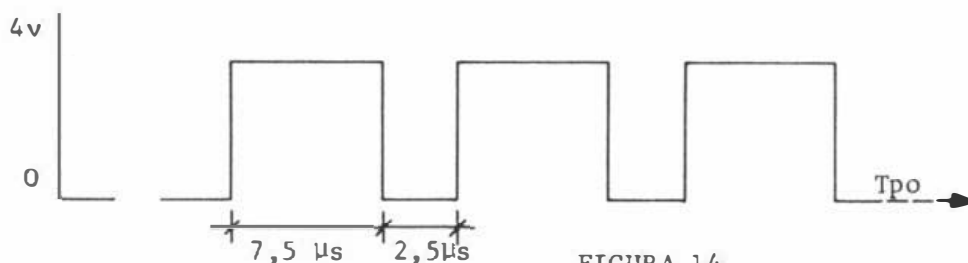


FIGURA 14

por D1 e filtrada por C1 e R1. O fornecimento da tensão de +15 volts é regulada por um diodo zener, como indica a figura 15.

A vantagem desse conversor CC/CC está no seu tamanho reduzido que permite a montagem em placas de circuito impresso com outros elementos do sistema.

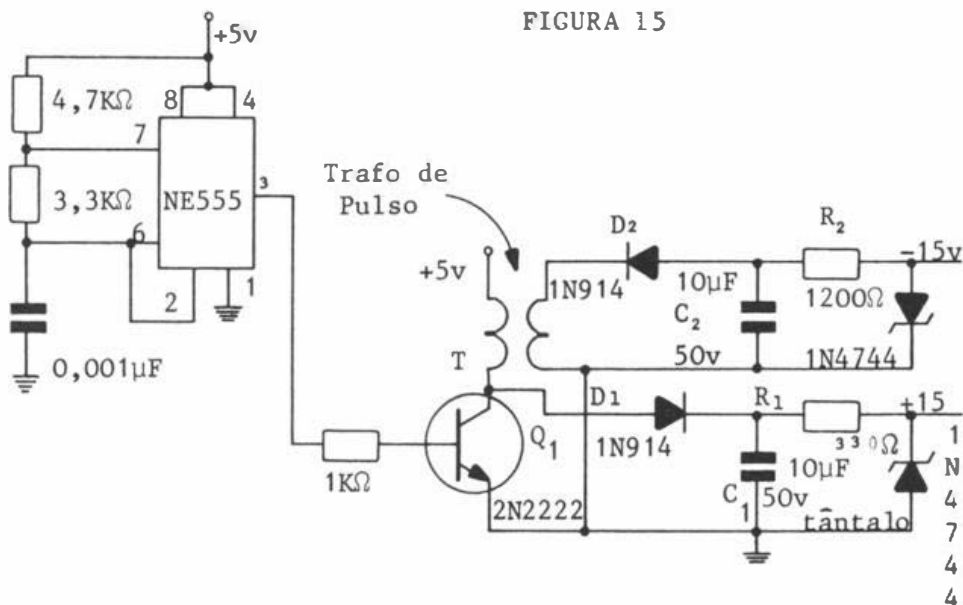


FIGURA 15

Devido ao fato do transformador T oferecer isolação CC, o terminal de maior tensão da bobina pode ser aterrado para produzir o pulso negativo, que será retificado, filtrado e regulado para alcançar - 15V.

Os pequenos capacitores de tântalo e o pequeno transformador de pulso substituem os componentes maiores que seriam usados em uma fonte convencional de + 15V.

UM CONVERSOR CC/CC FORMADO POR UM TEMPORIZADOR INTEGRADO E UM DOBRADOR DE TENSÃO

Esse conversor é o ideal para alimentar AMPOPs (amplificadores operacionais) e equipamentos portáteis à bateria, onde só se dispõe de uma tensão positiva.

O circuito fornece uma tensão de - 15V, com regulação de 1% e uma corrente de carga de 30mA. O consumo do circuito, sem carga, é de 11mA.

A figura 16 indica o circuito onde o 555 forma um oscilador de relaxação. As resistências Ra e Rb determinam a frequência, ajudadas pelo capacitor C1. A saída do oscilador está conectada ao sistema dobrador de tensão, composto pelos diodos D1 a D4 pelos capacitores C1 a C4.

Nesse circuito, temos realimentação, isto é, entre o dobrador de tensão e a entrada "reset" do temporizador, a saída do circuito vai flutuar em torno de 30V, não contando as 4 tensões dos diodos. Com a realimentação, o divisor de tensão, formado pelos diodos D5 e D6 e pelos resistores R1 e R2, injeta uma tensão de 0,7V na entrada "reset" do temporizador, quando a tensão negativa de saída tornar-se igual ao valor da tensão positiva de entrada.

Se a tensão de saída cair abaixo de - 15V, a oscilação do temporizador é inibida, e, em consequência, o sinal para o dobrador é removido, o que provoca uma regulação chaveada da tensão de saída.

Quando a saída do 555 tornar-se positiva o capacitor C1 será carregado através de D1, enquanto D2 estará inversamente polarizado. Porém, quando a saída tornar-se negativa, um pouco da carga de C1 será transferido para o capacitor C2, por

meio de D2, enquanto que O1 estará inversamente polarizado.

Assim que o sinal do 555 passar novamente para um valor positivo, o capacitor C3 carregar-se-á por intermédio de C2 e O3, até duas vezes a tensão de alimentação, aproximadamente. E na próxima transição do 555, para um valor negativo, essa carga deslocar-se-á para C4, através de D4, dobrando a tensão de saída do temporizador. Esse tipo de dobrador requer que o dispositivo de comando passe a agir tanto como fornecedor, - quanto consumidor de corrente.

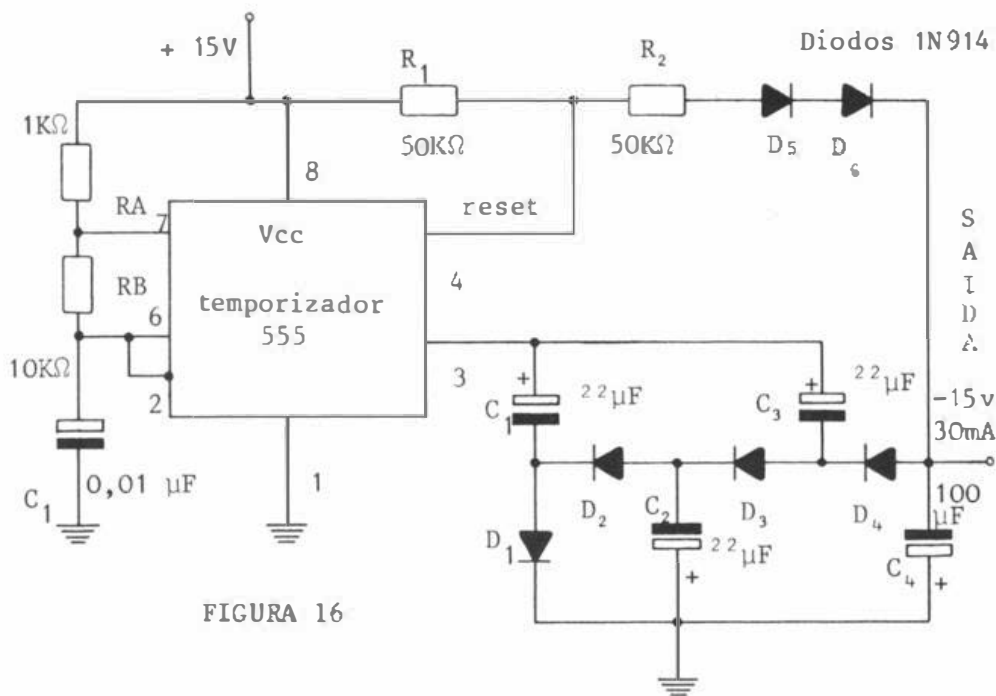


FIGURA 16

Obs.: Se R1 e R2 forem substituídos por um único potenciômetro de 100KΩ, a tensão de saída tornar-se-á variável de zero até o valor mínimo (-15V).

Se houver necessidade de uma regulação mais eficiente sobre as variações da alimentação, o resistor R2 poderá ser substituído por um diodo zener.

Por fim, os diodos D5 e D6 são opcionais, pois estão aí apenas para melhorar o rastreo entrada-saída do circuito.

CONVERSOR CC/CC DE + 12 PARA - 10V

Utilizando um 555, pode-se produzir uma tensão CC negativa de polarização, a partir de uma fonte positiva.

Podem-se também obter correntes acima de 10mA, pois a regulação de comutação empregada assegura uma tensão constante na saída.

Além de um transistor NPN e de um temporizador 555 pouca coisa a mais é acrescentada ao circuito, para se obter a fonte de tensão negativa, como se pode notar através da figura 17.

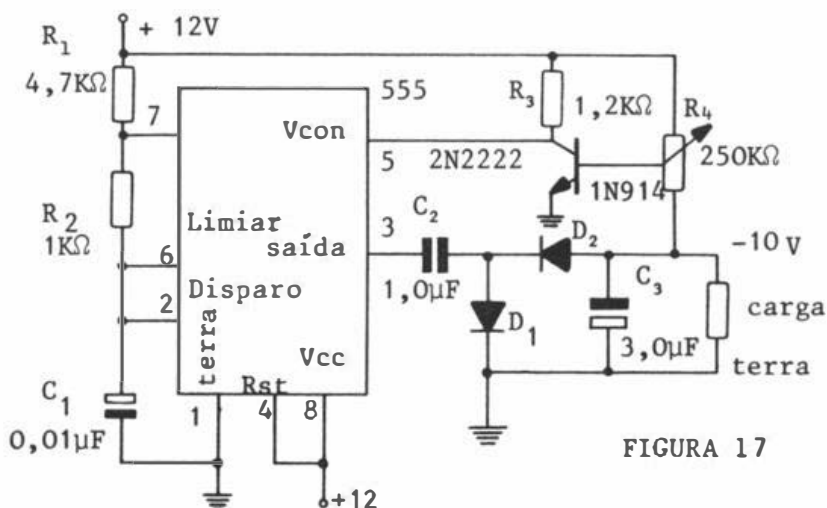


FIGURA 17

Os pulsos de saída do integrado são controlados em largura e frequência pelos resistores R₁ e R₂, além do capacitor C₁. Esses parâmetros podem ser seleccionados para máxima regulação ao nível desejado de tensão de saída. O terminal 3 do CI é conectado a uma rede composta por C₂, C₃, D₁ e D₂. O capacitor série C₂ faz com que o trem de pulsos perca sua refe

rência de terra, a fim de que os diodos D₁ e D₂ retifiquem o sinal e o capacitor C₃ possa filtrá-lo, sob a forma de uma tensão contínua negativa.

Para se regular a tensão de saída, o transistor 2N2222 varia a tensão de controle do 555, elevando ou diminuindo o ritmo de repetição dos pulsos.

O resistor R₃ atua como carga de coletor para esse transistor e a base do mesmo é excitada através do potenciômetro R₄, que compara a tensão de saída à tensão de alimentação.

A tensão de saída pode ser ajustada para qualquer nível entre "0" e "-10", por intermédio do potenciômetro R₄.

Com os componentes exibidos na figura 17, o circuito fornece -10V, a partir de uma fonte de 12V.

A saída negativa de tensão, que aparece sobre C₃, é regulada pelo transistor, que, por sua vez, vai aumentar ou reduzir a frequência do multivibrador com a periodicidade necessária.

Na figura 18, abaixo, ilustramos um outro circuito, usando também o CI 555, com uma tensão de saída de -12V com 25mA de consumo.

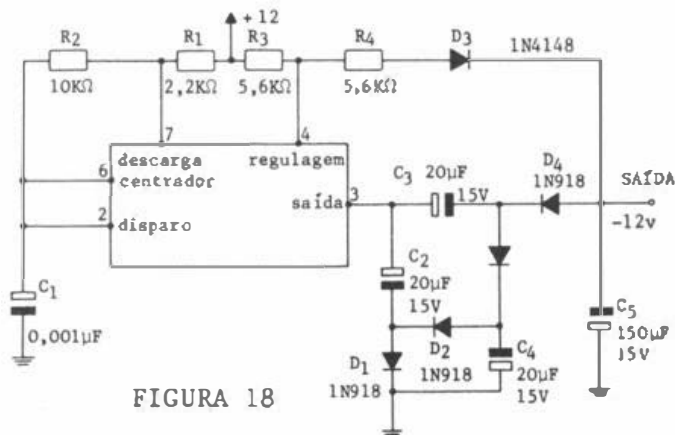


FIGURA 18

Obs.: O temporizador 555 produz uma onda retangular com uma frequência de 20KHz.

CONVERSOR CC/CA

A conversão de corrente contínua para corrente alternada, às vezes, faz-se necessária, como, por exemplo, em captação de energia solar, ou ainda, em lâmpada fluorescente para carros, em ignição eletrônica, em eletrodomésticos de 110V ou 220V, em baterias, etc.

Um fator de grande importância em circuitos de conversão de corrente contínua para corrente alternada é a estabilidade de frequência. Inúmeros aparelhos elétricos dependem dessa estabilidade para um perfeito funcionamento. Iremos apresentar alguns circuitos práticos de conversão que utilizam componentes semicondutores e transformadores.

Na figura 19, apresentamos um circuito conversor de 12V em corrente contínua para 220V, corrente alternada.

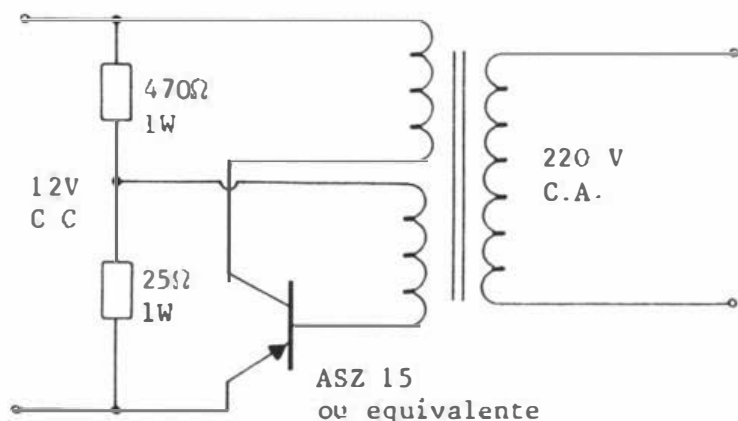
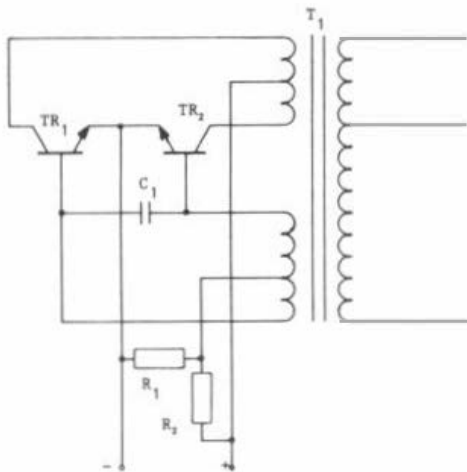


FIGURA 19

Na figura 20, apresentamos um conversor de corrente contínua em alternada, empregado em ignição eletrônica de carros de mais ou menos 1,8 ampères com frequência em torno de 300Hz.

O transformador utiliza núcleo toroidal e o número de espiras dependerá do projeto, podendo ser calculado através das equações dadas na apostila E-16.



TR₁, TR₂- 2N3055

$R_1 = 100\Omega$ 6W

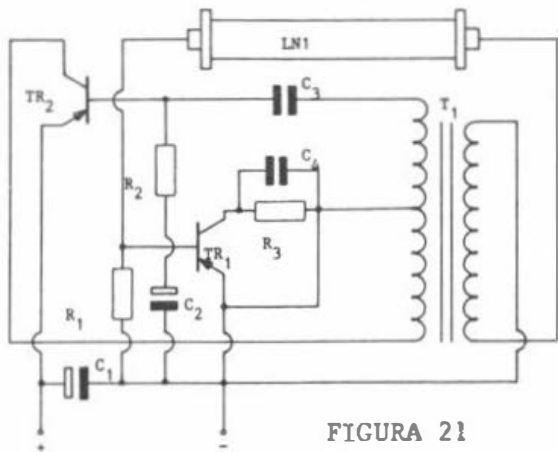
 $R_2 = 560 \Omega$ 6W

C₁ = 470.000 PF

T, - Veja Texto

FIGURA 20

Na figura 21, apresentamos um conversor de corrente contínua de 12V para corrente alternada de 220V, para acender uma lâmpada fluorescente de 220V 6 watts.



R₁ -270Ω 1/2 W

 $R_2 = 470\Omega \quad 1/2 \text{ W}$ $R_2 = 1500\Omega \quad 1/2W$

C₁ = 220 μ F / 16 V

C₂ = 22 MF/16V

*C₃-47.000PF POLIESTER

C₁ -22.000PF POLIESTER

TR. - AD142

TR-AC128

T₁ = 12+12V POR 220V

LN₁ - LÂMPADA FLUORESCENTE
T_F DE 6 WATTS.

FIGURA 21

Obs. Caso a lâmpada fique com o brilho fraco, experimentar substituir C3 por valores desde 100.000PF até 470.000PF.

CONVERSORES TENSÃO - FREQUÊNCIA

Os conversores tensão-frequência são produzidos sob a forma de circuito integrados, monolíticos e podem ser empregados em inúmeras funções. Conhecidos também por VFC (VOLTAGE TO - FREQUENCY CONVERTERS).

Os VFC RC4151 e RC4152 são alguns exemplos de conversores tensão-frequência. O RC 4151 foi o primeiro, porém ambos são compatíveis pino a pino e intercambiáveis quanto à aplicação.

Faremos, a seguir, algumas considerações sobre ambas as unidades.

O diagrama de blocos do RC 4151 e do RC 4152 é dado na figura 17, onde o VFC contém, em uma única pastilha, um bloco de circuitos, contendo um comparador, um monodisparo (one-shot), uma tensão de referência, uma fonte de corrente comandada e um transistor de saída de coletor exposto (do inglês "BARRE COLLECTOR") ou coletor aberto.

A amplitude de saída de fonte de corrente comandada é ajustada por meio de um resistor externo (R_s) e a largura do pulso do monodisparo é ajustado, através de uma rede RC externa. Uma vez que o coletor do transistor de saída não possui conexão com o circuito, a tensão de saída é determinada pela queda, através de R_L . (Ver figura 22).

Trata-se, portanto, do único projeto em que se usam as vantagens das propriedades de igualamento, de fabricação monolítica.

Não iremos mostrar o diagrama do circuito interno do circuito integrado 4151, pois não é esse o nosso objetivo. Resaltamos, porém, a sua versatilidade, por se tratar de um circuito com inúmeros pontos de entrada e de saída.

A figura 23, ilustra a configuração recomendada para um VFC com operação em gama ampla, onde ele é, basicamente, um circuito de carga balanceada, no qual, um amplificador operacional, externo serve como integrador.

Os pulsos de corrente (I_o) do RC 4151 são somados a uma corrente proporcional à tensão de entrada (V_{IN}/R_B).

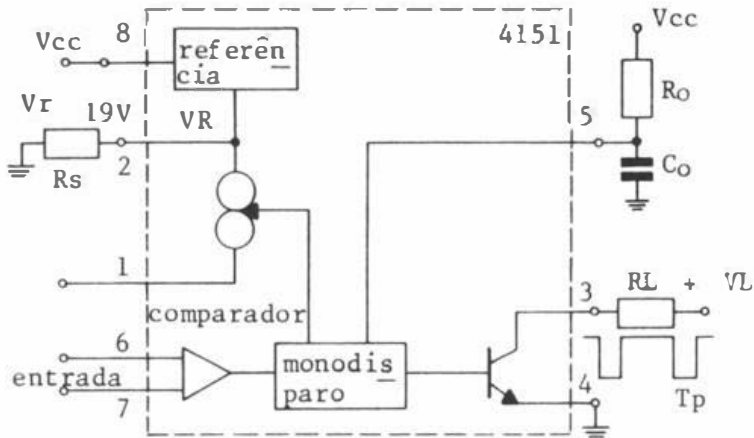


FIGURA 22

A saída do integrador fará com que a cadência dos pulsos varie até que o valor médio dos pulsos de corrente de saída (I_o) iguale ao valor médio de corrente de entrada. No equilíbrio:

$$V_{IN}/R_B = I_o \times T_p \times F_o$$

Onde:

I_o = pulso de corrente de saída com amplitude V_r/R_s ;

T_p = largura do pulso;

A frequência nominal de saída F_o é dada por:

$$F_o = 0,486 \frac{R_s}{R_B \times R_o \times C_o} V_{in},$$

Onde: $-10V \geq V_{in} \geq 0$

A tensão de referência (V_r) é de aproximadamente 1,9V, a largura do pulso, que é estabelecida pela rede RC externa, é de $1,1 \times R_o \times C_o$.

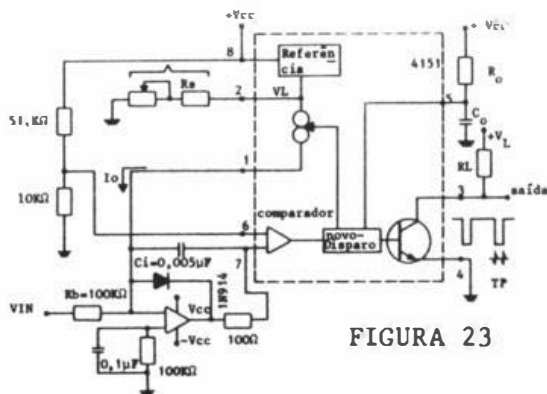


FIGURA 23

Os valores dos componentes devem estar dentro das seguintes faixas, para uma melhor linearidade e estabilidade:

$$6,8K\Omega \leq R_o \leq 680K$$

$$0,001\mu F \leq C_o \leq 1,0 F$$

$$12K\Omega \leq R_s \leq 18K\Omega.$$

O valor de R_b depende do amplificador operacional externo que for escolhido, mas podem-se considerar razoáveis valores de $20K\Omega$ a $200K\Omega$.

O AMPOP 741, ou o equivalente é satisfatório para operação de até $10KHz$. Ultrapassando este valor, pode haver distorção na linearidade. O RC 4131 ou RC 4531 deverão ser considerados para a gama de operação entre $10KHz$ e $100KHz$.

A conversão tensão-frequência pode também ser utilizada para se obter isolamento elétrica.

CONVERSÃO ANALÓGICA DIGITAL

A frequência de saída de um VFC pode ser facilmente convertida para uma saída digital parcela, para utilização em um computador digital ou para um display (mostrador) digital.

Na figura 24, temos o diagrama de blocos generalizado de um conversor analógico, digital de 8 bits, com saída paralela

la, utilizando um VFC.

O contador acumula os pulsos de saída do VFC durante um tempo pré-fixado. No início do intervalo de tempo, o contador é levado a zero. No final do intervalo de tempo, o contador é inibido e a saída do contador é levada a uma tranca. Esse método apresenta as seguintes vantagens:

- A conversão é feita de uma única vez; diferindo das conversões digitais, analógicas de aproximação sucessiva, existindo, portanto, uma menor perda de códigos;
- A capacidade para rejeição de ruídos;
- A isolação elétrica pode ser executada através de um opto-acoplador entre o VFC e o contador, podendo proporcionar excelente isolação a baixo custo;
- A resolução e a velocidade de conversão podem ser facilmente adaptadas às aplicações específicas.

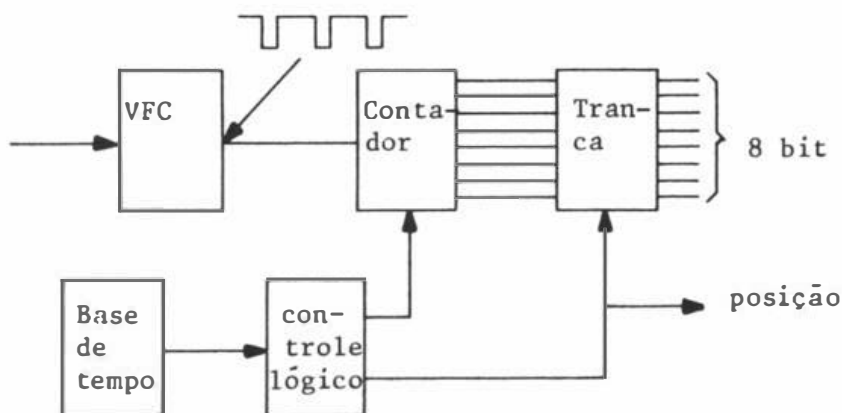


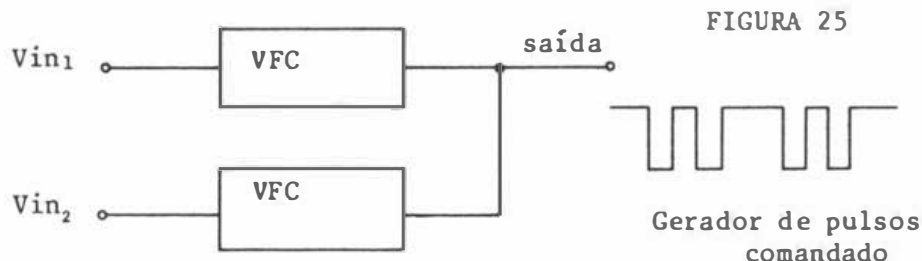
FIGURA 24

Os sistemas baseados em microprocessadores contêm relógio, contadores, trancas e todos os demais circuitos necessários. Um sistema microprocessador pode ser utilizado para suportar diversos canais de VFC, desde que a velocidade de aquisição de dados seja suficientemente baixa.

GERADOR DE PULSOS

O VFC 4151 pode ser utilizado diretamente como um gerador de pulsos, de gama ampla, controlado por tensão. A frequência de repetição de pulsos pode ser facilmente variada dentro de uma grande faixa. Para isso, são utilizadas duas unidades 4151 em uma configuração, como mostra a figura 25, onde é possível gerar salvas repetitivas de pulsos.

Essas salvas de pulsos são, muitas vezes, necessárias para testes lógicos.



Além dessas inúmeras aplicações, pode-se ainda construir um acurado multiplicador analógico, onde, através de uma polarização adequada, o multiplicador pode ser configurado como um dispositivo de quatro quadrantes e escalonado para uma saída de $\pm 10V$. Essa tensão de saída pode ser calculada, através da expressão $V_x \cdot V_y / 10$, onde V_x e V_y variam dentro de uma faixa de tensão de $\pm 10V$.

Não entraremos em maiores detalhes sobre esse assunto, pois foge do objetivo desta apostila.

CIRCUITO PRÁTICO CONVERSOR CC/CC

O circuito da figura 27 é um conversor CC/CC que eleva a tensão $+5V$ para $+12V$ e $-12V$. O circuito é constituído, basicamente, de três partes distintas, a saber: oscilador, elevador de tensão e retificador estabilizador, como mostra o diagrama da figura 26.



FIGURA 26

O oscilador é constituído pelo timer 555 que produz uma frequência em torno de 20KHz. Essa frequência é introduzida na base de Q1 e Q2 com fases inversas, alternando a polaridade do transformador, constituído de núcleo toroidal (ou de outro tipo). A tensão de saída do transformador é aplicada em um retificador em ponte e estabilizada pelo regulador de tensão 7812 e 7912.

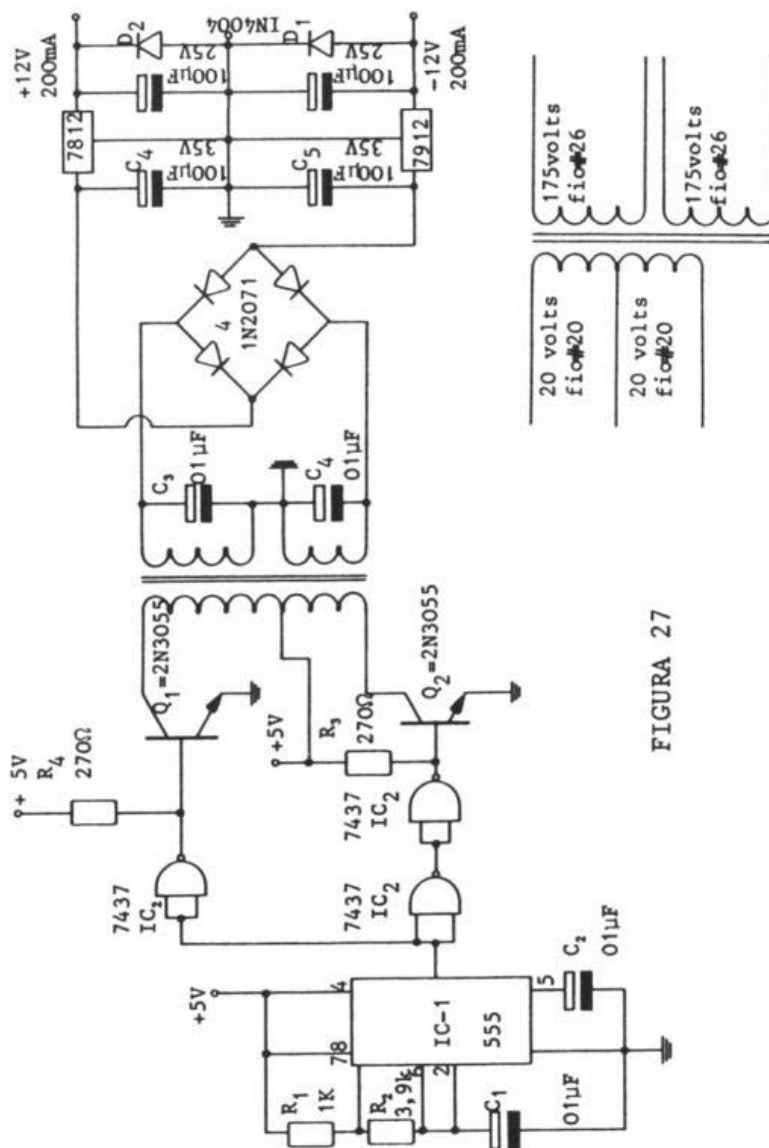
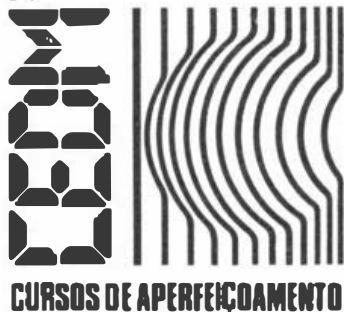


FIGURA 27



CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-19

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Os circuitos multiplicadores de tensões incluem:
 - a) sintonizadores, acopladores e dobradores;
 - b) multiplicador de tensão, inversores e circuitos acopladores;
 - c) dobradores de meia onda, dobradores de onda completa e multiplicadores de tensão;
 - d) retificadores e estabilizadores de tensão.
- 2) Nos duplicadores de meia-onda, a tensão de saída varia entre:
 - a) zero e o dobro de tensão de entrada, durante cada ciclo;
 - b) uma vez e o dobro de tensão de entrada, durante cada ciclo;
 - c) zero e o dobro da tensão de entrada, a cada dois ciclos;
 - d) zero e o dobro da tensão de entrada, a cada semiciclo.

- 3) O circuito da figura 3 é um dobrador de onda completa, a finalidade da resistência R_c é:
- a) formar juntamente com a indutância L , o circuito de filtragem;
 - b) proteger os diodos contra picos de corrente;
 - c) limitar a corrente da carga;
 - d) todas as alternativas anteriores estão corretas.
- 4) O triplicador da figura 4 fornece uma tensão de saída igual a:
- a) seis vezes o valor de tensão de entrada;
 - b) quatro vezes o valor do capacitor de saída;
 - c) todas as alternativas anteriores estão corretas.
 - d) três vezes a tensão de pico do secundário do transformador.
- 5) Considerando um circuito triplicador que utiliza um transformador com tensão no secundário de 12Volts. A tensão de saída com carga será igual a:
- a) 45 volts;
 - b) 4,5 volts;
 - c) 63,3 volts;
 - d) 16,9 volts.
- 6) Quando não se dispõe de diodos retificadores que suportem tensões inversas de pico, muito elevadas, a solução é:
- a) associar em paralelo dois ou mais diodos com uma tensão inversa menor;
 - b) associar em série quatro diodos com uma tensão inversa de qualquer valor;
 - c) associar em série dois ou mais diodos com uma tensão inversa menor;
 - d) associar um capacitor em série com os diodos retificadores.
- 7) Um dobrador de tensão 12V - 24V como o da figura 12 é constituído basicamente de:
- a) um multivibrador que acasala as impedâncias de entrada e saída e um retificador de meia onda;

- b) um multivibrador que produz ondas quadradas e um retificador;
 - c) um multivibrador que produz ondas quadradas e um inversor;
 - d) um retificador, um inversor e um multivibrador.
- 8) Um conversor ideal para alimentar amplificadores operacionais em equipamentos portáteis é aquele formado por:
- a) um retificador de onda completa e um dobrador de tensão;
 - b) um temporizador integrado e um dobrador de tensão;
 - c) um circuito inversor e um dobrador de tensão;
 - d) um inversor e um dobrador de tensão.
- 9) Os conversores tensão-freqüência são produzidos sob a forma de:
- a) transistores bipolares e capacitores eletrolíticos;
 - b) transistores bipolares e circuitos-integrados monolíticos;
 - c) circuitos-integrados monolíticos;
 - d) as alternativas a e b estão corretas.
- 10) Nos circuitos da figura 23, os valores de R_o , C_o e R_s podem assumir os seguintes valores, respectivamente:
- a) $680\text{K}\Omega$, $0,5\mu\text{F}$ e $14\text{K}\Omega$;
 - b) $450\text{K}\Omega$, $2,5\mu\text{F}$ e $13\text{K}\Omega$;
 - c) $650\text{K}\Omega$, $1,0\mu\text{F}$ e $32\text{K}\Omega$;
 - d) $600\text{K}\Omega$, $2,0\mu\text{F}$ e $19\text{K}\Omega$.

LIÇÃO E-20

AMPLIFICADORES (BUFFERS E DRIVERS)

GENERALIDADES

Esta lição tem como finalidade mostrar ao aluno as interligações que, às vezes, se fazem necessárias entre circuitos digitais internos para suprir algumas defasagens de corrente ou para interligar circuitos lógicos com circuitos externos de potências. Como, por exemplo, excitação de lâmpadas, motores relés, etc.

Em decorrência disto, achamos necessário, antes de estudarmos os amplificadores, estudarmos algumas características elétricas dos circuitos lógicos como, por exemplo, a representação elétrica dos sinais lógicos.

SINAIS LÓGICOS E ANALÓGICOS

O processamento de dados, em uma calculadora eletrônica, consiste em tratar, transferir e memorizar sinais elétricos. Nas calculadoras analógicas, são utilizados vários sinais contínuos. Por exemplo, um valor qualquer é representado por uma tensão, que deverá se manter, durante o processamento, o mais proporcional possível ao valor representado. Em calculadoras digitais, as informações são introduzidas pelo teclado em decimal e, em seguida, decodificadas para binário, processadas

memorizadas, decodificadas para decimal e apresentadas nos displays. Estes dados binários são materializados por sinais elétricos (níveis lógicos) de dois estados distintos, onde um nível de tensão representa o estado binário "1" e outro, muito diferente, representa o estado binário "0". Veja:

- 0 - zero volts (terra)
- 1 - + 5 volts (+ Vcc)

Como podemos observar, a representação digital oferece vantagens em relação à analógica. Por exemplo, melhor transmissão dos dados, menor interferência de ruídos, sistema de memórias mais prático e simples, obtido por meio de flip-flops, representação dos dados por apenas dois níveis de tensão (terra e + Vcc).

Já o sistema analógico apresenta como desvantagens: maior facilidade de interferência de ruídos, devido à exigência de um alto grau de estabilidade, e emprego de uma vasta gama de níveis de tensão. Por exemplo, no sistema decimal, seriam necessários dez níveis de tensão distintos, como mostra a tabela abaixo.

- 0 - 0v (terra)
- 1 - 1v (+ Vcc)
- 2 - 2v (+ Vcc)
- 3 - 3v (+ Vcc)
- 4 - 4v (+ Vcc)
- 5 - 5v (+ Vcc)
- 6 - 6v (+ Vcc)
- 7 - 7v (+ Vcc)
- 8 - 8v (+ Vcc)
- 9 - 9v (+ Vcc)

Desta forma, podemos conceituar as duas técnicas como: analógicas e digitais.

TÉCNICAS ANALÓGICAS

Analógicos são todos os sinais que variam de uma forma contínua em relação a um determinado tempo. Por exemplo, a tensão alternada da rede domiciliar, a tensão contínua, fornecida por uma pilha ou bateria, um sinal de áudio, etc. A figura 1 nos mostra alguns aspectos desses sinais analógicos.

Na figura 1A, temos a representação de uma tensão analógica alternada. A figura 1B representa uma tensão analógica contínua, fornecida por uma bateria de 6 volts. A figura 1C apresenta um circuito analógico, prático e a figura 1D, a variação da corrente em função da variação da tensão.

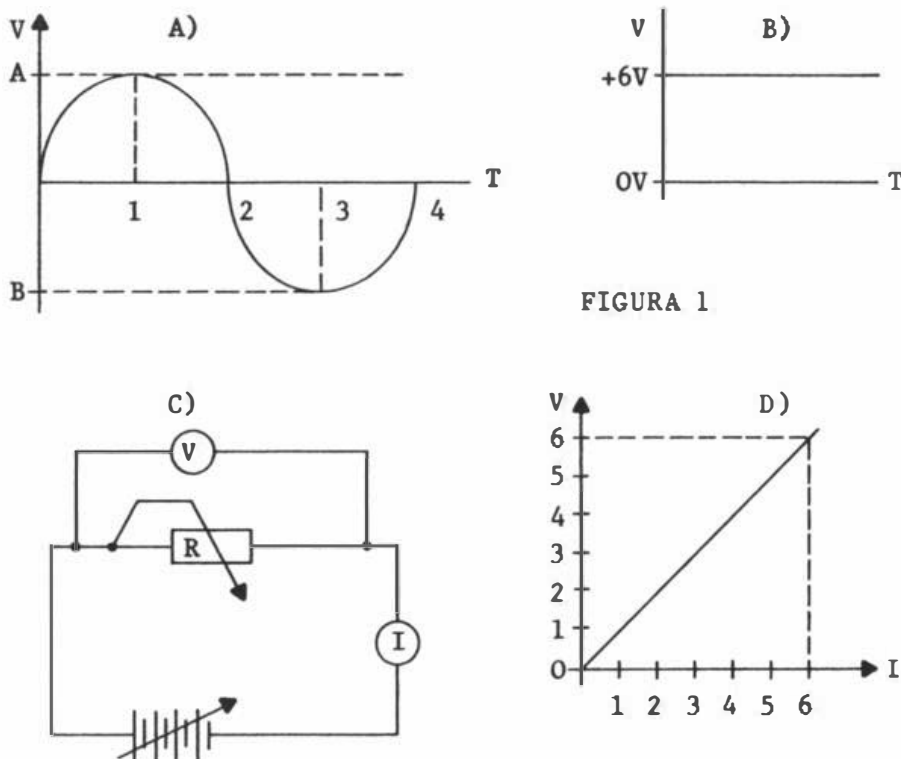


FIGURA 1

TÉCNICAS DIGITAIS

Digitais são todos os sinais que variam em incrementos (acrêscimo, saltos) em função de um tempo, como, por exemplo, a variação de uma tensão alta ($+V_{cc}$) para uma tensão baixa (terra).

A figura 2A mostra um circuito prático para representar os níveis lógicos. E a figura 2B apresenta a forma de onda que ocorreria se a chave S_1 fosse ligada e desligada em função de um tempo bem determinado.

Observando os dois circuitos básicos, concluímos que as variações analógicas são constituídas de infinitos valores. Ao

passo que as variações lógicas são constituídas de valores fi nitos (no caso, "0" e "1").

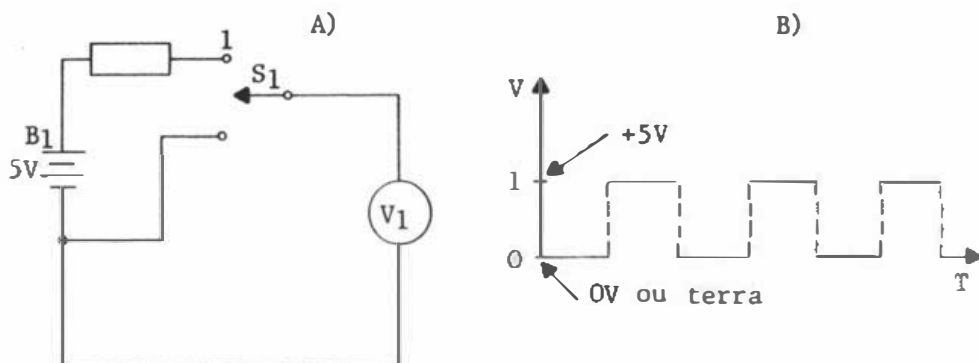


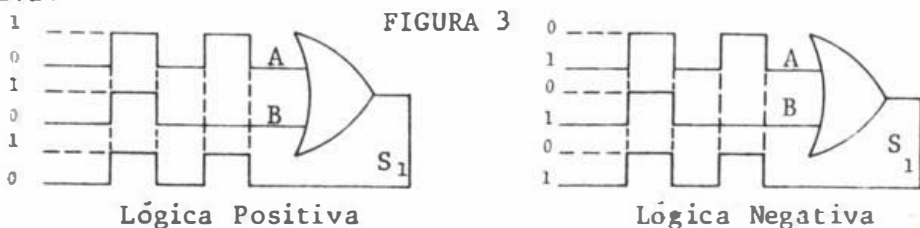
FIGURA 2

NÍVEIS LÓGICOS

Como vimos no tópico anterior, para materializarmos as condições lógicas na eletrônica, devemos substituir os dados "0" e "1" por níveis de tensão. Conforme mostra a figura 2B, o "1" lógico está representado por +5V e o "0" lógico, por 0V (terra ou ausência de tensão).

Lembramos ainda que existem duas condições de representar os dados lógicos "0" e "1" por níveis de tensão, identificadas por "lógica positiva" e "lógica negativa".

Estas duas condições lógicas podem ser adotadas a critério do projetista. Por exemplo, se tomarmos uma porta lógica "ou" (em inglês or) e adotarmos, como níveis de tensão, zero volts (terra) para representar o bit zero lógico "0" e cinco volts (+5V) para representar o bit um lógico "1", estaremos trabalhando com lógica positiva. Por outro lado, se adotarmos, como níveis de tensão, zero volts (terra) para representar o bit um lógico "1" e cinco volts (+5V) para representar o bit zero lógico, estaremos trabalhando com lógica negativa.



LÓGICA POSITIVA

Entende-se por lógica positiva, quando a tensão mais positiva representa o nível um "1" e a outra indica o nível zero "0". A figura 4 mostra este aspecto.



FIGURA 4

O valor da tensão destes níveis é especificado dentro de uma certa faixa de tensão, para maior segurança dos estados. A faixa estipulada pelos fabricantes varia de acordo com a tecnologia empregada. Por exemplo, para a família TTL (transistor transistor lógica), temos:

Lógica "1" - Nível um - Tensões entre + 2,4V e + 5V

Lógica "0" - Nível zero - Tensões entre 0,0V e + 0,4V

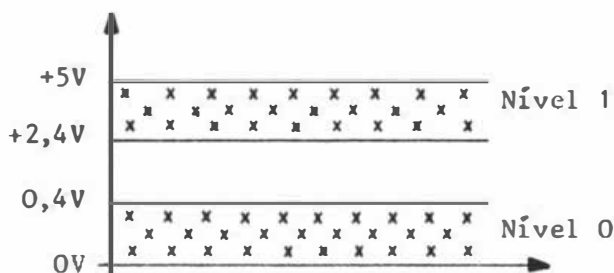


FIGURA 5

Os circuitos lógicos interpretam satisfatoriamente estes níveis, dentro da faixa estipulada pelos fabricantes. Por outro lado, há também certo esforço por parte dos fabricantes em recomendar aos projetistas a utilização da faixa central destes níveis, a saber:

Nível "0" = 0,2V

Nível "1" = + 3,7V

Estas recomendações devem ser seguidas para que haja um perfeito desempenho dos circuitos, impedindo desta forma, interferências indesejáveis a uma perfeita interpretação dos níveis lógicos durante o envelhecimento do dispositivo.

LÓGICA NEGATIVA

Entende-se por lógica negativa, quando a tensão mais positiva representa o nível "0" e a outra indica o nível um "1". A figura 6 mostra este aspecto.

FIGURA 6



Observação. Esta técnica negativa é empregada em casos particulares, por exemplo, nos computadores da IBM. Desta forma, este curso só tratará de assuntos com a utilização da lógica positiva, com exceção de casos que, na oportunidade, serão citados.

FAN-IN E FAN-OUT

Fan-in é o número máximo de entradas de um bloco lógico.

Fan-out é a capacidade de carga que se pode ligar à saída de um bloco lógico, normalmente expresso em quantidade de carga padrão que a saída de uma porta lógica aceita, sem afetar, no entanto, o nível lógico. Esta quantidade de carga padrão é normalmente expressa em número de porta que se pode interligar. Por exemplo, a porta lógica "NÃO E" (NAND 7410) - tem um fan-out igual a "10", ou seja, permite a ligação de dez portas lógicas em sua saída. A figura 7 mostra detalhadamente estas ligações.

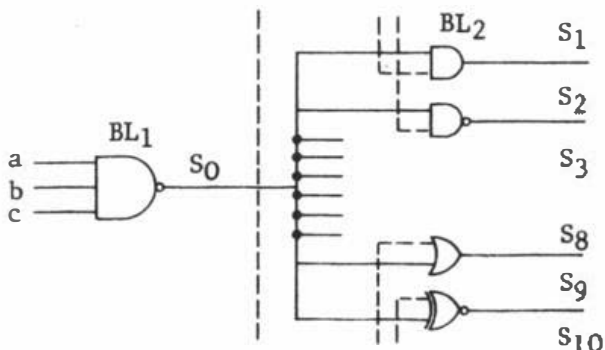


FIGURA 7

De acordo com a figura 7, notamos que a porta NAND (BL₁) age como um sorvedouro de corrente das portas de carga (BL₂).

Considerando o fan-out de um circuito TTL, devemos levar em conta duas condições: uma, quando a saída da porta (BL₁) estiver a nível "0" (baixo) e a outra, quando a saída da porta (BL₁) estiver a nível "1" (alto), devido à ação bilateral do transistor de entrada da porta (BL₁). A figura 8 mostra a configuração básica de uma porta "NÃO E" (NAND) de um circuito TTL. Os diodos, ligados às entradas do transistor multi-emissor, estão com os anodos aterrados e não fazem parte do circuito para sinais positivos de entrada, entretanto, limitam as tensões negativas na entrada para um valor seguro. A capacitância C_L (mostrada em tracejado na figura 8) simula as capacitâncias dos diodos inversamente polarizados.

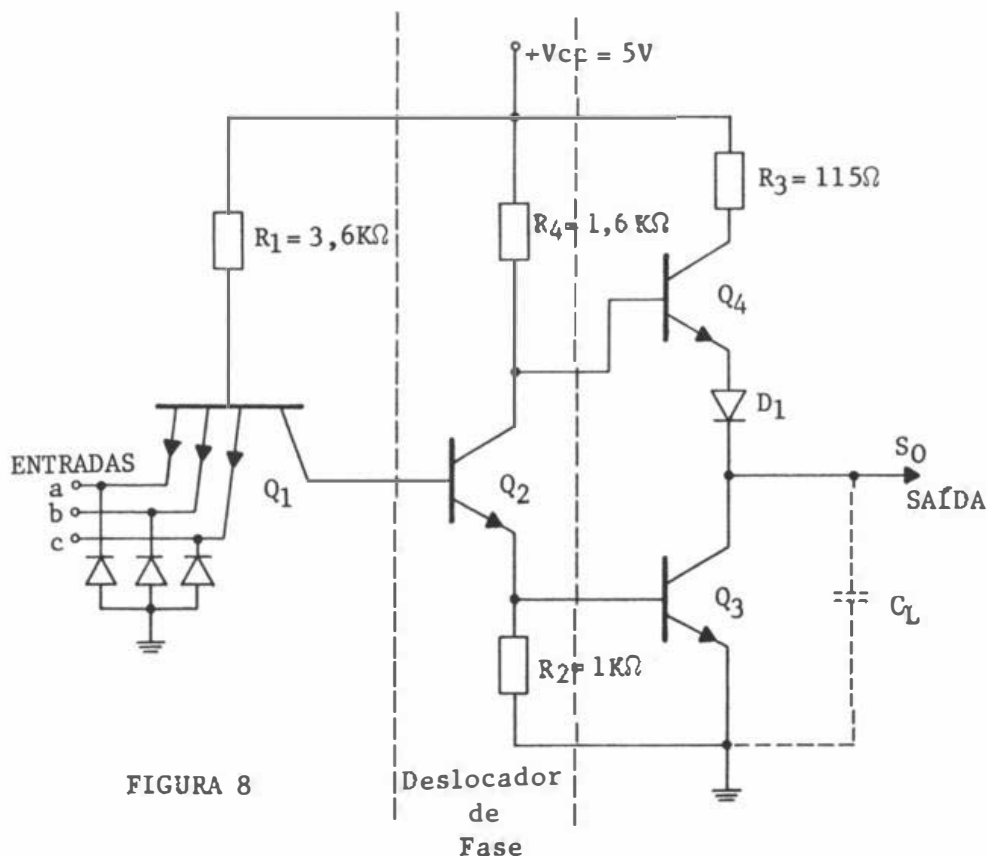


FIGURA 8

As características abaixo se aplicam ao bloco TTL, mostrado na figura 8.

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 3,6 \text{ k}\Omega & V_{CC} &= 5V \\
 R_2 &= 1 \text{ k}\Omega & V_{BE \text{ sat}} &= V_D \text{ (ligado)} = 0,7 \text{ volts.} \\
 R_3 &= 115\Omega & V_{BC \text{ sat}} &= 0,5 \text{ volts} \\
 R_4 &= 1,6 \text{ k}\Omega & V_{CE \text{ sat}} &= 0,2 \text{ volts} \\
 \beta_1 &= 0,2 \\
 \beta_2 &= 4,5
 \end{aligned}$$

Com a saída da porta (BL1) a nível "0" (baixo) é necessário calcular a corrente de base do transistor Q3 da porta (BL1) (figura 8). Nestas condições, os transistores Q2 e Q3 estarão conduzindo e o transistor Q1, com a junção base coletor diretamente polarizada. Desta forma, a tensão na base de Q1 em relação à terra é:

$$\begin{aligned}
 V_{B1} &= 2 V_{BE \text{ (sat)}} + V_{BC \text{ (sat)}} \\
 V_{B1} &= 2 \times 0,7 + 0,5 = 1,9 \text{ volts}
 \end{aligned}$$

A tensão sobre R1 poderá ser conhecida e a corrente de base de Q1 será:

$$I_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{B1}}{R_1} = \frac{5 - 1,9}{3,6 \times 10^3} = 861,11 \text{ }\mu\text{A}$$

Como já vimos, Q2 estará conduzindo e sua tensão no coletor é Vce (SAT), adicionado à Vbe (SAT) de Q3.

O cálculo da corrente de coletor de condução de Q2 será:

$$\begin{aligned}
 I_{C2} &= \frac{V_{CC} - (V_{CE \text{ (sat)}} + V_{BE \text{ (sat)}})}{R_4} = \frac{5 - (0,2 + 0,7)}{1,6 \times 10^3} = \\
 &= 2,56 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

$$I_{C2} = 2,56 \text{ mA.}$$

De acordo com a figura 9, $\beta_1 = 0,2$ para o transistor Q1, conseqüentemente para a saturação do transistor Q2 é necessário apenas um $\beta_2 = 2,48$.

0_i Polarizado Inversamente

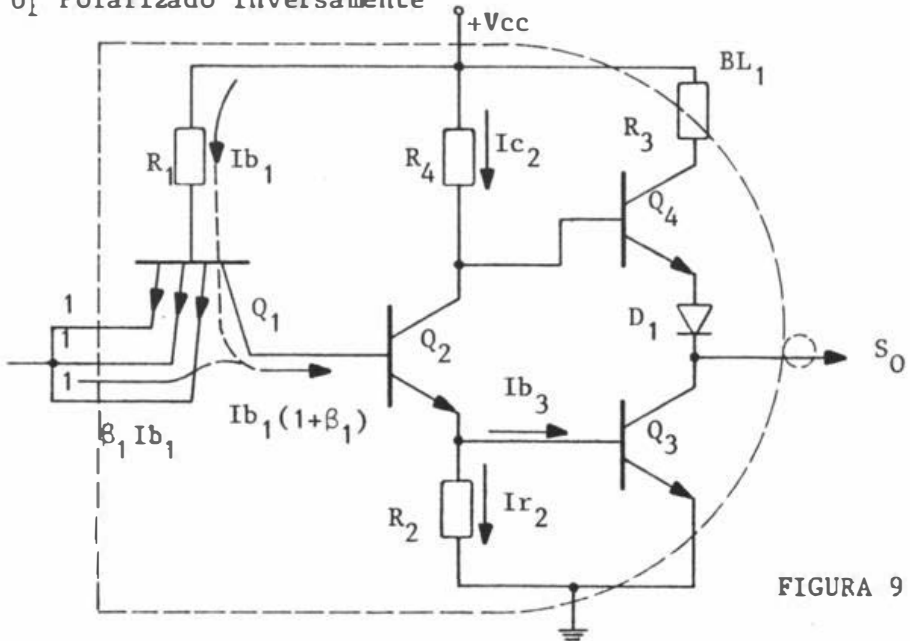


FIGURA 9

$$\beta_2 = \frac{I_{c2}}{I_{b2}} = \frac{I_{c2}}{\beta_1 I_{b1} + I_{b1}} = \frac{I_{c2}}{I_{b1} (\beta_1 + 1)}$$

$$\beta_2 = \frac{2,56 \times 10^{-3}}{861,11 \times 10^{-6} (0,2 + 1)} = 2,48$$

$$\beta_2 = 2,48$$

Podemos notar ainda que a corrente de base de Q3 é igual à corrente do emissor de Q2 menos a corrente de R2. Notamos também que a corrente do emissor Q2 é a soma das correntes do coletor e da base de Q2. E a corrente, através de R2, deverá ser suficiente para provocar $V_{be}(\text{sat})$ na junção base emissor de Q3.

$$I_{b3} = I_{b2} + I_{c2} - \frac{V_{be}(\text{sat})}{R_2}$$

$$I_{b2} = I_{b1} (\beta_1 + 1) = 861,11 \times 10^{-6} (0,2 + 1) = 1,03 \text{ mA.}$$

$$I_{b3} = 1,03 \times 10^{-3} + 2,56 \times 10^{-3} - \frac{0,7}{1 \times 10^3} = 2,89 \text{ mA.}$$

$$I_{b3} = 2,89 \text{ mA.}$$

Sendo $\beta_2 = 4,5$, é possível calcularmos a corrente de coletor do transistor Q3 para a saída So.

$$I_{c3} = \beta_2 I_{b3} = 4,5 \times 2,89 \times 10^{-3} = I_{c3} = 13 \text{ mA.}$$

Por outro lado, determinaremos a corrente de carga (I_e), supondo não haver corrente de coletor no transistor Q1, bloco de carga (BL2), quando este estiver conduzindo na forma direta. A corrente de carga é a própria corrente que atravessa o resistor R1 através da junção base emissor de Q1 diretamente polarizado do bloco (BL2) (figura 10).

Como a tensão de entrada do bloco de carga também é $V_{ce}(\text{sat})$, podemos determinar a corrente de carga I_e do seguinte modo:

$$I_e = \frac{V_{cc} - (V_{ce}(\text{sat}) + V_{be}(\text{sat}))}{R_1}$$

$$I_e = \frac{5 - (0,2 + 0,7)}{3,6 \times 10^3} = 1,14 \text{ mA.}$$

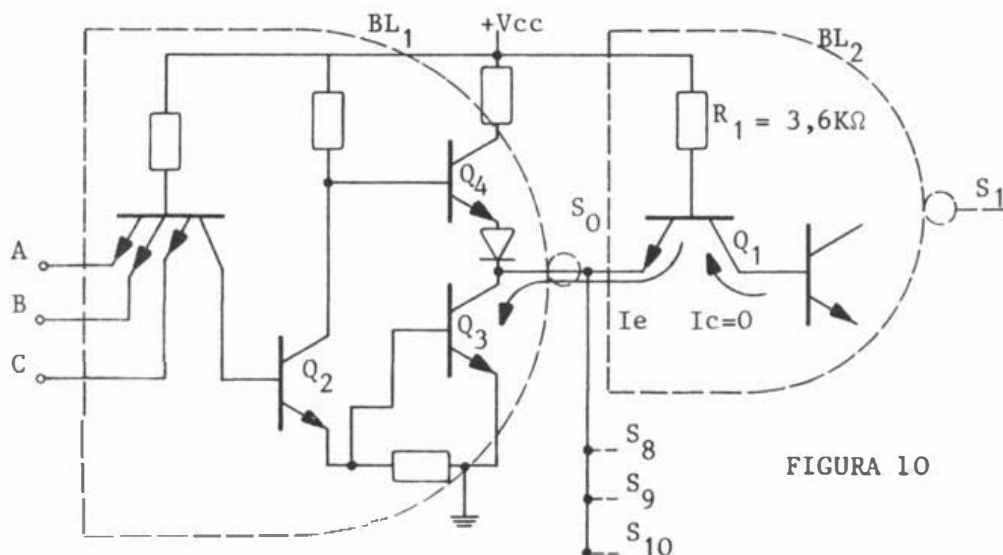


FIGURA 10

Usando um circuito de saída totem pole, como mostra a figura 11, quando Q3 estiver conduzindo, o transistor Q4 estará no corte, não existindo, portanto, contribuição para corrente

do coletor de Q3 por meio do transistor Q4. Se a saída for baixa, o fan-out (Fob) será a relação da corrente de condução do coletor do transistor de saída Q3 e a corrente de carga do bloco (BL2) alimentado.

$$Fob = \frac{I_{c3}}{I_e} = \frac{13}{1,14} = 11,4 = 11$$

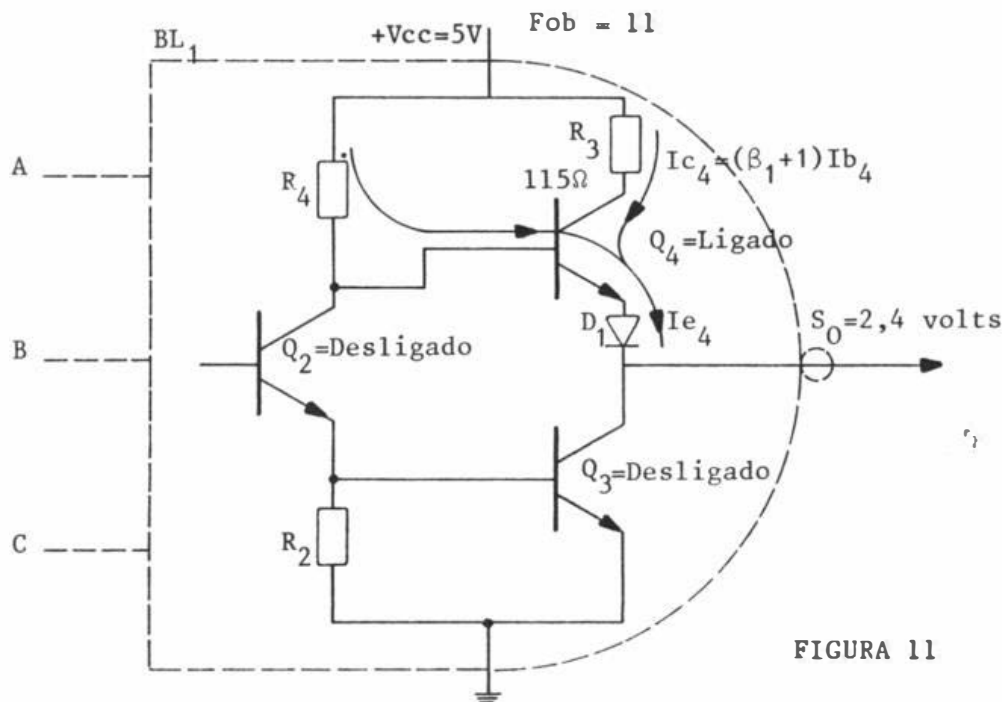


FIGURA 11

Vamos calcular agora o fan-out com um transistor de entrada do bloco de carga (BL2), polarizado inversamente.

Quando a corrente estiver fluindo para dentro do terminal de entrada do bloco de carga (BL2), a tensão de nível alto será reduzida arbitrariamente, indicando um nível alto mínimo de $V_{oh} = 2,4$ volts. O transistor Q4 do bloco alimentador (BL1) estando conduzindo, a tensão na base de Q4 será a queda de tensão de dois diodos, ou seja, $V_{b4} = (2 \times 0,7) + 2,4 = 3,8$ volts. Nestas condições, o transistor Q2 estará no corte e a queda de tensão, através do resistor R4, será provocada pela corrente de base de Q4, como mostra a figura 11.

Como a corrente do emissor de Q4 é equivalente a $(\beta_2 + 1) I_{b4}$ e $\beta_2 = 4,5$, teremos:

$$I_{e4} = (\beta_2 + 1) \frac{V_{cc} - V_{b4}}{R_4} = (4,5 + 1) \frac{5 - 3,8}{1,6 \times 10^3} = 4,125 \text{ mA}$$

$$I_{e4} = 4,125 \text{ mA}$$

Porém, antes de considerarmos este valor como fonte de corrente do bloco, devemos calcular a corrente de saturação do coletor do transistor Q4.

Estando Q4 conduzindo, a tensão em seu coletor é V_{ce} (sat) superior em relação ao emissor, a corrente de saturação de Q4 será:

$$I_{c4} = \frac{V_{cc} - (V_{ce}(\text{sat}) + V_d(\text{ligado}) + V_{oh})}{R_3} =$$

$$= \frac{5 - (0,2 + 0,7 + 2,4)}{115} = I_{c4} = 14,78 \text{ mA}$$

Podemos calcular a corrente de base (I_{b4}) de Q4:

$$I_{b4} = \frac{(V_{cc} - V_{b4})}{R_6} = \frac{5 - 3,8}{1,6 \times 10^3} = 750 \text{ } \mu\text{A}$$

$$I_{b4} = 750 \text{ } \mu\text{A}$$

A soma das correntes que fluem por Q4 será a corrente de emissor I_{e4} :

$$I_{e4} = I_{b4} + I_{c4} = 14,78 \times 10^{-3} + 750 \times 10^{-6} = 15,53 \text{ mA}$$

$$I_{e4} = 15,53 \text{ mA}$$

Assim, com estes valores, a máxima corrente de saída do bloco, com V_{oh} mínimo de 2,4 volts, será 15,09 mA e não 1,72 mA.

Por outro lado, a corrente de entrada para o bloco de carga (BL2) com as entradas em nível alto é $\beta_1 I_{b1}/M$, onde M é o número de emissores do transistor Q1. Para $\beta_1 = 0,2$, a corrente de entrada do transistor Q1, polarizado inversamente, será $I_{b1} = 861,11 \text{ } \mu\text{A}$, como já determinamos anteriormente.

$$I_{b1} = \frac{V_{cc} - V_{b1}}{R_1} = \frac{5 - 1,9}{3,6 \times 10^3} = 861,11 \text{ } \mu\text{A}$$

$$I_{b1} = 861,11 \text{ } \mu\text{A}$$

O fan-out (Foa), com a saída em nível alto, constitui-se - da relação entre a corrente da fonte de Q4 do bloco alimentador (BL1) e a corrente de Q1 do bloco de carga (BL2). Desta forma, teremos:

$$Foa = \frac{(M I_{e4})}{\beta_1 I_{b1}} = \frac{3 \times 15,53 \times 10^{-3}}{0,2 \times 861,11 \times 10^{-6}} = 270,52 = 270$$

$$Foa = 270$$

O fan-out (Fob) com saída baixa, com valores típicos fornecidos aqui e considerando ainda o circuito mostrado nas figuras 8, 9, 10 e 11, é igual a 10. Como o β_1 do transistor de entrada é baixo, torna-se difícil concluir que $Foa > Fob$.

Normalmente o fan-out da família TTL é especificado em quantidades determinadas de carga, sendo igual a "10", ou seja, podemos ligar dez portas distintas a uma única saída, como mostra a figura 7. Com exceção das portas buffers, o fan-out de cada circuito integrado e outras características serão fornecidos nos manuais de circuitos integrados MCI-1 a MCI-26 que fazem parte deste curso.

AMPLIFICADORES (BUFFERS E DRIVERS)

Buffers e drivers são amplificadores, ou seja, circuitos com finalidade de amplificar a potência do sinal elétrico pulsante de saída de um circuito lógico. Porém existe uma pequena diferença entre ambos.

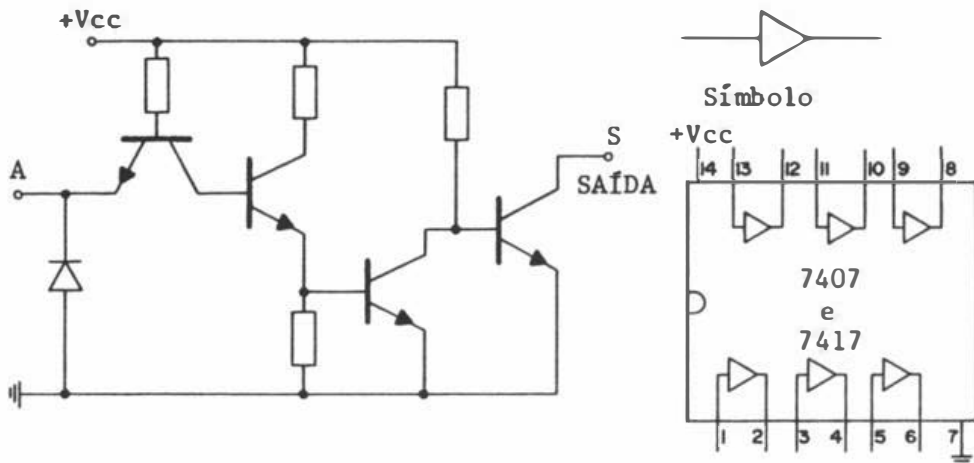
Buffers são amplificadores para aumentar o fan-out. Estes buffers são normalmente encontrados no comércio, na forma integrada. Iremos comentar alguns componentes das famílias TTL e MOS.

Os buffers na família TTL são normalmente apresentados com o coletor aberto (OPEN COLLECTOR). A figura 12 mostra o circuito interno destes e o seu símbolo.

O buffer 7407 tem saída com coletor aberto e tensão máxima de 30V e um fan-out igual a 25. O buffer 7417 tem saída com coletor aberto e tensão máxima de 15V e um fan-out igual a 25.

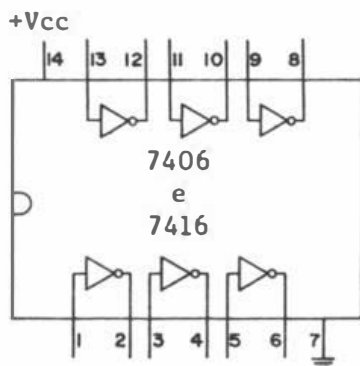
Estes buffers são também apresentados comercialmente como inversores. A figura 13 mostra este caso.

FIGURA 12



O buffer 7406 tem saída com coletor aberto e tensão máxima de 30V e um fan-out igual a 25. O buffer 7416 tem saída com coletor aberto e tensão máxima de 15V e um fan-out igual a 25.

FIGURA 13



A família MOS também tem, em sua série: o 4049, um buffer inversor com corrente típica de saída com $V_{CC} = 15V$ e saída baixa (dreno) = 48mA e saída alta (fonte) = 8mA. O 4050, um buffer com corrente típica de saída com $V_{CC} = 15V$ e saída baixa (dreno) = 48mA e saída alta (fonte) = 8mA. A figura 14 mostra a disposição dos pinos para os dois CIs.

Os buffers são apresentados nas mais variadas formas. Por exemplo, temos as portas: NAND BUFFERS 7437, 7438 e 7440.

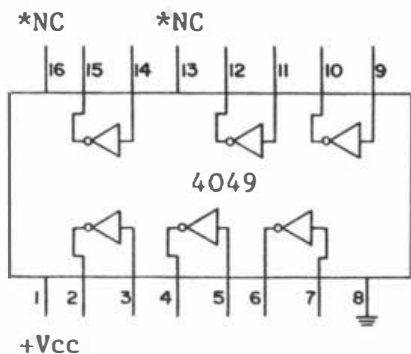
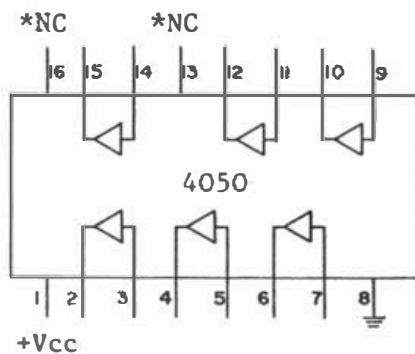


FIGURA 14



*NC = Não conectado.

DRIVERS

Os drivers são circuitos empregados na saída de blocos lógicos, para converterem estes sinais, para excitação de circuitos de potência. Portanto, a distinção entre um circuito buffer e um driver está nas aplicações: os buffers são empregados em circuitos lógicos internos, com a finalidade de aumentar o fan-out, apesar de um aumento mínimo de corrente, porém sem perda da resposta de frequência. Por outro lado, os drivers são empregados em circuitos de saída, para excitação de circuitos de potência, possuindo, desta forma, uma corrente de saída maior. Mas, em contra partida, existe uma perda na resposta de frequência.

Os drivers são normalmente circuitos transistorizados saturados e, às vezes, estágios push-pull ou totem-pole, como mostram os circuitos da figura 15.

Os circuitos TTL são providos de uma corrente de saída limitada, como vimos no tópico fan-out. Desta forma, para um circuito TTL comandar um circuito de maior potência, é requerido, no mínimo, um discreto transistor (driver) que consiga suportar uma corrente e tensão requerida pela carga, como mostra a figura 16.

Para determinarmos R_{bd} (o qual controla a corrente de base do transistor driver), devemos dividir a corrente da carga pelo beta do transistor. Assim o valor de R_1 pode ser encontrado pela divisão de 4,1V (+ 5 volts de alimentação, menos 0,9 volts de perda em Q_4 e D_1) pela corrente de base e subtrair 130 Ω ms que se constituem na resistência interna do CI.

Driver para interfacear circuitos MOS com um estágio de potência (Triac).

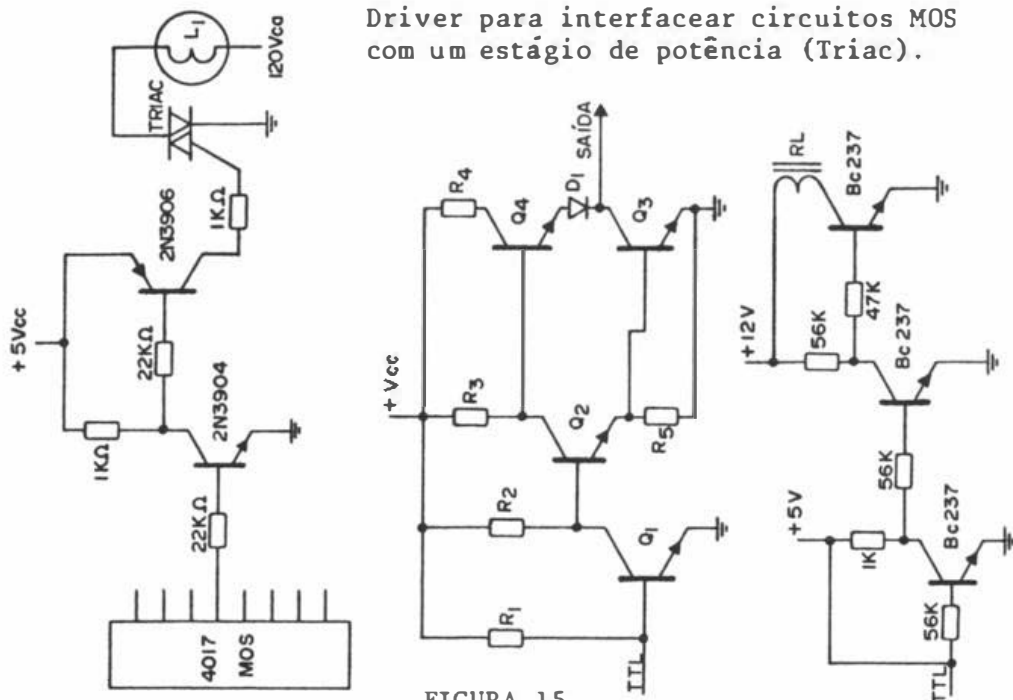


FIGURA 15

Por exemplo: usando um transistor (Q_d) com um β igual a 70 e uma carga de $30\ \Omega$ e 20 volts de alimentação, a corrente de carga I_{rL} é encontrada desta forma:

$$I_{rL} = V_{cc} / R_L \quad \therefore \quad I_{rL} = 20V / 30\Omega \quad \therefore \quad I_{rL} = 0,666A \text{ ou } 666mA.$$

E a corrente de base I_{bd} é determinada pela expressão:

$$I_{bd} = I_{rL} / \beta \quad \therefore \quad I_{bd} = 666mA / 70 \quad \therefore \quad I_{bd} = 9,51mA$$

O valor da resistência R_{bd} que se encontra em série com a base é dada por:

$$R_{bd} = (V_{cc} - 0,9V) / I_{bd} \quad \therefore \quad R_{bd} = 5V - 0,9V / 9,51mA \quad \therefore \quad R_{bd} = 0,431 \times 10^3\Omega \text{ ou } R_{bd} = 431\Omega$$

Como devemos subtrair 130Ω do valor de R_{bd} calculado, temos:

$R_{bd} = (R_{bd} \text{ calculado}) - 130\Omega \quad \therefore \quad R_{bd} = 301\Omega$ podemos, portanto, adotar $R_{bd} = 300\Omega$.

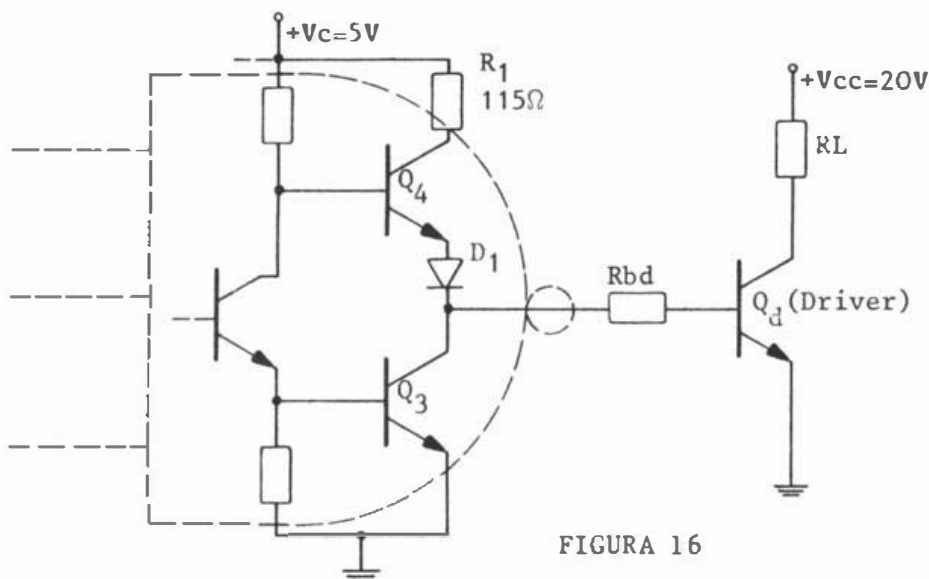


FIGURA 16

VANTAGENS DO TTL

Vamos enumerar algumas vantagens do circuito que acabamos de ver. O transistor Q_1 multi-emissor de entrada, ilustrado pela figura 8, apresenta alguns aspectos importantes. Quando a tensão de entrada estiver a nível lógico, baixo (0 lógico), a junção base-emissor estará diretamente polarizada. E como o circuito do coletor de Q_1 é também o da base do transistor Q_2 e não sendo possível uma grande corrente reversa de base, então o transistor Q_1 satura-se. Com a junção base-coletor polarizada diretamente, temos um caminho de impedância baixa. E o tempo necessário para o corte é bem menor do que em outras configurações.

Com a utilização do transistor multi-emissor, temos uma série de vantagens, como tamanho geométrico menor, custo mais baixo, além da redução de capacitâncias parasitas, resultando, com isso, em maior velocidade de chaveamento.

Os transistores Q_3 e Q_4 , constituem um estágio de saída elevador de nível, também conhecido como totem-pole, o que permite a alimentação de uma carga capacitiva, sem comprometer seriamente o tempo de chaveamento, além de oferecer baixa impedância de saída em ambos os estados lógicos, alto ou baixo.

Para a saída em nível alto, o transistor Q4 apresentar-se-á como uma fonte em seguidor de emissor, fornecendo corrente para a carga. Quando a saída estiver a nível baixo, a corrente que se origina da carga só encontra a baixa resistência de saturação do transistor Q3.

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DOS CIRCUITOS INTEGRADOS

As folhas de especificações e características técnicas de circuitos integrados raramente podem dar margem a erros, pois, em geral, as condições para o teste são sempre estabelecidas e mencionadas pelos fabricantes. Os circuitos integrados (CIs) da série 54/74 possuem um Fan-out para saída baixa, $F_{ob} = 10$, é uma especificação dos CIs: 7400, 7402, 7405, 7409, etc. que acabamos de demonstrar há pouco.

É possível ligarmos dez portas TTL da série 54/74 como carga na saída, sem alterarmos as condições de funcionamento do dispositivo. Não é necessário limitarmos a 8 ou 7 portas, pois os CIs são garantidos para as condições de teste para o pior caso e ainda fornecem uma margem interna de segurança.

Um valor mínimo e máximo é garantido para as faixas de temperatura e tensão de alimentação, conforme o aluno poderá verificar, posteriormente, ao receber os manuais de circuitos integrados. Embora a maioria dos dispositivos possua característica próxima a valores médios, algumas variações podem ocorrer dentro de limites especificados.

Ilustramos abaixo, como exemplo, uma tabela com valores típicos para portas da série 54/74. Entretanto tais valores não são definidos para o pior caso e sim para valores típicos de operação, considerando um $F_{ob} = 10$.

CONDIÇÕES DE → EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE (TA) $V_{cc} = 5V, F_{ob} = 10$					
Símbolo	-55°C	0°C	25°C	70°C	125°C
V _{oh}	3,0	3,1	3,25	3,30	3,50
V _{ol}	0,25	0,29	0,30	0,31	0,32
V _t	1,50	1,40	1,30	1,20	1,00

CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO + Ta = 25°C EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO Vcc. Fob = 10,					
Símbolo	4,5 V	4,75 V	5,0 V	5,25 V	5,5 V
Voh	2,60	2,85	3,25	3,35	3,55
Vol	0,33	0,32	0,30	0,30	0,30
Vt	1,28	1,29	1,30	1,32	1,35

Onde:

Voh = tensão de saída para nível lógico alto.

Vol = tensão de saída para nível lógico baixo.

Vt = limiar que corresponde às tensões de entrada e saída iguais.

A fim de que os dispositivos operem dentro de uma margem de segurança, eles são testados e garantidos.

Na tabela abaixo estão as características de entrada e saída para portas SN5400/7400.

DISPOSITIVO	FAIXA DE TEMPERATURA AMBIENTE	FAIXA DE TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO.	FOB
SN7400	-55°C ≤ Ta ≤ 125°C	4,5V ≤ Vcc ≤ 5,5V	10
SN7400	0°C ≤ Ta ≤ 70°C	4,75 ≤ Vcc ≤ 5,25V	
Tensões de saída garantidas		Voh ≥ 2,4 v	Vol ≤ 0,4 v
Tensões de entrada garantidas		Vih ≥ 2,0 v	Vil ≤ 0,8 v

Onde:

Vih - tensão de entrada para nível lógico alto.

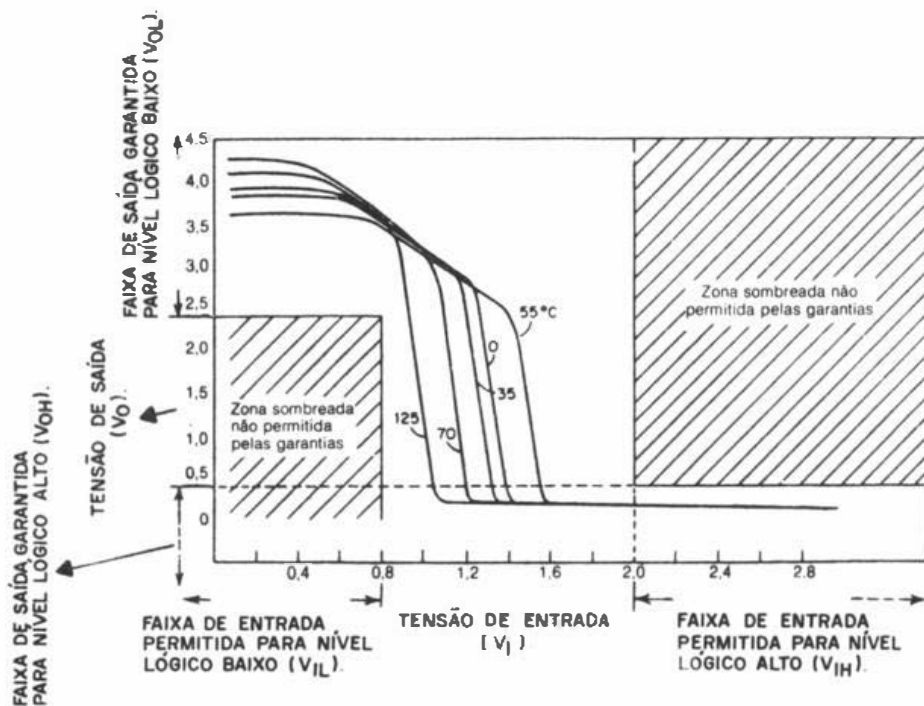
Vil - tensão de entrada para nível lógico baixo.

Observa-se pela tabela acima que a tensão de saída máxima, garantida para nível baixo Vol é no máximo igual a 0,4 v, menor que a tensão de entrada máxima garantida Vil = 0,8 v. Da mesma forma, a tensão de saída mínima a nível alto Voh é no mínimo igual a 2,4 volts e maior que a tensão de entrada mínima garantida Vih que é 2,0 volts. Analisando tais fatos, veremos que, em ambos os estados lógicos, há uma diferença de 0,4 volts. Esta diferença constitui a margem de segurança ga-

rantida, denominada: margem de ruído. Sobre ela voltaremos a falar posteriormente.

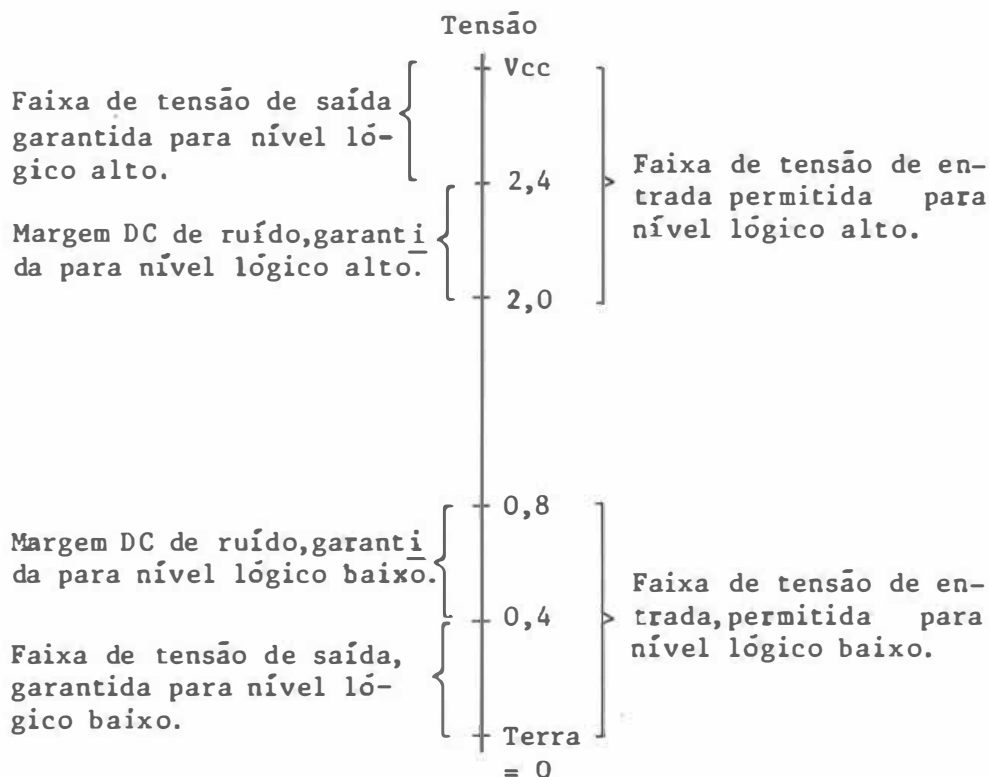
O conhecimento das características de entrada e saída de portas da série 54/74 é necessário, quando se deseja a utilização plena do dispositivo, ou o acoplamento de um dispositivo com outro que não seja da família TTL, série 54/74. Por exemplo, a capacidade de carga que se pode ligar à saída de um integrado SN7400 vale 10 (Fob) e não tem significado algum, quando outras portas diferentes das 54/74 estão sendo alimentadas.

A seguir, temos um gráfico que ilustra as zonas permitidas para o uso de portas NÃO E (NAND) TTL, da série SN54/74, em nível baixo ou alto. As características apresentadas são válidas para 5 cinco margens diferentes de temperatura: 0°C, 35°C, 55°C, 70°C e 125°C, para portas típicas com $V_{CC} = 5$ volts e $F_{ob} = 10$.

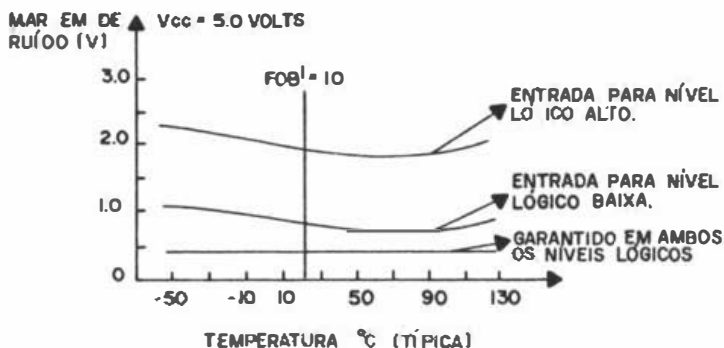


MARGEM DC DE RUÍDO

Como já vimos anteriormente, a margem dc de ruído pode ser definida como sendo a diferença entre os limites de tensão de um determinado estado lógico, geralmente chamada de margem dc de ruído, garantida. Na figura abaixo ilustramos a margem de ruído para portas da série SN54/74.



Uma margem de ruído de 400 mV, ou seja, 0,4 volts é garantida. Entretanto, uma porta TTL proporciona uma margem de ruído quase sempre maior que 1,0 volt. De acordo com o gráfico da página 22, as portas TTL possuem margem de ruído maior que 1V, com alimentação de 5,0 volts, independentemente do estado baixo ou alto e nunca é inferior a 400 mV, apesar de variar sob a temperatura ambiente.



MARGEM AC DE RUÍDO

Em geral, a margem de ruído é um fator ac, apesar do ruído dc não ser impossível de ocorrer. Devido à velocidade dos circuitos lógicos, os pulsos em microssegundo de largura são longos e podem ser tratados como dc. Conforme as larguras de pulso diminuem em alguns nanossegundos, o pulso de entrada pode ser mais curto que o tempo necessário para que o sinal se propague, através do dispositivo. São necessários então pulsos com amplitude maiores, de forma que o tempo seja suficiente para o funcionamento correto do dispositivo.

ALGUNS TIPOS DE RUÍDO

Os sistemas lógicos, em geral, produzem os mais variados tipos de ruídos, que podem ser classificados da seguinte forma:

- 1) Ruído da linha de alimentação - Ruído oriundo do sistema de distribuição, podendo ser em corrente alternada ou corrente contínua.
- 2) Conversação cruzada - Ruído que se introduz nas linhas de sinal, devido às linhas vizinhas, ou ao cruzamento entre elas.
- 3) Ruído externo - Ruído proveniente de ambientes, onde trabalha o sistema lógico, devido a circuitos de desarmes, - faiscamento de contatos de relês, motores, etc.
- 4) Ruído por corrente de sinal - É gerado nas impedâncias parasitas ao longo do circuito, devido ao fluxo de cor

rente de sinal.

5) Ruído por reflexão nas linhas de transmissão - O não casamento de uma linha de transmissão ocasiona uma oscilação amortecida e, conseqüentemente, ruídos.

6) Picos de corrente contínua (I_{cc}) - É o ruído provocado pelo chaveamento do estágio de saída, em totem-pole, de um sistema lógico.

ALGUNS MÉTODOS DE CONTROLE AOS RUÍDOS

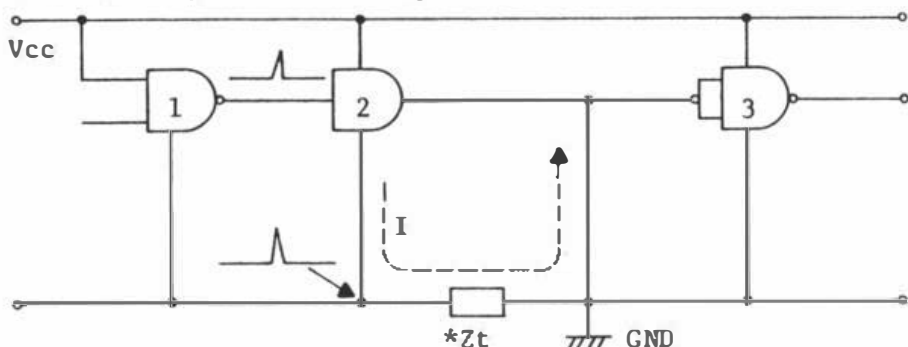
Blindagem - Todo dispositivo ou sistema lógico em funcionamento, além do seu próprio ruído, gerado internamente, está sujeito a outros externos, já citados anteriormente. Os pulsos de ruído podem se originar de várias fontes ao mesmo tempo, mas serão sempre um campo eletromagnético ou eletrostático ou ambos. O importante é que não devemos deixar que a frente de onda penetre no nosso sistema. Para uma exclusão completa da mesma, é necessário que façamos uma blindagem completa no circuito.

Materiais, como alumínio, são suficientes para bloquear o ruído, devido aos campos eletrostáticos. Já o ferro pode bloquear por completo ruídos oriundos de campos magnéticos. Além disso, o sistema deve ser conectado a um bom terra assim como a blindagem, pois do contrário esta última pode acoplar o ruído a todo o sistema.

Sistemas lógicos mais lentos são menos sensíveis aos ruídos do que aqueles mais rápidos, os quais possuem uma largura de banda maior. O circuito integrado tipo MOS é provavelmente o circuito lógico mais lento, com um tempo de propagação de 0,5 μ S. Já o TTL leva um tempo de 20 ns por porta. Ambos são suscetíveis a ruídos industriais, entretanto a baixa impedância de um circuito lógico TTL o torna menos sensível ao ruído do que o MOS ou outro sistema lógico.

ATERRAMENTO E DESACOPLAMENTO - Quando se trata de ruídos internos, o tempo de propagação da porta não tem muita importância. Em uma ligação à terra, mal feita, a corrente que flui irá gerar um pico de ruído. Porém se efetuarmos uma boa conexão à terra, a corrente que flui para ela vê uma baixa impedância e se atenua. Se a linha e o retorno se originam e terminam próximos à alimentação do sistema todo, não teremos descontinuidade na mesma. Caso contrário, teremos uma impedân

cia devido ao retorno à terra, mal executado. Considere, por exemplo, o circuito dado logo abaixo, onde a ligação à terra é feita longe da alimentação Vcc.



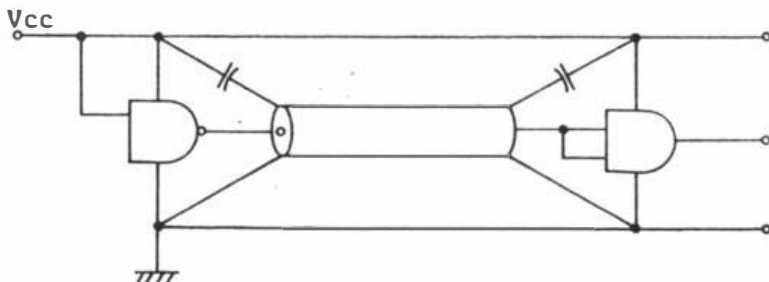
*Zt → impedância devido à ligação à terra estar mal executada.

Vamos supor que a porta 1 seja comutada com um pulso de 1 para 0. Teremos uma corrente I que irá fluir, segundo a seta tracejada. Como a ligação à terra não está correta, teremos um pulso que irá acarretar uma saída falsa na porta lógica 3. ZT corresponde à impedância, devido à descontinuidade existente pelo retorno à terra, mal executado.

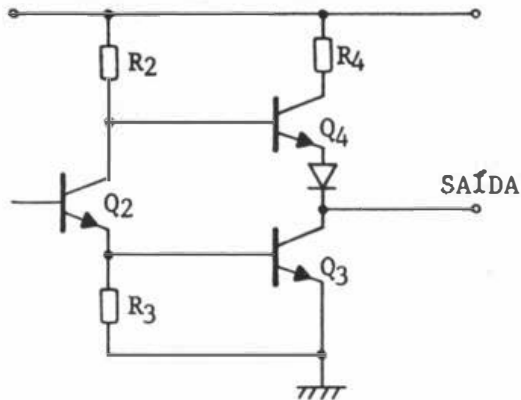
O cancelamento desta corrente deve ser feito no ponto da ligação terra. Deste modo, não teremos picos indesejáveis de tensão, para tanto um sistema TTL. Costumam-se adotar duas regras básicas, que são bem eficazes para minimizar o efeito desta corrente:

1º) Desacoplar a tensão de alimentação Vcc das portas - correspondentes linhas de alimentação e recepção, através de capacitores cerâmicos (tipo disco) de 0,1 μF .

2º) Ligar os retornos a um bom terminal de terra, junto aos dispositivos alimentador e receptor, se o sistema possuir cabo coaxial ou linhas de par trançado. A figura a seguir, ilustra esse aspecto.

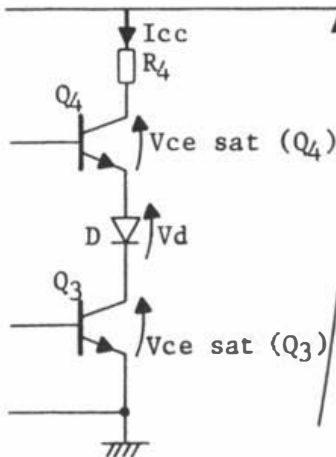


Todos os estágios de saída TTL em totem-pole, como mostra a figura abaixo, reforçam a corrente transiente, quando a saída passa de nível lógico 0 para 1.



Este pico de corrente deve-se à superposição dos transistores Q3 e Q4 no período de condução. Isto ocorre porque quando o transistor Q4 começa a conduzir, Q3 ainda não entrou no corte, formando assim um caminho direto para a corrente desde a fonte Vcc até o terra. A série TTL, de baixa potência, apresenta picos de correntes de pequeno valor, porém de maior duração, devido a sua velocidade que é lenta.

Podemos calcular essa corrente da seguinte maneira:



Equações

$$R_4 I_{cc} + V_{ce \text{ sat. }}(Q_4) + V_d + V_{ce \text{ sat. }}(Q_3) = V_{cc}$$

$$R_4 I_{cc} = V_{cc} - V_{ce \text{ sat. }}(Q_4) - V_d - V_{ce \text{ sat. }}(Q_3)$$

$$I_{cc} = \frac{V_{cc} - V_{ce \text{ sat. }}(Q_4) - V_d - V_{ce \text{ sat. }}(Q_3)}{R_4}$$

A corrente que flui devido à superposição dos transistores Q3 e Q4 é determinada pela equação acima e somente limitada pelas características de Q3 e Q4 e do diodo D, além do valor de R4.

CONVERSAÇÃO CRUZADA - Já vimos que se trata um tipo de ruído que aparece em linhas de sinal, devido a campos magnéticos e estáticos que se interagem, gerando efeitos de acoplamento.

Podemos ter três tipos de linhas de sinal: cabos coaxiais, linhas de par trançado e linhas de fios paralelos. Para as portas TTL, a conversação cruzada não é muito relevante, - quando usamos cabo coaxial, devido a suas características de blindagem e baixa impedância. O pior caso, na prática, para a conversação cruzada em linhas de sinal aparece quando ambas - as linhas (transmissora e receptora) estão próximas entre si, porém muito separadas da ligação de retorno para a terra. Isto pode ser evitado, distanciando-se mais as linhas entre si. O acoplamento mútuo pode ser reduzido com o uso de um cabo coaxial ou ainda pares trançados blindados. Estes últimos são de custo menor e de fácil manuseio. Os cabos coaxiais apresentam baixa impedância característica e ótima blindagem, porém são de custo mais elevado. Todavia a maior parte de ruído pode ser eliminada pelas características do TTL, cuja impedância de saída é bem baixa.

A seguir estabelecemos algumas regras que, em conjunto com as outras já vistas, atenuam os efeitos de ruídos nas linhas de transmissão para os sistemas TTL:

1) Os retornos de terra da linha de transmissão devem ser estabelecidos no início e no final da mesma, junto aos terminais das portas;

2) Portas usadas com a finalidade de alimentar a linha não devem ser utilizadas para outros fins;

3) Portas alimentadas pela linha devem ter todas as entradas conectadas à mesma;

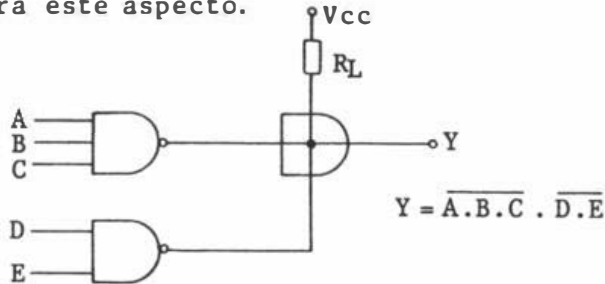
4) Ao usar cabo coaxial, recomenda-se usar o cabo de impedância característica de 93Ω . Se for utilizar par trançado, uma boa referência é usar fio bitola 26 ou 28 com isolamento fino, trançando uma volta por cm. Impedâncias menores dificultam a alimentação, enquanto as maiores aumentam a conversação cruzada.

PORTAS COM COLETOR ABERTO

Já vimos que a saída das portas lógicas em totem-pole da série 54/74 possui baixa impedância, tanto em nível bai-

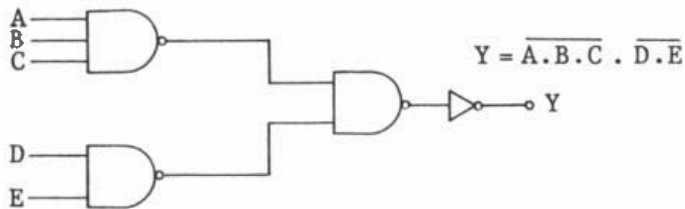
xo como em nível alto, além da baixa sensibilidade ao ruído.

Esta configuração não é própria para a conexão lógica E-por fio. Fazer uma ligação E-por fio significa ligarmos todas as saídas a uma porta E que será o terminal comum. A figura abaixo ilustra este aspecto.



Conexão E-por fio.

Se utilizássemos portas com saída em totem-pole, teríamos a seguinte configuração:



Conexão usando portas com saídas "totem-pole".

Para a conexão E por fio temos a possibilidade de uma das portas ter uma saída a nível lógico zero e as demais, um valor lógico 1. No entanto, se a conexão E-por fio fosse efetuada, utilizando-se portas com saída totem-pole, a saída correspondente a nível baixo (zero) deveria absorver a corrente dos transistores de todas as demais portas, havendo a possibilidade da destruição dos transistores de saída, devido ao elevado valor de corrente. Por estas razões é que existem as portas em coletor aberto. E os blocos com saídas totem-pole não são recomendados para uso em configurações E-por fio.

A seguir, temos dois circuitos típicos TTL com saídas em coletor aberto.

Para ambos os circuitos, temos um R_{ext} para o caso de se efetuar uma conexão E - por fio. O valor de R_{ext} não pode ser muito elevado, pois, do contrário, irá reduzir o consumo de potência. Porém, em nível lógico 1, determina a impedância de saída. Em projetos deve-se assegurar um valor

máximo para R_{ext} , de modo que assegure uma saída igual ou maior que 2,4 volts, em nível lógico 1.

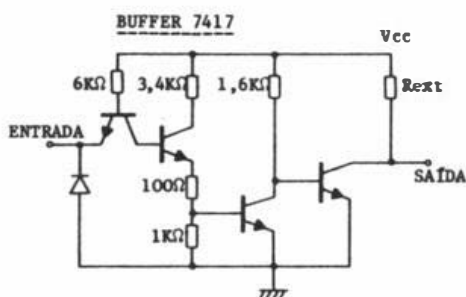
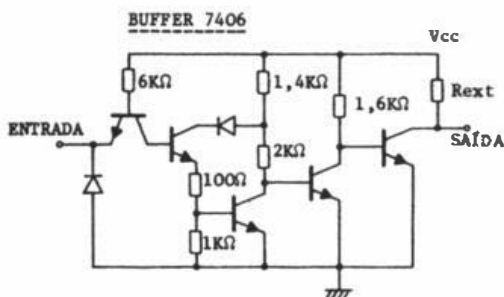
Em estado lógico zero(0), um valor mínimo de R_{ext} deve assegurar que V_{ol} não ultrapassa 0,4 volts. Os valores escolhidos para $V_{oh} \geq 2,4$ volts e $V_{ol} \leq 0,4$ volts são parâmetros garantidos para um estágio de saída totem-pole padronizado. Utilizando-se estes valores para o projeto de circuitos em configuração E- por fio, obtém-se uma margem de ruído garantida de 0,4 volts, como já discutimos anteriormente. O valor de R_{ext} para qualquer estado lógico é calculado por:

$$R_{ext} = \frac{V_{rext}}{I_{rext}}$$

Onde:

V_{rext} = tensão sobre R_{ext} .

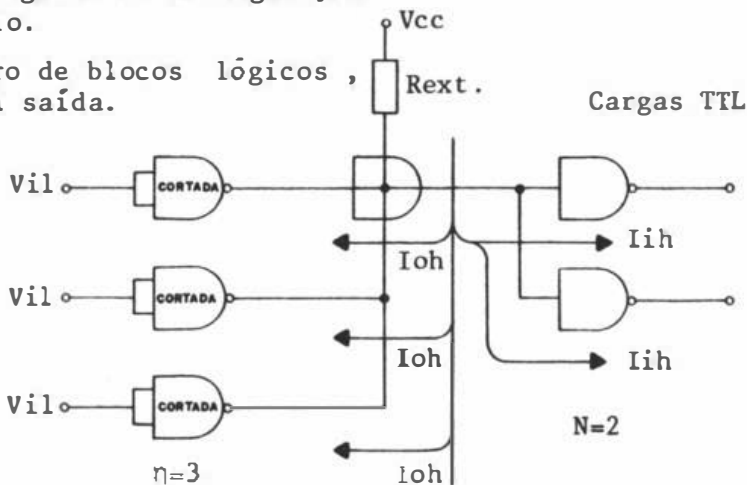
I_{rext} = corrente através de R_{ext} .



A figura, logo abaixo, mostra o caso de uma porta TTL SN7412, com saída a nível alto (1), em configuração E- por fio.

η → Número de saídas em coletor aberto, ligadas na configuração E- por fio.

N → Número de blocos lógicos, ligados à saída.



A corrente através de Rext é uma composição das correntes NI_{ih}, nas cargas, e das correntes de fuga ηI_{oh} dos transistores que estão no corte. De acordo com as características elétricas, os valores de I_{ih} e I_{oh} são 40 μ A máximas e 0,25mA máximas respectivamente. Para esta situação, calculamos o máximo valor para Rext.

CÁLCULO DE REXT MÁXIMO

$$\begin{aligned} I_{ih} &= 40 \mu A & R_{em\acute{a}x.} &= \frac{V_{lrext}}{I_{rext}} \\ I_{oh} &= 0,25 \text{ mA} \end{aligned}$$

I_{oh} = 0,25 mA e como temos três saídas em coletor aberto ($\eta = 3$), logo:

$$I_{oh} \cdot \eta = 0,25 \times 3 = 0,75 \text{ mA.}$$

Da mesma forma:

$$N \times I_{ih} = 2 \times 40 \mu A = 80 \mu A$$

O valor de I_{rext} será:

$$I_{Rext} = \eta I_{oh} + N I_{ih} = 750 \mu A + 80 \mu A = 830 \mu A$$

$$I_{Rext} = 830 \mu A.$$

O valor da tensão sobre Rext será a diferença entre V_{cc} e a tensão de saída alta necessária (V_{oh}). Logo:

$$V_{Rext} = V_{cc} - V_{oh \text{ necessário}} = 5 - 2,4 = 2,6 \text{ volts.}$$

O valor máximo de Rext será:

$$R_{em\acute{a}x} = \frac{2,6}{830 \times 10^{-6}} = 3132 \Omega$$

$$R_{em\acute{a}x} = 3,1k\Omega$$

Para nível baixo, calculamos o mínimo valor de Rext. A próxima figura indica o circuito para o cálculo de Rext mínimo.

A queda máxima de tensão em Rext será a diferença entre a tensão de alimentação e o máximo valor da tensão de saída, a nível baixo (V_{ol}). A corrente, através de Rext e das portas cargas, deve se limitar à máxima capacidade de absorver corrente de um transistor de saída, a menos que possa ser garantido que mais de um transistor estará conduzindo durante os períodos de nível baixo. A corrente deve ser limitada a um

I_{ol} , de acordo com as especificações do fabricante $I_{ol} = 16\text{mA}$.
Desta forma, $R_{e(\text{mín.})}$ será:

$$R_{e(\text{mín.})} = \frac{V_{cc} - V_{ol \text{ necessário}}}{I_{ol \text{ disponível}} - N \cdot I_{il}}$$

$I_{il} = 1,6\text{mA}$ (de acordo com as especificações do fabricante)

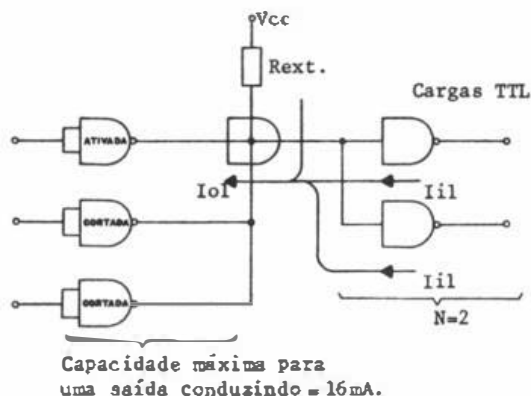
$V_{ol} = 0,4 \text{ volts}$ (de acordo com as especificações do fabricante).

$$R_{e(\text{mín.})} = \frac{5 - 0,4}{16 \times 10^{-3} - 2 \times 1,6 \times 10^{-3}} = 359,38\Omega$$

$$R_{e(\text{mín.})} = 360\Omega.$$

Se considerarmos um fan-out de 10 e sem conexões E por fio, o cálculo de R_{ext} indicará um valor infinito de resistência ($V_{rl} + 0 = \infty$). Entretanto, uma resistência de $4k\Omega$ satisfaz a condição de lógica 1 e limita, em menos de 0,43 volts, a tensão de lógica 0 de saída.

A seguir, temos duas tabelas que fornecem os valores máximos e mínimos de R_{ext} , para várias combinações de cargas TTL e estágios de saída, conectados em E- por fio.



Se desejamos saber o valor máximo de R_{ext} , devemos seguir a tabela seguinte, para a qual valem as seguintes considerações:

Todos os valores da tabela foram calculados, considerando-se a tensão de alimentação $V_{cc} = 5 \text{ volts}$.

Condições para nível lógico alto (1)	{	$V_{oh \text{ necessário}} = 2,4 \text{ volts}$
		$I_{oh \text{ máximo}} = 250\mu\text{A}$

Condições para nível lógico baixo (0)	{	$V_{ol \text{ necessário}} = 0,4 \text{ volts}$
		$I_{ol \text{ máximo}} = 16\text{mA}$

FAN-OUT PA RA CARGAS TTL, (N)	Máximo η							
		1	2	3	4	5	6	7
1	VALOR MÁXIMO DE REXT (K Ω)	8,96	4,81	3,29	2,50	2,01	1,68	1,45
2		7,87	4,48	3,13	2,40	1,95	1,64	1,42
3		7,12	4,19	2,98	2,32	1,89	1,60	1,39
4		6,34	3,93	2,85	2,24	1,84	1,56	1,36
5		5,77	3,71	2,73	2,16	1,79	1,52	1,33
6		5,30	3,51	2,62	2,09	1,74	1,49	1,30
7		4,90	3,33	2,52	2,03	1,69	1,46	1,28
8		4,56	3,17	2,42	1,96	1,65	X	X
9		4,26	3,02	X	X	X	X	X
10		4,00	X	X	X	X	X	X

FAN-OUT PA RA CARGAS TTL, N	VALOR MÍNIMO PARA REXT. (ohms).	MÁXIMO η
1	319	32
2	359	28
3	410	24
4	479	21
5	575	17
6	718	13
7	958	9
8	1437	5
9	2875	2
10	4000*	1

* teoricamente, o valor é infinito (veja explicação dada no texto).

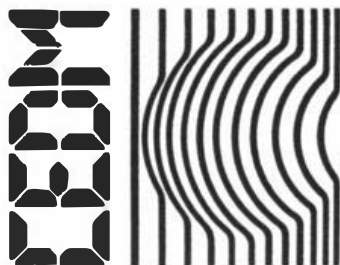
η → número de saídas em coletor aberto, ligadas na configuração E- por fio.

Para o cálculo de η máximo, foi usada a seguinte equação:

$$\eta_{\text{máx.}} = \frac{2,6}{Rl(\text{mín.}) \cdot I_{oh}} - \frac{N \cdot I_{ih}}{I_{oh}}$$

TABELA DE SÍMBOLOS EMPREGADOS NA ELETRÔNICA DIGITAL

F_i	- Carga de entrada (fan-in)
F_o	- Carga de saída (fan-out)
$f_{\text{m}\acute{a}\text{x}}$	- Frequência máxima de relógio
I_{cc}	- Corrente de alimentação
I_{ccH}	- Corrente de alimentação, saída alta
I_{ccL}	- Corrente de alimentação, saída baixa
I_{iH}	- Corrente de entrada a nível alto
I_{iL}	- Corrente de entrada a nível baixo
I_o	- Corrente de saída
I_{oH}	- Corrente de saída estado alto
I_{oL}	- Corrente de saída estado baixo
$I_{O_{off}}$	- Corrente de saída em estado de bloqueio
$I_{O_{on}}$	- Corrente de saída em estado saturado
I_{os}	- Corrente de saída curtocircuitada
t_{PHL}	- Tempo de propagação para a comutação de alto para baixo, na saída
t_{PLH}	- Tempo de propagação para a comutação de baixo para alto, na saída
t_n	- Instante anterior ao pulso de relógio
t_{n+1}	- Instante depois do pulso de relógio
t_w	- Largura média do pulso
V_{BEQ}	- Tensão base-emissor do transistor Q
V_{cc}	- Tensão de alimentação
V_{CD}	- Tensão no diodo limitador de entrada
V_{IH}	- Tensão de entrada em nível alto
V_{IL}	- Tensão de entrada em nível baixo
V_o	- Tensão de saída
V_{OH}	- Tensão de saída alta
V_{OL}	- Tensão de saída baixa.



CURSOS DE APERFEIÇOAMENTO

CURSO DE ELETRÔNICA DIGITAL E MICROPROCESSADORES

CAIXA POSTAL 1642 - CEP 86100 - LONDRINA - PARANÁ

EXAME DA LIÇÃO E-20

OBSERVAÇÃO

- cada questão é composta de três ou quatro alternativas.
- só uma delas está correta.
- marque a que considerar correta.
- passe as respostas corretas para a folha de exame.

- 1) Os circuitos digitais utilizam lógica "0" e "1" que são materializados, na eletrônica, por níveis de tensões:
 - a) Baixo (-5V) e alto (+5V);
 - b) Baixo (-0V) e alto (-5V);
 - c) Baixo (0V = terra) e alto (+5V);
 - d) As alternativas a, b e c estão corretas.
- 2) Qual das alternativas abaixo está correta?
 - a) Analógicos são todos os sinais invariáveis;
 - b) Analógicos são todos os sinais que variam de uma forma contínua, em relação a um determinado tempo;
 - c) Analógicos são todos os sinais que variam em incrementos, em função de um tempo;
 - d) Digitais são todos os sinais que variam de uma forma contínua, em relação a um determinado tempo.
- 3) Entende-se por lógica positiva toda tensão que represente a lógica "0" e "1", com níveis:
 - a) Superiores a zero volts, ou seja, lógica "0" = 0 a 0,4V e lógica "1" = -2,4V a -5V;
 - b) Superiores a zero volts, ou seja, lógica "0" = 0 a 0,4V e lógica "1" = 2,4V a 5V;

- c) Inferiores a zero volts, ou seja, lógica "0" = 0 a 0,4V e lógica "1" = 2,4V a 5V;
- d) Inferiores a zero volts, ou seja, lógica "0" = 0 a -0,4V e lógica "1" = 2,4V a -5V.

4) O fan-out é:

- a) A capacidade de carga que se pode ligar na saída de um bloco lógico, especificado para a família TTL como sendo igual a 40;
- b) A capacidade de carga que se pode ligar na entrada de um bloco lógico, especificado para a família TTL como sendo igual a 10;
- c) A capacidade de carga que se pode ligar na entrada de um bloco lógico, especificado para a família TTL como sendo igual a 40;
- d) A capacidade de carga que se pode ligar na saída de um bloco lógico, especificado para a família TTL como sendo igual a 10.

5) Qual será o beta (β) de um transistor que contenha uma corrente de coletor $I_c = 3,2\text{mA}$ e uma corrente de base $I_b = 2,3\text{mA}$?

- a) 1,39;
- b) 0,71;
- c) 1,5;
- d) 3,17.

6) Os buffers e os drivers são, respectivamente:

- a) Amplificadores internos de média potência e amplificadores de saída de baixa potência;
- b) Amplificadores internos de alta potência e amplificadores internos de média potência;
- c) Amplificadores internos de média potência e amplificadores de saída de alta potência;
- d) Amplificadores de saída de alta potência e amplificadores de saída de alta potência.

7) A vantagem do emprego dos drivers é:

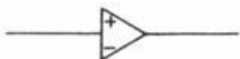
- a) Maior potência, menor tamanho físico, maior resposta de frequência;
- b) Menor tamanho físico, menor resposta de frequência, maior potência de saída;
- c) Menor tamanho físico, menor resposta de frequência, menor consumo de corrente;
- d) Maior tamanho físico, menor resposta de frequência, maior potência.

8) Os drivers são apresentados normalmente na forma:

- a) Integrada;
- b) Transistorizada;
- c) Valvular;
- d) Todas as alternativas estão erradas.

9) O símbolo adotado para os buffers e drivers é:

a)



b)



c)



d)



10) Qual deve ser o valor de R_{bd} do circuito da figura 16, se adotarmos um transistor com um beta (β) igual a 60 e uma carga igual a 40 Ω ?

- | | |
|-------------------|------------------|
| a) 0,491 Ω | c) 362 Ω |
| b) 491 Ω | d) 3,61 Ω |

