

AeroTD
ESCOLA DE AVIAÇÃO CIVIL

Eletrônica I
Prof. Rodrigo Costa



CNPJ	72.443.914/0001-38
Mantenedora	AERO TD ESCOLA DE AVIAÇÃO CIVIL LTDA - ME
Instituição	AERO TD Escola de Aviação Civil
Esfera Administrativa	Privada
Endereço (Rua, Nº.)	Rua Madalena Barbi nº 46.
Cidade UF CEP	Bairro: Centro - Florianópolis SC. CEP: 88.015-200
Telefone Fax	(48) 32235191
Eixo Tecnológico:	Infraestrutura
Curso:	Profissionalizante em Manutenção de Aeronaves - Habilitação Aviônicos
Carga Horária Total:	1040 horas

ES

Sumário

Apresentação da disciplina	4
Módulo I	6 - 83
Módulo II	85 - 164
Módulo III	167 - 217
Módulo IV	220 - 259
Módulo V	261 a 272
Módulo VI	273 a 287
Módulo VII	290 a 312
Módulo VIII	314 a 329

Apresentação da Disciplina

Caro aluno,

A disciplina de Eletrônica I dará a você conhecimentos para compreender os princípios básicos dos fundamentos da eletrônica, facilitando assim a análise e interpretação de complexos e sofisticados sistemas eletrônicos existentes atualmente nas aeronaves.

Esta disciplina se divide em oito módulos:

Módulo I: Circuitos reativos e osciloscópios;

Módulo II: Análise de circuitos, semicondutores e fontes de força elétrica;

Módulo III: Transistores de junção e polarização de transistores;

Módulo IV: Amplificadores e osciladores transistorizados; Transistores especiais;

Módulo V: Circuitos Integrados e Sensores;

Módulo VI: Reguladores de Tensão;

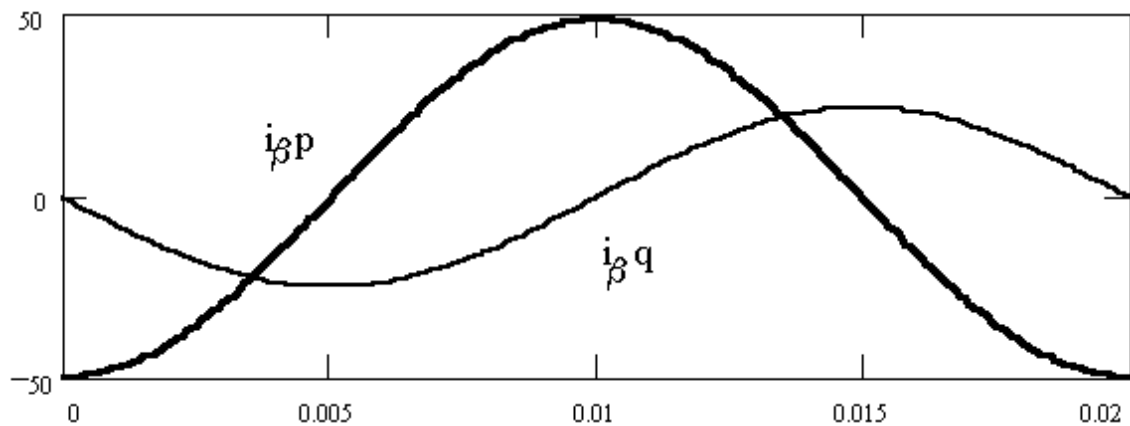
Módulo VII: Diodos Especiais;

Módulo VIII: Decibéis e Amplificadores Operacionais.

Vamos dar início a essa fantástica viagem no mundo da eletrônica, presente nos modernos circuitos das aeronaves.

Bons estudos!

Prof. Rodrigo Costa



Fonte: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpCAP7/Image151.gif>

MÓDULO I

CIRCUITOS REATIVOS

INTRODUÇÃO

Caro aluno,

Na disciplina de eletrônica I, iniciaremos nossos estudos falando de circuitos reativos e osciloscópios, objeto do módulo I.

Para que os equipamentos eletrônicos possam funcionar, os circuitos resistivos, indutivos e capacitivos são combinados em associações RL, RC e RLC. Devido a essas associações conterem reatâncias, são chamadas de circuitos reativos.

O osciloscópio é um instrumento de medida eletrônico que cria um gráfico bidimensional visível de uma ou mais diferenças de potencial. O eixo horizontal do (monitor) normalmente representa o tempo, tornando o instrumento útil para mostrar sinais periódicos. O eixo vertical comumente mostra a tensão.

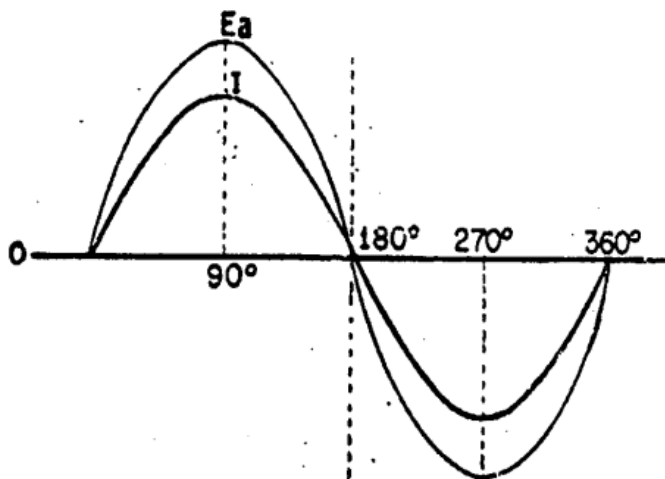
Então convido você a seguir comigo nesta viagem.

Bons estudos...

1.1 CIRCUITO REATIVO EM SÉRIE

Para que os equipamentos eletrônicos (rádio, radar etc.) possam desempenhar suas funções, os circuitos resistivos, indutivos e capacitivos são combinados em associações RL, RC e RLC. Em virtude de tais associações conterem reatâncias, as mesmas são chamadas de circuitos reativos. Todo circuito constituído por resistores e que não contenham quantidades apreciáveis de indutância ou capacitância, são considerados como circuitos resistivos.

Quando uma corrente alternada (CA) é aplicada a um circuito resistivo, a corrente e a tensão do circuito estarão em fase, conforme figura 1-1.

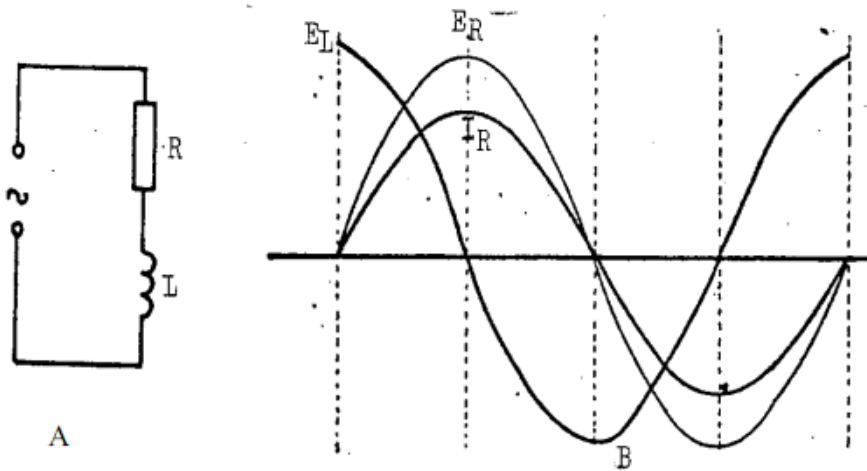


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-1

Ao se ligar um indutor em série com um resistor, a queda de tensão no resistor (E_R) estará em fase com a corrente (I_R); porém, a tensão no indutor (E_L) está adiantada de 90° .

A figura 1-2A nos mostra um circuito RL em série e a figura 1-2B, a relação de fase entre a corrente e a tensão no indutor e resistor.

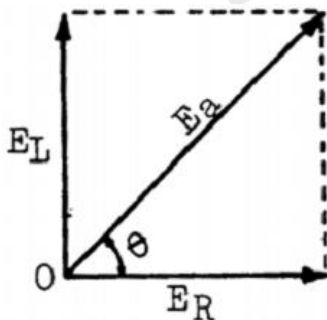


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-2

Desse modo, pode-se ver que a presença do indutor no circuito, resulta uma defasagem de 90° entre as tensões.

A tensão resultante de qualquer circuito RL pode ser determinada por meio de vetores. Assim sendo, por intermédio do gráfico da figura 1-3, podemos achar a tensão resultante, que vem a ser a própria tensão aplicada.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-3

A tensão no resistor é tomada sobre o vetor horizontal e a tensão no indutor, sobre o vetor vertical: como as tensões estão defasadas de 90° , o ângulo entre elas será reto.

Traçando um paralelogramo baseado nestes dois vetores, teremos um vetor resultante (E_a) que é a hipotenusa de um triângulo retângulo. Segundo o teorema de Pitágoras o quadrado da hipotenusa é igual à soma dos quadrados dos catetos; logo:

$$E_a^2 = E_R^2 + E_L^2 \quad \text{ou}$$

$$E_a = \sqrt{E_R^2 + E_L^2}$$

Impedância

Quando um resistor e um indutor estão ligados em série, a oposição total à passagem da corrente não é uma simples soma aritmética, mas sim uma soma vetorial, em virtude da defasagem de 90° existente entre as tensões no circuito.

Suponha-se, por exemplo, que um resistor de 400 ohms esteja ligado em série com um indutor, cuja reatância indutiva seja de 300 ohms.

A oposição total à passagem da corrente não será de 700 ohms mas sim de 500 ohms.

Cálculo da Impedância

Por intermédio da lei de Ohm, a queda de tensão num resistor (E_R) é o produto da resistência (R) pela corrente (I_T), ou seja:

$$E_R = R \times I_T$$

Como X_L representa a oposição ao fluxo da corrente, a tensão no indutor (E_L) será:

$$E_L = X_L \times I_T$$

Já que, a tensão aplicada (E_a) no circuito é o produto da corrente (I_T) pela oposição total (Z_T), logo:

$$E_a = Z_T \times I_T$$

Uma vez que:

$$E_a = \sqrt{E_R^2 + E_L^2}$$

Logo teremos:

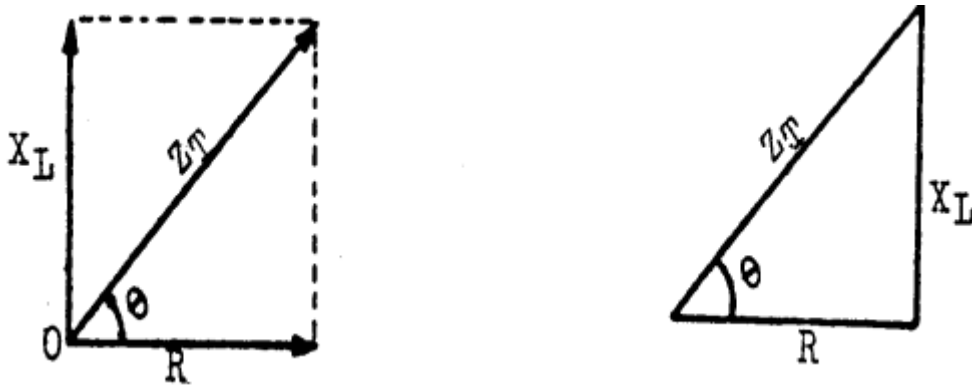
$$E_a = \sqrt{(R \times I_T)^2 + (X_L \times I_T)^2}$$

$$Z_T \times I_T = \sqrt{I_T^2 (R^2 + X_L^2)}$$

$$Z_T \times I_T = I_T \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z_T = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Desse modo, a impedância de um circuito R_L em série, é igual a raiz quadrada da soma dos quadrados da resistência e da reatância indutiva.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

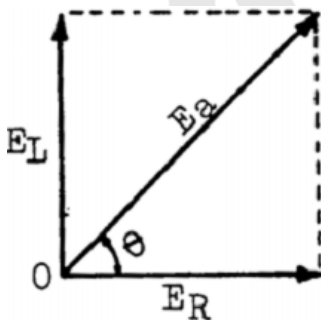
Figura 1-4

Assim, podemos traçar o diagrama vetorial, conforme figura 1-4, uma vez que Z_T corresponde à hipotenusa e $R^2 + X_L^2$, à soma dos quadrados dos catetos.

Ângulo de Fase

Denomina-se ângulo de fase (θ), ao ângulo formado pelo vetor da tensão aplicada ao circuito (E_a), com o vetor da tensão (E_R), conforme a figura 1-5.

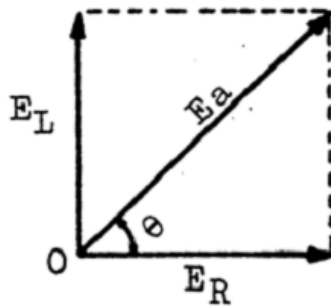
Tomando-se por base o valor da corrente, o ângulo de fase θ será positivo, contando no sentido inverso dos ponteiros do relógio, a partir dessa referência. Uma vez conhecido o ângulo, podemos também determinar se o circuito é resistivo, indutivo ou capacitivo, da seguinte forma: o circuito será resistivo quando, for igual a zero, indutivo quando θ for positivo e capacitivo quando θ for negativo.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-5

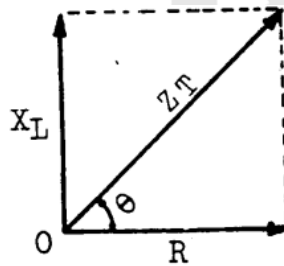
O ângulo de fase θ poderá ser determinado por meio das funções trigonométricas dos diagramas das figuras 1-6 e 1-7.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-6

$$\text{Logo: } \operatorname{tg} \theta = \frac{E_L}{E_R} \quad \cos \theta = \frac{E_R}{E_a}$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-7

$$\text{Logo: } \operatorname{tg} \theta = \frac{X_L}{R} \quad \cos \theta = \frac{R}{Z_T}$$

Potência Elétrica

No estudo dos circuitos resistivos, a potência dissipada por um resistor, foi determinada pelo produto de tensão (E_a) pela corrente (I_T), ou seja: $P_T = E_a \cdot I_T$ isto, porém não acontece num circuito de CA que contenha resistência e indutância.

A corrente no circuito fluirá, sendo limitada pela impedância, mas a energia utilizada para produzir o campo magnético será desenvolvida à fonte no desenvolvimento do mesmo. Portanto, num circuito de CA que contenha resistência, parte da potência é dissipada no resistor sob a forma de calor e parte é devolvida à fonte.

Assim sendo, o produto, $P_T = E_a \cdot I_T$ não só dá a potência que realmente está sendo consumida pelo circuito, mas sim uma potência que aparenta estar sendo absorvida.

Este produto é chamado de potência aparente (P_A), sendo expresso volt/ampère (VA), e não em watts, para diferenciar da potência real.

A potência aparente (P_A) poderá ser calculada por qualquer uma das equações abaixo:

$$P_A = E_a \cdot I_T$$

$$P_A = I_T^2 \cdot Z_T$$

$$P_A = \frac{E^2}{Z_T}$$

Sempre que a corrente circula num circuito que contenha resistência e reatância, haverá sempre por parte do resistor, uma dissipação de potência, que é chamada potência real (P_R), verdadeira ou efetiva do circuito, sendo expressa em watts.

Portanto, para se achar a potência real de um circuito que contenha resistência e reatância, basta calcular apenas a potência dissipada pelo resistor, a qual será o produto da tensão no resistor (E_R) pela corrente (I_T), ou seja:

$$P_R = E_R \cdot I_T$$

Uma vez que: $\cos \theta = \frac{E_R}{E_a}$

Logo: $E_R = E_a \cdot \cos \theta$

Portanto: $P_R = E_a \cdot I_T \cdot \cos \theta$

Fator de Potência

O fator de potência de um circuito é muito importante, porque ele nos permite converter a potência aparente, em potência real ou efetiva.

Define-se como fator de potência (f_p), a relação entre a potência real (P_r) e a potência aparente (P_a) de um circuito.

$$f_p = \frac{P_R}{P_A}$$

Como:

$$P_R = E_a \cdot I_T \cdot \cos \theta \text{ e } P_A = E_a \cdot I_T$$

$$\text{Logo: } f_p = \frac{E_a I_T \cdot \cos \theta}{E_a I_T}$$

$$f_p = \cos \theta$$

$$\text{Porém, como: } \cos \theta = \frac{R}{Z_T}$$

$$\text{Logo: } f_p = \frac{R}{Z_T}$$

Em consequência, o fator de potência poderá ser calculado por qualquer uma das três equações apresentadas.

O fator de potência é usualmente expresso em fração decimal ou percentagem.

Exercício resolvido:

Calcular o fator de potência de um circuito, sabendo-se que a potência aparente é de 400 VA (Volt/Ampère) e a potência real é de 200 Watts.

$$P_a = 400\text{VA} \quad P_R = 200\text{W}$$

$$\text{Como: } f_p = \frac{P_R}{P_A}$$

$$\text{Logo: } f_p = \frac{200}{400}$$

$$f_p = 0,5 \text{ ou } 50\%$$

Lei de Ohm

A lei de ohm para circuitos de CA, diz que, a corrente (I_T) é diretamente proporcional à tensão (E_a) e inversamente proporcional à impedância (Z_T). Logo, teremos:

$$I_T = \frac{E_a}{Z_T}$$

Exercício resolvido

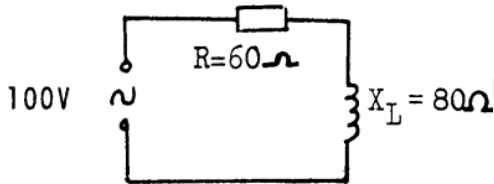
Calcule a corrente total do circuito da figura 1-8.

Dados:

$$R = 60 \text{ ohms}$$

$$E_a = 100 \text{ V}$$

$$X_L = 80 \text{ ohms}$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-8

Uma vez que: $Z_T = \sqrt{R^2 + X_L^2}$

Logo:

$$Z_T = \sqrt{60^2 + 80^2} \quad Z_T = 100 \text{ ohms}$$

Como: $I_T = \frac{E_a}{Z_T}$

Logo: $I_T = \frac{100}{100} \quad I_T = 1 \text{ A}$

Frequência de Corte

Qualquer circuito que contenha reatância, não responderá igualmente a todas as frequências.

Ao analisarmos um circuito RL, vimos que seu comportamento foi diferente nas altas frequências em relação às baixas. No processo de análise, somente uma simples frequência de cada vez foi aplicada ao circuito.

Contudo, se um sinal contendo uma faixa de frequências é aplicado ao circuito série RL, a reação do circuito será diferente para cada frequência individual contida neste sinal.

Por exemplo, conforme a frequência diminui, a corrente total aumenta. Haverá mais corrente circulando para as baixas frequências do que para as altas frequências.

O valor da resistência de um circuito, todavia não é afetada por uma variação de frequência, mas X_L é uma função direta da frequência. Portanto, num circuito de CC, a

oposição da bobina é desprezível e o circuito é considerado resistivo; o ângulo de fase é zero e a potência real estará no seu máximo valor.

Exemplo:

Considere o circuito série consistindo de um resistor de 80 ohms e uma bobina de 12,73 mH, com uma tensão aplicada de 100 vcc.

Desde que o ângulo de fase é zero, a impedância do circuito será igual a 80 ohms. A corrente será:

$$I_T = \frac{E_a}{Z_T} \quad I_T = \frac{100}{80} \quad I_T = 1,25A$$

A potência real do circuito terá como valor:

$$P_R = E_a \times I_T \times \cos \theta$$

$$P_R = 100 \times 1,25 \times 1$$

$$P_R = 125W$$

A fonte de CC é substituída por uma fonte de CA de frequência variável, com 100v RMS de saída. Ao se aumentar a frequência de saída da fonte, a reatância indutiva (X_L) aumentará, enquanto o valor do resistor permanecerá em 80 ohms.

Quando a frequência atingir a 500Hz, X_L terá aumentando para 40 ohms.

Calculando os valores teremos:

$$Z_T = 89,4 \text{ ohms}$$

$$I_T = 1,1 \text{ A}$$

$$\cos \theta = 0,89$$

Usando os valores acima observaremos que a potência real do circuito diminui com o aumento da frequência:

$$P_R = E_a \times I_T \times \cos \theta$$

$$P_R = 100 \times 1,1 \times 0,89$$

$$P_R = 97,9W$$

Conforme a frequência é aumentada ainda mais, a corrente continuará a diminuir e X_L continuará a aumentar.

Eventualmente atingiremos uma frequência na qual X_L será igual à resistência.

Por exemplo em 1 KHz:

$$X_L = 2\pi \times f \times L$$

$$X_L = 6,28 \times 10^3 \times 12,73 \times 10^{-3}$$

$$X_L = 79,94 \text{ ohms}$$

Portanto em 1 KHz , $X_L = R$. O ângulo de fase do circuito é de 45° e a impedância total é de 113 ohms.

Desde que $X_L = R$, as tensões E_L e E_R também são iguais.

A potência real do circuito é:

$$P_R = E_a \times I_T \cos \theta$$

$$P_R = 100 \times 0,884 \times 0,707$$

$$P_R = 62,5 \text{ W}$$

Nota-se que a potência real foi diminuída para a metade de seu valor máximo de 125W. A frequência em que $X_L = R$ $E_L = E_R$ e a potência real foi diminuída para à metade de seu valor máximo, é denominada de frequência de corte, ponte de meia potência, ou ponto 0,707.

O termo frequência de corte é usado porque, para frequências abaixo do ponto de corte, a resposta do circuito é considerada (em muitos casos) abaixo de um valor utilizável.

Na frequência de corte, a tensão de corte (E_{CO}) assim como a corrente de corte (I_{CO}), será respectivamente:

$$E_{CO} = E_a \times 0,707$$

$$I_{CO} = I_M \times 0,707$$

Uma fórmula pode ser deduzida para determinar a frequência de corte (f_{CO}) da seguinte maneira:

Na frequência de corte:

$$R = X_L$$

Como:

$$X_L = 2\pi \times f \times L$$

$$\text{Então: } R = 2\pi \times f \times L$$

$$\text{Teremos: } R = 2\pi \times f_{CO} \times L$$

$$f_{CO} = \frac{R}{2\pi \times L}$$

Onde:

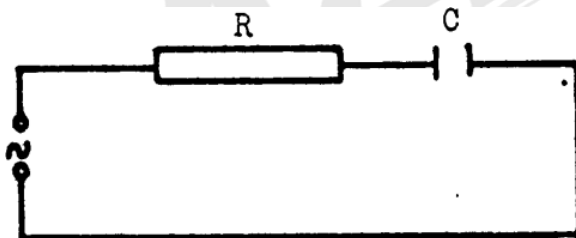
f_{CO} = frequência de corte (Hertz)

R = Resistência (Ohms)

L = indutância em (Henry)

1.2 CIRCUITO RC EM SÉRIE

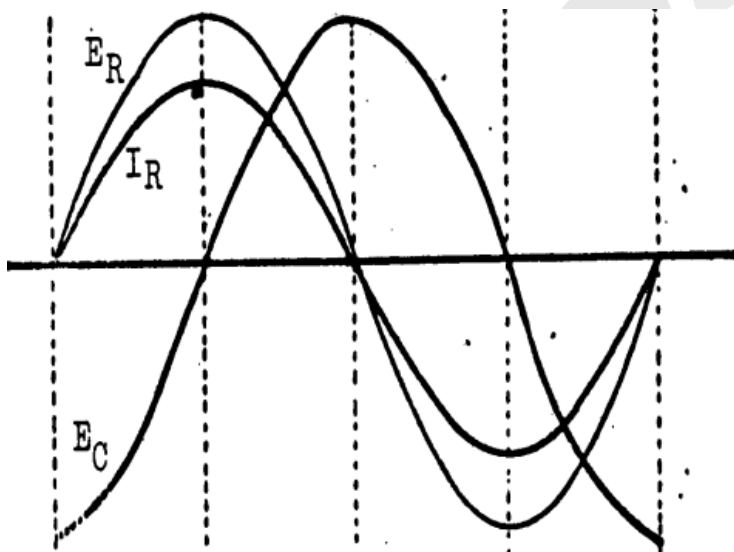
As considerações básicas feitas para o circuito RL em série continuam a ter valor para o circuito RC em série que agora vamos estudar e no qual temos um resistor e um capacitor associados, como mostra a figura 1-9.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-9

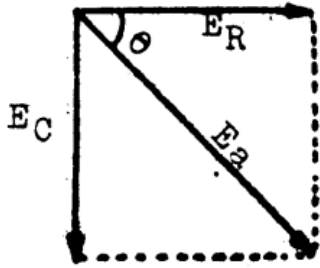
Num circuito série contendo resistor e capacitor, a queda de tensão no resistor (E_R) está em fase com a corrente, porém, a queda de tensão no capacitor (E_C) está atrasada de 90° , em relação a E_R , conforme nos mostra a figura 1-10.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-10

Assim, por intermédio do gráfico da figura 1-11, podemos achar a tensão resultante (E_a) que vem a ser a própria tensão aplicada, através da composição vetorial entre E_R e E_C .



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-11

Do gráfico, tiramos a seguinte equação para o cálculo da tensão aplicada (E_a) ao circuito:

$$E_a = \sqrt{E_R^2 + E_C^2}$$

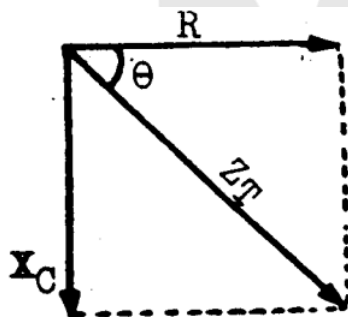
Ainda, podemos concluir que a tensão resultante (E_a) está atrasada em relação a E_R de um ângulo θ negativo.

Impedância

Num circuito contendo resistor e capacitor, a oposição à passagem da corrente não é uma soma aritmética, mas sim uma soma vetorial semelhante ao circuito RL em série.

De acordo com o gráfico da figura 1-12, a impedância ou oposição total ao fluxo da corrente no circuito, será expressa pela equação:

$$Z_T = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

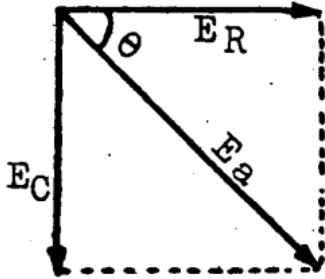


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-12

Ângulo de Fase

O ângulo de fase θ , como já vimos, é o ângulo formado pelo vetor da tensão aplicada (E_a) com o vetor da tensão (E_T), conforme nos mostra a figura 1-13. É fácil de verificar que o ângulo de fase é negativo.

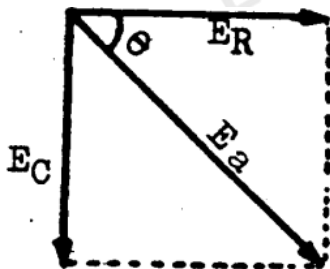


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-13

O ângulo de fase θ poderá ser determinado por meio das funções trigonométricas dos diagramas das figuras 1-14 e 1-15.

Como:

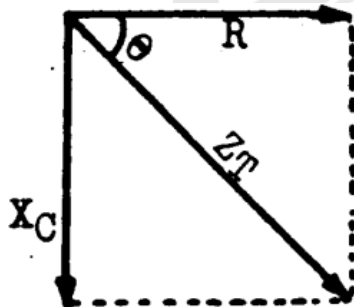


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-14

$$\text{Logo: } \operatorname{tg} \theta = \frac{E_C}{E_R} \quad \cos \theta = \frac{E_R}{E_a}$$

Como:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-15

$$\text{Logo: } \tan \theta = \frac{X_C}{R} \quad \cos \theta = \frac{R}{Z_T}$$

Potência Elétrica

Todo circuito que contenha resistência e reatância, parte de potência é dissipada no resistor sob a forma de calor e parte é devolvida à fonte. Portanto, o produto $P_T = E_a \times I_T$, não nos dá a potência que está sendo consumida pelo circuito.

Este produto é chamado de potência aparente (P_A).

A potência aparente poderá ser calculada por qualquer uma das equações abaixo:

$$P_A = E_a \times I_T$$

$$P_A = I_T^2 \times Z_T$$

$$P_A = \frac{E_a^2}{Z_T}$$

Sempre que a corrente circule num circuito que contenha resistência e reatância, haverá sempre por parte do resistor, uma dissipação de potência, que é chamada de potência real, verdadeira ou efetiva do circuito.

Podemos calcular a potência real de um circuito, por intermédio das equações abaixo:

$$P_R = E_R \times I_T \quad e$$

$$P_R = E_a \times I_T \times \cos \theta$$

Fator de Potência

Fator de potência é a relação entre a potência real (P_R) e a potência aparente (P_A) de um circuito. O fator de potência (f_p) poderá ser calculado por qualquer uma das equações seguintes:

$$f_p = \frac{P_R}{P_A} \quad f_p = \cos \theta \quad f_p = \frac{R}{Z_T}$$

Frequência de Corte

Um circuito série RC apresentará uma discriminação de frequência similar, em muitos aspectos, àquela encontrada em um circuito série RL.

Os termos frequência de corte, ponto de meia potência e frequência crítica tem o mesmo significado, conforme previamente definidos.

Nos circuitos séries, a tensão desenvolvida nos componentes reativos, depende da reatância do componente a qual, por sua vez, depende da frequência.

Como X_C é uma função inversa da frequência, logo, à medida que a frequência for aumentada, a reatância do capacitor diminuirá e a tensão será dividida entre o resistor e o capacitor.

A frequência de corte será atingida quando a tensão estiver dividida igualmente entre R e C.

A frequência de corte de um circuito série RC pode ser determinada da seguinte maneira:

Desde que a frequência de corte (f_{co}) ocorre quando: $R = X_C$

Substituindo a equação para X_C , teremos:

$$R = \frac{1}{2 \pi \times f \times C}$$

Substituindo f por f_{co} , teremos:

$$R = \frac{1}{2 \pi \times f_{co} \times C}$$

$$\text{Logo: } f_{co} = \frac{1}{2 \pi \times R \times C}$$

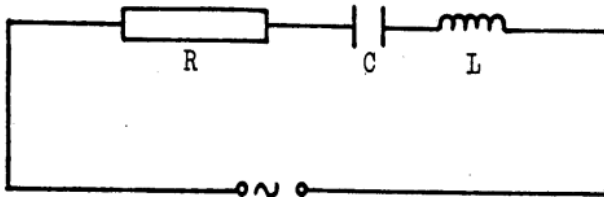
Onde: f_{co} = frequência de corte (Hertz)

R = resistência (ohms)

C = capacitância (Farad)

1.3 CIRCUITO RCL EM SÉRIE

Quando se aplica uma CA em um circuito série contendo resistor, capacitor e indutor, conforme figura 1-16, é necessário levar em consideração o fato de que os ângulos de fase entre a corrente e a tensão diferem em todos os três elementos.

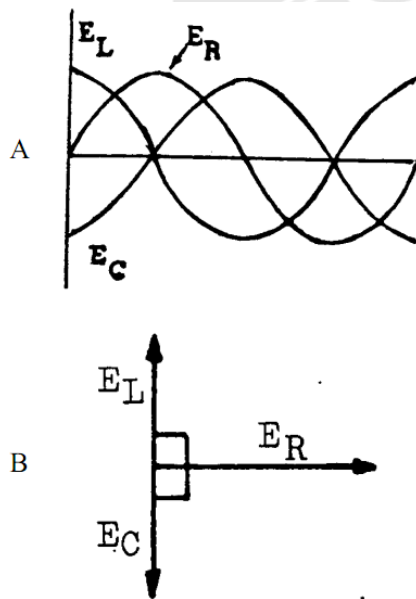


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-16

Tomando-se a corrente de um circuito série como referência, temos: No resistor, a tensão (E_R) está em fase, no indutor, a tensão (E_L) está adiantada de 90° e no capacitor, a tensão (E_C) está atrasada de 90° . Como em qualquer circuito série, a corrente é a mesma, através de todos seus componentes, podemos concluir que E_L está adiantada de 90° de E_R e E_C , atrasada de 90° de E_R , conforme nos mostra a figura 1-17A.

Logo, podemos compor o diagrama vetorial, conforme figura 1-17B:



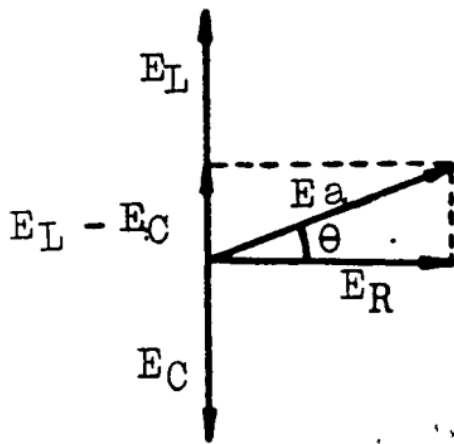
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-17

A soma vetorial das tensões E_R , E_L e E_C é igual à tensão aplicada (E_a) ao circuito. Como a tensão no capacitor E_C e a tensão no indutor E_L estão defasadas 180° , logo, a tensão resultante da composição vetorial entre E_L e E_C é a diferença, já que são vetores diretamente opostos entre si. Esta tensão resultante será somada vetorialmente com a queda de tensão no resistor (E_R), para a determinação da tensão aplicada (E_a) ao circuito. Isto é expresso pelo gráfico da figura 1-18.

Pelo teorema de Pitágoras, teremos:

$$E_a = \sqrt{E_R^2 + (E_L - E_C)^2}$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-18

Impedância

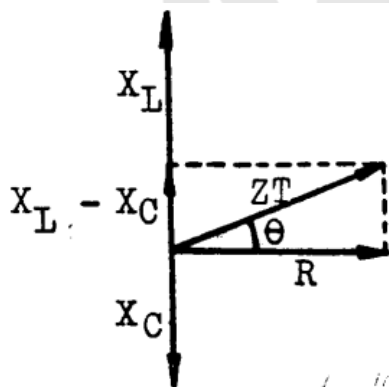
O raciocínio para o cálculo da impedância de um circuito RCL em série de CA é semelhante ao que foi visto para o cálculo da impedância utilizada em circuitos RC em série de CA também.

Assim tensão aplicada, a primeira operação será a diferença entre X_L e X_C , em virtude de serem vetores diretamente opostos entre si, conforme nos mostra a figura 1-19.

Este resultado será composto vetorialmente com o valor da impedância.

Pelo teorema de Pitágoras, teremos:

$$Z_T = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$



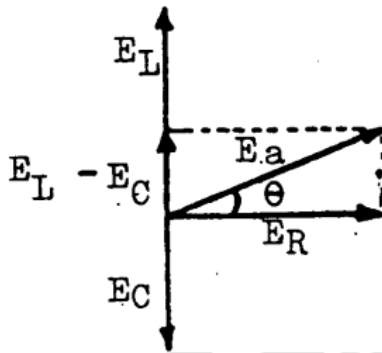
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-19

Ângulo de Fase

O ângulo de fase θ , como já vimos, é o ângulo formado pelo vetor da tensão aplicada (E_a), com o vetor da tensão (E_R) e poderá ser determinado por meio das funções trigonométricas dos diagramas das figuras 1-20 e 1-21.

Como:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

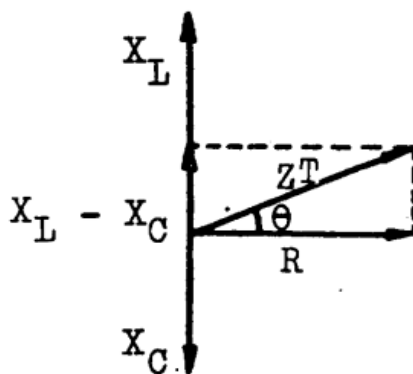
Figura 1-20

Logo:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{E_L - E_C}{E_R}$$

$$\cos \theta = \frac{E_R}{E_a}$$

Como:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-21

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{X_L - X_C}{R}$$

$$\cos \theta = \frac{R}{Z_T}$$

Classificação dos Circuitos RCL em Série

- a) Quando X_L for maior que X_C ou E_L maior que E_C temos: θ positivo, circuito RL;
- b) Quando X_C for maior que X_L ou E_C maior que E_L temos: θ negativo, circuito RC;
- c) Quando X_L for igual a X_C ou E_L igual a E_C temos: θ igual a zero, circuito resistivo.

Potência Aparente, Real e Fator de Potência

Empregam-se as mesmas equações já vistas nos circuitos RL ou RC, ou seja:

$$P_A = E_a \times I_T \quad P_A = I_T^2 \times Z_T$$

$$P_A = \frac{E_a^2}{Z_T}$$

$$P_R = E_R \times I_T \quad P_R = E_a \times I_T \times \cos \theta$$

$$f_p = \frac{P_R}{P_A} \quad f_p = \cos \theta$$

$$f_p = \frac{R}{Z_T}$$

Exercício resolvido:

Determine no circuito da figura 1-22, a impedância, o fator de potência, a intensidade da corrente, a potência aparente, real e a tensão em cada um dos elementos.

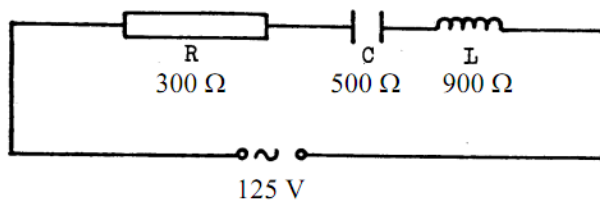
Dados:

$$X_L = 900 \text{ ohms}$$

$$X_C = 500 \text{ ohms}$$

$$R = 300 \text{ ohms}$$

$$E_a = 125 \text{ V}$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-22

Cálculo da impedância

$$Z_T = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z_T = \sqrt{300^2 + (900 - 500)^2}$$

$$Z_T = 500 \Omega$$

Cálculo do fator de potência:

$$\cos \theta = \frac{R}{Z_T} \quad \cos \theta = \frac{300}{500}$$

$$\cos \theta = 0,6$$

Como: $f_p = \cos \theta$

Logo: $f_p = 0,6$ ou 60%

Cálculo da intensidade da corrente:

$$I_T = \frac{E_a}{Z_T} \quad I_T = \frac{125}{500}$$

$$I_T = 0,25A \text{ ou } 250 \text{ mA}$$

Cálculo da potência aparente:

$$P_A = E_a \times I_T \quad P_A = 125 \times 0,25$$

$$P_A = 31,25VA$$

Cálculo da potência real:

$$P_R = E_a \times I_T \times \cos \theta$$

$$P_R = 125 \times 0,25 \times 0,6$$

$$P_R = 18,75W$$

Cálculo da tensão no resistor:

$$E_R = R \times I_T \quad E_R = 300 \times 0,25$$

$$E_R = 75V$$

Cálculo da tensão no indutor:

$$E_L = X_L \times I_T \quad E_L = 900 \times 0,25$$

$$E_L = 225V$$

Cálculo da tensão no capacitor:

$$E_C = X_C \times I_T \quad E_C = 500 \times 0,25$$

$$E_C = 125V$$

1.4 RESSONÂNCIA EM SÉRIE

Os fenômenos de um circuito ressonante constituem uma característica muito significativa dos circuitos eletrônicos. São encontrados em rádio, radar, televisão, aplicações em projéteis teleguiados, etc. A forma que um aparelho de rádio pode sintonizar uma estação desejada, encontra sua resposta no estudo dos circuitos ressonantes.

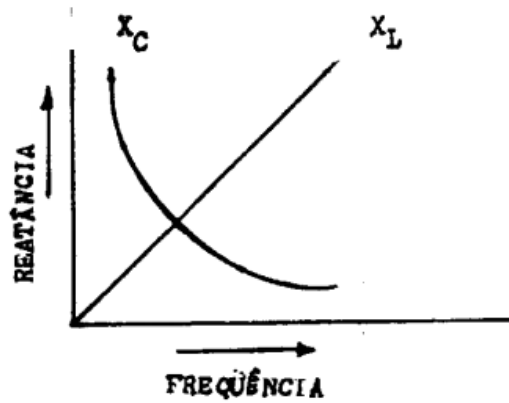
Quando é estabelecida a igualdade entre a reatância indutiva e a reatância capacitiva ($X_L = X_C$), a qual determina a igualdade entre as tensões $E_L = E_C$, dizemos que o circuito está em ressonância.

Esta condição é desejável em vários circuitos usados em eletrônica, mas pode trazer consequências desagradáveis, com danos para os elementos de um circuito, quando não é prevista.

Sabemos que a reatância indutiva é diretamente proporcional à frequência e que a reatância capacitiva é inversamente proporcional à mesma.

Assim, quando aplicamos uma CA a um circuito RCL em série e fazemos a frequência variar desde um valor praticamente nulo a um valor alto, podemos observar o crescimento da reatância indutiva e a queda da reatância capacitiva.

Numa determinada frequência, as duas grandezas tornam-se iguais, veja a figura 1-23, e o circuito apresenta características que correspondem à condição denominada ressonância.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-23

Impedância

Quando o circuito RCL em série entra em ressonância, a reatância total do circuito é zero, uma vez que X_L e X_C se anulam mutuamente porque estão 180° defasadas. É claro, portanto, que quando $X_L = X_C$ a impedância (Z_T) do circuito será a própria resistência (R), uma vez que:

$$Z_T = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

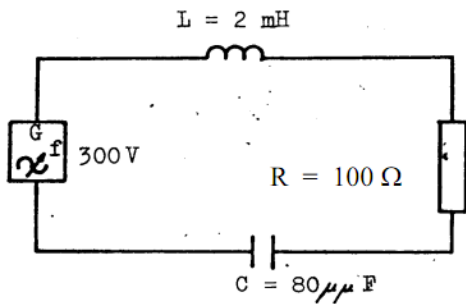
Como: $X_L = X_C$

Logo: $Z_T = R$

Do exposto, é evidente, que quando um circuito RCL em série entra em ressonância, a corrente do circuito é máxima, uma vez que a impedância é mínima, pois a única oposição que o circuito oferece deve-se somente à sua resistência. Portanto, a corrente de um circuito RCL em série atinge seu maior valor no ponto de ressonância.

Análise do Circuito Ressonante

O estudo feito até agora registra as condições de um circuito sintonizado no ponto de ressonância; contudo, para que se possa entender melhor o comportamento do circuito, é necessário analisar as condições que nele existem, em ambos os lados da ressonância.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-24

Na figura 1-24, temos circuito RCL em série, em que podemos calcular a tensão, a corrente e a impedância.

A frequência do gerador pode ser variada de 100 a 600 K_{HZ} , permitindo dessa maneira que se observe a conduta do circuito ao entrar e ao sair de ressonância.

A corrente do circuito é calculada para as diversas frequências do gerador. Empregando-se as equações já conhecidas, para 100 K_{HZ} , tem-se:

$$X_L = 2 \pi f \times L$$

$$X_L = 6,28 \times 2 \times 10^2$$

$$X_L = 6,28 \times 10^5 \times 2 \times 10^{-3}$$

$$X_L = 1256 \text{ ohms}$$

$$\text{Como: } X_C = \frac{1}{2 \pi f \times C}$$

$$X_C = \frac{1}{6,28 \times 10^5 \times 8 \times 10^{-11}}$$

$$X_C = 19890 \text{ ohms}$$

A reatância efetiva ou total do circuito (X) pode então ser calculada:

$$X = X_C - X_L$$

$$X = 19890 - 1256$$

$$X = 18634$$

A impedância do circuito será:

$$Z_T = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Como X é 200 vezes maior que R, a impedância pode ser considerada, na prática, igual à própria reatância.

Então, ter-se-á: $Z_T = 18634$

A corrente I_T , calcula-se pela Lei de Ohm, logo teremos: $I_T = \frac{E_a}{Z_T}$

$$I_T = \frac{3000}{18634} \quad I_T = 16\text{mA}$$

Em uma análise do comportamento do circuito, podem-se calcular os valores acima determinados entre os limites de trabalho do equipamento (100 a 600KHz).

A tabela abaixo (figura 1-25) relaciona os valores das reatâncias, a diferença entre elas, a impedância e a corrente no circuito, para cada frequência de operação.

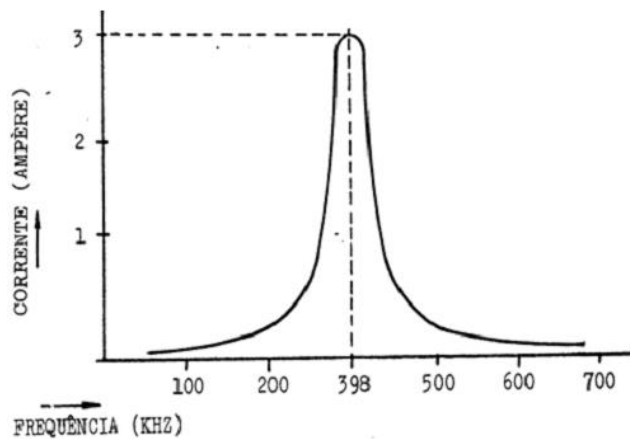
FREQ.	X_L	X_C	x	R	Z	E	I
KHz	OHM	OHM	$x_L - x_C$	OHM	OHM	VOLT	AMPERE
100	1256	19890	18634	100	18634	300	0,016
200	2512	9945	7433	100	7433	300	0,04
398	5000	5000	ZERO	100	100	300	3
500	6280	3978	2302	100	2302	300	0,13
600	7536	3315	4221	100	4221	300	0,071

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-25

A figura 1-26 apresenta o gráfico da variação da corrente em função da frequência. O conjunto gráfico e tabela mostra claramente que, na frequência de ressonância (398), a impedância é mínima (igual a R), a corrente é máxima e as reatâncias são iguais.

Portanto, um circuito série ressonante RCL atua como se fora um circuito simples, unicamente resistivo. O fluxo da corrente é limitado exclusivamente pela resistência.

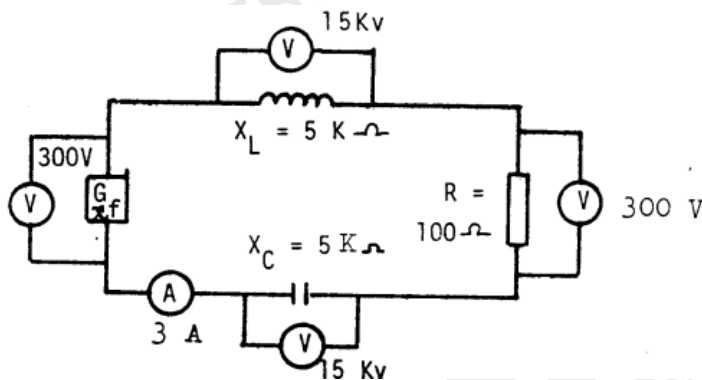


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-26

Todavia, as tensões nos elementos reativos, embora iguais e opostas, podem atingir valores bastante elevados. Essas tensões são determinadas pela corrente que percorre o circuito multiplicado pela reatância do elemento (Lei de Ohm).

No circuito da figura 1-27, temos o circuito RCL em ressonância, onde os medidores nos mostram as leituras das tensões e correntes.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-27

$$E_L = I_T \times X_L = 3 \times 5000 = 15000\text{v}$$

$$E_C = I_T \times X_C = 3 \times 5000 = 15000\text{v}$$

A tensão em L ou C é igual a 50 vezes a tensão aplicada. A tensão reativa depende da corrente que percorre o circuito a qual, por sua vez, depende da resistência ôhmica.

Desta forma, um circuito ressonante de resistência pequena é capaz de gerar tensões elevadas através das reatâncias.

Isto se aplica a circuitos que necessitam de um ganho de tensão, embora lhes seja aplicada uma baixa tensão.

Frequência de Ressonância

A frequência em que um circuito RCL em série entra em ressonância pode ser determinada da seguinte maneira:

Como: $X_L = X_C$

Logo teremos:

$$2 \pi f \times L = \frac{1}{2 \pi f \times c}$$

$$4 \pi^2 \times f^2 \times C \times L = 1$$

$$f^2 = \frac{1}{4 \pi^2 \times L \times C}$$

$$f_r = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L \times C}}$$

Onde:

f_r = frequência de ressonância (Hertz)

L = indutância (Henry)

C = Capacitância (Farad)

Um exame da equação em apreço faz-nos concluir que a resistência do circuito não influi na sua frequência de ressonância e que esta só depende do produto LC. Isto significa que circuitos com valores diferentes para L e para C podem entrar em ressonância na mesma frequência, desde que os produtos LC sejam iguais.

Por isto, podem-se fazer num circuito, várias combinações de L e C, obtendo-se o mesmo produto. Sendo constante o produto, constante será também a frequência de ressonância.

Exemplo: uma indutância de 0,5 mH e uma capacitância de 32 μ F irão ressonar na mesma frequência (398HZ que uma bobina de 2 mH e uma capacitância de 80 μ F.

Curvas de Ressonância

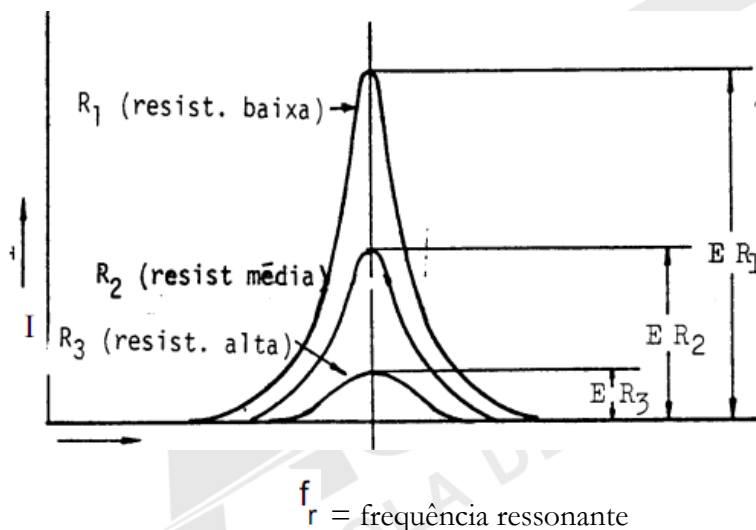
Como já foi visto, a frequência de ressonância independe do valor da resistência do circuito. Um circuito que tenha uma resistência de 100 ohms terá a mesma frequência de ressonância que um circuito com 1 ohm de resistência, desde que o produto LC seja constante, em ambos os casos. Entretanto, a intensidade da corrente no circuito cresce à medida que a resistência diminui.

Se fosse possível montar um circuito com resistência nula, a corrente na ressonância seria infinitamente grande.

Na prática, a resistência nunca é nula, mas pode ser elevada e dentro dos limites finitos. Na figura 1-28, temos algumas curvas típicas de ressonância para um circuito que tenha os mesmos valores L de e C, mas valores diferentes para a resistência.

A diferença entre os valores de pico de cada uma das curvas deve-se ao fato das resistências possuírem valores diferentes. Observe-se também que à medida que a resistência R aumenta, as curvas de respostas tornam-se mais achatadas e mais largas nas proximidades da frequência de ressonância.

Se a resistência de um circuito ressonante for muito grande, o circuito perde sua utilidade como seletor de frequência, por ser diminuta a discriminação do fluxo de corrente entre as frequências que são e as que não o são.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-28

Assim, o circuito perde a vantagem de seletividade de frequência.

O "Q" e a Seletividade

A fim de que os receptores de rádio possam desempenhar suas funções, é necessário que este selecione uma estreita faixa de frequência, rejeitando as demais.

Só assim se conseguirá separar emissoras que se acham muito próximas no dial do rádio. Quanto mais estreita for a faixa de frequência, maior será sua seletividade. Portanto, seletividade é a aptidão que tem um receptor de selecionar um sinal, entre muitos outros de frequências próximas.

A seletividade de um aparelho é determinada pelos seus circuitos sintonizados.

Quanto menor possamos fazer a resistência de uma bobina, com respeito à sua reatância, maior será a seletividade.

A seletividade de uma bobina é medida pela relação "Q" que é igual à sua reatância dividida pela sua resistência.

Como a resistência de um capacitor é mais baixa do que a resistência de uma bobina, esta constitui o elo mais fraco do circuito sintonizado.

O "Q" do circuito sintonizado é o "Q" da bobina.

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

Como:

$$X_L = \frac{E_L}{I_T}$$

$$R = \frac{E_a}{I_T}$$

$$Q = \frac{E_L}{I_T} \times \frac{I_T}{E_a}$$

$$\text{Logo: } Q = \frac{E_L}{E_a}$$

$$Q = \frac{E_L}{E_a}$$

Portanto, o "Q" de um circuito série ressonante vem a ser também a relação que existe entre a tensão no indutor ou no capacitor ($E_L = E_C$) e a tensão aplicada (E_a) ao circuito.

A expressão anterior indica que o "Q" varia inversamente com a resistência do circuito; quanto mais baixa a resistência, maior será o "Q".

As curvas de ressonância indicam que, quanto mais baixa for a resistência do circuito, maior será sua discriminação de frequência. Por isto, o "Q" indica a capacidade de um

circuito ressonante para selecionar ou rejeitar uma determinada faixa de frequência, sendo por isso, conhecido como fator de qualidade ou mérito de um circuito.

Quanto maior for o "Q" de um circuito ressonante em série, maior será seu valor como seletor de frequência.

Influência do "Q" no Ganho de Tensão

No circuito da figura 1-27, as tensões nas reatâncias por ocasião da ressonância são de 15000 volts, ao passo que a tensão aplicada (que é a mesma da resistência) é de 300 volts. Esta alta tensão depende diretamente da corrente que percorre o circuito, a qual, por sua vez, depende da tensão aplicada e da resistência.

Comparando-se a tensão em uma das reatâncias com a tensão aplicada, tem-se uma ideia exata da qualidade do circuito ressonante.

O circuito ressonante em série amplifica a tensão aplicada na frequência de ressonância. Se as perdas do circuito são baixas, o "Q" do circuito será alto e a amplificação de tensão será relativamente grande. A amplificação de tensão do circuito da figura 1-27 será de:

$$Q = \frac{E_L}{E_a}$$

$$Q = \frac{15000}{300} \quad Q = 50$$

Largura de Faixa

Largura de faixa (Band Width) ou faixa de passagem de um circuito é uma faixa de frequência na qual a variação da tensão aplicada, produz resposta que não difere muito da obtida na frequência de ressonância.

Os limites mínimos da resposta em geral, são tomados na curva de ressonância a 0,707 do valor máximo da corrente ou tensão, conforme o que se esteja calculando.

Na figura 1-29, a área sombreada representa a faixa de frequência para a qual a corrente é maior que 0,707 do valor de pico. Observe-se que a metade desta faixa fica acima da

frequência de ressonância (f_r até f_2) e a outra metade abaixo (f_r até f_1).

As duas frequências, uma acima e outra abaixo da ressonância, nas quais são obtidas respostas mínimas, formam os limites da largura da faixa aceita do circuito.

Os pontos f_1 e f_2 são chamados pontos de meia potência, em virtude desses pontos corresponderem a 50% da potência máxima.

A largura da faixa de passagem, também conhecida como passa banda (band pass), pode ser determinada pela seguinte equação:

$$Bw = f_2 - f_1$$

Em que:

Bw = faixa de passagem (Hertz)

f_2 = frequência mais alta que passa pelo circuito (Hertz)

f_1 = frequência mais baixa que passa pelo circuito (Hertz)

Todavia, como o "Q" do circuito determina a largura total da curva de ressonância, a faixa de passagem também pode ser calculada baseando-se na frequência de ressonância (f_r) e no "Q" do circuito, ou seja:

$$Bw = \frac{f_r}{Q}$$

Em que:

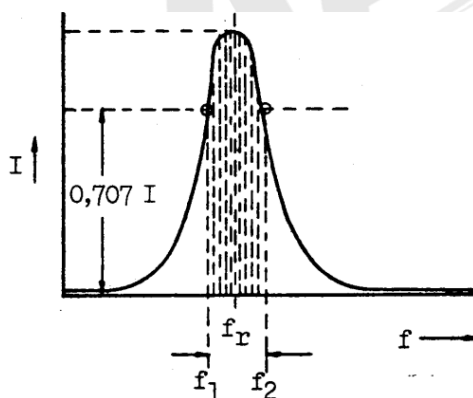
Bw = faixa de passagem (Hertz)

f_r = frequência de ressonância (Hertz)

Q = qualidade ou ganho

Nesta fórmula, permite ver-se que quanto maior for o "Q", menor será a faixa de passagem e, inversamente, quanto menor for o "Q", maior será a faixa de passagem.

A frequência mais baixa que passa pelo circuito (f_1) assim como a mais alta (f_2) pode ser calculada da seguinte maneira:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-29

Como:

$$f_r - f_1 = \frac{Bw}{2} \quad e \quad f_2 - f_r = \frac{Bw}{2}$$

Logo:

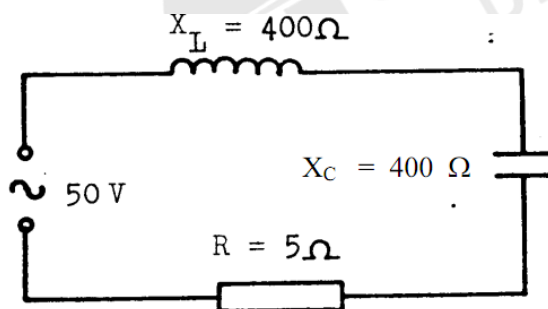
$$f_1 = f_r - \frac{Bw}{2} \quad f_2 = f_r + \frac{Bw}{2}$$

Exercício resolvido:

Calcule a faixa de passagem do circuito da figura 1-30, sabendo-se que sua frequência de ressonância é de 160000 Hz e monte sua curva de ressonância.

Dados:

$$X_L = 400 \text{ ohms}$$
$$X_C = 400 \text{ ohms} \quad f_r = 160000 \text{ Hz}$$
$$R = 5 \text{ ohms} \quad E_a = 50 \text{ v}$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-30

Cálculo da corrente:

$$I = \frac{E}{R} \quad I = \frac{50}{5} \quad I = 10A$$

Cálculo do "Q":

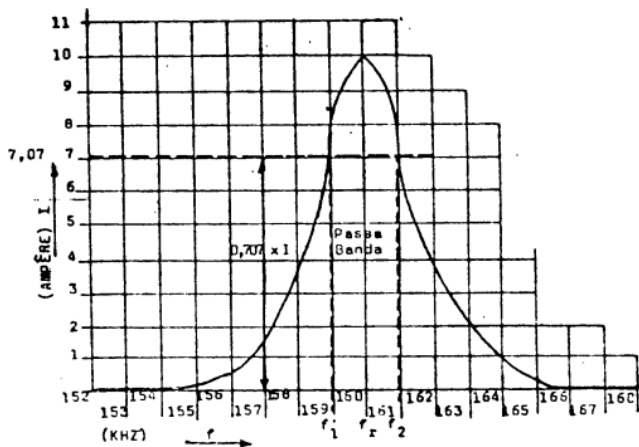
$$Q = \frac{X_L}{R} \quad Q = \frac{400}{5} \quad Q = 80$$

Cálculo da Faixa de Passagem:

Faixa de passagem:

$$\frac{f_r}{Q} = \frac{160000}{80} = 2000 \text{ Hz}$$

Para a Curva de Ressonância, teremos:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-31

No rádio, da mesma forma que nos outros equipamentos eletrônicos, é muito frequente o uso e a aplicação dos circuitos reativos em paralelo.

A importância dos circuitos reativos em paralelo deve-se ao fato de que eles aparecem no estudo dos amplificadores eletrônicos e, devido a isso, é essencial a compreensão das relações existentes entre tensões, intensidade de corrente, impedância e potência nesses circuitos.

1.5 CIRCUITO RL EM PARALELO

Vimos que, no circuito reativo em série, por ser a corrente um elemento constante em todos os pontos do circuito, tomávamos seu vetor como referência, para representação gráfica e cálculos.

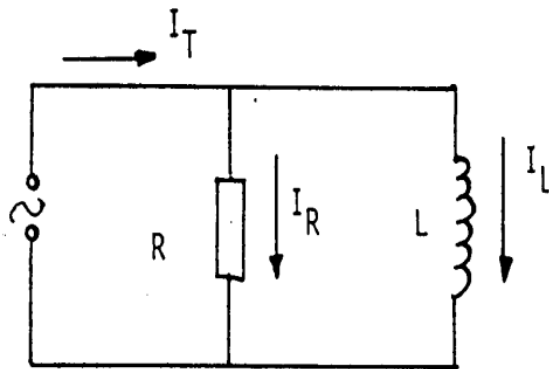
No circuito reativo em paralelo, porém, o elemento constante é a tensão, ou seja, a tensão aplicada é a mesma em todos os ramos do circuito. Além de terem o mesmo valor estão em fase.

Daí a razão porque a tomaremos como vetor referência.

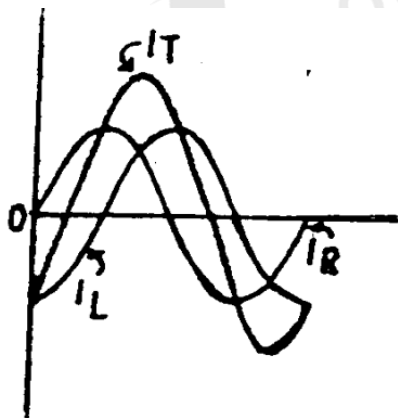
Intensidade de Corrente

Ao se ligar um indutor em paralelo com um resistor, a tensão no indutor (E_L) e no resistor (E_R) é idêntica à tensão aplicada e estão em fase entre si.

Todavia, a corrente através do indutor está atrasada de 90° em relação à tensão aplicada e a corrente através do resistor está em fase com a tensão aplicada. Logo, podemos concluir que a corrente no indutor (I_L) está atrasada de 90° em relação a corrente no resistor (I_R). A figura 1-32, nos mostra um circuito RL em paralelo e a figura 1-33, sua relação de fase. A corrente total de qualquer circuito RL em paralelo não pode ser determinada pela soma aritmética das correntes nos vários ramos, por causa da diferença de fase.



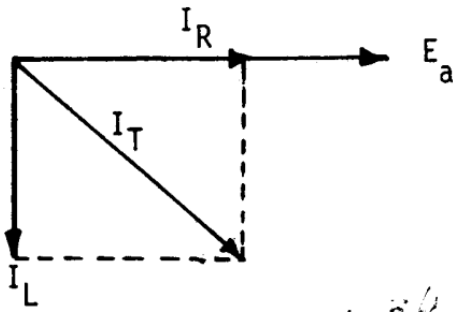
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-32



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-33

No gráfico da figura 1-34, a corrente no resistor I_R é representada pelo vetor horizontal e a corrente no indutor I_L , pelo vetor vertical. O vetor I_L é orientado no sentido negativo porque está atrasado em relação a I_R .

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-34

O módulo do vetor da corrente de linha I é sempre maior do que I_T é sempre maior do que I_R ou I_L , porque ele é a hipotenusa de um triângulo retângulo.

Para se calcular a corrente no resistor e no indutor, emprega-se a Lei de Ohm:

$$I_R = \frac{E_R}{R} \quad I_L = \frac{E_L}{X_L}$$

Como: $E_a = E_R = E_L$

Logo: $I_R = \frac{E_a}{R} \quad I_L = \frac{E_a}{X_L}$

Em que:

E_a = tensão aplicada (volts)

E_R = tensão no resistor (volts)

E_L = tensão no indutor (volts)

Cálculo da Impedância

A impedância de um circuito RL em paralelo pode ser determinada pela Lei de Ohm, ou seja:

$$Z_T = \frac{E_a}{I_T}$$

Todavia, nos circuitos CC, vimos que, para efetuar o cálculo da resistência equivalente entre dois resistores no circuito, empregávamos a seguinte fórmula:

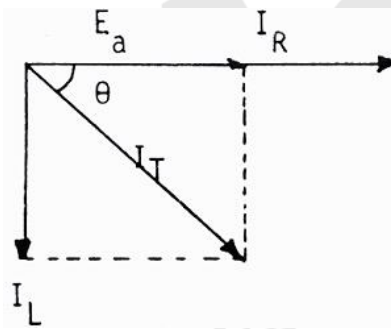
$$R_T = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

Analogamente, nos circuitos reativos em paralelo, podemos calcular a impedância por intermédio de uma fórmula semelhante a esta. Donde, por analogia, teremos:

$$Z_T = \frac{R \times X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

Ângulo de Fase

Denomina-se ângulo de fase (θ), ao ângulo que a corrente de linha (I_T) forma com a tensão aplicada (E_a). Veja a figura 1-35.



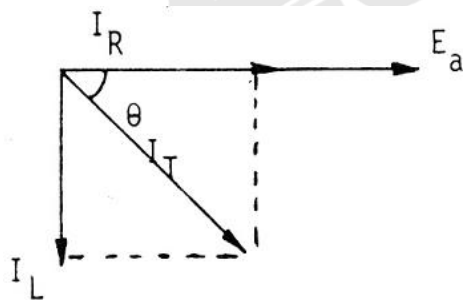
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-35

O ângulo de fase (θ) poderá ser determinado por meio das funções trigonométricas do diagrama vetorial da figura 1-36.

$$\text{tg } \theta = \frac{I_L}{I_R}$$

Logo:

$$\text{Como: } I_L = \frac{E_a}{X_L} \text{ e } I_R = \frac{E_a}{R}$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-36

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\frac{E_a}{X_L}}{\frac{E_a}{R}}$$

Logo:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\cancel{E_a}}{X_L} \times \frac{R}{\cancel{E_a}} \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{R}{X_L}$$

Em função do diagrama da figura 1-36 temos que, o $\cos \theta = \frac{I_R}{I_T}$

Como: $I_R = \frac{E_a}{R}$ e $I_T = \frac{E_a}{Z_T}$

Logo: $\cos \theta = \frac{\frac{E_a}{R}}{\frac{E_a}{Z_T}}$

$$\cos \theta = \frac{\cancel{E_a}}{R} \times \frac{Z_T}{\cancel{E_a}} \quad \cos \theta = \frac{Z_T}{R}$$

Potência Elétrica

Todo circuito que contenha resistência e reatância, parte da potência é dissipada no resistor sob a forma de calor e parte é devolvida à fonte. O produto $P_T = E_a \times I_T$, é chamado de potência aparente, (P_a) sendo sua unidade o Volt Ampère (VA).

A potência aparente poderá ser calculada por qualquer uma das equações abaixo:

$$P_A = E_a \times I_T$$

$$P_a = I_T^2 \times Z_T$$

$$P_a = \frac{E_a^2}{Z_T}$$

A potência dissipada pelo resistor é chamada de potência real, verdadeira ou efetiva do circuito, sendo sua unidade o Watt.

Podemos calcular a potência real (P_R) de um circuito por intermédio da seguinte equação:

$$P_R = E_a \times I_R$$

Como:

$$\cos \theta = \frac{I_R}{I_T}$$

Logo:

$$P_R = E_a \times I_T \times \cos \theta$$

Fator de Potência

Define-se como fator de potência (f_p), a relação entre a potência real (P_R) e a potência aparente (P_A) de um circuito.

$$f_p = \frac{P_R}{P_A}$$

Como:

$$P_R = E_a \times I_R \quad \text{e} \quad P_A = E_a \times I_T$$

$$f_p = \frac{E_a \times I_R}{E_a \times I_T} \quad f_p = \frac{I_R}{I_T}$$

Logo:

$$\text{Porém, como } \cos \theta = \frac{I_R}{I_T}$$

$$f_p = \cos \theta$$

Logo:

Em consequência, o fator de potência poderá ser calculado por qualquer uma das equações apresentadas.

O fator de potência é usualmente expresso em fração decimal ou percentagem.

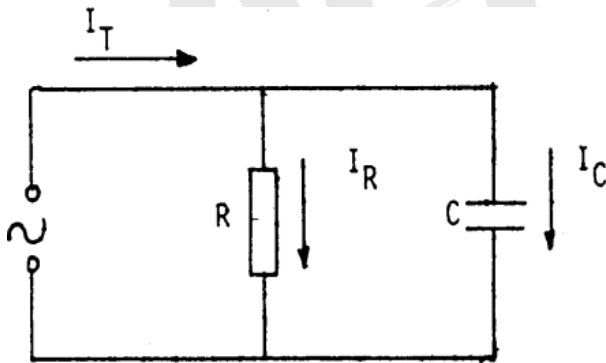
1.6 CIRCUITO RC EM PARALELO

As considerações básicas, feitas para o circuito RL em paralelo, continuam a ter valor para o circuito RC em paralelo que agora vamos estudar e no qual temos um resistor e um capacitor associados, como mostra a figura 1-37.

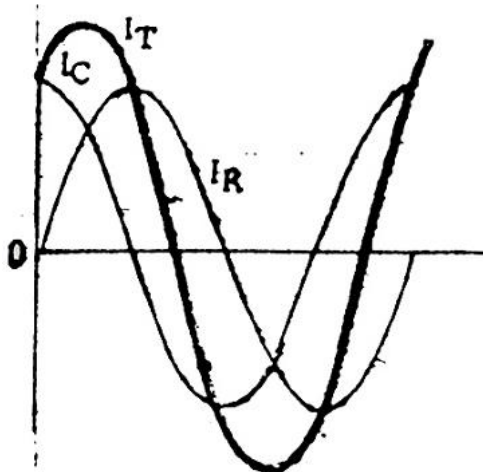
Tratando-se de um circuito em paralelo, a tensão é a mesma em qualquer ponto do circuito e estão em fase entre si.

Contudo, a corrente que atravessa o capacitor está adiantada de 90° em relação à tensão aplicada e a corrente que percorre o resistor está em fase com a mesma tensão, conforme nos mostra a figura 1-38.

Isto quer dizer que a corrente capacitiva se apresenta defasada de 90° , em avanço sobre a corrente resistiva.

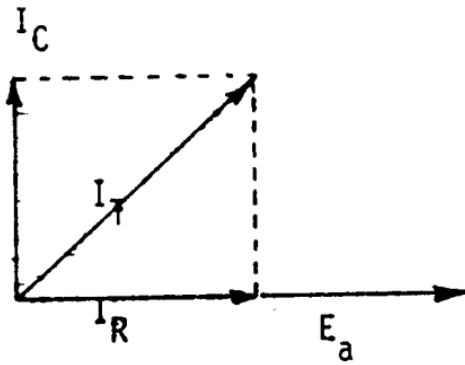


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-37



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-38

No gráfico da figura 1-39, a corrente I_R é representada pelo vetor horizontal e a corrente no indutor I_C pelo vetor vertical. O vetor I_C é orientado no sentido positivo porque está adiantado em relação a I_R .



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-39

A corrente resultante (I_T) ou de linha é a soma vetorial destas duas correntes, ou seja:

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

O módulo do vetor da corrente de linha (I_T) é sempre maior do que I_R ou I_C , porque ele é a hipotenusa de um triângulo retângulo.

Para se calcular a corrente no resistor e no capacitor, emprega-se a Lei de Ohm:

$$I_R = \frac{E_a}{R} \quad I_C = \frac{E_a}{X_C}$$

Cálculo da Impedância

A impedância de um circuito RC em paralelo pode ser determinada pela lei de Ohm, ou seja:

$$Z_T = \frac{E_a}{I_T}$$

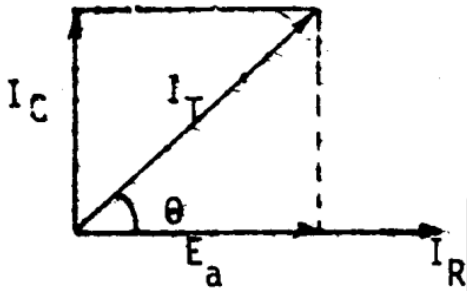
Ou através da seguinte equação:

$$Z = \frac{R \times X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$$

Ângulo de Fase

O ângulo de fase θ , como já vimos, é o ângulo formado pelo vetor da corrente de linha

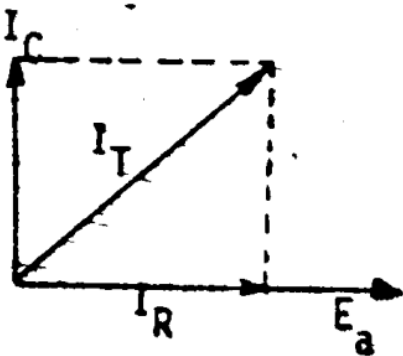
(I_T) com o vetor da tensão aplicada (E_a).



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-40

O ângulo de fase θ poderá ser determinado por meio das funções trigonométricas do diagrama vetorial da figura 1-41.

Como:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-41

Logo: $\text{tg } \theta = \frac{I_C}{I_R}$

Porém, como: $I_C = \frac{E_a}{X_C}$ e $I_R = \frac{E_a}{R}$

Logo: $\text{tg } \theta = \frac{\frac{E_a}{X_C}}{\frac{E_a}{R}} = \frac{E_a}{X_C} \times \frac{R}{E_a}$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{R}{X_C}$$

Em função do diagrama da figura 1-41, temos que, o $\cos \theta = \frac{I_R}{I_T}$

Como: $I_R = \frac{E_a}{R}$ e $I_T = \frac{E_a}{Z_T}$

Logo:

$$\cos \theta = \frac{\frac{E_a}{R}}{\frac{E_a}{Z_T}} \quad \cos \theta = \frac{E_a}{R} \times \frac{Z_T}{E_a}$$

$$\cos \theta = \frac{Z_T}{R}$$

Potência Aparente e Real

Para se calcular a potência aparente (P_a) e a potência real (P_R), empregam-se as mesmas equações já vistas no circuito RL em paralelo, ou seja:

$$P_a = E_a \times I_T \quad P_a = I_T^2 \times Z_T$$

$$P_a = \frac{E_a^2}{Z_T} \quad P_R = E_a \times I_R$$

$$P_R = E_a \times I_T \times \cos \theta$$

Fator de Potência

Para o cálculo do fator de potência empregam-se as mesmas equações vistas no circuito RL em paralelo, em que:

$$f_p = \frac{P_R}{P_a}$$

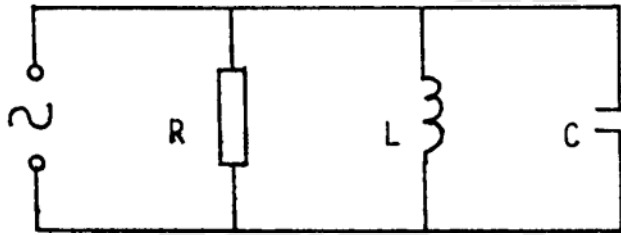
$$f_p = \frac{I_R}{I_T}$$

$$f_p = \cos \theta$$

1.7 CIRCUITO RCL EM PARALELO

Quando se aplica uma CA em um circuito paralelo contendo resistor, capacitor e indutor, conforme mostra a figura 1-42, é necessário levar em consideração o fato de que os ângulos de fase entre a corrente e a tensão diferem nos três elementos.

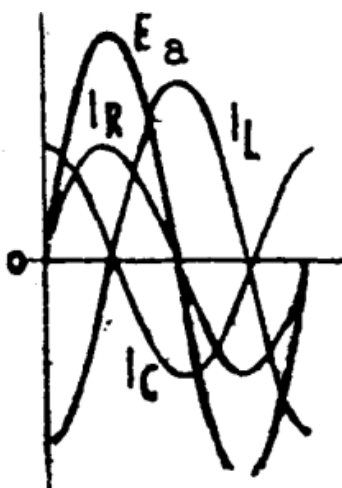
Tomando-se a tensão de um circuito paralelo como referência, temos: no resistor, a corrente (I_R) está em fase; no indutor, a corrente (I_L) está atrasada de 90° e no capacitor, a corrente (I_C) está adiantada de 90° .



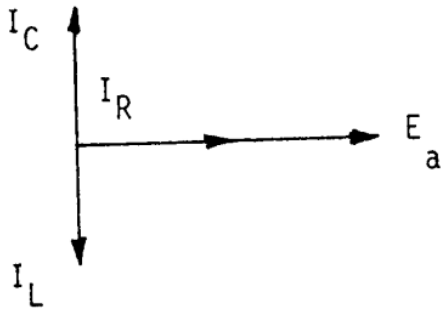
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-42

Como em qualquer circuito em paralelo, a tensão é a mesma em qualquer ponto do circuito e estão em fase entre si, podemos concluir que I_L está atrasada de 90° de I_R e I_C adiantada de 90° de I_R , conforme nos mostra a figura 1-43.

Logo, podemos compor o diagrama vetorial, conforme figura 1-44.

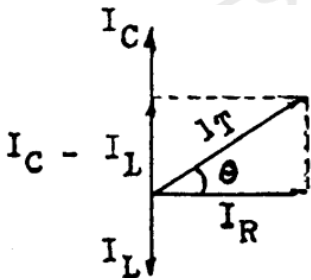


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-43



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-44

A soma vetorial das correntes I_R , I_L e I_C é igual à corrente total ou de linha do circuito. Como a corrente no capacitor I_C e a corrente no indutor I_L estão defasadas de 180° , logo, a corrente resultante da composição vetorial entre I_C e I_L é a diferença, já que são vetores diretamente apostos entre si. Esta corrente resultante será somada vetorialmente, com a corrente do resistor I_R , para a determinação da corrente total ou de linha do circuito. Isto é expresso pelo gráfico da figura 1-45.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-45

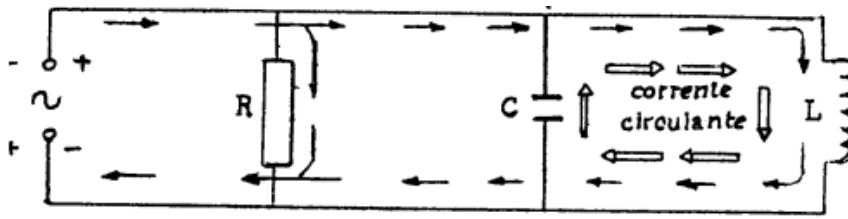
Pelo teorema de Pitágoras, teremos:

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$$

Neste tipo de circuito existe uma corrente circulatória que vem a ser a menor entre as duas correntes I_L e I_C . Esta corrente circula apenas no circuito formado por L e C. Depois da carga inicial do capacitor, ele descarrega através da bobina.

O fluxo da corrente através da bobina produz um campo magnético que se mantém, enquanto a corrente estiver fluindo.

Quando a corrente se reduz a zero, o campo magnético se desvanece, induzindo uma corrente que carrega o capacitor, mas com polaridade oposta à original. Aí o capacitor se descarrega em sentido oposto.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-46

Os ciclos se repetem e o capacitor volta a se carregar ao seu estado original. Esses ciclos se repetem periodicamente e a sua ação dá origem à corrente circulatória, veja a figura 1-46.

Para se calcular a corrente no resistor, capacitor e indutor, emprega-se a Lei de Ohm.

$$I_R = \frac{E_a}{R}$$

$$I_C = \frac{E_a}{X_C}$$

$$I_L = \frac{E_a}{X_L}$$

Cálculo da Impedância

A impedância de um circuito RCL em paralelo pode ser determinada pela Lei de Ohm, em que:

$$Z_T = \frac{E_a}{I_T}$$

ou através da seguinte equação:

$$Z_T = \frac{R \times Z_1}{\sqrt{R^2 + Z_1^2}}$$

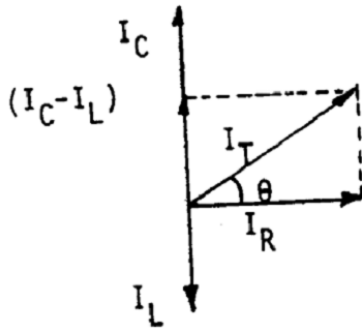
Onde:

$$Z_T = \frac{X_L \times X_C}{X_C - X_L}$$

Ângulo de Fase

O ângulo de fase θ poderá ser determinado por meio das funções trigonométricas do diagrama da figura 1-47.

Como:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-47

Logo:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{I_C - I_L}{I_R} \quad \cos \theta = \frac{I_R}{I_T} \quad \text{ou} \quad \frac{Z_T}{R}$$

Classificação dos Circuitos RCL em Paralelo:

- Quando X_L for menor que X_C ou I_L maior que I_C , temos: θ negativo, circuito R_L .
- Quando X_C for menor que X_L ou I_C maior que I_L temos: θ positivo, circuito R_C .
- Quando X_L for igual a X_C ou I_L igual a I_C , temos: θ igual a zero, circuito RESISTIVO.

Potência Aparente, Real e Fator de Potência

Para o cálculo, empregam-se as mesmas equações já vistas nos circuitos R_L ou R_C em paralelo, ou seja:

$$P_A = E_a \times I_T \quad P_A = I_T^2 \times Z_T$$

$$P_A = \frac{E_a^2}{Z_T}$$

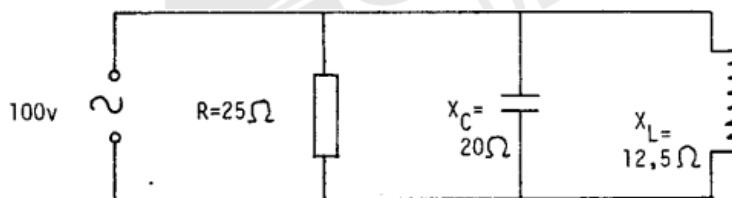
$$P_R = E_a \times I_R$$

$$P_R = E_a \times I_T \times \cos \theta$$

$$f_p = \frac{P_R}{P_A} \quad f_p = \cos \theta$$

$$f_p = \frac{I_R}{I_T} \quad f_p = \frac{Z_T}{R}$$

Dado o circuito da figura 1-48, determinar:



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-48

As intensidades de corrente I_R , I_C e I_L :

$$I_R = \frac{E_a}{R} \quad I_R = \frac{100}{25 \Omega} \quad I_R = 4A$$

$$I_C = \frac{E_a}{X_C} \quad I_C = \frac{100V}{20 \Omega} \quad I_C = 5A$$

$$I_L = \frac{E_a}{X_L} \quad I_L = \frac{100V}{12,5 \Omega} \quad I_L = 8A$$

A corrente total ou de linha:

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$$

$$I_T = \sqrt{4^2 + (8 - 5)^2}$$

$$I_T = \sqrt{16 + 9} \quad I_T = 5 A$$

A impedância total do circuito:

$$Z_T = \frac{E_a}{I_T} \quad Z_T = \frac{100V}{5 A}$$

$$Z_T = 20 \Omega$$

O fator de potência:

$$f_p = \frac{I_R}{I_T} \quad f_p = \frac{4 A}{5 A}$$

$$f_p = 0,8 \text{ ou } 80\%$$

A potência real:

$$P_R = E_a \times I_T \times \cos \theta$$

$$P_R = 100 \times 5 \times 0,8$$

$$P_R = 400 W$$

A potência aparente:

$$P_A = E_a \times I_T$$

$$P_A = 100 \times 5$$

$$P_A = 500 VA$$

A corrente circulante no tanque:

A corrente circulatória é a menor entre as duas correntes I_L ou I_C .

Como I_C é a menor corrente, logo, a corrente circulatória será de 5^A .

1.8 RESSONÂNCIA EM PARALELO E CIRCUITO TANQUE IDEAL

Ressonância em Paralelo

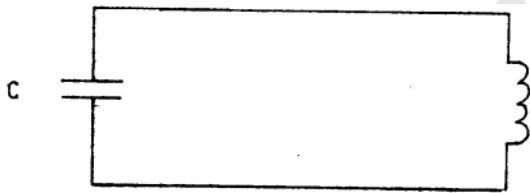
O circuito sintonizado em paralelo é um dos mais importantes da eletrônica, sendo amplamente empregado em transmissores, rádio, radar, etc.

O fenômeno da ressonância em série, também se presta a uma análise nos circuitos em paralelo, entretanto, sua aplicação revela condições diferentes de operação.

Um circuito em paralelo encontra-se em ressonância quando é estabelecida a igualdade entre a reatância indutiva e a reatância capacitiva ($X_L = X_C$) a qual determina a igualdade entre as correntes $I_L = I_C$.

Circuito Tanque Ideal

Chama-se comumente tanque a qualquer associação LC, particularmente quando as reatâncias são ligadas, conforme a figura 1-49.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-49

A designação tanque resulta da capacidade que têm os circuitos LC de armazenar energia. Embora o circuito tanque ideal não seja exequível na prática, uma análise de seu comportamento é instrutiva.

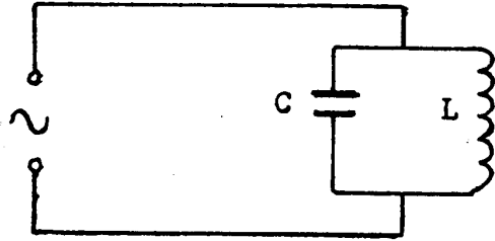
A figura 1-50 representa o esquema de um circuito tanque ideal ($R = 0$) em que um indutor e um capacitor estão associados em paralelo e ligados a uma fonte de CA de frequência variável.

Há, portanto, dois caminhos por onde a corrente pode circular; um pelo indutor e outro pelo capacitor.

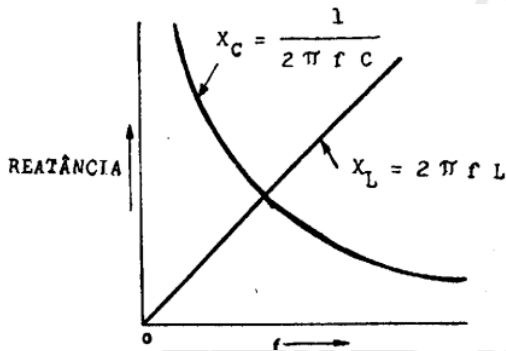
Se a fonte de CA operar em baixa frequência, a maior parte da corrente circulará pelo indutor do que pelo capacitor, porque X_L é menor que X_C . Se, porém, a fonte de CA operar em alta frequência, a maior parte da corrente circulará pelo capacitor porque X_C é menor que X_L .

Para uma determinada frequência a reatância indutiva será igual à reatância capacitiva ($X_L = X_C$), logo, o circuito entra em ressonância.

A figura 1-51 mostra o gráfico da variação da reatância indutiva e capacitiva em função da frequência.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-50



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-51

Uma vez estando o circuito em ressonância, a corrente através do indutor e do capacitor são iguais ($I_L = I_C$), porém defasadas de 180° . Assim sendo, a corrente total ou de linha que é a soma vetorial de I_L e I_C , é igual a zero. Este fato é mostrado por intermédio do diagrama vetorial da figura 1-52. Assim, nesse circuito ressonante em paralelo hipotético, a impedância do circuito será infinita e não haverá corrente de linha.

Todavia, haverá uma corrente circulatória no tanque apesar de nenhuma corrente ser fornecida pela fonte.

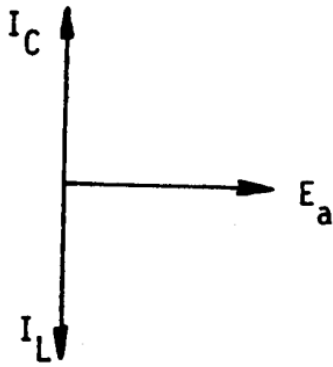
Depois da carga inicial do capacitor, ele descarrega sobre o indutor, isto é, a energia armazenada no capacitor fornece a corrente que percorre o indutor.

O campo magnético resultante em torno do indutor age como fonte de energia para recarregar o capacitor.

Essa transferência de energia entre os dois elementos continua na frequência de ressonância sem qualquer perda.

O sistema está em estado oscilatório e pode ser comparado com um pêndulo em que, não havendo atrito, oscila continuamente, desde que tenha recebido um deslocamento inicial devido a uma fonte de energia.

$$I_L = I_C \quad \text{e} \quad X_L = X_C$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-52

Mas, da mesma maneira que o pêndulo real nunca é totalmente desprovido de atrito e dissipa alguma energia durante a oscilação, os circuitos ressonantes em paralelo, na prática, incluem alguma resistência que absorve energia da fonte original.

Consequentemente apesar da impedância do circuito ser máxima na ressonância, tem valor finito, e não infinito e a corrente de linha, apesar de ser mínima e estar em fase com a tensão aplicada, não é igual a zero.

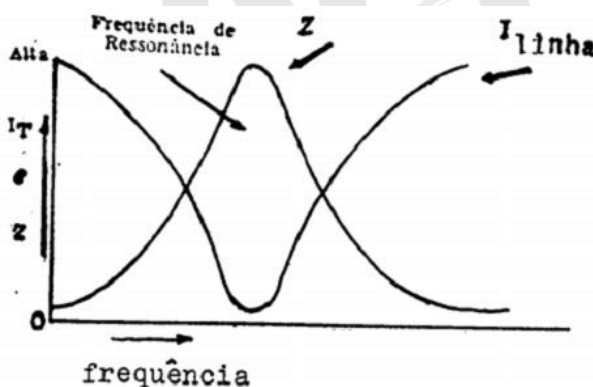
Na figura 1-53, temos o gráfico representativo da impedância e corrente em relação à variação de frequência.

A corrente circulatória no tanque tem o mesmo sentido e é máxima quando o circuito encontra-se em ressonância.

Veja a figura 1-54.

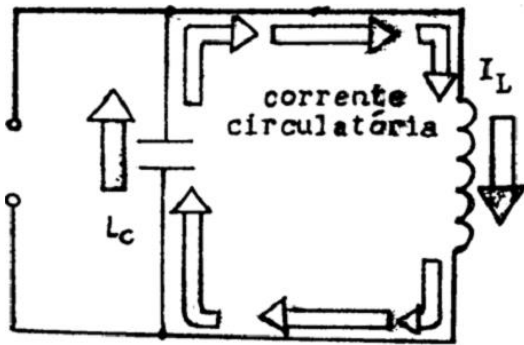
A corrente circulatória, é considerada como sendo a corrente do capacitor I_C ou do indutor I_L , uma vez que $I_L = I_C$ e pode ser facilmente determinada pela Lei de Ohm:

$$I_C = \frac{E_a}{X_C} \quad \text{e} \quad I_L = \frac{E_a}{X_L}$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-53



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-54

A ressonância nos circuitos paralelos é chamada de anti-ressonante, por serem seus efeitos exatamente opostos aos observados nos circuitos em série.

Frequência Anti-ressonante

Aplica-se a expressão de frequência anti-ressonante ao circuito em paralelo e frequência de ressonância ao circuito em série. Em qualquer caso, uma combinação LC tem uma frequência ressonante, qualquer que seja o nome que esta receba.

A frequência anti-ressonante de um circuito paralelo é determinada da mesma maneira que num circuito em série, ou seja:

$$f_r = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L \times C}}$$

Impedância no Circuito Tanque Ideal

No circuito ressonante em paralelo a tensão é a mesma e as correntes em cada ramo e na linha são determinadas pela impedância total da linha. Assim, a corrente no ramo indutivo ou capacitivo em qualquer instante é:

$$I_L = \frac{E_a}{X_L} \quad I_C = \frac{E_a}{X_C}$$

A corrente total I_T na linha, pela Lei de Ohm, é:

$$I_T = \frac{E_a}{Z_T}$$

Além disso, como já foi visto, a corrente total é igual à soma vetorial das correntes nos ramos. Como essas correntes estão defasadas de 180° e X_C é convencionalmente negativo, tem-se:

$$I_T = I_L - I_C$$

Donde:

$$I_L - I_C = \frac{E_a}{Z_T} \quad Z_T = \frac{E_a}{I_L - I_C}$$

$$Z_T = \frac{E_a}{\frac{E_a}{X_L} - \frac{E_a}{X_C}}$$

$$Z_T = \frac{X_L \times X_C}{X_C - X_L}$$

A impedância de um circuito em paralelo difere de um circuito em série. Uma reatância indutiva grande em um circuito em série faz com que este haja indutivamente, porém, uma grande reatância indutiva num circuito em paralelo faz este agir capacitivamente, pois passa mais corrente pelo ramo capacitivo.

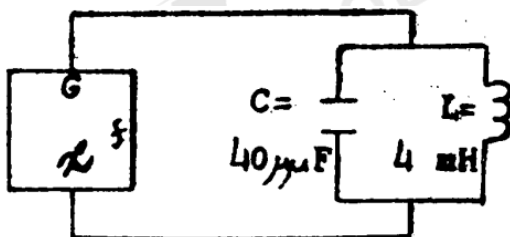
Um circuito tanque ideal apresenta as seguintes características:

- Na ressonância, a impedância é infinita;
- À medida que a frequência se afasta da frequência de ressonância, a impedância se aproxima de zero;
- O circuito se aproxima indutivamente para as frequências inferiores à de ressonância e, capacitivamente, para as frequências maiores que a de ressonância. Os pontos precedentes indicam que o circuito tanque é muito versátil. Pode ser usado para substituir um capacitor ou um indutor.

Exercício resolvido.

A figura 1-55 mostra o esquema de um circuito RC em paralelo. O gerador de frequência variável entrega 300V.

A frequência anti-ressonante será:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-55

$$f_r = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L \times C}}$$

$$f_r = \frac{1}{6,28 \sqrt{4 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^{-11}}}$$

$$f_r = 398000 \text{ Hz}$$

A corrente em qualquer um dos ramos é determinada pela reatância nesse ramo. Como I_L é igual a I_C , qualquer reatância pode ser usada.

$$X_L = 2 \pi \times f \times L$$

$$X_L = 6,28 \times 398 \times 10^3 \times 4 \times 10^{-3}$$

Logo:

$$I_L = \frac{E_a}{X_L} \quad I_L = \frac{300}{10000}$$

$$X_L = 10000 \text{ ohms} \quad I_L = 0,03 \text{ A}$$

Assim, a corrente circulatória no tanque é de 0,03A, mas a corrente na linha é praticamente nula; como já sabemos, a frequência de ressonância oferece o máximo de impedância à linha.

Se a frequência do gerador for mudada para 200 KHz a corrente nos ramos diferirá:

$$X_L = 2 \pi \times f \times L$$

$$X_L = 6,28 \times 398 \times 10^3 \times 4 \times 10^{-3}$$

Logo: $I_L = \frac{E_a}{X_L}$

$$I_L = \frac{300}{10000}$$

$$X_L = 10000 \text{ ohms}$$

$$I_L = 0,03 \text{ A}$$

Assim, a corrente circulatória no tanque é de 0,03A, mas a corrente na linha é praticamente nula. Como já sabemos, a frequência de ressonância oferece o máximo de impedância à linha.

Se a frequência do gerador for mudada para 200 KHz a corrente nos ramos diferirá:

$$X_L = 2\pi \times f \times L$$

$$X_L = 6,28 \times 2 \times 10^5 \times 4 \times 10^{-3}$$

$$X_L = 5024 \text{ ohms}$$

Logo:

$$I_L = \frac{E_a}{X_L} \quad I_L = \frac{300}{5024}$$

$$I_L = 0,059A$$

Como: $X_C = \frac{1}{2\pi \times f \times c}$

$$X_C = \frac{1}{6,28 \times 2 \times 10^5 \times 4 \times 10^{-11}}$$

$$X_C = \frac{10^6}{50,24} \quad X_C = 19900 \text{ ohms}$$

Logo:

$$I_C = \frac{E_a}{X_C} \quad I_C = \frac{300}{19900}$$

$$I_C = 0,015A$$

Como a corrente indutiva é maior que a capacitiva, o circuito se conduz indutivamente.

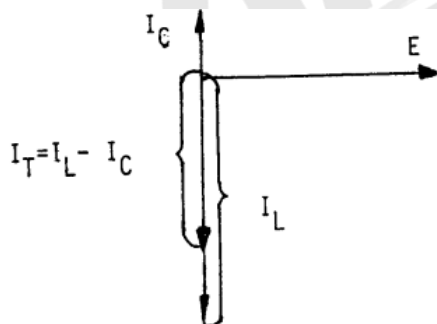
A corrente de linha é:

$$I_T = I_L - I_C$$

$$I_T = 0,059 - 0,015 \quad I_T = 0,044A$$

Assim, a corrente na linha é de 44 mA, atrasada de 90° em relação à tensão aplicada. A

figura 1-56, mostra o diagrama vetorial deste circuito na frequência de 200 KHz.



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-56

Empregando-se a fórmula da impedância, tem-se:

$$Z_T = \frac{X_L \times X_C}{X_C - X_L}$$

$$Z_T = \frac{5024 \times 19900}{19900 - 5024}$$

$$Z_T = 6720 \text{ ohms}$$

1.9 CIRCUITO TANQUE REAL E CIRCUITO TANQUE COM RESISTOR EM DERIVAÇÃO

Circuito Tanque Real

As conclusões obtidas no estudo do circuito tanque ideal e os resultados da análise do circuito anterior foram baseados na hipótese da resistência nos ramos em paralelo ser nula ou desprezível.

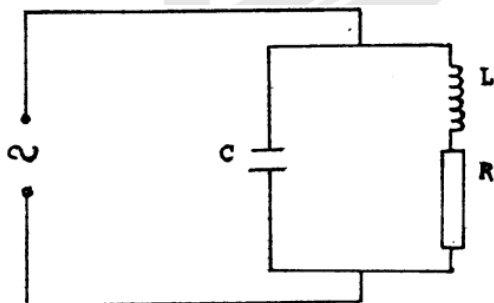
A figura 1-57 apresenta um diagrama esquemático equivalente a um circuito real. O ramo capacitivo contém uma resistência desprezível, enquanto que o ramo indutivo inclui toda a resistência do circuito.

A presença da resistência no circuito em paralelo significa que as correntes dos respectivos ramos não estão exatamente defasadas de 180° na ressonância. A resistência altera o ângulo de fase de cada ramo, como é visto na figura 1-58.

Assim as correntes dos ramos não se anulam completamente e resulta disso uma corrente de linha.

Dessa forma, o valor da corrente de linha na ressonância é, pois um indicativo da quantidade de resistência presente no circuito.

À medida que a resistência diminui, a corrente de linha tende para uma amplitude mínima e a entrar em fase com a tensão aplicada.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-57



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-58

Fator de Qualidade

O fator de qualidade ou "Q" de um circuito ressonante em paralelo é igual ao de um circuito ressonante em série, em que:

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

Porém, no circuito ressonante em série, a qualidade ou Q do circuito também é determinada pela relação entre a tensão em cada reatância e a tensão aplicada. Como a tensão é a mesma no circuito ressonante em paralelo, o Q do circuito também é determinado pela relação entre a corrente no tanque e a corrente na linha, ou seja:

$$Q = \frac{I_{\text{tanque}}}{I_{\text{linha}}}$$

Como a corrente ressonante do tanque é igual à corrente de menor valor, I_C ou I_L e em virtude de I_L ser menor que I_C teremos:

$$Q = \frac{I_{\text{tanque}}}{I} \quad Q = \frac{I_L}{I_T}$$

$$Q = \frac{\frac{E_a}{X_L}}{\frac{E_a}{Z_T}} \quad Q = \frac{Z_T}{X_L}$$

Como: $X_L = X_C$

$$\text{Logo: } Q = \frac{Z_T}{X_C}$$

Obs.: esta equação, somente deve ser empregada quando o valor de R for muito baixo em relação a XL.

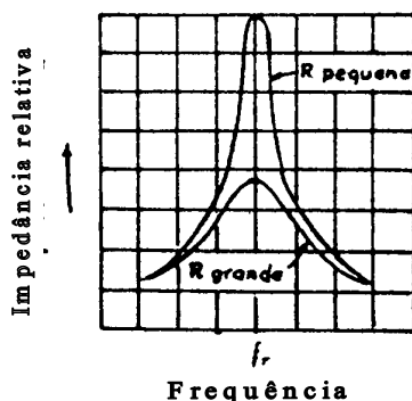
Assim, o Q de um circuito ressonante em paralelo também é considerado como sendo a relação entre a impedância e a reatância indutiva ou capacitiva.

Os circuitos de Q elevados são, como já vimos, muito úteis nos circuitos eletrônicos seletivos. Quanto maior for o Q, maior será a seletividade do circuito.

Curvas de Ressonância

Nos circuitos ressonantes em paralelo, a curva de impedância é a curva característica de ressonância (figura 1-59).

Como já foi visto, a frequência de ressonância independe do valor da resistência do circuito.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-59

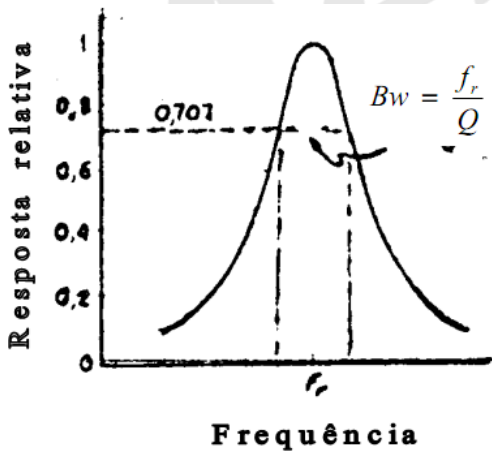
A agudeza da curva depende do Q do circuito e pode ser aumentada ou diminuída, respectivamente com o acréscimo ou decréscimo do valor da resistência. Se a resistência do

circuito ressonante for muito grande, o circuito perde sua utilidade como seletor de frequência.

Largura de Faixa

A largura de faixa do circuito ressonante em paralelo segue as especificações para a largura de faixa do circuito ressonante em série.

Portanto, os limites efetivos da faixa de passagem são tomados nos pontos da curva de ressonância a 0,707 do valor de pico. Assim, as duas frequências, uma acima e outra abaixo da ressonância (pontos de meia potência), formam os limites da largura de faixa. Veja a figura 1-60.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-60

A largura de faixa de um circuito sintonizado pode ser determinada por meio da fórmula:

$$Bw = \frac{f_r}{Q}$$

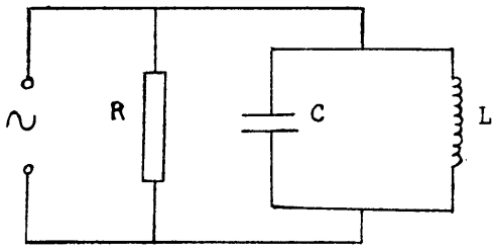
Onde: Bw = largura de faixa (hertz)

f_r = frequência anti-ressonante (hertz)

Q = Qualidade

Circuito Tanque com Resistor em Derivação

Outro caso que deve ser mencionado é o que acontece quando um resistor está ligado em paralelo com o circuito tanque, conforme a figura 1-61. O resistor R é chamado de "resistor de amortecimento" e aumenta efetivamente a largura de faixa de um circuito, porque ele será responsável por uma parte da corrente de linha que a ressonância não pode cancelar. O amortecimento de derivação faz diminuir o Q do circuito e, portanto o circuito fica menos seletivo.



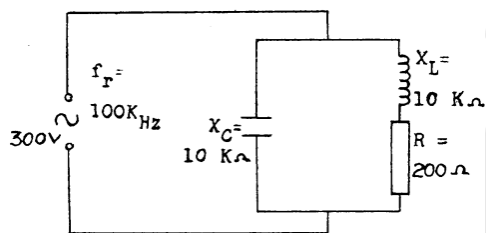
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-61

Exercício resolvido

Estando o circuito da figura 1-62 em ressonância, calcular:

$$Q = \quad Z = \quad I_T =$$

$$I_{\text{tanque}} = \quad P_R =$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-62

Cálculo do Q:

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad Q = \frac{10000}{200}$$

$$Q = 50$$

Cálculo da impedância:

$$Z = Q \times X_L \quad Z = 50 \times 10000$$

$$Z = 500 \text{ K}\Omega$$

Cálculo da corrente de linha:

$$I_T = \frac{E_a}{Z_T} \quad I_T = \frac{300}{500000}$$

$$I_T = 0,6 \text{ mA}$$

Cálculo da corrente no tanque:

$$I_{\text{tanque}} = Q \times I_T$$

$$I_{\text{tanque}} = 50 \times 0,0006 \quad I_{\text{tanque}} = 30 \text{ mA}$$

Cálculo da largura de faixa:

$$Bw = \frac{f_r}{Q}$$

$$Bw = \frac{100000}{50}$$

$$Bw = 2 \text{ KHz}$$

$$P_R = I_R^2 \times R$$

$$P_R = 0,03^2 \times 200$$

$$P_R = 0,18 \text{ W}$$

1.10 FILTROS DE FREQUÊNCIA

Comumente, a corrente em um circuito de rádio contém vários componentes de frequência. A função de um circuito de filtro é efetuar uma determinada separação destes componentes. Assim, um filtro pode ser usado para separar os componentes de corrente contínua dos de corrente alternada ou para separar grupos de componentes de corrente alternada por faixas de frequência.

Para conseguir esta finalidade, o filtro deve apresentar baixa atenuação (oposição) para componentes de frequência dentro de uma faixa particular, a faixa de passagem, e alta atenuação em frequências dentro de outras faixas atenuadas.

Características dos Circuitos de Filtros

Os filtros são comumente classificados de acordo com as suas características de seletividade: o filtro "passa-baixa" transmite todas as frequências abaixo de uma frequência

limite, chamada frequência de corte (f_{co}), e barra as frequências mais altas que a frequência de corte e o filtro "passa-alta" faz exatamente o contrário.

O filtro "passa-faixa" deixa passar as frequências contidas numa faixa entre duas frequências de corte e elimina as frequências que ficarem acima e abaixo dos limites da faixa.

O filtro "corta-faixa" barra as frequências que ficam dentro de uma faixa, deixando passar todas as demais.

O ponto de corte em um circuito de filtro pode ser facilmente determinado pelas equações abaixo:

$$P_{co} = E_a \times 0,707 \text{ ou}$$

$$P_{co} = I_T \times 0,707$$

Em que:

P_{co} = ponto de corte

E_a = tensão aplicada

I_T = corrente total

Desde que, idealmente, um filtro deve deixar passar frequências escolhidas sem atenuação, as perdas de energia devem ser baixas.

Em consequência, os componentes de um circuito de filtro consistem comumente em elementos reativos.

Pela disposição conveniente de indutores e capacitores, os filtros podem ser construídos de maneira a permitir qualquer característica de seleção de frequência.

Filtro Passa-Baixa

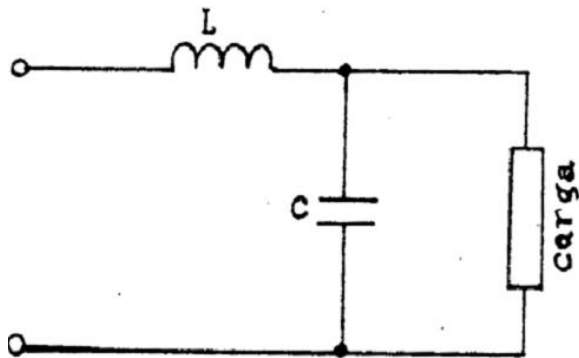
A figura 1-63 ilustra um filtro passa-baixa. Na entrada, as altas frequências encontram uma reatância indutiva relativamente elevada em L e uma baixa reatância capacitiva em C. Assim, as altas frequências são detidas por L e postas em curto circuito, por C. As frequências baixas encontram fraca oposição em L e alta oposição em C.

Por conseguinte, as baixas frequências passam da entrada para a saída.

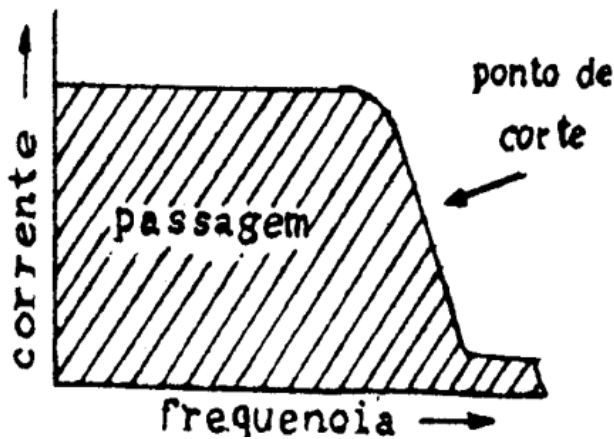
Portanto, um filtro passa-baixa destina-se a conduzir todas as frequências abaixo de uma frequência crítica pré-determinada ou frequência de corte e a reduzir ou atenuar consideravelmente as correntes de todas as frequências acima desta frequência.

Nesse filtro passará também a frequência que se encontra no ponto de corte.

Na figura 1-64 vemos o gráfico característico de seu ponto de corte.



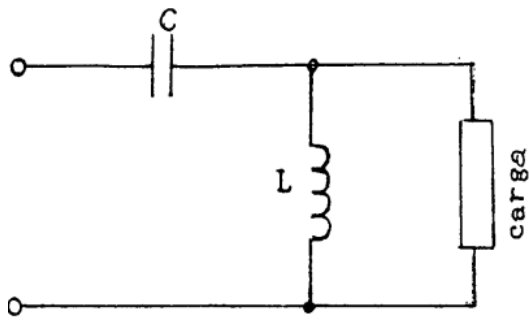
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-63



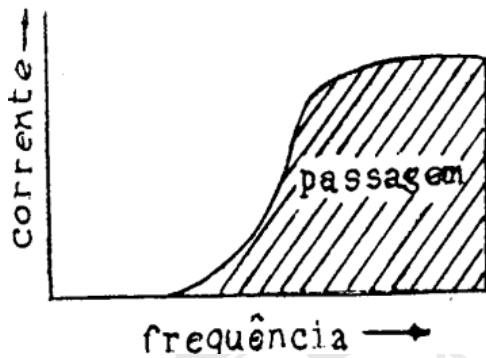
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-64

Filtro Passa-alta

Na figura 1-65, temos um filtro passa-alta. As baixas frequências deparam com uma reatância capacitiva relativamente alta em C e uma reatância indutiva baixa em L. As altas frequências encontram diminuta oposição em C e alta oposição em L. Por conseguinte, as altas frequências passam da entrada para a saída. Portanto, um filtro desse tipo destina-se a deixar passar correntes de todas as frequências acima do ponto de corte e atenuar todas as frequências abaixo desse ponto. Neste filtro passará também a frequência que se encontra no ponto de corte. Na figura 1-66, vemos o gráfico característico de seu ponto de corte. Para melhor a ação seletiva dos filtros passa-alta e passa-baixa, eles são projetados com duas ou mais secções.



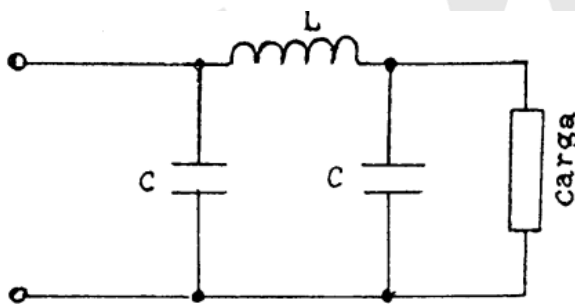
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-65



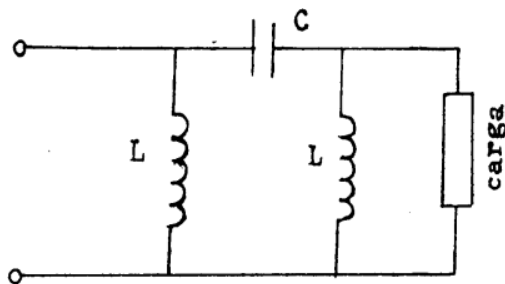
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-66

As figuras 1-67 e 1-68 mostram respectivamente filtros passa-baixa e passa-alta e do tipo "π", assim designados por causa de sua semelhança com a letra pi.

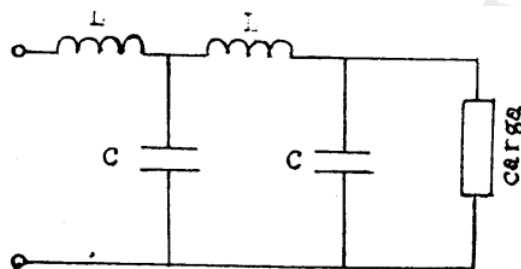
Os elementos mais perto da entrada caracterizam o filtro. Assim, as figuras 1-69 e 1-70, mostram respectivamente, filtros passa-baixa com entrada a indutor e passa-alta com entrada a capacitor. Todavia, para que estes filtros possam desempenhar satisfatoriamente suas funções, os componentes reativos, devem ser iguais, ou seja: $C_1 = C_2$ e $L_1 = L_2$



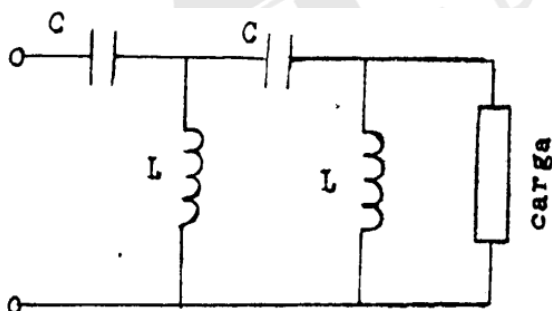
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-67



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-68



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-69



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-70

Filtros de Circuitos Sintonizados

Os circuitos ressonantes (sintonizados) possuem características que os tornam ideais para filtros, quando se deseja grande seletividade.

O circuito ressonante em série oferece baixa impedância à corrente de frequência em que está sintonizado e uma impedância relativamente grande às correntes das demais frequências.

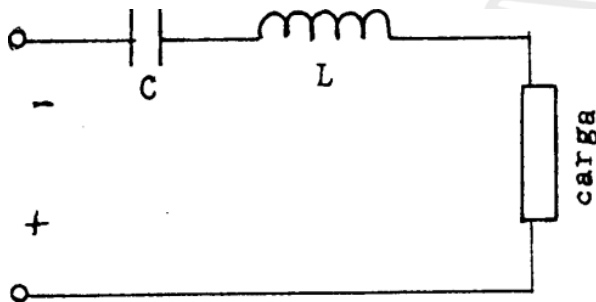
O circuito ressonante em paralelo oferece uma impedância muito grande à corrente de sua frequência ressonante e uma impedância relativamente baixa às outras.

Filtro Passa-Faixa

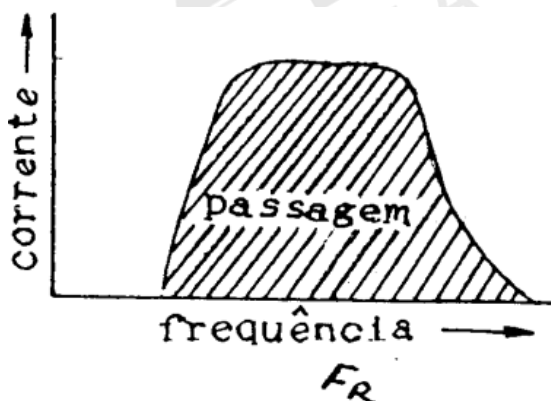
Os filtros passa-faixa ou passa-banda destina-se a deixar passar correntes dentro dos limites de uma faixa contínua, limitada por uma alta e por uma baixa frequência de corte e para reduzir ou atenuar todas as frequências acima e abaixo desta faixa.

Na figura 1-71, utiliza-se um circuito ressonante em série como filtro passa-faixa.

Na figura 1-72 vemos o gráfico que ilustra a faixa de frequência desejada.



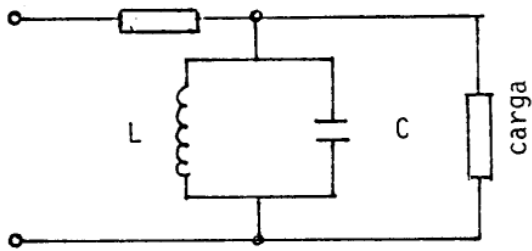
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-71



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
Figura 1-72

Os circuitos sintonizados em série oferecem dentro dessa faixa, uma pequena impedância às correntes dessas frequências e fora dela uma alta impedância. Assim, as correntes dessas frequências desejadas dentro da faixa circularão pelo circuito sem serem afetadas, mas as correntes de frequências indesejadas, isto é, fora da faixa, encontrarão grande impedância e não poderão passar.

Na figura 1-73, temos um circuito ressonante em paralelo como filtro passa-faixa.

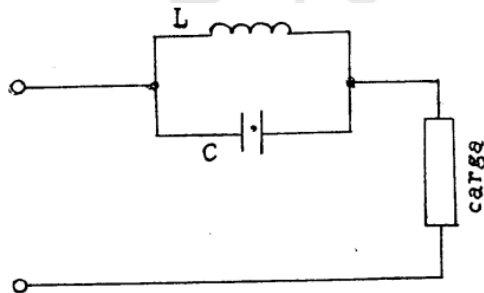


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-73

Os circuitos sintonizados em paralelo oferecem, dentro dessa faixa, uma alta impedância às correntes dessas frequências e fora dela uma baixa impedância.

De modo que as correntes das frequências fora da faixa serão desviadas pelo tanque, ao passo que as correntes das frequências dentro da faixa circularão pelo circuito sem serem afetadas pelo tanque.

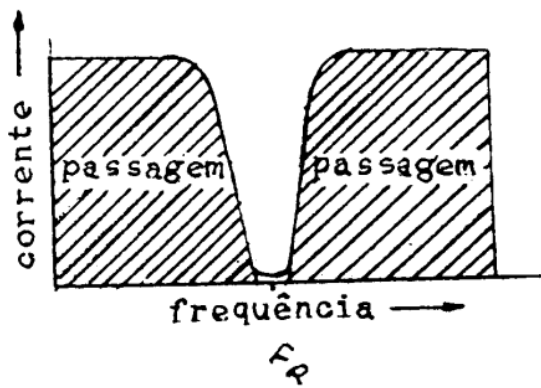
Filtro Corta-Faixa



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-74

Os filtros corta-faixa são destinados a suprimir as correntes de todas as frequências dentro de uma faixa contínua limitada por duas frequências de corte, uma mais alta e outra mais baixa, e a deixar passar todas as frequências acima e abaixo dessa faixa.

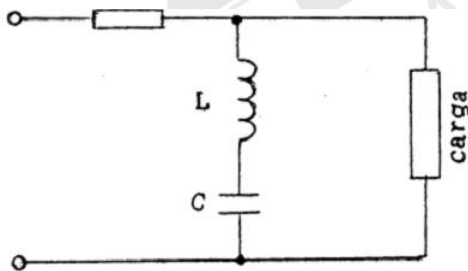
Na figura 1-74, temos um circuito ressonante em paralelo com filtro corta-faixa e, na figura 1-75, temos o seu gráfico característico.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-75

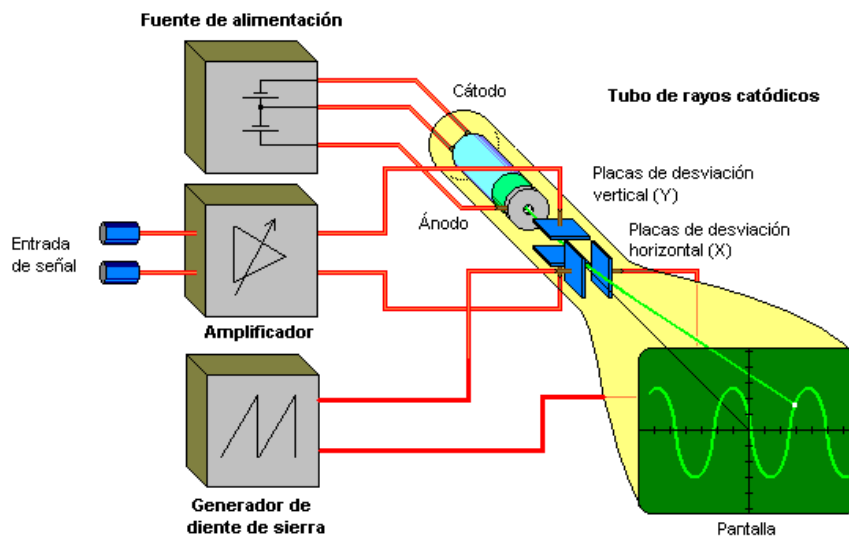
O circuito ressonante em paralelo é sintonizado na frequência do sinal que não se deseja. Logo, o filtro apresenta alta impedância às correntes dessa frequência e permite a passagem de todas as outras frequências.

A figura 1-76 ilustra um circuito ressonante em série como filtro corta-faixa.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional
 Figura 1-76

O circuito ressonante em série é sintonizado também, na frequência do sinal indesejado, e estas correntes indesejadas serão eficazmente desviadas, geralmente, para a terra. Porém, as demais frequências não serão afetadas.



Fonte: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/Osciloscopio.png>

1.11 OSCILOSCÓPIO

O osciloscópio é considerado um instrumento básico de teste em oficinas e na indústria, assim como em laboratórios de pesquisas e desenvolvimento de projetos eletrônicos.

O osciloscópio permite ao técnico ou engenheiro observar tanto o valor como a forma do sinal em qualquer ponto de um circuito eletrônico. Suas principais aplicações são:

- Medições de valores de: potência, tensão, ângulo de fase etc.
- Comparação entre uma frequência desconhecida e uma frequência padrão, determinando assim o valor desconhecido.

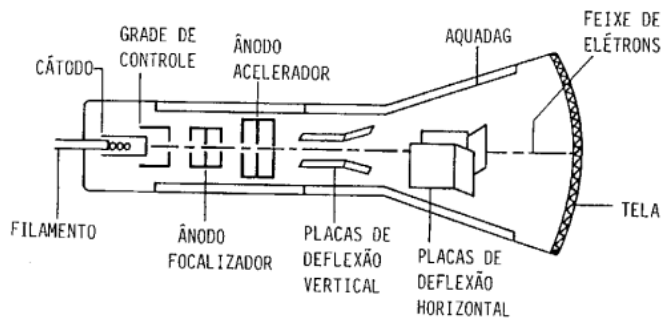
O osciloscópio é um instrumento que consiste basicamente de um tubo de raios catódicos e de circuitos ampliadores auxiliares.

1.12 TUBO DE RAIOS CATÓDICOS

O tubo de raios catódicos (TRC) é um tubo de vidro projetado especialmente para medir fenômenos elétricos que não podem ser medidos por outros meios.

O tubo de raios catódicos não é só a parte principal do osciloscópio como também é amplamente usado nos equipamentos de radar para observação visual das informações obtidas pelo receptor deste.

Atualmente o TRC é largamente difundido podendo ser encontrado em equipamentos de eletromedicina, terminais de vídeo de microcomputadores etc.



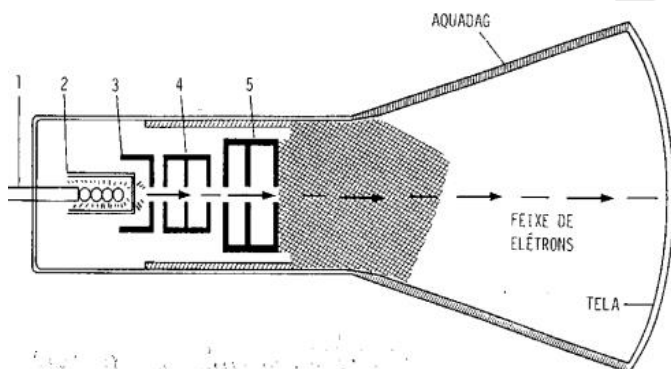
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-77 Tubo de raios catódicos

Os elementos de operação do tubo de raios catódicos estão encerrados em seu interior que contém um alto vácuo a fim de preservar o filamento e permitir que o feixe de elétrons seja bem definido.

Canhão Eletrônico

A parte mais importante do TRC é o canhão eletrônico, que está situado em um de seus extremos e que tem por finalidade projetar um feixe de elétrons de um extremo a outro do tubo. Constituem o que denominamos "raio catódico". O canhão eletrônico consiste de um filamento, um cátodo, uma grade de controle, um ânodo focalizador (1º ânodo) e um ânodo acelerador (2º ânodo). Esses elementos são mostrados na figura 1-78.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-78 Canhão eletrônico

As conexões com os diversos elementos são efetuadas por meio de pinos que estão na base do tubo. Em muitos casos, o cátodo está ligado internamente o filamento.

Os filamentos são aquecidos geralmente por CA, aplicada por um transformador de filamento, separado.

O cátodo é um cilindro de níquel cujo extremo está coberto com óxido de bário e estrôncio, de maneira que quando aquecido emite elétrons livremente na direção desejada. O ânodo acelerador também é um cilindro. Em seu interior há um diafragma que tem uma abertura em seu centro. Como o ânodo acelerador é altamente positivo, atrairá os elétrons emitidos pelo cátodo.

As tensões aplicadas ao ânodo acelerador variam desde 250V até 10.000 V. Esta alta tensão faz com que o feixe de elétrons (raio catódico) adquira uma alta velocidade. Embora a maioria dos elétrons seja atraída e capturada pelo ânodo de aceleração, muitos podem passar através da abertura que existe no diagrama do tubo.

A tela do TRC tem por finalidade transformar a energia cinética do elétron em energia luminosa. A tela é composta de uma substância semitransparente, conhecida como fósforo, e está situada na parte interior do tubo. Quando o feixe de elétrons atinge a tela, esta emite a luz cuja cor depende da composição do fósforo.

O revestimento mais comumente usado é o silicato de zinco que emite luz verde. Uma consideração importante é a persistência que indica a quantidade de tempo em que a tela continuará incandescente, depois de ser atingida pelo feixe.

Pode-se notar que se deve proporcionar algum meio de eliminar os elétrons da tela; do contrário, a carga negativa na tela aumentaria a tal que ponto que não chegariam mais elétrons até ela.

O método usado para eliminar tais elétrons, é colocar um revestimento de condutor de AQUADAG, ao longo de toda parte interior do tubo, com exceção da tela, e conectá-la ao cátodo. A emissão de elétrons secundários pode assumir efeitos graves e, portanto, é coletada pelo revestimento de AQUADAG e devolvida ao cátodo.

O cátodo é circundado pela grade de controle, a qual é mantida a um potencial mais negativo que este e serve para controlar o fluxo de elétrons que saem do cátodo.

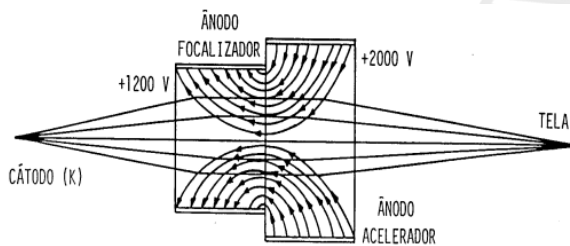
A intensidade do brilho na tela é regulada pelo valor da tensão negativa de polarização aplicada à grade de controle, quanto mais negativa for a tensão de polarização, menos intenso será o brilho.

Se a grade se tornar suficientemente negativa, não haverá mais fluxo de elétrons para a tela e conseqüentemente, deixará de haver brilho. O ajuste do potencial é feito pelo controle de intensidade.

Se não houver um meio para proporcionar o foco, os elétrons serão emitidos, mas devido a repulsão mútua se difundirão e golpearão a tela como uma massa dispersa que terá aspecto embaçado.

Os ânodos de focalização e aceleração agem como uma espécie de lente que concentra o feixe e torna nítida a imagem na tela.

O ânodo de focalização tem um potencial de 1200V e o ânodo de aceleração tem 2.000V. Por causa dessa diferença de 800V, existe um campo eletrostático muito forte na região entre os dois ânodos. A intensidade desse campo pode ser variada, mudando-se as tensões do ânodo focalizador.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-79 Processo de focalização

O campo eletrostático é representado pelas linhas curvas.

Os elétrons que passam por este campo sofrerão a ação de uma força que tentará fazê-los seguir as linhas de força.

Um elétron que entra na lente tem sobre si duas forças atuantes: uma força que é motivada pela aceleração dada pela atração do ânodo acelerador e outra motivada pelo campo eletrostático que existe entre os ânodos. A tendência do elétron é desviar-se, e em lugar de se deslocar em linha reta, desloca-se em uma direção tangencial às linhas de força.

Esta curvatura por sua vez depende da diferença de potencial que existe entre os dois ânodos. Todos os elétrons que passam pela lente tendem a unir-se em um ponto chamado ponto focal.

Variando-se o potencial aplicado ao ânodo focalizador, pode-se conseguir uma focalização correta na tela.

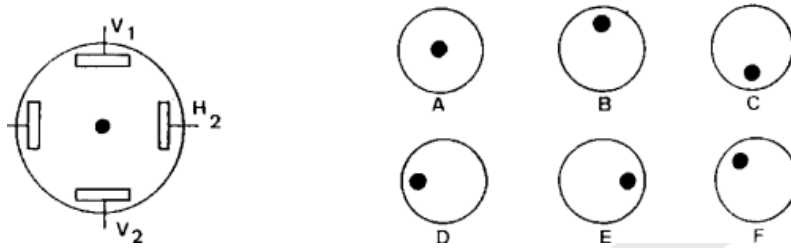
Deflexão Vertical e Horizontal

Se o TRC não possuísse outros elementos além do canhão eletrônico e a tela, o feixe de elétrons atingiria o centro desta e produziria um ponto luminoso.

Para movimentar o feixe e colocar o ponto luminoso em várias partes da tela, utiliza-se sistemas de deflexão ou de desvio vertical e horizontal.

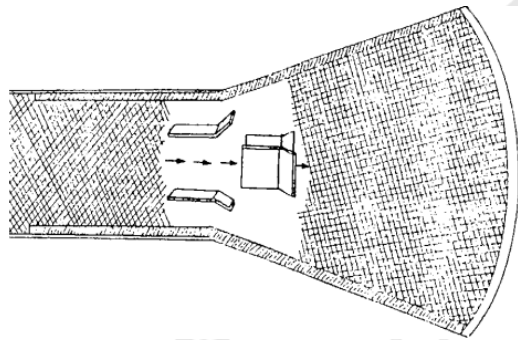
Existem dois tipos de deflexão ou desvio: o eletrostático e o eletromagnético.

Desvio Eletrostático



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-80 Placas de desvio eletrostático



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-81 Disposição das placas

O desvio eletrostático utiliza dois pares de placas de desvio, colocadas em ângulo reto entre si e o feixe de elétrons passa entre elas, como mostrado na figura 1-80.

A figura 1-81 mostra a vista de topo do TRC mostrando a disposição das placas defletoras ao feixe eletrônico, que é visto como um ponto no centro.

Se não for aplicada uma tensão externa a nenhum par de placas, o feixe permanecerá no centro da tela produzindo um ponto luminoso.

Se a placa vertical V1 se torna positiva, em relação a V2, o feixe será atraído em direção a V1 e o ponto luminoso consequentemente também subirá.

Se a placa vertical V1 é negativa com respeito a V2, o ponto se desloca para baixo. Estas três situações são ilustradas na figura 1-80 A, B e C. As três ilustrações pressupõem que não exista tensão alguma nas placas defletoras horizontais (H1 e H2).

Se as placas verticais estiverem a zero volts e a placa horizontal H1 foi tornada positiva em relação a H2, o feixe será atraído em direção a H1 e o ponto se moverá para a esquerda da tela. Finalmente se a placa H2 é positiva em relação a H1, o ponto será desviado para a direita da tela. Estas três situações são mostradas na figura 1-80 D, E e F.

Em qualquer caso, a distância em que o ponto é afastado do centro da tela é diretamente proporcional à tensão às placas defletoras.

Se forem aplicadas tensões positivas e iguais, simultaneamente às placas V1 e H1, o feixe será atraído para cima e para a esquerda, por forças idênticas.

O resultado é um desvio do ponto luminoso para uma posição de 45° do centro da tela. Outras combinações de tensões aplicadas às placas defletoras farão com que o ponto se desloque para posições diferentes da tela do TRC.

Até agora só estudamos os efeitos de tensões contínuas (CC) aplicadas nas placas defletoras verticais e horizontais.

A corrente alternada, ao contrário da corrente contínua, está variando constantemente de polaridade e valor.

Assim ao ser aplicada uma CA às placas defletoras, o ponto luminoso se moverá rapidamente para várias posições na tela, à proporção que a tensão varia de polaridade e valor. Isto ocorre da seguinte maneira:

Se uma CA é aplicada às duas placas de deflexão vertical (V1 e V2), o ponto luminoso se movimentará para cima e para baixo. Se a frequência da tensão aplicada for baixa, talvez seja possível ver o ponto subir e descer.

Dois fatores, porém não permitem que isso ocorra. A inércia do olho humano e também a reação da camada do fósforo que reveste o interior da tela do TRC.

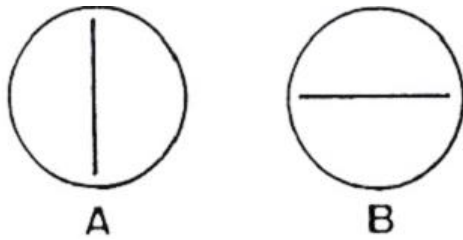
Ambos os fatores fazem com que se tenha a sensação de persistência luminosa na tela, em forma de um traço luminoso.

Se a placa V1 for polarizada positiva em relação a V2, durante o primeiro semiciclo positivo, o ponto luminoso se movimentará para cima e novamente para baixo, até retornar ao centro. O semiciclo negativo movimentará o ponto luminoso para baixo e novamente para cima, até retornar ao centro.

A distância que o ponto se afasta do centro para cima e do centro para baixo, depende do valor da tensão de pico.

Em virtude da velocidade com que se move o ponto luminoso, associado aos fatores de inércia do olho humano e persistência luminosa da tela do TRC, fazem com que aquele ponto surja como um traço reto.

Quando uma CA é aplicada às placas horizontais H1 e H2, teremos, pelas mesmas razões já explicadas, um traço horizontal. Este processo é ilustrado na figura 1-82 A e B.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-82 Aplicação de CA

Se forem aplicadas tensões alternadas iguais, de maneira que V1 e H1 tenham a mesma polaridade, assim como V2 e H2, teremos um traço na tela em uma posição de 45° entre a vertical e a horizontal.

Porém se V1 e H2 forem polarizados igualmente, assim como V2 e H1, o traço ficará também a 45°, mas em direção invertida. Este processo descrito está ilustrado na figura 1-83.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

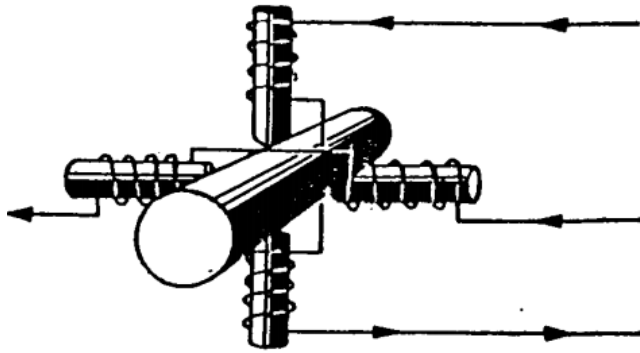
Figura 1-83 Aplicação de tensões alternadas iguais

Desvio Eletromagnético

O desvio eletromagnético é usado onde não é possível obter uma tensão adequada para o desvio eletrostático.

O desvio eletromagnético deve-se ao campo magnético estabelecido dentro do tubo de raios catódicos pelo conjunto de bobinas que estão colocadas ao redor do tubo. O desvio eletromagnético é mais sensível do que o eletrostático.

As bobinas estão colocadas proporcionalmente à corrente, como é mostrado na figura 1-84. O deslocamento do feixe de elétrons é afastado pelo campo magnético da mesma forma que é afetado pelo campo eletrostático.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

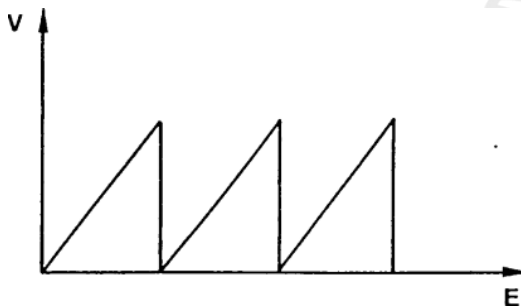
Figura 1-84 Conjunto de bobinas

1.13 CIRCUITO GERADOR DE BASE DE TEMPO

Para reproduzir as formas de onda que surgem na tela de um osciloscópio é necessário que este tenha, além do TRC, um circuito gerador de base de tempo, também conhecido como gerador dente de serra.

Sua finalidade é fazer com que o feixe eletrônico se mova da esquerda para a direita da tela a uma velocidade uniforme e logo regresse rapidamente ao lado esquerdo. Este movimento é chamado de varredura linear.

Para se dar a varredura no feixe eletrônico, o gerador produz uma tensão que cresce uniformemente de zero até um certo ponto e decai rapidamente ao nível zero, como mostra a figura 1-85.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-85 Tensão dente de serra

Este perfil é denominado dente de serra ou triangular. Esta tensão é aplicada às placas de deflexão horizontal.

O aumento gradual de tensão faz com que a placa H1 se torne cada vez mais negativa e H2 cada vez mais positiva.

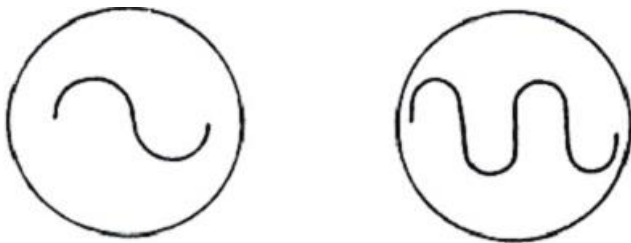
Assim, o feixe eletrônico vai se deslocando da esquerda para a direita com velocidade uniforme. A queda rápida da tensão faz com que o feixe regresse em muito pouco tempo, e esse tempo é denominado tempo de retorno.

Dependendo da frequência da tensão de varredura teremos na tela um traço horizontal. Se bem que uma tensão alternada aplicada às placas horizontais produza também um traço horizontal, esta não é adequada com base de tempo linear porque não possui as características desejáveis de uma tensão que se eleva de zero ao máximo de modo linear e volta a zero quase instantaneamente.

Para se examinar qualquer forma de onda por intermédio do osciloscópio, é necessário que apliquemos a tensão que se deseja analisar em suas placas de deflexão vertical e mantenhamos a tensão que se deseja analisar em suas placas de deflexão vertical e mantenhamos a tensão de dente de serra em suas placas horizontais. Isto fará com que o feixe eletrônico se desloque para cima ou para baixo e ao mesmo tempo para frente. Quando a frequência da tensão de varredura for igual à frequência da tensão aplicada nas suas placas verticais, surge um ciclo na tela do TRC.

Diz-se que a relação da frequência entre a tensão de varredura e o sinal é de 1:1 (um para um).

Quando a frequência da tensão de varredura é metade da frequência do sinal aplicado, teremos dois ciclos na tela do TRC, conforme mostra a figura 1-86.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

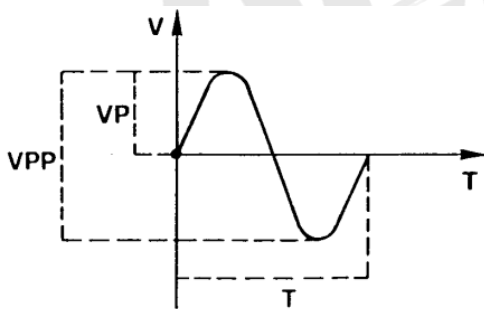
Figura 1-86

Portanto, para se calcular o número de ciclos que aparecem na tela de um osciloscópio devemos empregar a seguinte equação:

$$\text{Número de ciclos: } \frac{\text{Freq. aplicada}}{\text{Freq. de varredura}}$$

1.14 FUNÇÕES BÁSICAS DOS CONTROLES

- a) Intensidade: varia a quantidade de elétrons que chega à tela.
- b) Focalização: os ânodos ajustam a focalização do feixe na tela por meio deste comando.
- c) Posição vertical e horizontal: desloca o feixe para cima, para baixo, para esquerda ou para direita respectivamente.
- d) Entrada vertical: nessa entrada aplicam-se os sinais a serem medidos pelo aparelho.
- e) Entrada horizontal: normalmente às placas horizontais está aplicado um sinal periódico gerado internamente no osciloscópio, o sinal dente da serra, que tem uma velocidade de varredura constante na tela e faz com que o feixe vá de um lado ao outro e o regresso não seja observado. Injetando-se nessa entrada um sinal estaremos modificando a varredura; este procedimento é empregado em alguns casos, como na medida de fase entre dois sinais.
- f) Atenuador vertical: O sinal aplicado à entrada vertical antes de ser levado às placas defletoras poderá ter sua amplitude reduzida de múltiplos de 10.
- g) Ganho vertical: permite variar de maneira contínua a amplitude do sinal, antes que ele seja levado às placas defletoras.
- h) Ganho horizontal: permite variar a amplitude ao longo do eixo X.
- i) Seletor de varredura: permite a variação discreta na frequência da varredura interna.
- j) Varredura externa: usada quando pretende-se atuar externamente nas placas horizontais.
- k) Seletor de sincronismo: o sinal estará sincronizado quando tivermos uma configuração estável do mesmo na tela, o que corresponde a um sincronismo de varredura com o sinal aplicado às placas de deflexão vertical. O seletor deverá ser colocado na posição LINHA para o sincronismo com a rede; INTERNO para a varredura interna e, EXTERNO para a varredura externa de um sinal colocado na entrada horizontal.
- l) Chave de sincronismo: uma vez escolhida a referência de sincronismo, a chave de sincronismo permite o ajuste desejado.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 1-87 Exemplo de leitura com o osciloscópio

Onde:

V_p = valor de pico de tensão

V_{pp} = Valor pico a pico da tensão

T = Período do sinal.



Referência Bibliográfica

BRASIL. IAC – Instituto de Aviação Civil. Divisão de Instrução Profissional Matérias Básicas, tradução do AC 65-9A do FAA (Airframe & Powerplant Mechanics-General Handbook). Edição Revisada 2002.



No Próximo Módulo

Caro aluno,

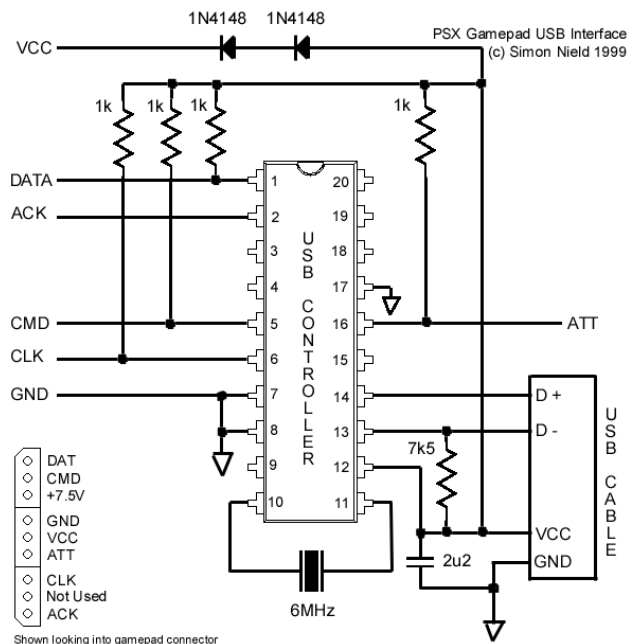
Tratamos aqui dos circuitos reativos e dos osciloscópios. Espero tenha assimilado bem estes conhecimentos.

No próximo módulo trataremos de análise de circuitos, semicondutores e fontes de força eletrônica.

Vamos em frente!



Anotações



Fonte: <http://www.zen35383.zen.co.uk/stnield/usb2psx.gif>

MÓDULO II

REQUISITOS PARA ANÁLISE DE CIRCUITOS

DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES

FONTES DE FORÇA ELETRÔNICA

INTRODUÇÃO

Caro aluno,

Continuando nossa viagem pelo mundo da eletrônica. Veremos neste módulo, análise de circuitos, que é o estudo da passagem da corrente elétrica pelos elementos que compõem um circuito elétrico; dispositivos semicondutores que são sólidos geralmente cristalinos de condutividade elétrica intermediária entre condutores e isolantes.

Os semicondutores são, quando puros e cristalinos, a temperaturas muito baixas, excelentes isolantes.

Ao contrário do comportamento observado nos metais, contudo, a condutividade dos semicondutores puros (intrínsecos) aumenta significativamente com a temperatura. Usualmente, à temperatura ambiente, exibem ainda baixa condutividade, sendo por tal

bons isolantes quando em condições de manuseio. Tornam-se condutores se consideravelmente aquecidos, contudo; e fontes de força eletrônica. Os circuitos que usam transistores, diodos ou circuitos integrados geralmente precisam de uma fonte de força para sua operação. Existem basicamente três tipos de fonte de força: Pilhas, baterias e Geradores

Vamos juntos descortinar estes conhecimentos.

Bons estudos...

2.1 REQUISITOS PARA ANÁLISE DE CIRCUITOS

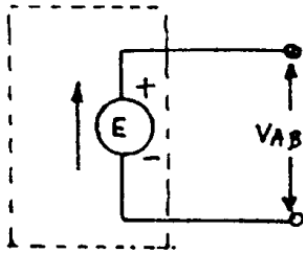
O estudo referente à análise de circuitos sob um ponto de vista completo, normalmente envolve cálculos complicados e são muitos os livros que podem ser encontrados tratando desse assunto.

Aqui, abordaremos a análise de alguns circuitos que empregam somente corrente contínua, onde as impedâncias são essencialmente resistências lineares e as tensões são constantes. Para o estudo de circuitos elétricos, dois objetivos principais são importantes: um, é determinar a impedância (ou resistência, para circuitos de CC) de um dado circuito, entre dois pontos quaisquer; outro é determinar a corrente ou tensão através de um elemento qualquer do circuito, quando uma tensão é aplicada a outra parte do referido circuito.

2.2 FONTES OU GERADORES DE TENSÃO CONSTANTE

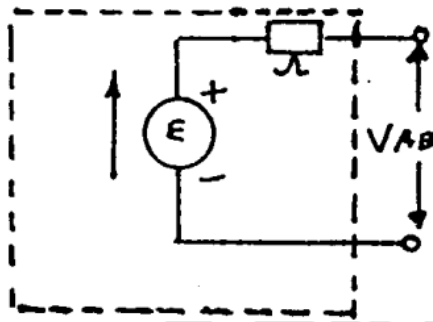
Uma fonte de tensão é, na verdade, um gerador de tensão que possui uma resistência interna **muito baixa**, entregando em sua saída um valor de tensão constante, para uma extensa gama de valores de carga a ele conectado.

Existe o gerador de tensão ideal e o gerador de tensão real. No primeiro caso, a diferença de potencial é mantida constante, qualquer que seja a carga à qual esteja ligado. Um gerador de tensão ideal, na prática, não existe, pois todo gerador possui uma resistência interna fazendo, com que a tensão nos seus terminais dependa da carga, atuando, portanto, com um gerador de tensão real. Nas figuras 2-1 e 2-2 ilustramos esquematicamente os dois tipos de geradores de tensão acima mencionados.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-1 Gerador de tensão ideal



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-2 Gerador de tensão real

Nota-se, em ambos os circuitos, uma seta colocada ao lado da f. e. m. A posição da seta é para indicar que, caso a fonte atuasse sozinha, provocaria o movimento de cargas positivas no sentido mostrado, indicando desta forma, o sentido da f. e. m. do gerador.

São vários os tipos de geradores de tensão e poderíamos citar, como exemplos típicos desses geradores encontrados na prática, as fontes de C C reguladas, uma bateria ou circuitos seguidores de emissor etc.

Os geradores de tensão constante têm grandes aplicações em circuitos onde desejamos que a tensão de saída seja estável ou constante. É o caso, por exemplo, dos reguladores de tensão eletrônicos, cuja finalidade é manter uma tensão constante nos seus terminais de saída, embora varie a tensão de entrada, ou o valor da carga.

Ocorre, entretanto, que geradores de tensão constante, a exemplo dos reguladores de tensão eletrônicos, são constituídos de dispositivos semicondutores, tais como: diodos comuns, diodos zener e transistores, isto sem falar de vários dispositivos totalmente integrados, os chamados CI (circuitos integrados). Portanto, uma análise, agora, destes circuitos, certamente estaria fora dos nossos objetivos iniciais. Circuitos dessa natureza poderão ser abordados, quando tivermos alguns conhecimentos básicos de dispositivos semicondutores, numa fase mais adiantada do nosso curso de eletrônica.

No nosso estudo referente à análise de circuitos, faremos utilização de um dispositivo gerador de tensão constante, chamado "Equivalente de Thévenin", muito empregado na resolução de circuitos considerados complexos.

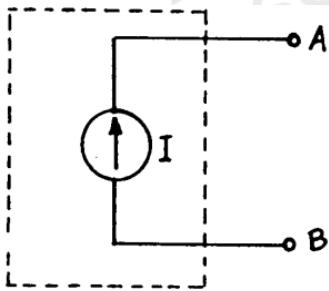
Este dispositivo eletrônico representa o circuito equivalente de qualquer circuito eletrônico, que tenha características de manter uma tensão constante de saída.

2.3 FONTES OU GERADORES DE CORRENTE CONSTANTE

Podemos definir fontes de corrente constante como sendo dispositivos capazes de fornecer uma corrente de valor constante a qualquer carga, desde um circuito aberto (carga infinita) até um curto-circuito (resistência de carga zero).

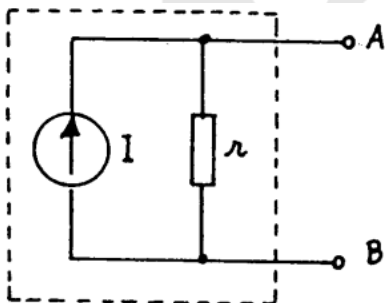
Um gerador de corrente constante ideal, na prática, não existe. O que existe é o gerador de corrente real, possuindo certas limitações, e sendo capaz de manter constante a corrente nos terminais da carga, dentro de uma faixa de variações desta referida carga.

As figuras 2-3 e 2-4 ilustram os dois tipos de geradores, que acabamos de mencionar. Naturalmente, trata-se de uma representação simbólica.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-3 Gerador de corrente ideal

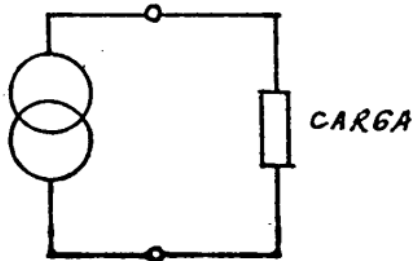


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-4 Gerador de corrente real

O gerador de corrente ideal teria uma altíssima resistência interna (idealmente infinita). Um gerador de corrente real compõe-se de um gerador ideal em paralelo com sua resistência interna.

Outro símbolo muito empregado para as fontes de corrente constante é o da figura 2-5.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

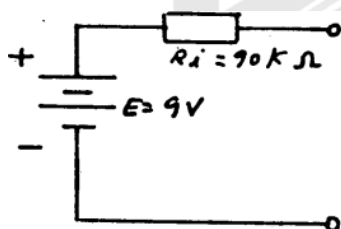
Figura 2-5 Representação simbólica de um gerador de corrente real

Um gerador de corrente constante prático é, portanto, aquele capaz de estabilizar a corrente em uma carga que varia dentro de uma grande faixa de valores.

Queremos chamar a atenção dos nossos leitores, para o seguinte: embora o assunto em pauta não se trate propriamente de geradores de corrente constante e geradores de tensão constante, achamos por bem, dar alguns conceitos básicos, os quais julgamos de grande utilidade para que, juntando aos demais assuntos que se seguirão, nos deem uma melhor ideia daquilo que pretendemos expor.

Na prática, os geradores de corrente podem assumir diversas configurações. O que vemos aqui, entretanto, serão alguns circuitos de caráter puramente didáticos. Ocorre que, como no caso dos geradores de tensão, os geradores de corrente constante, na prática, envolvem dispositivos semicondutores, tais como: transistores, diodos, zener, etc. Uma análise, agora, destes circuitos, estaria fora de nossas cogitações iniciais. O leitor poderá ter uma noção bem melhor de fontes de corrente constante (fontes práticas), no assunto referente a dispositivos semicondutores.

Conhecemos pelo circuito da figura 2-6.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

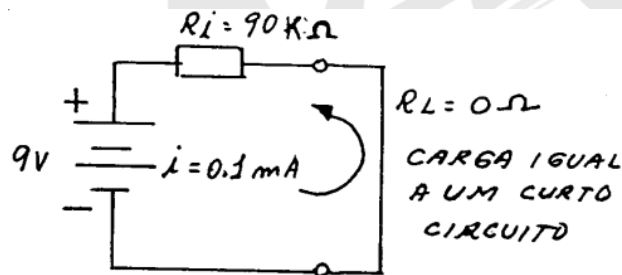
Figura 2-6 Circuito básico de um gerador de corrente constante

O circuito da figura 2-6 é constituído de um gerador de tensão, que tem conectado um resistor em série. Este dispositivo se aproxima relativamente bem de um gerador de corrente constante.

A bateria apresenta uma resistência interna muito baixa. Nós levamos em conta o valor dessa resistência interna.

Mas é necessário levarmos em conta a resistência interna do conjunto, ou seja, do nosso gerador. Consideraremos essa resistência, a título de exemplo, como sendo igual a 90 KΩ ($R_i = 90K\Omega$).

Agora, vamos supor que uma carga foi ligada ao nosso gerador. Esta carga é representada por R_L , que neste exemplo assume um valor inicial de 0 (zero) Ω, conforme nos mostra o circuito da figura 2-7.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

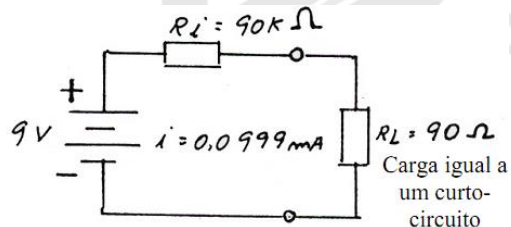
Figura 2-7 Circuito simplificado de um gerador de corrente constante, com a saída em curto-circuito.

Conforme vemos na figura 2-7, o valor da corrente que circula na carga, pode facilmente ser obtido pela lei de OHM: $i = \frac{9V}{90K\Omega} = 0,1mA$.

Agora, substituamos R_L (0 Ω), por que uma R_L de 90 Ω. Aplicando a lei de OHM, teremos:

$$i = \frac{90v}{90K\Omega + 90\Omega}$$

Observemos o circuito da figura 2-8.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-8 Gerador de corrente constante $R_L = 90\Omega$

Calculando, então, a corrente, temos $i = 0,0999 \text{ mA}$. Este valor mudou pouco, em relação ao anterior ($0,1 \text{ mA}$).

Para fins práticos, dizemos que a corrente praticamente se manteve constante.

Aumentemos novamente nossa resistência de carga, agora de 10 de vezes ($R_L = 9V \ 900 \ \Omega$). Aplicando a fórmula $i = \frac{9V}{90K\Omega + 900\Omega}$ teremos $i \ 0,099 \text{ mA}$, que também é um valor bem próximo de $0,1 \text{ mA}$.

Se quisermos calcular o erro quando utilizarmos a R_L de $90 \ \Omega$ a de $900 \ \Omega$, em relação à corrente obtida para a condição de curto-circuito, é só utilizarmos a seguinte fórmula:

$$\% \text{ Erro} = \frac{I_{\text{curto}} - I_{\text{carga}}}{I_{\text{curto}}} \times 100$$

Para fixarmos melhor esta nossa sequência de raciocínio, observemos a tabela da figura 2-9.

RI	RL	I CARGA	ERRO
90K Ω	Curto	0,1 mA	0 %
90K Ω	90 Ω	0,0999 mA	0,1%
90K Ω	900 Ω	0,099 mA	1,0%
90K Ω	9000 Ω	0,0909 mA	9,1%

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-9 Percentagem de erro da corrente de carga, em função de R_L e em relação a corrente de curto-circuito.

Se usarmos a fórmula, seguindo os dados da tabela da figura 2-9, vamos notar que, no caso do $90 \ \Omega$, o erro é de $0,1\%$ enquanto que com R_L igual a $900 \ \Omega$ temos 1% de erro. Entretanto, se aumentarmos a carga para $9k \ \Omega$, a corrente será $0,0909 \text{ mA}$, que corresponde a um erro de $9,1\%$.

É importante observarmos que com uma R_L de até $900 \ \Omega$, seu valor é bem pequeno quando comparado ao valor de R_i ($90 \text{ k} \ \Omega$). Neste caso, a variação de corrente entregue pelo gerador se situa em 1% .

Com isso, podemos facilmente deduzir que um bom critério para se obter uma fonte de corrente constante, é fazer com que sua resistência interna seja, no mínimo, 100 vezes o valor da maior carga a ser utilizada. Isto nos assegura um erro máximo de 1% .

É importante observarmos, aqui, que não é o valor absoluto da resistência interna do gerador, que irá qualificá-lo como um "bom" gerador de corrente, e sim sua resistência interna (R_i) comparada à resistência de carga R_L .

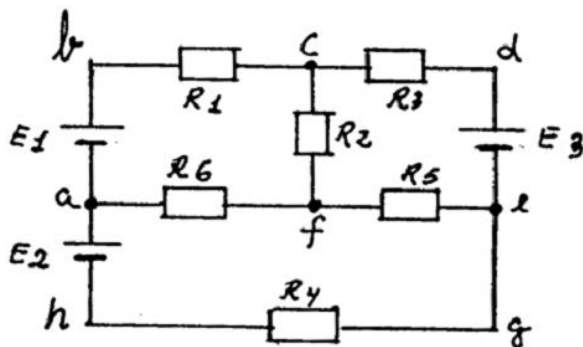
Ainda, com referência aos dados da tabela, podemos observar que, se quiséssemos utilizar uma $R_L = 9K \Omega$, teríamos que dispor de uma $R_i = 900 K\Omega$ m no mínimo. Entretanto, para que a corrente fosse mantida em 0,1 mA, necessitaríamos de uma fonte de 90 V, o que nos levaria a uma solução não muito prática.

Queremos lembrar, aqui aos nossos leitores, que qualquer circuito capaz de manter uma corrente constante, independentemente do valor da carga (dentro de certos limites) estará sendo representado por um circuito chamado "Equivalente de Norton".

Este será, portanto, nosso gerador de corrente constante. A exemplo do "Equivalente de Thévenin", o "Equivalente de Norton" encontra muita aplicação na resolução de circuitos considerados complexos, conforme veremos mais tarde nesse assunto referente a análise de circuitos.

2.4 ELEMENTOS DE CIRCUITOS

Denomina-se elemento de um circuito o menor componente individual, que é considerado na resolução de um problema. Tal elemento pode ser uma simples resistência, uma f. e. m., ou ainda um valor equivalente à associação de diversas resistências ou tensões. Na figura 2-10 temos uma representação esquemática para ilustrar os elementos de um circuito.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-10 Diagrama para ilustrar os elementos de um circuito

Na figura 2-10, E_1 , E_2 , E_3 , R_1 , R_2 , R_3 e R_4 são elementos do circuito. É importante ressaltarmos que E_1 , E_2 e E_3 podem representar uma simples pilha, um gerador, ou mesmo uma fonte eletrônica (um retificador, por exemplo).

Da mesma forma, R_1 , por exemplo, tanto pode ser um simples resistor, quanto a resistência à CC de um indutor, etc.

Terminologia Usual

Como propósito de facilitar a análise de circuitos elétricos, existem certos termos com os quais devemos nos familiarizar.

a) Rede ou Circuito

Dá-se o nome de rede a um conjunto de condutores, geradores e receptores ligados de uma maneira qualquer, ou seja, em série em triângulo, em paralelo, etc.

A figura 2-10 nos mostra um exemplo de uma rede ou circuito.

b) Nó de Intensidade ou Nó (ou ainda NODO)

Nó pode ser definido como a junção de três ou mais elementos componentes de uma rede. Se observarmos o circuito da figura 2-10, vamos notar que existem pontos comuns a diversos condutores, ou geradores, ou receptores. A exemplo temos os pontos *a*, *c*, e *e* *f*. Portanto, o Nó é o ponto de concorrência de três ou mais braços.

c) Braço ou Ramo

Qualquer porção de uma estrutura (de um circuito), ligando diretamente dois nós, sem passar através de um terceiro, chama-se **braço** ou **ramo**. Na figura 2-10, podemos observar que os elementos E1 e R1, por exemplo, constituem um ramo que une os nós *a* e *c*; da mesma forma, o elemento R2 forma o ramo que une os nós *c* e *f*. Em um **braço** ou **ramo**, todos os elementos que nele figuram estão em série. Neste circuito temos seis braços.

d) Laço de Circuito

Observando a figura 2-10, notamos um circuito fechado **a, b, c, f, a**, incluindo E1, R1, R2 e R6. Isto constitui exemplo do laço ou "loop". Desta forma podemos dizer que o laço é a combinação de todos os elementos formadores de um circuito fechado. Outros exemplos de laço: **abcdefa, fcdef**, etc.

e) Malha

Podemos dizer que a malha é o menor laço. A malha nada mais é do que um laço, que não pode ser subdividido em outros. São exemplos de malhas: **abcfa, fcdef e afegha**.

Portanto, a malha é todo circuito fechado que possa ser considerado dentro da rede, **que não pode ser dividido**.

2.5 TEOREMAS DAS ESTRUTURAS ELÉTRICAS

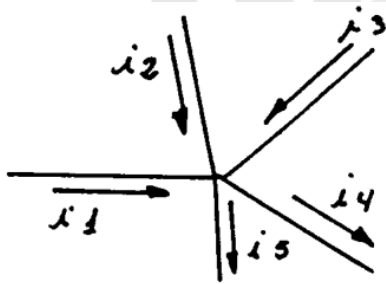
Os teoremas a serem abordados aqui, serão enumerados sem qualquer comprovação. Existem quatro teoremas largamente empregados na análise de circuitos, e que constituem a base para muitos outros teoremas existentes, São eles: Leis de Kirchoff, Teorema de Thévenin, Teorema de Norton e Teorema de Superposição.

a. Leis de Kirchoff

Fundamentalmente existem duas Leis de Kirchoff para o estudo das estruturas:

- a) Primeira Lei de Kirchoff ou Lei dos Nós "

"A soma das correntes que entram em um nó, é igual à soma das correntes que saem do nó". É o que nos ilustra a figura 2-11.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-11 Ilustração da primeira Lei de Kirchoff

Da mesma forma, é válido enunciar que: "a soma algébrica das correntes que entram e saem de um nó é nula". Então podemos escrever inicialmente, que:

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_4 + i_5$$

ou então:

$$i_1 + i_2 + i_3 - i_4 - i_5 = 0$$

- b) Segunda Lei de Kirchoff ou Lei das Malhas

Esta lei é relativa às tensões, podendo ser enunciada da seguinte maneira:

"Em qualquer circuito elétrico fechado, a soma algébrica das quedas de potencial deve ser igual à soma algébrica das elevações de potencial".

$$\underline{R} \cdot I \text{ (Queda de potencial)} = \underline{E} \text{ (Elevação de potencial)}$$

Em outras palavras: "a soma algébrica de todas as quedas de potencial e a f.e.m. devem ser iguais a zero". $R \times I - E = 0$

b. Aplicação das Leis de Kirchoff

Para aplicarmos as leis de Kirchoff aos circuitos elétricos, levamos em conta o sentido do fluxo de elétrons através desses circuitos. Em consequência usamos normalmente sentidos arbitrários de circulação, desde que não sejam evidentes os sentidos reais.

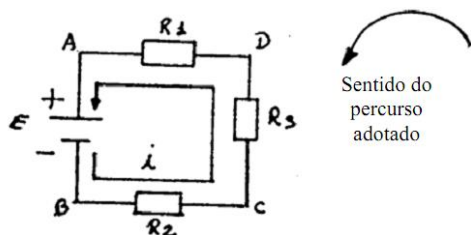
Devemos empregar, por exemplo, a lei das correntes ou lei dos nós, a fim de reduzirmos o número das correntes desconhecidas. Em seguida escrevemos uma equação de Kirchoff relativa à segunda lei, ou lei das malhas, para cada circuito fechado do conjunto e assim prosseguimos, escrevendo equações de modo que cada elemento do conjunto seja usado pelo menos uma vez em uma das equações. Deste modo, resolveremos as equações resultantes, determinando, em seguida, o valor de cada corrente.

De um modo geral, é possível prescrever várias regras que nos levem a escrever equações de tensão, ou mesmo de corrente, para qualquer circuito, todas conduzindo-nos a um resultado correto. Entretanto, para atender nossos objetivos, iremos nos limitar às seguintes regras:

- a) Uma rede contendo b ramos, necessita de b equações para a solução do problema, já que, para cada ramo há uma corrente.
- b) Começamos sempre aplicando inicialmente a lei dos nós.
- c) Se houver n nós aplicamos a primeira lei $n-1$ vezes, conseguindo $n-1$ equações independentes entre si.
- d) em virtude de serem necessárias b equações e a primeira lei ser utilizada $n-1$ vezes, podemos aplicar a segunda lei, $b-(n-1)$ vezes, ou seja, igual ao número de malhas.
- e) devemos atribuir, arbitrariamente, um sentido para a corrente em cada braço ou ramo do circuito.
- f) é necessário atribuímos, também, um sentido de percurso para cada malha.
- g) a força eletromotriz terá sinal positivo, desde que não se oponha ao sentido de percurso adotado, isto é, terá sinal positivo quando o sentido do percurso bater no polo positivo da bateria.
- h) quando um resistor for percorrido por uma corrente que tenha o mesmo sentido que aquele arbitrado para o percurso, o produto $I \times R$ será positivo. Em caso contrário, esse produto será negativo.
- i) se obtivermos um resultado negativo de corrente, isto significará que o sentido arbitrado inicialmente é oposto ao verdadeiro; entretanto, o valor numérico não se alterará.

(1) Exercícios de fixação

(a) Seja o circuito da figura 2-12 no qual queremos aplicar as leis de Kirchoff.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-12 Circuito para análise das Leis de Kirchoff

Observando o circuito da figura 2-12, vemos que se trata de um circuito bastante simples. Trata-se de um circuito série contendo um único gerador.

Agora, precisamos atribuir um sentido arbitrário para a corrente, dentro da malha, conforme ilustração na figura 2-12. É necessário que atribuamos, também, um sentido de percurso, para o nosso circuito.

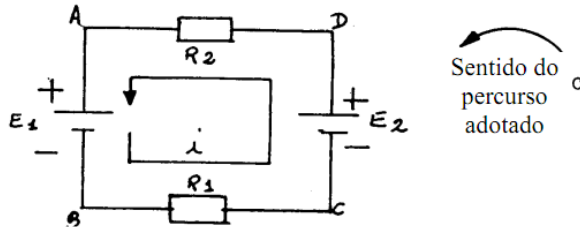
Suponhamos, então que o nosso percurso seja este: ABCDA. Deste modo, partindo do ponto A, e movendo-se na direção ABCDA, encontramos, inicialmente, a tensão E, que é positiva no ponto A. Daí, dizemos que a fonte E tem sinal positivo, porque ela não se opõe ao sentido arbitrado para o percurso. Portanto, o primeiro termo de nossa equação é +E. Vejamos, em seguida, as quedas do potencial (iR): ora, no nosso exemplo, a corrente que passa pelos resistores tem o mesmo sentido que o arbitrado para o percurso. Logo, os produtos iR_2 e iR_1 são todos antecedidos de um sinal positivo.

Assim, podemos afirmar, para o circuito da figura 2-12, que: $+E = iR_1 + iR_2 + iR_3$.

Isto está de acordo com a 2ª Lei de Kirchoff, que diz: "Em qualquer circuito fechado, a soma algébrica das quedas de potencial deve ser igual à soma algébrica das elevações de potencial".

Conforme já dissemos anteriormente, as "elevações de potencial" são as fontes E. No nosso exemplo, em questão, só existe uma fonte, embora pudesse haver mais de uma, como teremos oportunidade de ver em exemplos subsequentes.

(b) Seja, agora, o circuito da figura 2-13.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-13 - Circuito para análise das leis de Kirchoff

O circuito da figura 2-13 ainda é relativamente simples, contendo dois geradores: E_1 e E_2 . Observemos o sentido de percurso adotado. É o sentido ABCDA. Partindo do ponto A, seguindo a direção ABCDA, notamos que a ponta da seta indicadora do percurso aponta para o positivo da fonte E_1 . Esta seta não vai de encontro ao negativo de E_1 . Assim sendo, encontramos a partir do ponto A, a primeira tensão E_1 , que é positiva, e vai ser o primeiro termo da nossa equação. Continuando nosso movimento de acordo com a orientação indicada, vamos encontrar o segundo termo do primeiro membro de nossa equação. Trata-se da fonte E_2 . Só que tem um detalhe: a ponta da seta vai de encontro ao negativo da fonte.

Então, nós dizemos que a f.e.m. está se opondo ao sentido de percurso adotado. Por este motivo o 2º termo de nossa equação é negativo ($-E_2$). Quanto aos produtos iR , todos serão positivos, pois a corrente i , que passe pelos resistores, tem sentido igual ao arbitrado para o percurso.

Portanto, de acordo com a 2ª Lei de Kirchoff, podemos dizer que:

$$+ E_1 - E_2 = iR_1 + iR_2$$

Invertendo as posições dos membros da equação e colocando o fator i em evidência, temos:

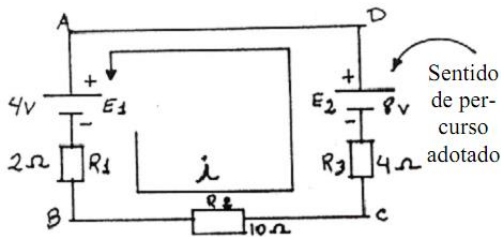
$$iR_1 + iR_2 = E_1 - E_2$$

$$i(R_1 + R_2) = E_1 - E_2$$

Agora, tirando o valor de i , vem:

$$i = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2}$$

(c) Vejamos na figura 2-14 um circuito idêntico ao anterior, sendo que seus elementos têm valores numéricos.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-14 Circuito para comprovação das Leis de Kirchoff

Adotando o sentido ABCDA para o percurso, bem como o sentido adotado para a corrente, e aplicando a segunda lei de Kirchoff, teremos:

$$+E_1 - E_2 = iR_1 + iR_2 + iR_3$$

Colocando "i" em evidência e tirando o seu valor na equação, teremos:

$$i = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

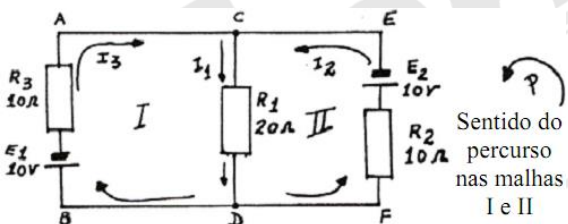
Substituindo o numerador e o denominador por seus respectivos valores, vem:

$$i = \frac{4V - 8V}{2\Omega + 10\Omega + 4\Omega} \quad i = -0,25A$$

Uma vez achada a corrente, as quedas de potencial podem ser facilmente encontradas.

É importante observarmos que, se o sentido da corrente fosse arbitrado ao contrário, certamente teríamos um resultado positivo para a corrente, indicando, desta forma, que o sentido arbitrado anteriormente para "i", estaria errado. Em ambos os casos, o resultado da corrente, em módulo é o mesmo.

(d) O circuito que analisaremos, agora, já não é tão simples quanto os três primeiros.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-15 Circuito para cálculo das leis de Kirchoff

Cabem aqui algumas considerações importantes, a saber:

1. Como existem dois nós, D e C, temos uma equação para a primeira lei, ou Lei dos Nós. Observando o circuito notamos que a corrente I_1 se subdivide em I_2 e I_3 , portanto: $I_1 = I_2 + I_3$ (primeira equação).

2. No circuito temos 2 malhas, portanto a segunda lei será escrita duas vezes.

3. Como no circuito há três ramos, teremos 3 equações: uma para a corrente e duas para as tensões.

4. Aplicando a segunda lei na malha I, adotando o percurso ABDCA, obtemos:

$$-E_1 = -I_1R_1 - I_3R_3 \therefore$$

$$-10V = -20I_1 - 10I_3 \text{ (segunda equação)}$$

5. Aplicando a segunda lei na malha II, adotando o percurso CDFEC, obtemos:

$$+E_2 = +I_1R_1 + I_2R_2 \therefore$$

$$+10V = 20I_1 + 10I_2 \text{ (terceira equação)}$$

6. Temos então três equações com incógnitas. Para resolvermos devemos fazer uso de um método simples conforme se segue.

(a) Substituímos a primeira equação (corrente) em uma das equações de tensão, obtendo uma quarta equação de tensão. Substituímos o valor de I_3 na segunda equação teremos:

$$I_3 = I_1 - I_2$$

$$+10 = +20I_1 + 10(I_1 - I_2) \therefore$$

$+10 + 30I_1 - 10I_2$ (quarta equação). Esta quarta equação possui as mesmas incógnitas que a terceira equação, assim podemos compará-las, arranjà-las e somá-las, obtendo:

$$20 = 50I_1 \therefore 2 = 5I_1 \therefore$$

$$I_1 = 2/5 \text{ A} = 0,4 \text{ A}$$

(b) Substituímos I_1 na segunda equação e obtemos:

$$10 = 20 \times 0,4 + 10I_3 \therefore$$

$$10 = 8 + 10I_3 \therefore I_3 = \frac{10-8}{10}$$

$$I_3 = 0,2 \text{ A}$$

(c) Como $I_1 = I_2 + I_3$

$$I_2 = I_1 - I_3 = 0,4 - 0,2 = 0,2 \text{ A}$$

ou substituindo I_1 na terceira equação obtemos:

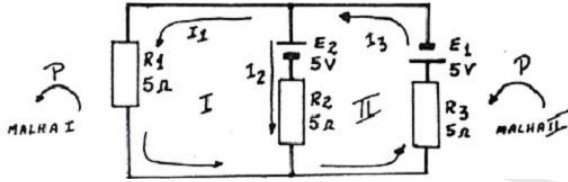
$$+10 = 20I_1 + 10I_2 \therefore$$

$$+10 = 20 \times 0,4 + 10I_2 \therefore$$

$$I_2 = 0,2 \text{ A}$$

7. Verificando a primeira equação $I_1 = I_2 + I_3$ então $0,4 = 0,2A + 0,2A$. Esta equação está correta com o resultado que obtemos. Podemos também verificar a igualdade de todas as equações e chegamos à conclusão que estão corretas.

e) Analisemos, agora, o circuito da figura 2-16.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-16 Circuito para análise das leis de Kirchoff

Para encontrarmos os valores de I_1 , I_2 e I_3 , seguiremos os sete passos seguintes.

1. Pela primeira Lei de Kirchoff, ou Lei dos Nós, obtemos a seguinte equação: $I_3 = I_1 + I_2$ (equação I)

2. Na malha I, pela segunda Lei de Kirchoff, obtemos:

$$-E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

$$-5V = 5I_1 - 5I_2 \text{ (equação II)}$$

3. Na malha II, pela segunda Lei de Kirchoff, obtemos:

$$E_1 + E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3$$

$$10V = 5I_2 + 5I_3 \text{ (equação III)}$$

4. Substituímos a equação I na equação III:

$$10V = 5I_2 + 5(I_1 + I_2)$$

$$10V = 5I_2 + 5I_1 + 5I_2$$

$$10V = 5I_1 + 10I_2 \text{ (equação IV)}$$

Comparamos a equação IV com a equação de tensão que ainda não foi usada, que é a II, que possui as mesmas incógnitas que a equação IV. Se multiplicarmos a equação II por -1 podemos cancelar I_1 e encontrar o valor de I_2 .

Somando II com IV, obtemos:

$$5V = -5I_1 + 5I_2$$

$$\underline{10V = +5I_1 + 10I_2}$$

$$15V = \quad 15I_2$$

$$\therefore I_2 = 1A$$

5. Aplicando o valor de I_2 na equação II obtemos o valor de I_1 :

$$-5V = 5I_1 - 5I_2$$

$$-5V = 5I_1 - 5$$

$$5I_1 = 0 \quad \therefore I_1 = 0$$

6. Aplicando o valor de I_2 na equação III obtemos o valor de I_3

$$10V = 5I_2 + 5I_3$$

$$10V = 5V + 5I_3$$

$$5I_3 = 10V - 5V$$

$$5I_3 = 5V \quad \therefore \quad I_3 = 1A$$

7. Fazendo a verificação de cada equação teremos:

a. $I_3 = I_2 + I_1 \quad \therefore \quad 1A = 1A + 0$

b. $-5V = 5I_1 - 5I_2$

$$-5V = 5 \times 0 - 5 \times 1A$$

$$-5V = -5V$$

c. $10V = 5I_2 + 5I_3$

$$10V = 5 \times 1A + 5 \times 1A$$

$$10V = 5V + 5V$$

$$10V = 10V$$

d. $10V = 5I_1 + 10I_2$

$$10V = 5 \times 0 + 10 \times 1A$$

$$10V = 10V$$

Todas as equações formam uma igualdade e chegamos à conclusão que estão corretas.

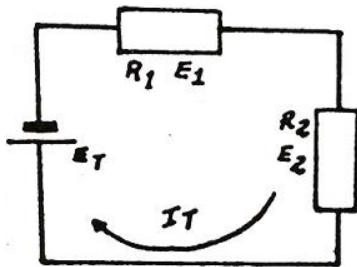
Método para resolver Kirchoff com duas malhas:

- 1- Tirar uma equação para as correntes;
- 2- Tirar duas equações para a tensão, uma equação para cada malha;
- 3- Substituir a equação das correntes em uma das equações de tensão obtendo uma quarta equação;
- 4- Esta quarta equação possui as mesmas incógnitas que a equação de tensão que não foi usada;
- 5- Preparamos esta quarta equação e somamos com a equação ainda não usada eliminando uma das incógnitas e encontrando o valor de uma das correntes;
- 6- Por substituição obtemos os outros valores de corrente do circuito;
- 7- Fazemos a verificação de todas as equações da resolução do problema e se todas formarem uma igualdade os resultados estarão corretos;
- 8- **Observação:** Em todas as substituições considere o módulo e o sinal encontrados.

2.6 DIVISOR DE TENSÃO E DIVISOR DE CORRENTE

Afim de melhor compreender como surgirão as fórmulas de tensão e corrente nos teoremas de Thévenin e Norton analisaremos os divisores de tensão e corrente, conforme demonstrado a seguir.

Divisor de Tensão



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-17 Divisor de tensão

No circuito da figura 2-17 temos:

$$E_T = E_1 + E_2 \quad \text{e} \quad I_T = I_1 = I_2$$

$$I_T = \frac{E_T}{R_1 + R_2}; \quad I_1 = \frac{E_1}{R_1}; \quad I_2 = \frac{E_2}{R_2}$$

$$\frac{E_T}{R_1 + R_2} = \frac{E_1}{R_1} = \frac{E_2}{R_2}$$

a) Cálculo de E_1 :

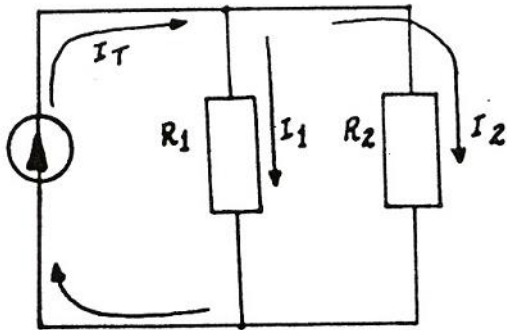
$$\frac{E_T}{R_1 + R_2} = \frac{E_1}{R_1} \quad \therefore E_1 = \frac{E_T \times R_1}{R_1 + R_2}$$

b) Cálculo de E_2 :

$$\frac{E_T}{R_1 + R_2} = \frac{E_2}{R_2} \quad \therefore E_2 = \frac{E_T \times R_2}{R_1 + R_2}$$

c) A finalidade do divisor de tensão é nos proporcionar o cálculo de queda de tensão nos resistores sem o uso da corrente do circuito.

Divisor de Corrente



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-18

No circuito da figura 2-18 temos:

$$I_T = I_1 + I_2 \quad \text{e} \quad E_T = E_1 = E_2$$

$$E_T = I_T \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}; \quad E_1 = I_1 R_1; \quad E_2 = I_2 R_2 \quad \therefore$$

$$I_T \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = I_1 R_1 = I_2 R_2$$

a) Cálculo de I_1

$$I_T \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = I_1 R_1$$

$$I_1 = \frac{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_T}{\frac{R_1}{1}} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot I_T}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_1}$$

$$I_1 = \frac{I_T \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

b) Cálculo de I_2

$$I_T \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = I_2 \cdot R_2$$

$$I_2 = \frac{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_T}{\frac{R_2}{1}} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot I_T}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_2}$$

$$I_2 = \frac{I_T \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

c) A finalidade do divisor de corrente é nos proporcionar o cálculo da corrente que passa por um braço do circuito sem o uso da tensão do circuito.

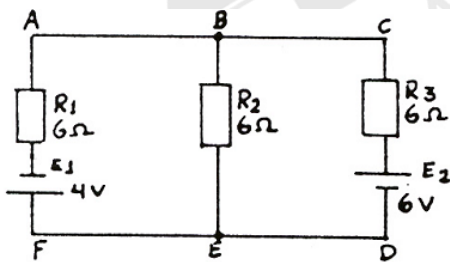
2.7 TEOREMA DA SUPERPOSIÇÃO

Enunciado

O teorema da superposição estabelece que "em qualquer rede contendo uma ou mais fontes de tensão (e/ou corrente), a corrente em qualquer elemento do circuito é a soma algébrica das correntes que seriam causadas por cada fonte individualmente, estando as demais substituídas por suas respectivas resistências internas".

Aplicação

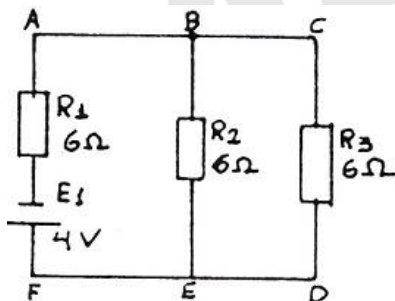
Para ilustrar a aplicação do teorema vamos analisar o circuito da figura 2-19, onde desejamos encontrar o valor e o sentido das correntes em R_1 , R_2 e R_3 .



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-19

Primeiramente usaremos E_1 e substituiremos E_2 por um curto (consideramos E_2 com $R_3 = 0$).



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

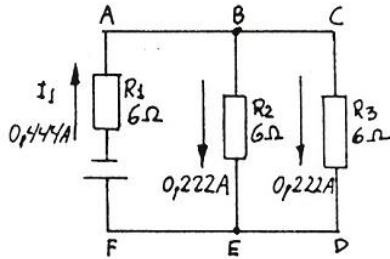
Figura 2-20

$$R_T = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 6 + 3 = 9\Omega$$

$$E_T = R_1 = 4V$$

$$I_T = I_{R1} = \frac{4V}{9\Omega} = 0,444A$$

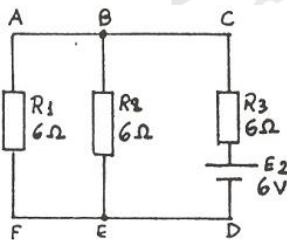
As correntes no circuito ficam como distribuídas a seguir:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-21

Em seguida usaremos E_2 e substituiremos E_1 por um curto (também consideramos R_1 de $E_1 = 0$).



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

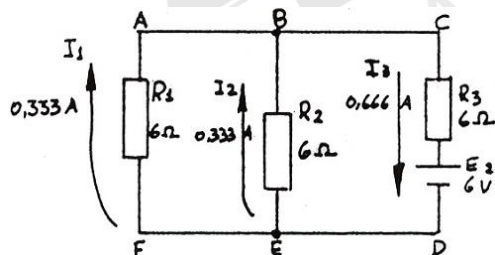
Figura 2-22

$$R_T = R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 6 + 3 = 9\Omega$$

$$E_T = E_2 = 6V$$

$$I_T = I_{R3} = \frac{6V}{9} = 0,666A$$

As correntes no circuito ficam como distribuídas na figura 2-23:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-23

Como último passo fazemos a superposição das correntes causadas por E_1 e por E_2 .

Em R_1 a corrente real será a soma algébrica de 0,444A e 0,333A no mesmo sentido, de F para A, de onde $I_{R1} = 0,777$ A.

Em R_2 obtemos 0,333A de E para B, e 0,222A de B para E. O resultado final é de 0,111A no sentido de E para B.

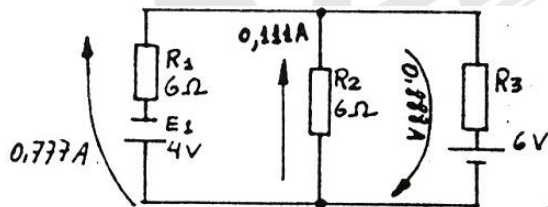
Em R_3 obtemos 0,222A e 0,666A no mesmo sentido, de C para D, de onde $I_{R3} = 0,888$ A. O resultado final está mostrado a seguir na figura 2-24.

Verificação:

$$I_{R3} = I_{R1} + I_{R2}$$

$$0,888A = 0,777A + 0,111A.$$

De acordo com a primeira Lei de Kirchoff está correto.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-24

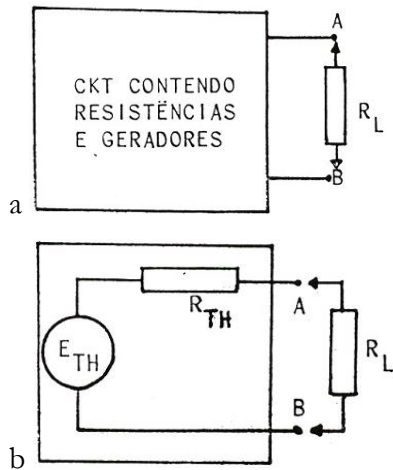
2.8 TEOREMA DE THÉVENIN

Nem sempre as leis de Ohm e de Kirchoff constituem a ferramenta necessária para a resolução de circuitos mais complexos.

O teorema de Thévenin faz parte de um grupo de teoremas sobre estruturas elétricas complexas, possibilitando-nos meios mais eficazes para a análise simplificada de circuitos dessa natureza.

A técnica utilizada possibilita a redução de um circuito complexo a um circuito equivalente simples, que passa a atuar como a rede original.

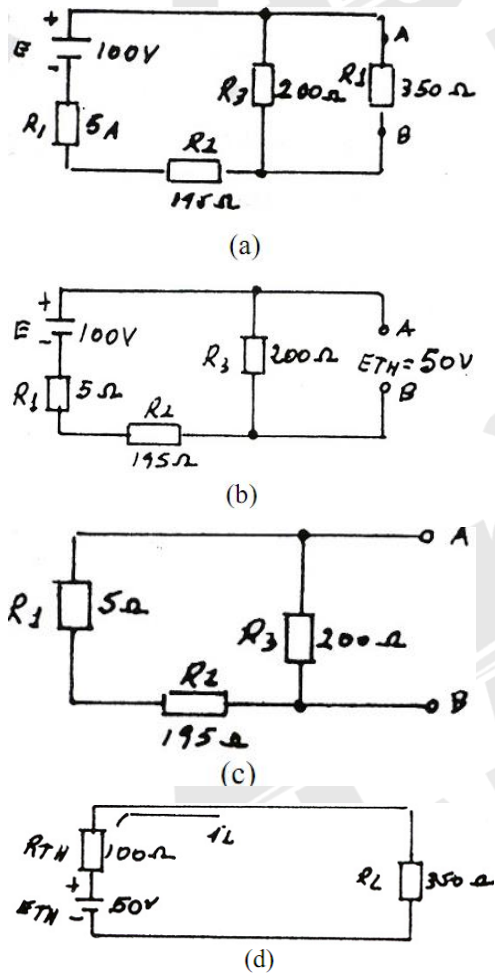
O teorema de Thévenin pode ser enunciado da seguinte maneira: "qualquer rede de dois terminais pode ser substituída por um circuito equivalente simples, constituído por um gerador, chamado gerador de Thévenin, cuja tensão E_{TH} , atuando em série com sua resistência interna R_{TH} , obriga a corrente a fluir através de uma carga" (Ver a figura 2-25 b).



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-25

Os circuitos a seguir nos mostram uma seqüência de operações, que visam a determinar os dois elementos fundamentais constituintes do teorema de Thévenin, ou seja, E_{TH} e R_{TH} .



$$R_{TH} = \frac{200(195 + 5)}{200 + 195} = 100\Omega$$

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-26

Vejamos agora, algumas regras usadas na determinação de ETH e RTH:

1 - Entendemos por tensão de Thévenin (ETH) aquela tensão vista nos terminais de carga, no circuito original, estando a resistência de carga removida, isto é, tensão em circuito aberto. É o que nos ilustra a figura 2-26 b.

Conforme observamos na figura 2-26 b, para calcularmos a tensão de Thévenin (ETH), removemos a carga RL. Neste caso a tensão de Thévenin é a tensão vista nos terminais em circuito aberto A-B. Isto significa que a tensão de Thévenin é a própria queda de tensão em R3. Assim, basta calcularmos a corrente total do circuito e multiplicamos por R3:

$$VR_3 = i \cdot R_3 = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot R_3 = \\ = \frac{100V}{5\Omega + 195\Omega + 200\Omega} \cdot 200\Omega = 50V$$

Portanto, temos que: $V_{R_3} = V_{AB} =$

ETH = 50 V

2 - Quanto à resistência de Thévenin (RTH), trata-se da resistência vista dos terminais de carga aberta, quando olhamos para a rede original, estando as fontes de tensão do circuito substituídas por suas resistências internas.

A figura 2-26 c, ilustra o que acabamos de mencionar. Neste caso, a fonte foi curto circuitada e o circuito passou a ter: R1 em série com R2 e as duas em paralelo com R3. Deste modo, a resistência equivalente entre os pontos A e B é 100 Ω, que é a resistência de Thévenin.

3 - Agora, resta-nos fazer o equivalente de Thévenin, para o circuito da figura 2-26 a. É o que nos mostra a figura 2-26 d.

Aí temos uma fonte de tensão de 50V, que é o gerador de Thévenin; em série com esta fonte temos uma resistência, que é a de Thévenin (100 Ω).

Este circuito, portanto, é capaz de fazer fluir uma corrente (iL) através de uma carga (RL), substituindo o circuito da figura 2-9 a.

Para calcularmos a corrente iL no circuito da figura 2-26 d é só empregar a Lei de Ohm:

$$iL = \frac{ETH}{RTH + RL} = \frac{50V}{100\Omega + 350\Omega} \cong 0,111A$$

Bem, agora, perguntamo-nos: que vantagem seria empregarmos tal método na resolução dos circuitos, uma vez que, aparentemente as coisas se tornaram mais complicadas, pois se trata de um circuito muito simples, podendo ser resolvido pela aplicação das leis de Ohm e de Kirchoff?

Realmente, para o circuito que acabamos de analisar, isto constitui uma verdade. Entretanto a veracidade do teorema de Thévenin torna-se evidente se modificarmos o circuito.

Para isto, vamos supor que quiséssemos achar o valor da corrente I_L quando R_L assumisse diversos valores, como por exemplo:

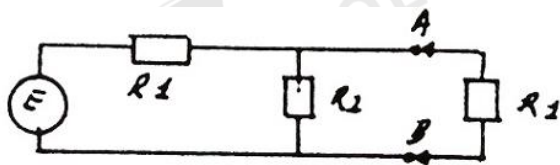
$$R_{L1} = 20 \Omega$$

$$R_{L2} = 50 \Omega$$

$$R_{L3} = 100 \Omega$$

$$R_{L4} = 1200 \Omega$$

Se fôssemos aplicar as leis de Ohm e de Kirchoff, por exemplo para calcular a I_L em cada R_L diferente, não resta dúvida que seria um trabalho bem laborioso. Entretanto, calculando o equivalente de Thévenin, facilmente determinamos os valores de corrente para cada valor diferente de R_L , uma vez que E_{TH} e R_{TH} , são grandezas independentes do valor de R_L . Vejamos mais um exemplo bem simples, de aplicação do teorema de Thévenin, para em seguida entrarmos na análise de circuitos mais complexos.



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-27

Para calcularmos a tensão de Thévenin (E_{TH}), basta acharmos a tensão entre os pontos A

e B. Portanto, ao retirarmos R_L do circuito, a tensão entre E e B é dada por $V_{AB} = E_{TH} = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_2 =$

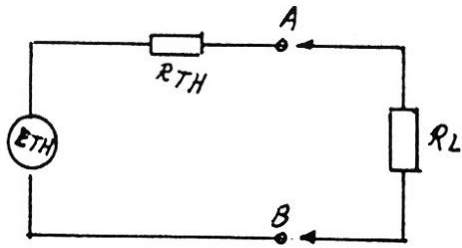
$$= \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_{TH} \text{ sendo igual a } \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

equivale à f.e.m. do gerador equivalente de Thévenin.

Agora, com a fonte "E" em curto-circuito, passemos ao cálculo de R_{TH} , que por natureza

é dada por $R_{AB} = R_{TH} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

Finalmente, teremos o circuito equivalente de Thévenin, seguido dos seus elementos fundamentais, (R_{TH} e E_{TH}), conforma a figura 2-28 a seguir.

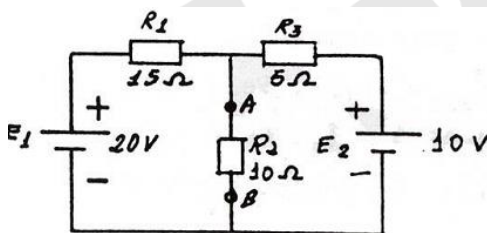


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-28

$$R_{TH} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad E_{TH} = \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

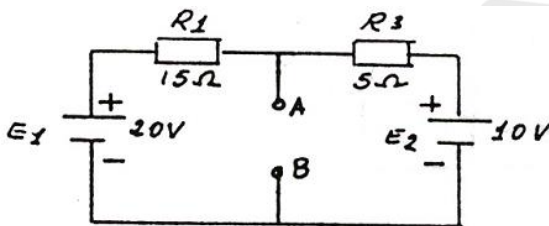
Vamos supor que quiséssemos calcular a potência dissipada no resistor R_2 do circuito da figura 2-29, aplicando o teorema de Thévenin.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-29 Ilustração do teorema de Thévenin

Precisamos encontrar o equivalente de Thévenin para o circuito da figura 2-29. Vamos abrir o circuito nos pontos A e B, pois R_2 representa nossa R_L . O circuito passa a ser como o da figura 2-30.



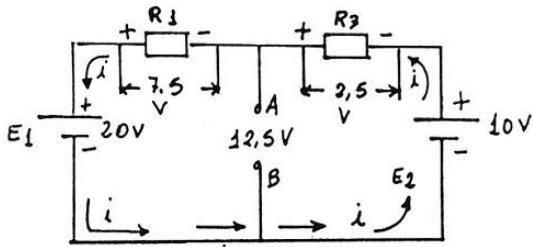
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-30 R_2 removida do circuito

As fontes E_1 e E_2 estão em oposição. Logo a corrente total será:

$$I_t = \frac{20V - 10V}{15\Omega + 5\Omega} = \frac{10V}{20\Omega} = 0,5A$$

Esta corrente, passando em R_3 produzirá uma queda de tensão de 2,5 V e passando em R_1 produzirá uma queda de tensão de 7,5 V. Assim, já podemos achar a tensão V_{AB} que será 12,5 V, conforme ilustrado na figura 2-31.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-31 Potencial entre os pontos A e B, igual a 12,5 V

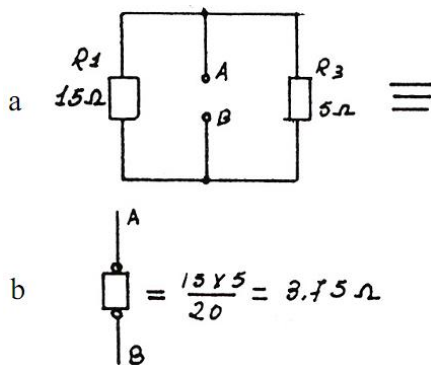
Pelo exposto no circuito da figura 2-31, observamos que a fonte E_1 é que determina o fluxo de corrente, pois esta fonte tem valor maior que E_2 . Assim sendo, de acordo com o sentido de corrente estabelecido, temos que, pelo lado de E_2 , a tensão $V_{AB} = E_2 + V_{R3}$, pois estas duas tensões estão em série e se somam, dando $V_{AB} = 12,5 \text{ V}$.

Pelo lado de E_1 , a tensão $V_{AB} = E_1 - V_{R1}$, pois estas duas tensões estão se opondo.

Logo: $V_{AB} = 20\text{V} - 7,5\text{V}$; ou $V_{AB} = 12,5\text{V}$. Portanto, sendo $V_{AB} = 12,5\text{V}$, concluímos que a tensão de Thévenin é 12,5V.

Agora vamos calcular a resistência de Thévenin. E só abrir o circuito da figura 2-29 nos terminais A e B e curto-circuitar as fontes E_1 e E_2 .

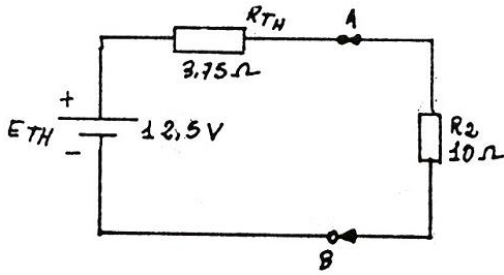
O circuito ficará como o da figura 2-32 a e 2-32 b.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-32

Assim, podemos fazer o equivalente de Thévenin para o circuito da figura 2-29, usando o circuito da figura 2-33.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-33 Equivalente de Thévenin

Deste modo, ficou fácil calcularmos a potência de R_2 . É só achar a corrente total, elevar ao quadrado e multiplicar por R_2 . Isto pode ser feito da seguinte maneira:

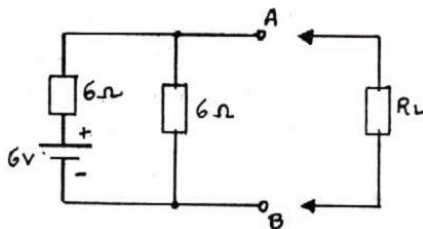
$$I_t = \frac{E_{TH}}{R_{TH} + R_2}; (I_t)^2 \times R_2 = P_2. \text{ Ou seja:}$$

$$P_2 = \left(\frac{12,5V}{13,75\Omega}\right)^2 \times 10\Omega = 8,28W.$$

Outros exemplos

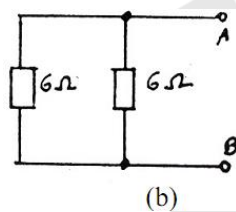
Exemplo 1

Vamos encontrar o equivalente Thévenin do circuito da figura 2-34 a.

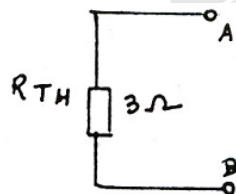


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

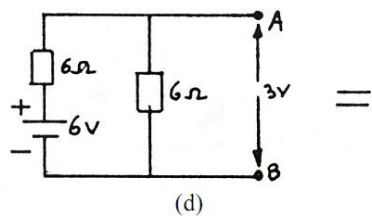
Figura 2-34 a



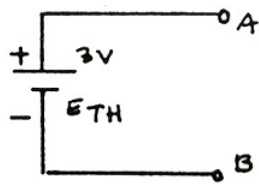
(b)



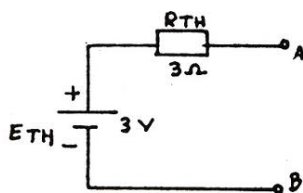
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-34 Ilustração do teorema de Thévenin

Solução:

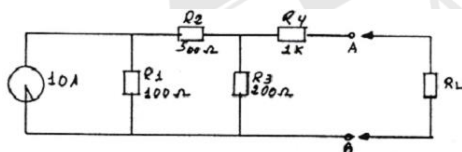
Primeiro removemos a carga. Então, determinamos a Resistência de Thévenin (R_{TH}), substituindo o gerador pela sua resistência interna, conforme nos mostra a parte "b". A rede fica então simplificada (parte c).

A tensão em circuito aberto, E_{TH} , é determinada deixando-se a carga desconectada (circuito aberto em A-B). Nestas condições temos 3V em A-B (parte d).

Esta tensão de circuito aberto é representada como um gerador de tensão constante (parte e). Finalmente, temos os circuitos das partes "c" e "e", que são combinados para produzir o Equivalente de Thévenin, conforme a parte "f".

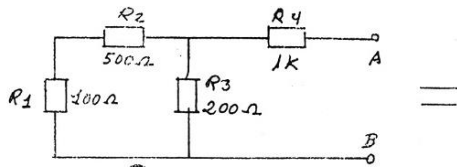
Exemplo 2

Vamos encontrar o Equivalente de Thévenin do circuito da figura 2-35 a.



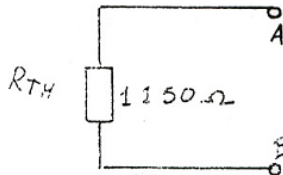
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-35 a



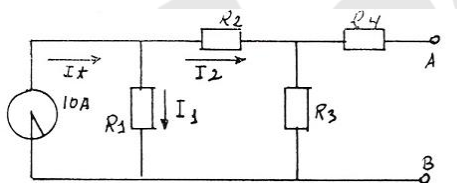
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-35 b



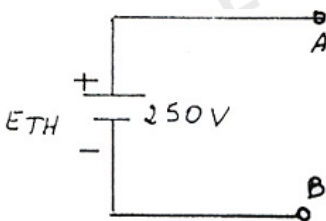
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-35 c



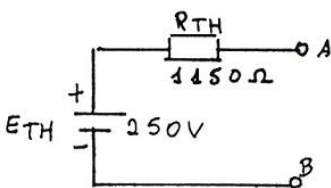
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-35 d



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-35 e



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-35 f

Figura 2-35 Ilustração do Teorema de Thévenin

Solução:

Vamos remover a carga. Em seguida, olhando para dentro dos terminais A e B, determinemos a resistência de Thévenin (b). Deste modo, o gerador de corrente de 10A foi substituído por uma resistência infinita (circuito aberto). Utilizando a fórmula a seguir,

$R_{TH} = R_4 + \frac{(R_1 + R_2)R_3}{(R_1 + R_2) + R_3}$, podemos encontrar a resistência equivalente, que é a resistência de Thévenin. Pela parte "b" podemos observar que R_1 e R_2 estão em série, e ambas estão em paralelo com R_3 . A resultante deste conjunto está em série com R_4 . Então, substituindo na fórmula os valores das resistências, teremos (na parte "c"):

$$R_{TH} = 1K + \frac{(100+500)200}{(100+500)+200} =$$

$$= 1000 + \frac{600 \times 200}{800} = 1000 + 150 \therefore R_{TH} = 1150\Omega$$

Na parte "d" observamos que uma porção da corrente do gerador produz uma queda de voltagem em R_3 . Aliás, não flui corrente em R_4 , pois o circuito está aberto neste ponto. Em consequência, a corrente de R_2 é a mesma de R_3 . Assim, a queda de tensão em R_3 é a tensão de Thévenin, pois é a tensão em circuito aberto. Observando, portanto, a parte "d", notamos que 10A entram no circuito pelo gerador. Temos dois ramos de corrente, I_1 e I_2 , uma vez que A-B está aberto, conforme já mencionamos.

O ramo de I_2 possui uma resistência de 700Ω e o outro 100Ω . O ramo de R_3 é o que nos interessa, uma vez que precisamos conhecer a queda de tensão em R_3 . Sabemos que correntes em ramos paralelos se dividem inversamente proporcionais às resistências. Portanto, podemos afirmar que em R_1 passa uma corrente sete vezes maior que a do ramo de R_2 com R_3 , pois $R_1 = 100\Omega$, e $R_2 + R_3 = 700\Omega$. Isto nos leva a escrever o seguinte:

$$I_1 + I_2 = I_t = 10A$$

$$I_1 = 7 I_2$$

$$7 I_2 + I_2 = 10A; 8 I_2 = 10A \therefore I_2 = \frac{10}{8} = 1,25A$$

$$\text{Mas, } I_2 = I_3 = 1,25A. \text{ Então, } V_{R3} = I_3 \times R_3 =$$

$$= 1,25 \times 200 = 250V. \text{ Assim, } V_{R3} = V_{AB} =$$

$$= E_{TH} = 250V.$$

Na parte "f" temos o equivalente de Thévenin, constituído por um gerador de tensão constante e sua resistência interna.

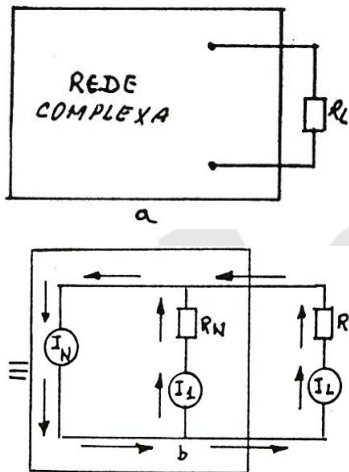
2.9 TEOREMA DE NORTON

Até aqui observamos o uso do teorema de Thévenin na simplificação da análise dos circuitos de malhas complexas, pela substituição do circuito original por um circuito equivalente envolvendo uma fonte de tensão constante, e o gerador de Thévenin (E_{TH}), atuando em série com uma resistência interna (R_{TH}).

O gerador de Thévenin fornece corrente à resistência de carga RL.

Estudaremos agora, o teorema de Norton, que emprega uma técnica bem semelhante à empregada pelo teorema de Thévenin, e que pode ser enunciado do seguinte modo: "Dois terminais de uma rede podem ser substituídos por um circuito equivalente, que consiste de um gerador de corrente constante I_N , em paralelo com sua resistência interna R_N ".

Na figura 2-36 vemos uma malha original atuando como um bloco bem como seu circuito equivalente.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-36

Pela figura 2-36 b observamos que a corrente de Norton (I_N) é distribuída entre a resistência de Norton (R_N) e a resistência de carga (R_L). Podemos observar pelo circuito da figura 2-36 b, que: $E_{RL} = E_{R_N}$. Ora, $E_{RL} = I_L \times R_L$; $E_{R_N} = I_1 \times R_N$ e $I_N = I_1 + I_L$.

Assim sendo, podemos estabelecer a seguinte proporção:

$$\frac{R_N}{R_L} = \frac{I_L}{I_1}$$

Aplicando uma das propriedades das proporções, teremos:

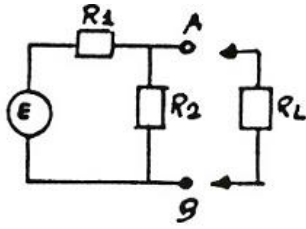
$$\frac{R_N + R_L}{R_N} = \frac{I_L + I_1}{I_1} \text{ ou, então, } I_L(R_N + R_L) =$$

$$= R_N(I_L + I_1) \therefore I_L = \frac{R_N(I_L + I_1)}{R_N + R_L} = \frac{R_N \times I_N}{R_N + R_L}$$

Portanto, para calcularmos a corrente em R_L , basta usarmos a fórmula:

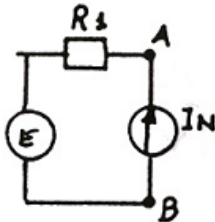
$$I_L = \frac{I_N \times R_N}{R_N + R_L}$$

Seja agora, o circuito da figura 2-37



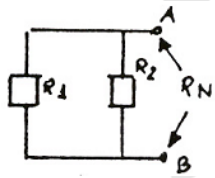
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-37 a



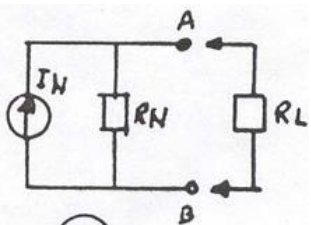
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-37 b



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-37 c



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-37 d

Vamos determinar o equivalente de Norton para o circuito da figura 2-37.

Para isto, inicialmente, coloquemos A e B em curto-circuito, ou seja, daremos um curto em RL.

$$I_{AB} = I_N = \frac{E}{R_1}$$

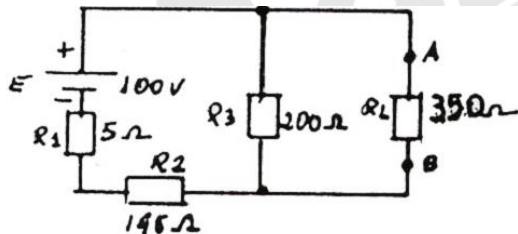
Deste modo, a corrente externa será:

Em seguida achemos a resistência de Norton: $R_{AB} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$, estando a fonte em curto-circuito (2-37 c).

Assim, podemos escrever duas regras simples, para determinação da corrente e da resistência de Norton:

- A corrente de Norton I_N é uma corrente constante que flui num curto-circuito entre os terminais da resistência de carga, quando esta é substituída por um curto-circuito (figura 2-37 b).
- A resistência de Norton R_N é aquela resistência vista dos terminais da carga aberta, olhando-se para a malha, quando sua fonte de tensão é substituída por sua resistência interna (R_N é definida da mesma maneira que a resistência de Thévenin - R_{TH}), conforme a figura 2-37 c. Na figura 2-37 d temos o equivalente de Norton: um gerador de corrente constante I_N com sua resistência interna, em paralelo R_N .

Consideremos o circuito da figura 2-38, no qual desejamos calcular a I_N , R_N e I_L .

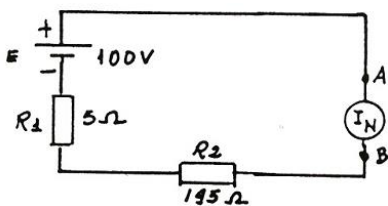


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-38

Inicialmente, estabelecendo um curto-circuito em R_L , forçosamente R_3 ficará em curto, o que nos permite empregar a seguinte fórmula:

$$I_N = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{100V}{5\Omega + 195\Omega} = \frac{100V}{200\Omega} = 500mA$$

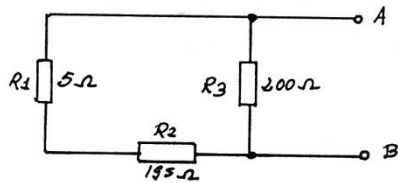


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-39

O circuito da figura 2-39 ilustra o que acabamos de mencionar. A corrente I_N é a corrente que flui no curto-circuito ($R_L = 0$).

Em seguida, calculamos a resistência de Norton. Para tal, podemos utilizar o circuito da figura 2-40.



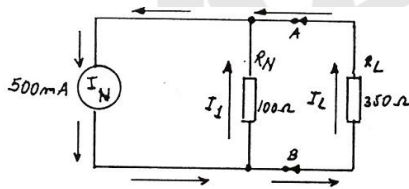
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-40

Desta forma, teremos:

$$R_N = R_{AB} = \frac{200(5+195)}{200+(5+195)} = 100 \text{ Ohm}$$

Finalmente, observando o circuito da figura 2-41, temos o circuito equivalente, contendo a corrente de Norton, a resistência de Norton e a corrente I_L .



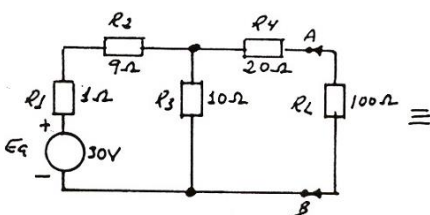
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-41

Pelo que já conhecemos, I_L facilmente pode ser calculada da seguinte maneira:

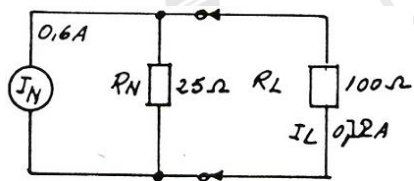
$$I_L = \frac{I_N \times R_N}{R_N + R_L} = \frac{500 \times 10^{-3} \times 100}{100 + 350} = 111 \text{ mA}$$

Vejam os mais um exemplo simples de aplicação do Teorema de Norton, ilustrado na figura 2-42.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-42 a



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-42 b

Primeiramente daremos um curto-circuito em R_L , no circuito da figura 2-42 a, para calcularmos a I_N . Deste modo, teremos R_3 em paralelo com R_4 e a resultante das duas, em série com R_1 e R_2 . Assim, teremos uma $R_t =$

$$R_1 + R_2 + \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4} = 1 + 9 + \frac{10 \times 20}{10 + 20} =$$

$$10 + 6,67 = 16,67 \text{ Ohms. } \therefore R_t = 16,67 \text{ Ohms,}$$

$$\text{Portanto, } I_t = \frac{E_a}{R_t} = \frac{30}{16,67} = 1,8 \text{ A}$$

A corrente de Norton, na realidade, é a corrente que passa em R_4 , estando R_L em curto.

Sendo $I_t = 1,8 \text{ A}$, I_N será: $I_t - I_{R_3}$. Ou então,

$$I_N = \frac{E_{R_3}}{R_4} = \frac{12V}{20\Omega} = 0,6 \text{ A.}$$

Passemos agora ao cálculo de R_N , que é a resistência vista dos terminais da carga aberta:

$$R_N = R_4 + \frac{(R_1 + R_2) \times R_3}{R_2 + R_1 + R_3} =$$

$$= 20 + \frac{10 \times 10}{20} = 25 \text{ Ohms}$$

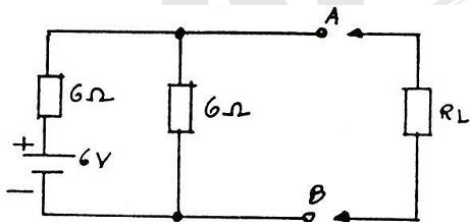
E, agora, de acordo com a figura 2-42 b, passemos ao cálculo de I_L .

$$\text{Portanto, } I_L = \frac{0,6 \times 25}{25 + 100} = 0,12 \text{ A}$$

Outros exemplos:

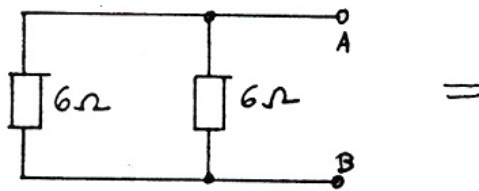
Vamos achar o equivalente de Norton da figura 2-43 a.

Solução: Inicialmente vamos encontrar a resistência de Norton que, conforme já mencionamos anteriormente, é definida da mesma maneira que a resistência de Thévenin (R_{TH}). Portanto, abrindo o circuito da parte "a" nos pontos A e B, temos dois resistores de 6Ω em paralelo, conforme nos mostra a figura 2-43 b. Na figura 2-43 c temos a resistência equivalente (R_N).



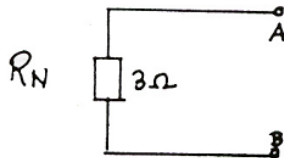
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-43 a



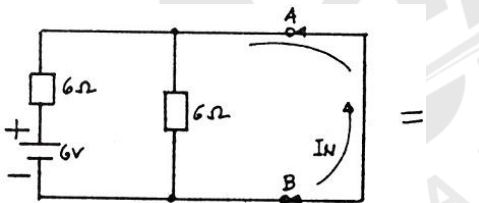
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-43 b



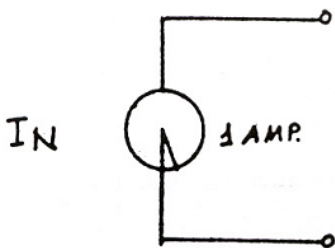
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-43 c



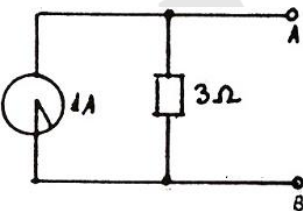
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-43 d



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-43 e



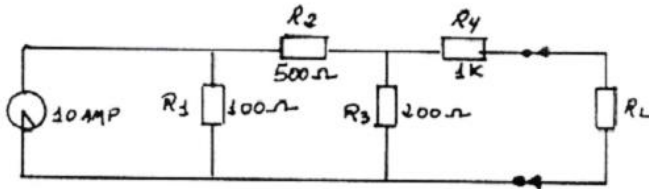
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-43 f

Figura 2-43 Ilustração do Teorema de Norton

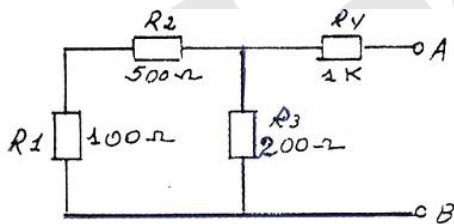
Para calcularmos a corrente de Norton (I_N) basta colocarmos um curto entre os pontos A e B da figura 2-43 d. A corrente no curto-circuito é a corrente de Norton. Neste caso, I_N é

igual à corrente total, podendo ser calculada assim: $I_N = \frac{6V}{6} = 1A$. Então, na parte "c" temos a corrente equivalente de Norton (I_N). Juntando a resistência equivalente (parte "c") à corrente equivalente (parte "e"), formamos o equivalente de Norton (figura 2-43f). Vamos encontrar o equivalente de Norton da figura 2-44 a.



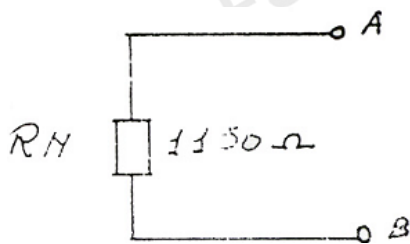
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-44 a



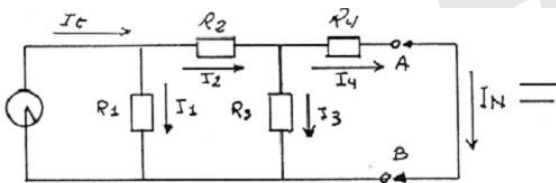
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-44 b



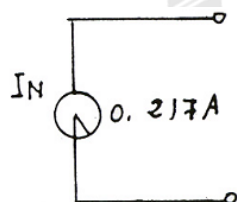
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-44 c



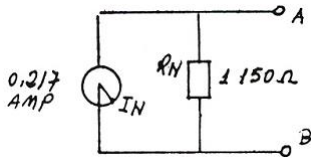
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-44 d



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-44 e



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-44 f

Figura 2-44 Ilustração do Teorema de Norton

Solução: Na figura 2-44 b a carga foi removida. Aí, temos R_1 em série com R_2 . Estes dois resistores estão em paralelo com R_3 . Este conjunto está em série com R_4 . Portanto, o cálculo da resistência equivalente de Norton (R_N) pode ser feito do seguinte modo:

$$R_N = R_4 + \frac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{(R_1 + R_2) + R_3} =$$

$$1K + \frac{600 \times 200}{800} = 1K + 150\Omega = 1150\Omega$$

A parte "c" nos mostra o que acabamos de demonstrar.

Ao colocarmos a fonte de corrente no circuito (10A), e substituirmos RL por um curto-circuito (figura 2-44 d), vamos procurar a corrente de Norton (I_N). A corrente de Norton é a mesma que flui nos terminais da carga em curto.

Fazendo uma observação da figura 2-44 d vemos que a corrente total "It" se distribui do seguinte modo: $I_t = I_1 + I_2$. E que $I_2 = I_3 + I_4$.

Ocorre que $I_4 = I_N$, ou seja, I_4 é igual à corrente de curto-circuito equivalente. Resolvendo, inicialmente, o circuito da figura 2-44 d por I_2 , temos:

$$I_2 = I_t \frac{R_1}{R_1 + (R_2 + \frac{R_3 \times R_4}{R_3 + R_4})} =$$

$$= 10 \frac{100}{100 + 500 + \frac{200 \times 1K}{1200}} \therefore$$

$$I_2 = 10 \frac{100}{100 + 500 + 166,67} = 1,305 A$$

Agora, resolvendo por I_4 , teremos:

$$I_4 = I_2 \frac{R_3}{R_3 + R_4} = 1,305 \frac{200}{200 + 1K} = 0,217 A$$

Logo, $I_4 = I_N = 0,217 A$

O gerador equivalente de Norton é mostrado na figura 2-44 f.

2.10 CONVERSÃO DO EQUIVALENTE DE NORTON PARA O DE THÉVENIN E VICE-VERSA

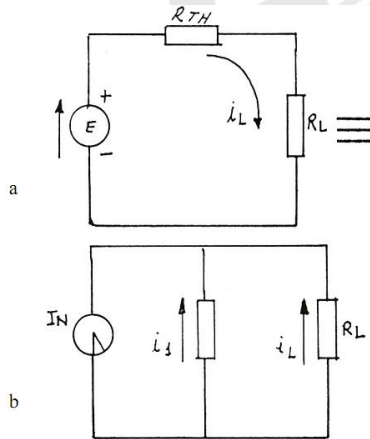
Às vezes, por questões de conveniência, torna-se mais fácil solucionar certos problemas de análise de circuitos empregando um método de equivalência entre geradores de corrente e de tensão.

Para isto, é recomendável adotarmos uma equivalência entre uma fonte de tensão e uma fonte de corrente.

Considerando os circuitos da figura 2-45, vamos observar que em "a" temos um gerador de tensão e em "b", um gerador de corrente.

Nestes dois circuitos, há uma carga R_L que é alimentada, portanto, por um gerador de tensão e por um gerador de corrente.

Recordemos, agora, as fórmulas já vistas anteriormente para o cálculo de I_L , em ambos os circuitos da figura 2-41.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-45 Conversão Norton para Thévenin e vice-versa

Na figura 2-45, por exemplo, temos na parte "a" $I_L = \frac{E}{R_{TH} + R_L}$,

e na parte "b" temos: $I_L = \frac{I_N \times R_N}{R_N + R_L}$

Uma vez que nos propomos a estabelecer uma equivalência entre "a" e "b" da figura 2-45, teremos:

$$\frac{E}{R_{TH} + R_L} = \frac{I_N \times R_N}{R_N + R_L}$$

Fazendo $R_{TH} = R_N = r$, teremos:

$$\frac{E}{r + R_L} = \frac{I_N \times r}{r + R_L}$$

Agora, eliminando o denominador da equação, vem:

$$(I_N \times r) (r + R_L) = E (r + R_L).$$

Tirando o valor de I_N , temos:

$$I_N = \frac{E(r + R_L)}{r(r + R_L)}.$$

Simplificando o numerador e o denominador, temos: $I_N = \frac{E}{r}$. Esta fórmula nos dá o valor da corrente de Norton, em função da tensão de Thévenin, não esquecendo que, para tal, consideraremos as resistências internas iguais, isto é: $R_{TH} = R_N = r$.

Portanto, da fórmula $I_N = \frac{E}{r}$, podemos também tirar o valor de "E", ou seja: $E = I_N \times r$, que é a fórmula que nos dará o valor da tensão de Thévenin, em função da corrente de Norton.

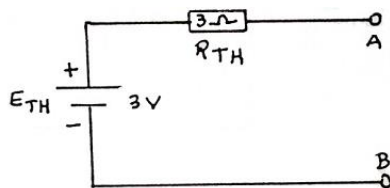
Exercícios de Aplicação

Suponhamos, um gerador de tensão, cuja "E" (E_{TH}), seja igual a 20V sabendo-se que $R_{TH}(r)$ é igual a 10Ω . Queremos saber o valor do equivalente de Norton.

Solução: neste caso, a fonte ou o gerador de corrente equivalente será:

$$I_N = \frac{E}{r} = \frac{20V}{10\Omega} = 2A$$

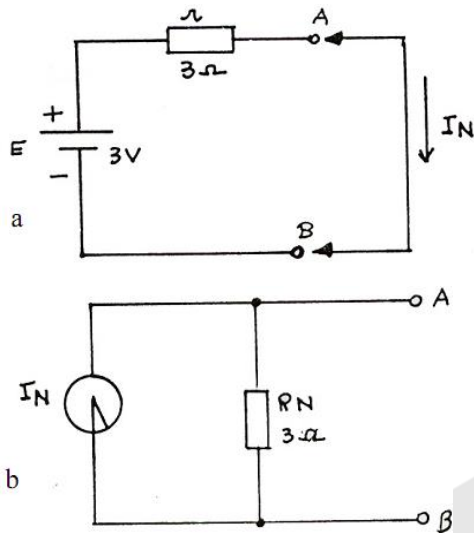
Seja o circuito da figura 2-48 que queremos converter num equivalente de Norton.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-46 Equivalente de Thévenin

Solução: vamos colocar um curto-circuito nos terminais A e B do circuito da figura 2-47 obtendo, assim, o circuito da figura 2-47 a.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

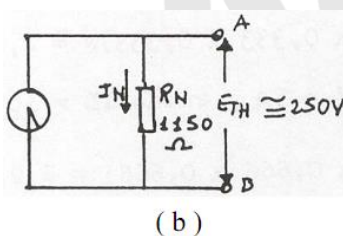
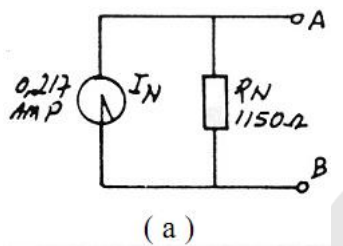
Figura 2-47 Convertendo o equivalente de Thévenin para o de Norton

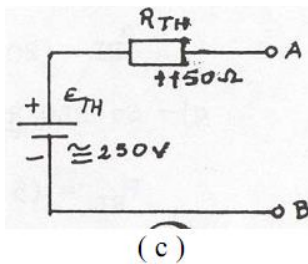
Resolvendo para I_N o circuito da figura 2-47 A, temos:

$$I_N = \frac{E}{r} = \frac{3V}{3\Omega} = 1A.$$

Agora, é só colocarmos a resistência do equivalente de Thévenin ($R_{TH} = r$) em paralelo com o gerador de corrente constante ($I_N = 1 A$), e teremos a solução, que é o circuito da figura 2-47 b.

Vamos converter o equivalente de Norton da figura 2-48 a para o de Thévenin.





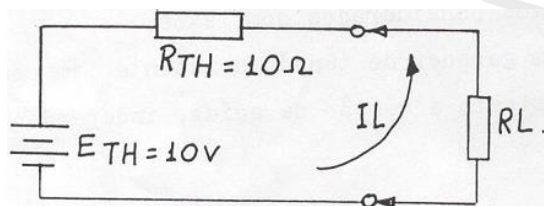
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-48 Convertendo Norton para Thévenin

Solução: vamos computar a queda de tensão através de R_N (figura 2-48 b). Esta queda $I_N \times R_N$, nos dará R_{TH} , que é aproximadamente 250 V. Agora, colocamos a resistência equivalente ($R_N = r = R_{TH}$) em série com o gerador de tensão constante (E_{TH}). Assim, obtemos o equivalente de Thévenin, conforme a figura 2-48 c.

2.11 TEOREMA DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

Este teorema estabelece que "a máxima potência transferida por uma fonte a uma determinada carga ocorre quando a impedância da carga for igual à impedância da fonte". Uma vez que qualquer circuito ou fonte pode ser representado por um circuito equivalente de Thévenin, utilizaremos este como base para os cálculos demonstrativos deste teorema. Ver a figura 2-49.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-49

$$I_L = \frac{E_{TH}}{R_{TH} + R_L} \quad P_{RL} = I_R^2 \times R_L$$

Pelas fórmulas apresentadas podemos fazer as seguintes verificações:

a) Se $R_L = R_{TH} = 10\Omega$,

$$\text{então, } I_L = \frac{10V}{10 + 10} = 0,5A$$

$$\text{e } P_{RL} = (10 \times 0,5 \times 0,5) \text{ w} = 2,5\text{w}$$

b) Se $R_L = 2 \cdot R_{TH} = 20\Omega$,

$$\text{então, } I_L = \frac{10V}{10 + 20} = 0,333A$$

$$\text{e } P_{RL} = (20 \times 0,333 \times 0,333) \text{ w} \cong 2,20\text{w}$$

c) Se $R_L = \frac{R_{TH}}{2} = 5\Omega$,

$$\text{então, } I_L = \frac{10V}{10 + 5} = 0,666A$$

$$\text{e } P_{RL} = (5 \times 0,666 \times 0,666) \text{ w} \cong 2,21\text{w}$$

d) Pelos cálculos executados fica demonstrado que a maior potência sobre R_L foi obtida quando R_L foi igual a R_{TH} .

A compreensão deste teorema é muito importante para a futura aplicação deste conceito em circuitos amplificadores, quando se falar em casamento de impedâncias.

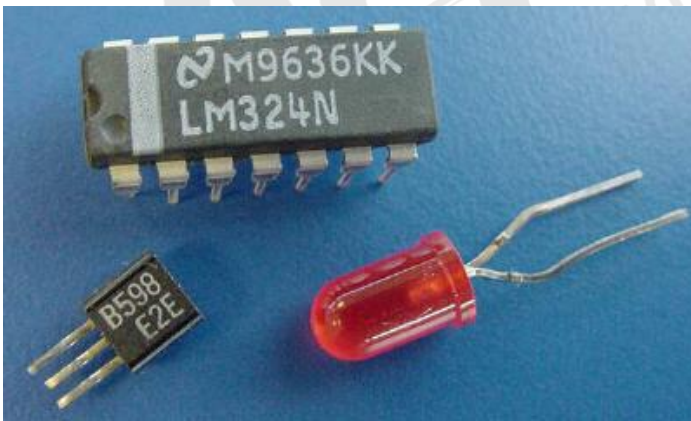
2.12 APÊNDICE

Sumário

- Uma fonte de tensão constante deve ter uma resistência interna muito baixa.
- Não existe, na prática, um gerador de tensão ideal, o que existe é o gerador de tensão real. -Existem vários tipos de geradores de tensão. Entre eles, temos uma bateria, uma fonte de CC regulada ou um seguidor de emissor.
- O equivalente de Thévenin é um dispositivo que atua como um gerador de tensão constante.
- O equivalente de Thévenin é muito empregado na resolução de circuitos considerados complexos.
- Um gerador de tensão constante tem como finalidade manter constante a tensão de saída, independentemente do valor da carga.
- O gerador de corrente constante é capaz de fornecer uma corrente de valor constante a qualquer carga.
- Um gerador de corrente ideal, na prática, não existe.
- Um gerador de corrente ideal teria resistência interna idealmente infinita.

- O circuito equivalente de Norton, é um gerador de corrente constante, muito empregado na simplificação de circuitos complexos.
- Um gerador de corrente constante é considerado "bom" quando o valor da sua resistência interna for no mínimo 100 vezes maior que o valor de RL.
- Existem diversos métodos que visam solucionar redes de correntes contínuas, cujas impedâncias são essencialmente resistências lineares e as tensões são constantes.
- Quatro teoremas largamente empregados na análise de circuitos são: Leis de Kirchoff, teorema de Thévenin, teorema de Norton e teorema de Superposição.
- No fornecimento de energia aos circuitos, temos a considerar as fontes de tensão e as fontes de corrente.
- Os geradores de tensão têm por finalidade manter constante a diferença de potencial entre dois pontos aos quais estejam ligados.
- Um gerador de corrente é aquele que mantém constante a corrente em seus terminais.
- É importante na análise de circuitos, a familiarização com os seguintes termos: Rede, Nó, Braço ou Ramo, Laço e Malha.
- As leis de Kirchoff empregadas na solução de redes complexas são duas: 1ª Lei ou "Lei dos Nós" e 2ª Lei ou "Lei das Malhas".
- A 1ª Lei de Kirchoff diz o seguinte: "A soma das correntes que entram em um nó, é igual à soma das correntes que saem do nó".
- A 2ª Lei de Kirchoff, no seu enunciado diz: "Em qualquer circuito elétrico fechado, a soma algébrica das quedas de potencial deve ser igual à soma algébrica das elevações de potencial".
- Quando as leis de Ohm e Kirchoff já não dispõem dos recursos necessários para a resolução de circuitos mais complexos, lançamos mão de outras ferramentas.
- O teorema de Thévenin é uma das formas utilizadas na resolução de malhas complexas.
- O teorema de Thévenin pode ser assim enunciado: "Qualquer rede de dois terminais pode ser substituída por um circuito equivalente simples, constituído por um gerador, chamado de gerador de Thévenin, cuja tensão E_{TH} , atuando em série com sua resistência interna R_{TH} , obriga a corrente a fluir através da carga".
- Outro teorema que emprega uma técnica semelhante à do teorema de Thévenin, é o teorema de Norton.

- Este teorema diz que: “Uma malha de dois terminais pode ser substituída por um circuito equivalente, que consiste de um gerador de corrente constante I_N , em paralelo com sua resistência interna R_N ”.
- É possível fazermos uma equivalência entre geradores de corrente e de tensão.
- Para isto tomamos as duas fórmulas de IL, para cada gerador (de tensão e de corrente), igualamos estas fórmulas e consideramos iguais as resistências internas ($R_{TH} = R_N = r$).
- O Teorema da Superposição facilita os cálculos de circuitos com duas ou mais fontes.
- Os estudos de divisores de tensão e de corrente podem facilitar em muito a resolução dos cálculos nos teoremas de Thévenin e de Norton.



Fonte: <http://static.hsv.com.br/gjf/solid-state1.jpg>

2.13 DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES

Os materiais semicondutores são elementos cuja resistência situa-se entre a dos condutores e a dos isolantes.

Dependendo de sua estrutura qualquer elemento pode ser classificado como isolante semicondutor ou condutor. Atualmente os principais componentes dos equipamentos eletrônicos são dispositivos semicondutores tais como: diodos, transistores e circuitos integrados. Seu emprego deve-se à habilidade de controlar o fluxo de corrente, executando as mesmas funções das válvulas eletrônicas, porém com grandes vantagens como tamanho, peso e durabilidade.

Por estas razões o emprego dos dispositivos semicondutores trouxe um grande desenvolvimento à eletrônica. Os primeiros conceitos de dispositivos semicondutores datam do início do século.

Em 1906 descobriu-se que determinados cristais, em contato com uma ponta metálica, tinham a propriedade de conduzir corrente elétrica somente numa direção criava-se então, o diodo sólido. Com o desenvolvimento da teoria atômica, os cientistas aperfeiçoaram o diodo sólido até que durante a Segunda Grande Guerra, em 1948 os cientistas W. Shockley, J. Bardeen e W. H Brattain apresentaram um pequeno dispositivo construído com cristal de germânio, que tinha a capacidade de controlar e amplificar a corrente elétrica. Este dispositivo que foi chamado de transistor foi aperfeiçoado e seu desenvolvimento deu origem ao aparecimento de muitos outros dispositivos que hoje formam a grande família dos semicondutores.

Devido ao funcionamento dos semicondutores estar ligado às características da estrutura dos materiais, faremos um estudo destas estruturas.

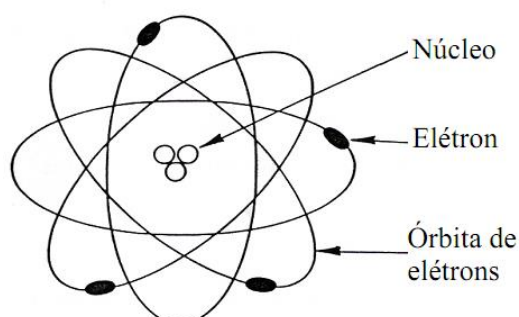
2.14 ESTRUTURA DA MATÉRIA

Como se sabe, podemos dividir um material em porções cada vez menores, até que chegamos a menor das porções, que recebe o nome de molécula. Podemos definir a molécula como sendo a menor porção que um material pode ser dividido. Se da molécula partirmos a uma nova divisão, chegaremos ao átomo, que por sua vez não conservará mais as propriedades do material subdividido.

Muitos modelos de átomos foram apresentados, mas coube a Rutherford e Neil Bohr o modelo do átomo atual.

Segundo este modelo o átomo é constituído de um núcleo que contém partículas denominadas prótons e nêutrons.

Em torno do núcleo giram, em órbitas distintas, outras partículas denominadas elétrons. Este modelo está representado na figura 2-50.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-50 Desenho representativo de um átomo

Pela tabela periódica dos elementos pode-se ver que existem 105 tipos de átomos. A quantidade de partículas que contém um átomo varia de espécie para espécie. Eletricamente, os prótons e os elétrons têm a mesma carga, porém de sinais contrários, sendo que a carga do próton é positiva e a do elétron é negativa. Diz-se que o átomo está eletricamente em equilíbrio, quando o número de elétrons for igual ao número de prótons. Caso contrário, o átomo é chamado de íon.

Um íon pode ser de dois tipos: íon positivo quando o átomo perdeu um ou mais elétrons e íon negativo quando o átomo ganhou um ou mais elétrons. Como citado anteriormente, no átomo, os prótons e nêutrons estão concentrados formando o núcleo, porém os elétrons agrupam-se ao redor do núcleo, em forma de camadas. Estas camadas têm um número máximo de 7, e são designadas pelas letras K, L, M, N, O, P, Q. Cada camada pode ter um número máximo de elétrons e esses são mostrados na figura 2-51.

Nº da camada	Designação	Nº máximo de elétrons
1	K	2
2	L	8
3	M	18
4	N	32
5	O	32
6	P	18
7	Q	8

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-51 Camadas atômicas

Devido ao fato do átomo ter a forma esférica, muitas vezes ele é representado em forma circular para facilitar o raciocínio.

Definição de Número Atômico: Como já foi dito, átomos diferentes possuem diferentes números de partículas. Por exemplo, o átomo de oxigênio possui 8 prótons e 8 elétrons, já o átomo de alumínio possui 13 prótons e 13 elétrons. Para podermos identificar e classificar os vários átomos existentes foi criado um número que indica quantos prótons existem em cada átomo.

Esse número é chamado de "número atômico".

2.15 LIGAÇÃO ATÔMICA

Vimos que com exceção da camada K que se completa com dois elétrons, a camada mais externa dos átomos pode conter oito elétrons, no máximo.

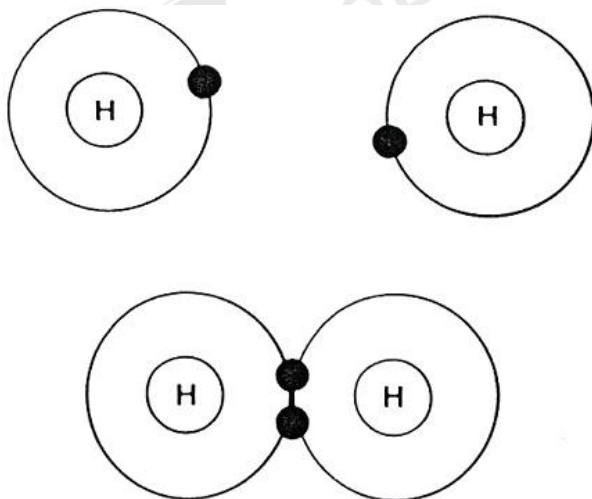
Os átomos que não possuem este número de elétrons tendem a se completarem doando ou recebendo a fim de terem oito elétrons na última camada.

A capacidade de combinação dos átomos é chamada de valência. Os elétrons da última camada dos átomos são chamados de elétrons de valência, pois é através deles que a ligação química se processa.

De acordo com a valência os elementos podem ser: monovalentes, divalentes, trivalentes etc.

Uma ligação covalente é uma combinação química em que os elétrons são compartilhados entre os átomos.

Um exemplo simples de ligação covalente é a combinação de dois átomos de hidrogênio, como mostrado na figura 2-52.

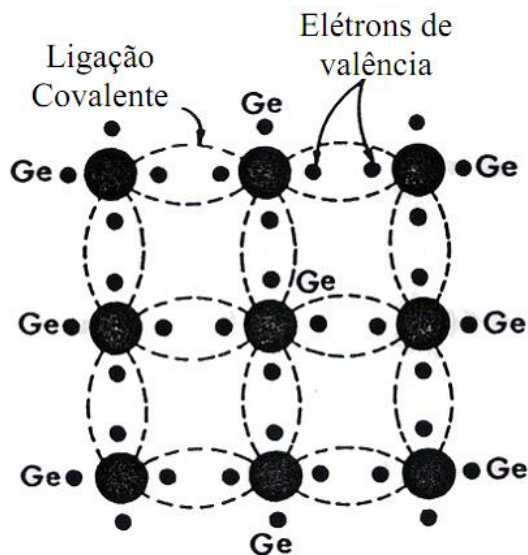


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-52 Ligação covalente

Os átomos de silício e de germânio, que são os mais importantes no estudo de semicondutores, também se ligam covalentemente e embora tenham números atômicos diferentes possuem valências iguais.

Esses átomos podem combinar-se covalentemente formando uma estrutura cristalina que pode ser representada num plano conforme a figura 2-53. Cada átomo compartilha seus elétrons de valência com outros quatro, obtendo uma estrutura eletricamente estável.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-53 Ligação covalente, estrutura cristalina

2.16 MATERIAIS SEMICONDUTORES

Como já foi dito, semicondutores são materiais cuja resistência se situa entre a dos condutores e a dos isolantes. Cabe ressaltar agora o conceito de condutores e a dos isolantes.

Um material condutor é caracterizado por apresentar os elétrons de valência de seus átomos fracamente ligados ao núcleo e, devido a essa ligação não ser muito forte, esses elétrons podem ser considerados livres.

Sendo assim, se aplicarmos uma diferença de potencial à esse material ele conduzirá facilmente uma corrente elétrica. Exemplos de materiais condutores: cobre, ouro, prata, ferro etc.

Quando os elétrons de valência do átomo estão fortemente ligados ao núcleo, de tal modo que não podem ser considerados elétrons livres no material, este é dito "isolante". Os materiais isolantes apresentam então uma forte oposição a passagem da corrente elétrica.

Exemplos de materiais isolantes: borracha, porcelana, vidro etc.

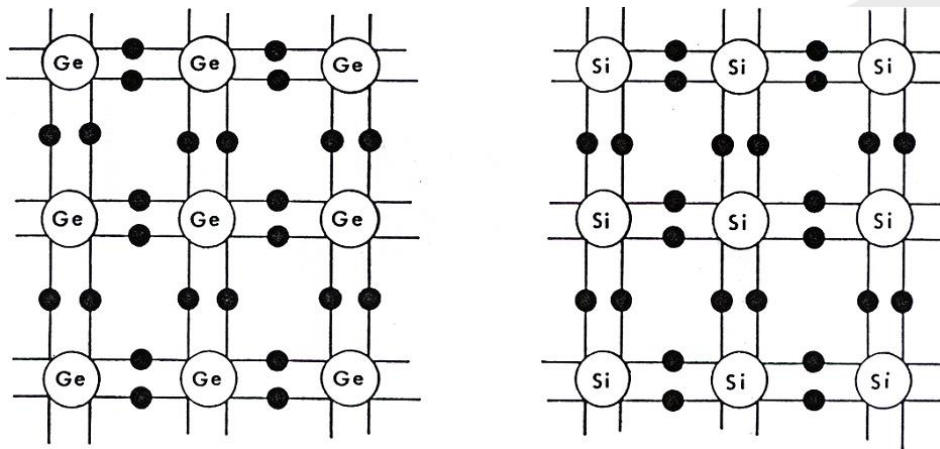
Dos materiais semicondutores existentes o germânio e o silício são atualmente os mais empregados.

Esses átomos ao se unirem entre si formam uma estrutura do tipo cristalina. Uma estrutura é dita "cristalina" quando sua forma é bem definida (sempre em forma de cristais). São exemplos de materiais com estrutura tipo cristalinos: cobre, diamante, silício, germânio etc.

Quando a forma da estrutura formada pela união dos átomos não é bem definida esta é dita

"amorfa". São exemplos de materiais com estrutura tipo amorfos: plásticos, gases, borracha etc.

A figura 2-54 mostra a estrutura cristalina do germânio e do silício.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-54 Rede cristalina plana do Germânio (Ge) e do Silício (Si)

Nas duas estruturas, os átomos se combinam covalentemente.

Cada átomo combina-se com mais quatro, tomando e fornecendo seus elétrons de valência. Observando as duas estruturas, vemos que cada elétron de valência no material está preso a dois átomos, nessa condição não deverá haver elétrons livres no material, logo as suas características elétricas são de isolante. Na realidade, isto só acontece se estes materiais estiverem a uma temperatura de 0o absoluto.

Processo de Formação de Portadores na Rede Cristalina

Apesar das ligações covalentes entre os átomos de cristais puros de silício e de germânio serem rígidas, quando o cristal é submetido a qualquer tipo de energia algumas delas chegam a se romper.

O rompimento entre as uniões ocorre quando o elétron de valência que pertence aos dois átomos adquire energia suficiente para se liberar.

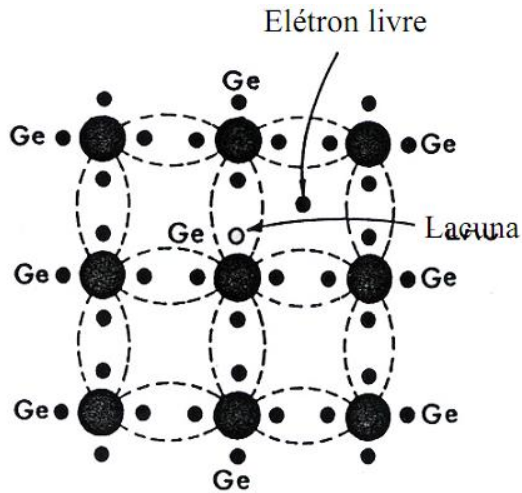
Ligações covalentes são interrompidas quando um dos cristais é submetido a certos campos de energia como: calor, luz, raios X, raios cósmicos etc.

O número de rompimentos é diretamente proporcional à intensidade do campo de energia aplicado ao cristal.

Cada rompimento gera um portador de carga elétrica negativa e uma carga elétrica positiva.

Pela figura 2-55 podemos observar que com o rompimento da ligação covalente ocorre a liberação do elétron, ficando no lugar deste um buraco ou lacuna.

Esta lacuna tem característica positiva, porque qualquer elétron próximo poderá ser atraído por ela.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-55 Geração de lacuna

Como já foi dito, vários fatores podem contribuir para a geração de portadores em cristais de germânio e de silício, porém, a variação de temperatura é o fator que mais os afeta.

A 0° absoluto, o germânio e o silício têm condições de serem isolantes, porém, na temperatura ambiente, aproximadamente 25° C, ambos os cristais apresentam em suas estruturas milhares de rompimentos entre as ligações, criando milhares de portadores positivos e negativos, lacunas e elétrons respectivamente.

Nesta situação tanto o germânio quanto o silício tem características de semicondutores intrínsecos, isto é possuem características próprias.

Na temperatura ambiente de 25° C, um cristal puro de silício apresenta aproximadamente 10^{10} lacunas e 10^{10} elétrons por cm^3 e uma resistividade de $2,4 \times 10^4$ ohms/ cm^3 .

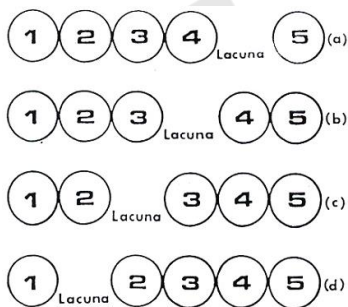
Para a mesma temperatura, um cristal puro de germânio apresenta, aproximadamente, 10^{13} lacunas e 10^{13} elétrons por cm^3 e uma resistividade de 47 ohms/ cm^3 .

Pelos valores de resistividade vemos que na mesma temperatura a estrutura do silício tem ligações covalentes mais estáveis que as do germânio, ou seja, são mais difíceis de serem rompidas.

Fluxo de Lacunas

Quando uma ligação perde um elétron de tal forma que exista uma lacuna, esta é fácil de ser preenchida por um elétron de valência que deixa uma ligação covalente de um átomo vizinho; este elétron ao sair da ligação covalente, deixa outra lacuna. Assim, efetivamente, a lacuna se move na direção oposta à direção do elétron. Esta lacuna, nesta nova posição, pode ser agora preenchida por outro elétron proveniente de outra ligação covalente. Temos assim um mecanismo para a condução de eletricidade.

Um modo conveniente de ilustrar esse movimento é mostrado na figura 2-56, em forma de esferas.



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-56 Fluxo de lacunas

2.17 JUNÇÃO PN - FORMAÇÃO

Até agora estudamos os cristais de silício e de germânio em suas formas puras. Porém, partindo-se de um cristal puro, através de técnicas específicas, consegue-se introduzir neste cristal, átomos de outro metal, de tal modo a se conseguir o comportamento elétrico desejado.

Esta operação é denominada "dopagem" e o metal a ser introduzido no cristal é chamado de impureza. Os metais usados como impureza podem ter átomos trivalentes ou pentavalentes, isto é, com três ou cinco elétrons na última camada.

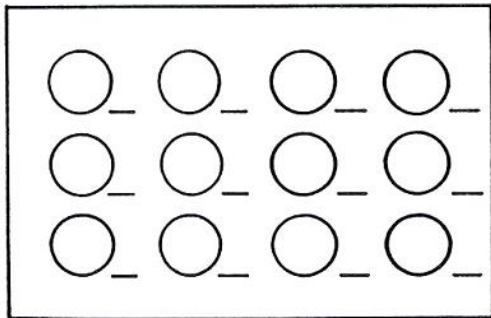
Se na dopagem usarmos impurezas trivalentes (ou aceitadoras), cria-se no cristal portadores de carga positiva ou lacunas, pois, para participar da ligação covalente o átomo da impureza necessita de um elétron para completar sua última camada com quatro elétrons. Este cristal é chamado de positivo ou P.

Porém, se na dopagem usarmos impurezas pentavalentes ou doadoras, cria-se no cristal elétrons livres, pois para participar da ligação covalente o átomo da impureza doa um

elétron que estava em excesso. Este elétron pode então ser considerado livre. Este cristal é chamado de negativo ou N.

Para a criação de um cristal tipo N as impurezas geralmente utilizadas são: fósforo, arsênio, bismuto e antimônio.

A figura 2-57 mostra um bloco representativo do elemento N.



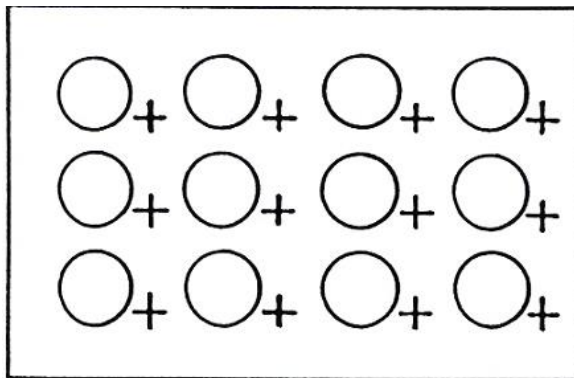
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-57 Cristal tipo N (representação)

Os círculos pequenos representam os átomos pentavalentes, o sinal negativo é o quinto elétron do átomo pentavalente, que não entrou na combinação.

Para a criação de um cristal tipo P as impurezas normalmente utilizadas são: bário, alumínio, gálio e índio.

A figura 2-58 mostra um bloco representativo do elemento P.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

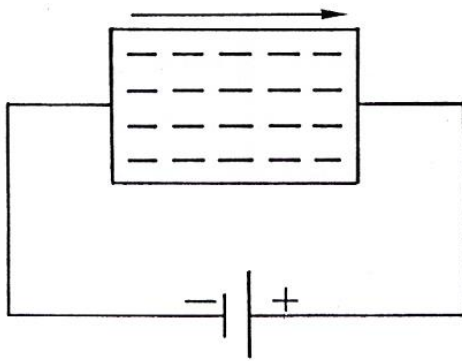
Figura 2-58 Cristal do tipo P (representação)

Os pequenos círculos representam os átomos trivalentes e os sinais positivos fora dos círculos são as lacunas criadas por eles.

Facilmente, entendemos que a dopagem criará, no cristal, tantos elétrons livres ou lacunas quantos forem os átomos de impurezas doadoras ou aceitadoras introduzidos.

Polarização do Elemento N

Ao polarizarmos um elemento N, conforme a figura 2-59, teremos o aparecimento de uma corrente elétrica, cujos portadores são elétrons e cujo sentido é o indicado na figura. A intensidade desta corrente é limitada pela resistividade do elemento N, que depende da quantidade de portadores, que, por sua vez depende da quantidade de átomos da impureza.



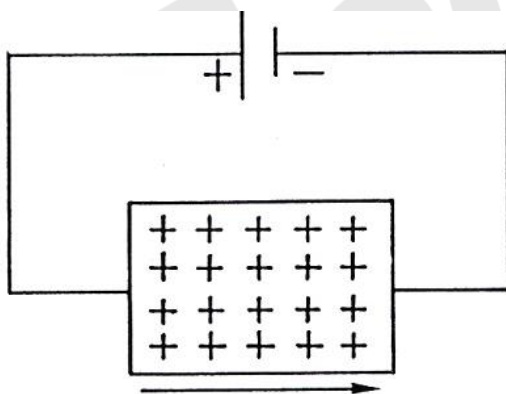
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-59 Polarização do elemento N

Por serem portadores de carga negativa, os elétrons livres no elemento são atraídos pelo potencial positivo da fonte de tensão, dando à corrente o sentido indicado na figura 2-59.

Polarização do Elemento P

A figura 2-60 mostra a polarização de um elemento P. Ao polarizarmos um elemento P conforme indicado na figura 2-60, haverá uma corrente de lacunas no cristal no sentido mostrado.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

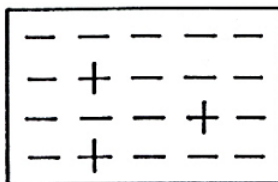
Figura 2-60 Polarização do elemento P

As lacunas, que são positivas, são repelidas pelo seu positivo da fonte de tensão e atraídas pelo polo negativo da mesma.

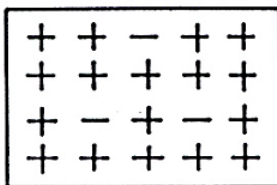
Um elétron entra no cristal no lado negativo da fonte e se combina com uma lacuna, completando a união, estes já não existem mais como portadores elétricos. Em seguida a bateria que perdeu um elétron no lado negativo da fonte, tira um elétron do cristal no lado positivo da fonte, gerando assim, uma lacuna que é imediatamente repelida pelo polo positivo da fonte e atraída pelo polo negativo. Temos assim uma corrente elétrica constante que é limitada pela resistividade do elemento, que por sua vez, depende do número de portadores criados na dopagem do mesmo.

Portadores Majoritários e Minoritários nos Elementos

Como vimos anteriormente, se adicionarmos impurezas pentavalentes a um cristal surgem nesse cristal tantos elétrons livres quanto forem os átomos de impurezas adicionados. Sabemos que na temperatura ambiente o cristal puro apresenta portadores positivos e negativos em números iguais. Porém, com a dopagem essa igualdade é alterada e o material que possuía igual quantidade de portadores, possui agora, maior número de elétrons do que de lacunas. Dizemos então que os elétrons são portadores majoritários e as lacunas portadores minoritários no elemento N.



Elemento N



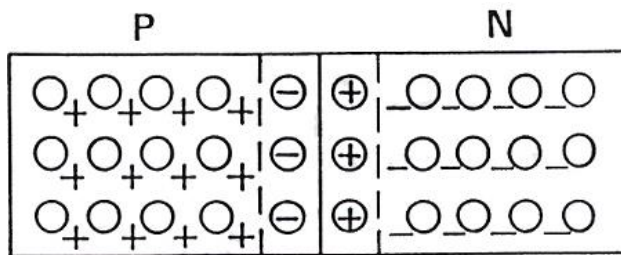
Elemento P

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-61 Concentração de portadores nos elementos P e N

Quando se une um elemento P a um elemento N, há uma combinação natural de portadores ou seja, elétrons do elemento N e lacunas do elemento P, em toda a estrutura das superfícies unidas.

Porém, nem todos os elétrons e lacunas se recombinam porque as primeiras recombinações criam íons, que fazem uma barreira ao processo de recombinação. Isto pode ser visto na figura 2-62.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

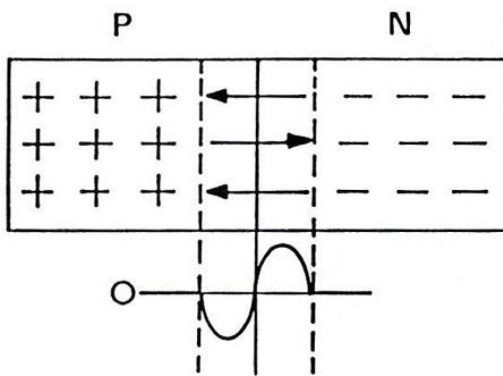
Figura 2-62 Formação de íons na junção PN

No elemento P os átomos que se ionizam são os das impurezas aceitadoras e no elemento N os das impurezas doadoras. Esta região ionizada entre os elementos P e N é dotada de um campo eletrostático negativo, no lado P e positivo no lado N.

Esse campo é considerado como se fosse um campo de força, cujo potencial negativo, da região P, repele os portadores de elétrons, do lado N e cujo potencial positivo, da região N, repele as lacunas do lado P.

Por isso, embora os portadores de elétrons e lacunas estejam em movimento, à temperatura ambiente, eles não se difundem por toda estrutura cristalina.

A figura 2-63 mostra uma junção PN com os portadores de carga e as forças de repulsão.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-63 Campo eletrostático e forças de repulsão na junção PN

Devido à falta de portadores de carga nessa região a mesma recebe o nome de região de "depleção".

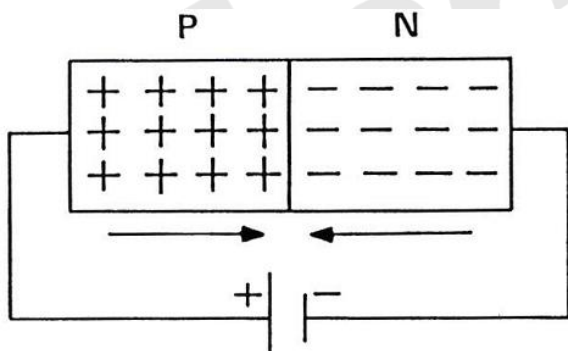
2.18 POLARIZAÇÃO DE UMA JUNÇÃO PN

De acordo com a polaridade dos elementos P e N da junção tem-se um comportamento diferente da mesma.

A junção PN pode ser polarizada de duas maneiras: direta ou inversa.

Junção PN Diretamente Polarizada

Diz-se que a junção PN está diretamente polarizada quando se tem o positivo da fonte de tensão ligado ao elemento P e o negativo ao elemento N, como mostra a figura 2-64.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-64 Junção PN diretamente polarizada

Na polarização direta da junção PN, temos uma diminuição da barreira de potencial pois as lacunas, do lado P, são repelidas pelo potencial positivo e os elétrons do lado N são repelidos pelo potencial negativo da fonte de tensão.

A região agora apresenta uma baixa resistência, cerca de dezenas de ohms.

Os átomos pertencentes ao lado N tornam-se íons positivos, porque seus elétrons foram deslocados em direção da junção, tendo agora condições de receberem elétrons da fonte de tensão.

Por sua vez os átomos do lado P, tornam-se íons negativos, porque suas lacunas foram deslocadas para a junção, tendo condições de fornecer elétrons para o lado positivo da fonte de tensão.

Vemos que com essa polarização, temos elétrons entrando no lado N e saindo no lado P.

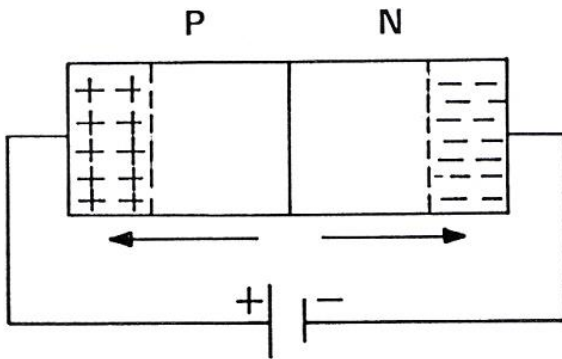
Na região da junção, há um processo constante de recombinação de elétrons e lacunas.

Assim uma corrente elétrica é estabelecida numa junção PN.

Esta corrente é denominada corrente direta.

Junção PN Inversamente Polarizada

Diz-se que a junção PN está inversamente polarizada quando se tem o positivo da fonte de tensão no lado N e o negativo no lado P, como mostra a figura 2-65.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-65 Junção PN inversamente polarizada

Podemos observar que o potencial positivo, no lado N, é uma força de atração para os elétrons e que o potencial negativo, no lado P é uma força de atração para as lacunas.

A ação dessa força faz com que os portadores se desloquem, temos então um aumento na barreira de potencial, como é mostrado na figura 2-65.

Este aumento é diretamente proporcional ao aumento da tensão aplicada à junção PN. Nesta situação não deve circular corrente normal no circuito, porém, devido às características do cristal, haverá uma pequena corrente que é denominada corrente de fuga.

2.19 DIODO SEMICONDUTOR

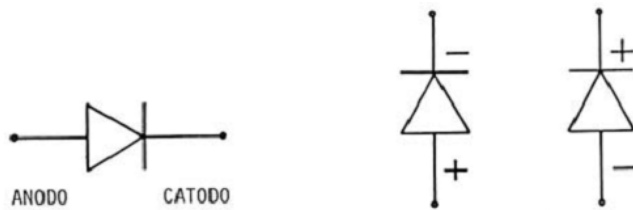
Vimos anteriormente que podemos polarizar uma junção PN de duas maneiras distintas, direta e inversamente.

Na primeira condição temos uma corrente circulando pela junção e na segunda esta corrente pode ser considerada desprezível. Vemos então que esse dispositivo possui características de condução elétrica unidirecional. Tal elemento pelas características acima descritas será amplamente empregado na Eletrônica, principalmente na retificação de sinais recebendo para tanto o nome de diodo de junção ou diodo semiconductor.

2.20 DIODO RETIFICADOR

Existem muitos tipos de diodos, tais como o diodo Zener, o SCR, o fotodiodo etc.

Porém, entre os vários tipos de diodos existentes um dos mais usados na eletrônica é o diodo retificador cujo símbolo é mostrado na figura 2-66.

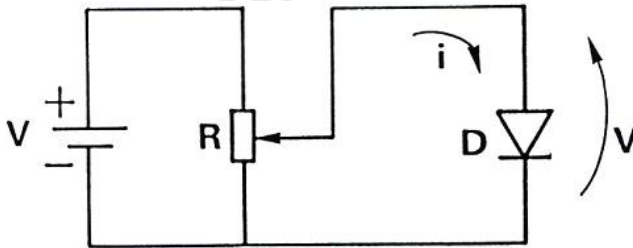


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-66 Símbolo e polarização dos diodos

Polarização Direta do Diodo

Como já foi visto na polarização direta da junção PN o lado N está ligado ao polo negativo da fonte de tensão e o lado P no polo positivo da mesma.



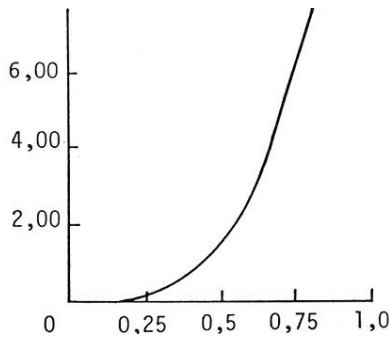
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-67 Circuito do diodo semicondutor polarizado diretamente

Pelo circuito da figura 2-67 podemos observar que, através do potenciômetro R, conseguimos variar, a partir de zero volt, a tensão aplicada ao diodo.

Como a variação de corrente é diretamente proporcional à variação de tensão veremos que ao aumentarmos a tensão sobre o diodo a corrente também aumentará proporcionalmente. Até um determinado valor de tensão este comportamento é válido, a partir de tal ponto a corrente cresce bruscamente e a tensão no diodo tende a ficar constante.

A figura 2-68 mostra a curva de polarização direta de um diodo.

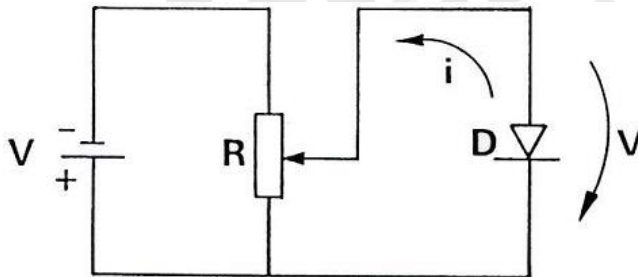


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-68 Curva da polarização direta do diodo

Polarização Inversa do Diodo

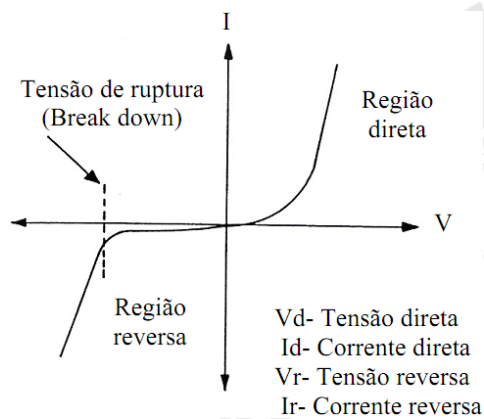
A figura 2-69 mostra o circuito de um diodo polarizado inversamente.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-69 Diodo polarizado inversamente

Na polarização inversa da junção PN, o lado N está ligado no polo positivo da fonte de tensão e o lado P no polo negativo da mesma.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-70 Curva de polarização inversa do diodo

Pelo circuito vemos que, através do potenciômetro R, fazemos com que a tensão negativa no elemento P aumente lentamente. Nesta situação a corrente que flui no circuito é desprezível, porém, se aumentarmos ainda mais o valor da tensão sobre o diodo, atingiremos um valor em que há um aumento brusco da corrente reversa, comprometendo até mesmo a integridade da junção PN. Este valor de tensão é denominado tensão de ruptura.

A curva de polarização reversa do diodo semiconductor é mostrada na figura 2-70.

2.21 RUPTURA DA JUNÇÃO PN

A ruptura da junção ocorre quando a corrente reversa atinge um nível suficiente para romper as ligações entre os átomos do cristal, danificando a mesma.

O valor da tensão de ruptura é de suma importância no projeto de circuitos utilizando diodos polarizados inversamente. Os diodos construídos com cristais de silício suportam maiores tensões inversas do que os diodos de germânio.

A ruptura da junção de um diodo pode ser causada por vários fatores como tensão inversa (ou avalanche) e por efeito térmico.

Ruptura por Tensão Inversa (efeito Avalanche)

Quando a tensão inversa atinge um valor alto o suficiente para provocar o rompimento das ligações entre os átomos do cristal diz-se que a ruptura se dá por tensão inversa ou por efeito avalanche, porque esses rompimentos geram portadores, que por sua vez vão romper, por choque, outras ligações e assim por diante como numa avalanche.

Este processo de quebra e geração de portadores diminui rapidamente a resistência da junção aumentando bruscamente a corrente por ela, podendo inclusive danificá-la.

Ruptura por Efeito Térmico

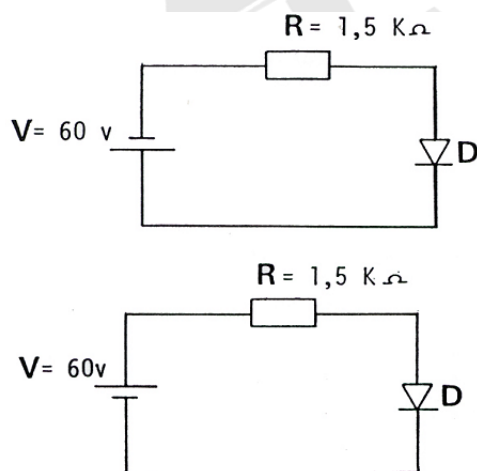
Como visto anteriormente, existe na junção PN a geração de portadores minoritários devido à temperatura.

A ruptura por efeito térmico se dá quando os portadores minoritários provocam uma corrente inversa que resulte numa potência maior que a da capacidade de dissipação da junção.

Para uma tensão inversa constante, a corrente inversa pode ser aumentada pelo efeito térmico, o que aumenta a potência da junção. Com o aumento dessa potência haverá também um aumento de temperatura o que resulta num novo aumento da corrente inversa, esse aumento de corrente tende a aumentar ainda mais a potência e essa por sua vez a temperatura. E assim sucessivamente até a ruptura.

2.22 APLICAÇÃO DO DIODO RETIFICADOR

Pelo que foi visto até aqui notamos que o diodo pode ser considerado como sendo uma chave eletrônica. Quando em polarização direta, a corrente sobre ele fica limitada somente pelos elementos do circuito externo. Porém, quando está polarizado inversamente, a corrente do circuito fica limitada por ele mesmo, tendo assim, o comportamento de um circuito aberto. A figura 2-71 mostra dois circuitos com diodos polarizados direta e inversamente.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

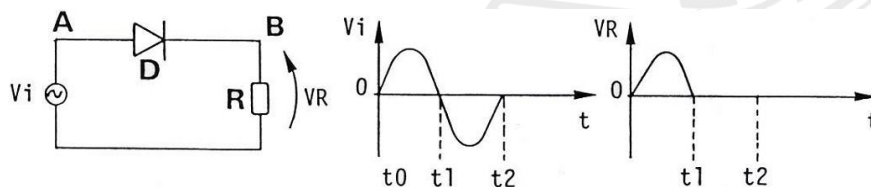
Figura 2-71 Diodos polarizados inversa e diretamente

No circuito com a polarização direta a corrente que flui pelo circuito é uma junção da tensão de 60 V e da tensão sobre o diodo, que é muito pequena, pois em polarização direta o diodo é praticamente um curto-circuito. Tem-se então quase toda tensão (59,3 V) sobre a resistência de 1,5 K, restando apenas uma pequena tensão (0,7 V) sobre o diodo. No circuito com a polarização inversa não há praticamente corrente fluindo, portanto não haverá queda de tensão sobre R. Tem-se então toda a tensão da fonte sobre o diodo o qual pode ser considerado um circuito aberto.

2.23 DIODO EM TENSÃO ALTERNADA

Quando polarizado com tensão alternada o diodo retificador conduz somente durante o semiciclo em que está polarizado diretamente, ou seja, durante o semiciclo em que a tensão de anodo for maior que a de catodo, permanecendo cortado no outro semiciclo.

A figura 2-72 apresenta um circuito com um diodo operando em tensão alternada e também as formas de onda de entrada e de saída.



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-72 Circuito retificador com tensão senoidal

Durante o semiciclo positivo de V_i (de t_0 a t_1), o ponto A fica positivo em relação ao ponto B, polarizando o diodo diretamente.

Nesta condição, o diodo é praticamente um curto-circuito e a corrente no circuito determina em R uma queda de tensão proporcional à tensão entre os tempos t_0 e t_1 da tensão de entrada.

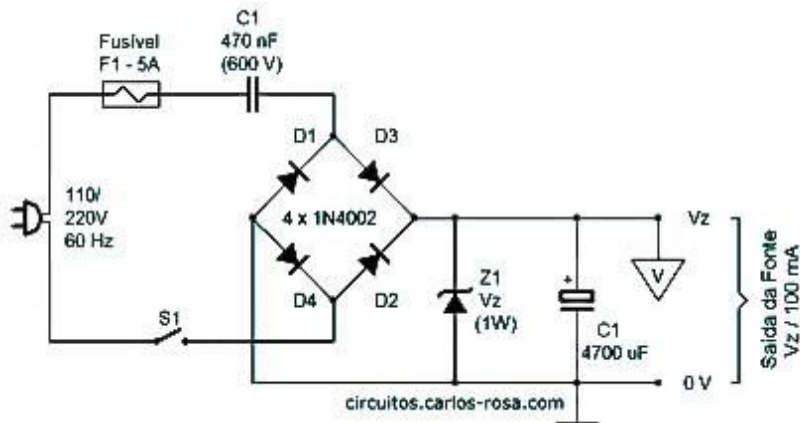
Durante o semiciclo negativo de V_i (de t_1 a t_2), o ponto A fica negativo em relação ao ponto B, polarizando o diodo inversamente.

Nestas condições, o diodo pode ser considerado um circuito aberto.

A ação descrita acima é chamada retificação, e é onde o diodo tem a sua mais importante aplicação.

Como outras aplicações do diodo retificador podemos citar: em detectores de pico, circuitos limitadores, circuitos de proteção etc.

2.24 FONTES DE FORÇA ELETRÔNICA



Fonte: <http://eletronicaeparainiciantes.files.wordpress.com/2013/01/sem-tc3adtulo-1-cc3b3pia.jpg?w=1000>

Figura 2-73

2.25 TIPOS DE FONTES DE FORÇA

Os circuitos que usam transistores, diodos ou circuitos integrados geralmente precisam de uma fonte de força CC para sua operação. Existem basicamente três tipos de fonte de força CC:

- Pilhas e baterias
- Geradores CC
- Fontes de força eletrônica

As pilhas e baterias produzem tensão CC através da ação química. Os geradores CC usam movimento mecânico para girar um condutor em seu campo magnético e assim produzir uma tensão CC pulsante.

Pilhas e baterias são atualmente muito utilizadas, pois os modernos circuitos em estado sólido requerem potências muito baixas comparadas com as necessárias aos antigos equipamentos à válvula. Pilhas e baterias são essenciais aos equipamentos portáteis e aos equipamentos instalados em locais distantes da energia CC.

Porém um equipamento mais potente, nos quais o uso de pilhas ou baterias seria impraticável, a energia CC é fornecida por uma fonte de força eletrônica.

Uma fonte de força eletrônica é um circuito que fornece uma tensão CC para a operação de outros circuitos eletrônicos. Existem as fontes eletrônicas que convertem tensão CA em CC e as que convertem tensão CC em CA, sendo a primeira a mais utilizada.

A energia primária para a maioria das fontes de força eletrônica é a tensão CA de 60 Hz que encontramos nas tomadas. A fonte converte esta tensão em tensão CC, à ser utilizada pelos circuitos eletrônicos, de acordo com as seguintes etapas:

- Ajuste da amplitude da tensão CA
- Retificação
- Filtragem
- Regulagem

A amplitude da tensão CA é ajustada usando-se um transformador de núcleo de ferro.

Este transformador pode ser projetado para elevar a tensão CA aplicada quando uma alta tensão CC de saída for necessária, ou pode ser projetado para reduzir a tensão CA quando uma baixa tensão de saída é requerida.

Após efetuado o ajuste da amplitude da tensão CA, a mesma é convertida em tensão CC. Este processo é chamado de retificação. A retificação é efetuada por diodos retificadores que, como já sabemos, são dispositivos que oferecem alta resistência ao fluxo de corrente em uma direção (de catodo para anodo) e baixa resistência no sentido oposto (de anodo para catodo).

A tensão de saída no retificador pode ser chamada de tensão CA retificada ou tensão CC pulsante. Como na saída da fonte necessitamos de uma tensão CC sem variações, um circuito de filtro é empregado logo após o estágio retificador. Este circuito eliminará as pulsações existentes na saída do retificador. O filtro normalmente consiste de um capacitor, uma combinação de capacitores e indutores ou uma combinação de capacitores e resistores.

A tensão obtida na saída do filtro pode ser aplicada diretamente à carga. Porém essa tensão poderá variar devido a variações da tensão CA de entrada e da carga. Essas variações poderiam prejudicar o desempenho do circuito em operação.

Para obtermos uma tensão de saída constante um circuito regulador é colocado entre o estágio de filtragem e a carga. O regulador efetua as compensações necessárias causadas pelas variações da tensão CA de entrada e as variações de carga, mantendo a tensão de saída constante.

O regulador é normalmente um circuito de controle por realimentação, composto por transistores e outros semicondutores.

Ao utilizarmos uma pilha ou bateria como fonte de energia a tensão fornecida pode não ser adequada ao circuito a ser alimentado.

Neste caso é necessária uma fonte que converta a tensão disponível na utilizável.

Essas fontes são chamadas de conversores CC-CC. Essa conversão da tensão CC de uma dada bateria em um valor mais alto implica na conversão da tensão CC da bateria em tensão CA, através de um dispositivo de chaveamento eletrônico.

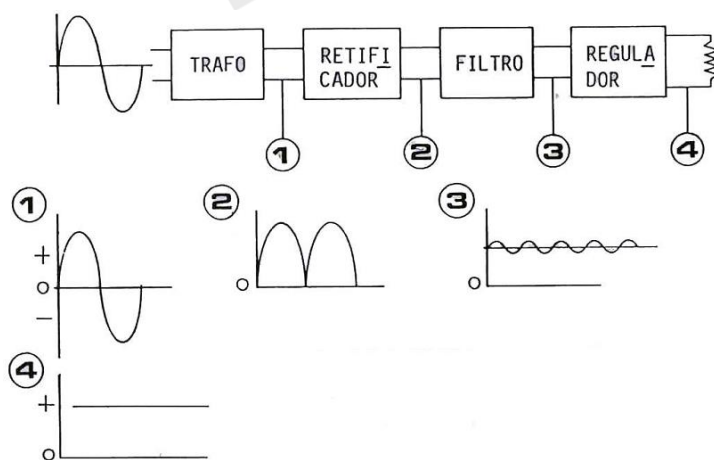
Esta tensão é elevada ao valor desejado por meio de um transformador.

A tensão alternada do secundário do transformador é então retificada para a tensão CC pulsante, filtrada e aplicada à carga através de um regulador. Por último, existe o tipo de fonte de força que converte energia CC em CA, este é chamado de conversor.

Este dispositivo é necessário quando se necessita de energia CA e só se dispõe de baterias e pilhas como fonte de energia, ou seja, só de energia CC. Como no caso de conversor CC-CC a energia CC é transformada em CA, por meio de chaveamento eletrônico, em seguida é elevada ao valor desejado, retificada e filtrada.

Os inversores são muito empregados em aeronaves, onde existem equipamentos que são alimentados com energia CA.

A figura a seguir mostra o diagrama básico em blocos de uma fonte de força eletrônica.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-74 Diagrama básico de uma fonte de força eletrônica

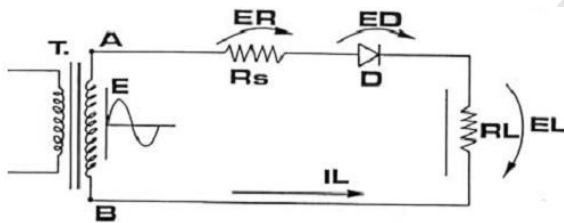
2.26 CIRCUITOS RETIFICADORES

O retificador é aquela parte da fonte de força que, através de diodos retificadores converte a tensão CA do transformador em CC pulsante.

No retificador os diodos semicondutores, atuam como chaves unidirecionais, sensíveis à polaridade e que permitem o fluxo de corrente através da carga em apenas uma direção. Existem vários tipos de circuitos retificadores como veremos a seguir.

Retificador de Meia Onda

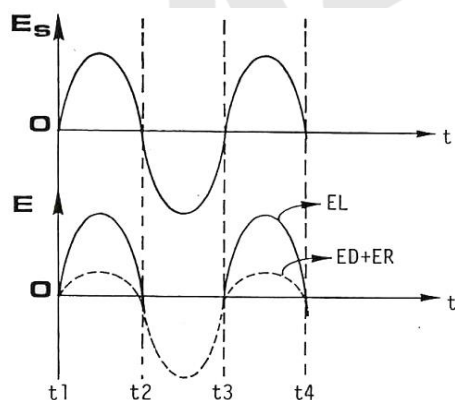
No circuito retificador de meia onda apenas um diodo é usado no processo de retificação. A figura 2-75 mostra o circuito retificador de meia onda.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-75 Circuito retificador de meia onda

Quando a polaridade da tensão no secundário polariza diretamente o diodo D, ocorre um fluxo de corrente através de RL. Quando a polaridade se inverte no ciclo seguinte, o diodo é polarizado inversamente e não há fluxo de corrente na carga como mostra a figura 2-76. Pelas formas de onda da figura 2-76 podemos observar que durante o período de t_1 a t_2 , em que o diodo está conduzindo, parte da tensão aparece através do retificador e da resistência do secundário do transformador, porém sua maior parte aparece sobre a resistência de carga RL. O diodo e o secundário do transformador apresentam uma resistência pequena quando estão conduzindo. A queda de tensão sobre o diodo é de aproximadamente 0,7 V, quando este está conduzindo para diodos de silício e 0,2 V para os diodos de germânio.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-76 Formas de onda em um retificador de meia onda

No período de t_2 a t_3 o diodo está cortado pois, o ponto A no secundário do transformador (figura 2-74) é negativo em relação ao ponto B, o que polariza o diodo inversamente. Nesta situação nenhuma corrente fluirá através da carga, não havendo também queda de tensão sobre a mesma, e toda a tensão do secundário do transformador cairá sobre o diodo.

No período seguinte, de t_3 a t_4 , o diodo conduzirá novamente e a operação será a mesma verificada no período de t_1 a t_2 , analogamente, a operação de t_4 a t_5 será a mesma verificada de t_2 a t_3 . Com isso, teremos sobre RL uma tensão que consistirá de uma série de meias ondas senoidais de mesma polaridade. A corrente através da carga RL será uma série de pulsos que ocorrem na mesma frequência da tensão CA da rede.

No circuito da figura 2-74 vemos que a polaridade da tensão de saída através da carga é positiva em relação à terra, porém, se o diodo fosse invertido a saída seria negativa em relação à terra, pois a corrente fluirá em direção oposta à da análise anterior. Se considerarmos o diodo e o transformador como elementos ideais, ou seja, o diodo apresenta uma queda de tensão igual a zero quando está diretamente polarizado e se comporta como um circuito aberto, quando está inversamente polarizado e o transformador tem uma resistência de enrolamento igual a zero.

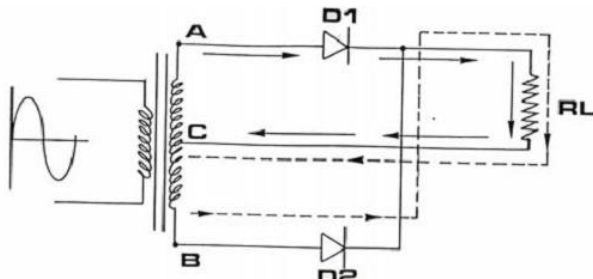
Durante os períodos t_1 , a t_2 e t_3 a t_4 , toda a tensão do secundário do transformador seria aplicada sobre a carga RL com estas condições ideais e durante os períodos t_2 a t_3 e t_4 a t_5 , nenhuma tensão apareceria sobre RL.

O valor médio da forma de onda da corrente ou tensão na saída do retificador de meia onda é igual a 0,318 vezes o valor da corrente ou tensão de pico. Esta seria a tensão ou corrente indicada por um típico medidor CC de D'Arsonval conectado à RL, se todos os componentes fossem ideais. No entanto, na prática esse valor é um pouco menor devido às perdas no diodo e na resistência do enrolamento secundário do transformador.

Retificador de Onda Completa

Como visto anteriormente o circuito retificador de meia onda produz uma série de pulsos a partir da tensão CA de entrada. Mesmo com o uso de filtros, é difícil de se obter uma tensão CC sem flutuações na saída do mesmo. Um circuito retificador de onda completa utiliza os dois semiciclos da tensão CA de entrada, de tal modo a obter uma tensão de saída mais estável.

Este circuito utiliza um transformador com center-tape, dois diodos retificadores e um resistor de carga, como mostra a figura 2-77.



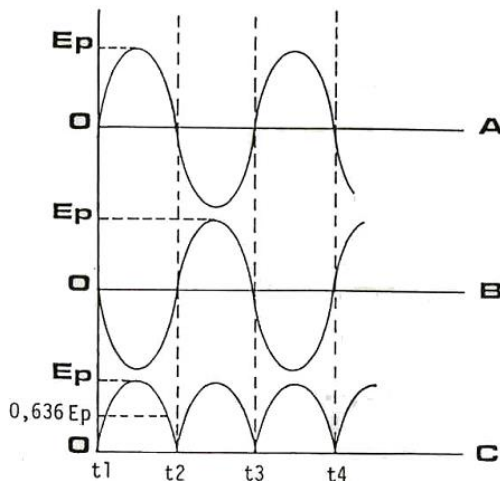
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-77 Circuito retificador de onda completa

Quando o ponto A, no secundário do transformador é positivo em relação ao ponto C, o ponto B será negativo em relação ao mesmo. Esta condição ocorre de t_1 a t_2 na figura 2-78. Durante este período o diodo D1 conduzirá e o diodo D2 não. A corrente será como indicado pelas setas cheias da figura 2-77.

Note que a corrente flui somente na metade do enrolamento do secundário do transformador.

Durante o período de t_2 a t_3 , o diodo D2 conduz e D1 não. A corrente é indicada pelas setas tracejadas na figura 2-77. A figura 2-78 mostra as formas de onda das tensões nos pontos A, B e C.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-78 Formas de onda em um retificador de onda completa

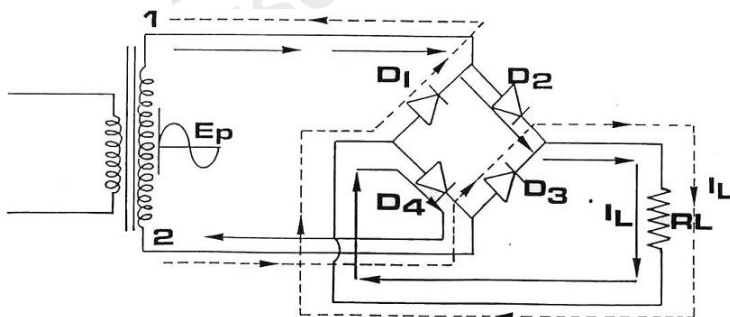
Vemos na figura 2-78 que a tensão CC através da carga é uma série de pulsos unidirecionais, porém há o dobro de pulsos que havia no retificador de meia onda.

Portanto, os pulsos de saída ocorrem em uma frequência que é o dobro da de entrada. Com isso temos que a tensão média através do resistor de carga será o dobro da tensão que era produzida no circuito retificador de meia onda, ou seja, será 0,636 vezes o valor de pico.

Um ponto importante a ser observado no circuito é que apenas um diodo conduz de cada vez, um no semiciclo positivo e outro no semiciclo negativo da tensão de entrada. O diodo que não conduz sofre uma polarização reversa de todo enrolamento, portanto, ambos os diodos devem ser capazes de suportar esta tensão para garantir o bom funcionamento do circuito.

Retificado em Ponte

Um retificador em ponte é um circuito formado por quatro diodos conectados de tal forma que é desnecessário o uso de um transformador com center-tape. Com essa configuração obtém-se a retificação de onda completa com um enrolamento simples de secundário. A figura 2-79 mostra o circuito retificador em ponte.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-79 Circuito retificador em ponte

No instante em que temos E_p positivo, ou seja, o ponto 1 positivo em relação ao ponto 2, os diodos D_2 e D_4 conduzem (ficam em série) pois, as tensões que aparecem sobre eles propiciam um efeito como é mostrado na figura 2-80.

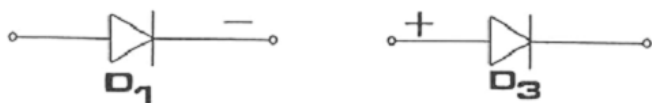
Estes diodos conduzindo farão com que circule uma corrente no circuito, no sentido indicado pelas setas cheias na figura 2-79.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-80 Polarização de D_2 e D_4 no semiciclo positivo da tensão de entrada

Quando E_p inverte a polarização, o ponto 1 será negativo em relação ao ponto 2, devido a estes potenciais os diodos D1 e D3 conduzem (ficam em série) como mostra a figura 2-81.



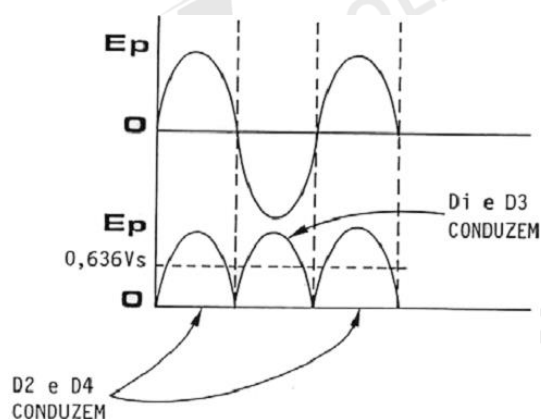
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-81 Polarização de D1 e D3 no semiciclo negativo da tensão de entrada

Uma vez conduzindo, os diodos D1 e D3 propiciarão a circulação de uma corrente cujo sentido é o indicado pelas setas tracejadas na figura 2-79.

É fácil verificar que mesmo V_s mudando de polaridade a corrente na carga circula sempre no mesmo sentido, isto quer dizer que a corrente I_1 possui somente uma polaridade, ou seja, esta corrente é contínua pulsante e conseqüentemente a tensão sobre a carga também o será.

A figura 2-82 mostra as formas de onda no retificador em ponte.



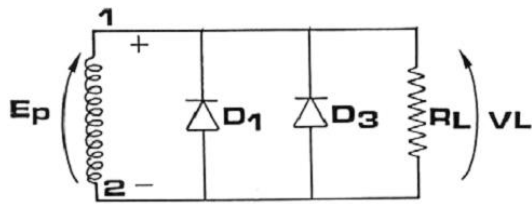
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-82 Formas de onda da tensão de saída no retificador em ponte

Quando os diodos D2 e D4 conduzem os diodos D1, D3, o secundário do transformador e a carga R_1 estão em paralelo. Desta maneira o circuito comporta-se como mostra o esquema da figura 2-83.

Da maneira que os diodos D1 e D3 se encontram na figura 2-83, eles estão polarizados inversamente e a tensão máxima que ficará sobre eles é a tensão máxima fornecida pelo secundário do transformador.

A tensão na carga também será igual à tensão V_s . Analogamente, quando a tensão V_s muda de polaridade, a tensão reversa sobre os diodos D2 e D4 será a mesma tensão que aparece no secundário do transformador e a mesma na carga.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-83 Esquema equivalente do circuito em ponte no semiciclo positivo da tensão de entrada

Logo, pode-se concluir que a tensão de pico reversa sobre os diodos terá o mesmo valor da tensão máxima fornecida pelo secundário do transformador.

2.27 FILTROS

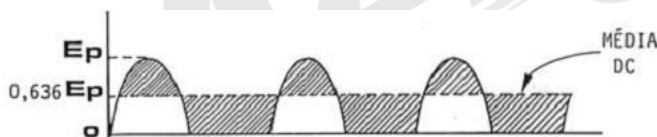
Como vimos a saída de qualquer circuito retificador a diodos é uma corrente CC pulsante. Este tipo de corrente é inadequado para alimentar a maioria dos circuitos eletrônicos, os quais geralmente requerem uma tensão CC constante para funcionar.

Numa fonte de força eletrônica, é usado um circuito de filtro para converter a onda CC pulsante em uma onda CC pura. A seguir veremos a definição de Ripple e os filtros mais comumente usados bem como o seu dimensionamento.

Fator de Ripple

A saída CC pulsante produzida pelos circuitos retificadores é uma forma de onda complexa que pode ser dividida em componentes CA e CC.

A finalidade do filtro é remover a componente CA que é chamada de ondulação ou ripple.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-84 Forma de onda de saída de um retificador de meia onda

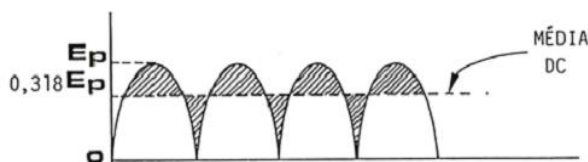
A figura 2-84 mostra a forma de onda CC pulsante da saída do retificador de meia onda.

A tensão CC média é 0,318 vezes o valor de pico da tensão de entrada CA. O ripple ou correspondente CA é indicado pelas áreas sombreadas abaixo e acima da média CC. Podemos considerar o ripple como sendo uma forma de onda não senoidal sobreposta ao

nível médio CC. Note que se a fonte de força opera com uma tensão de linha cuja frequência é 60 Hz, a frequência de oscilação do retificador de meia onda é 60 Hz.

Portanto, o período de oscilação é igual $\frac{1}{60} = 0,01667$ segundos ou 16,67 milissegundos.

A forma de onda da tensão de saída em um retificador de onda completa é mostrada na figura 2-85.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-85 Forma de onda de saída de um retificador de onda completa

Pela figura podemos observar que no retificador de onda completa a média CC de saída é o dobro da de um retificador de meia onda, ou seja, $0,636 E_p$. Isso se deve ao fato de termos mais um pulso CC de saída por ciclo de entrada.

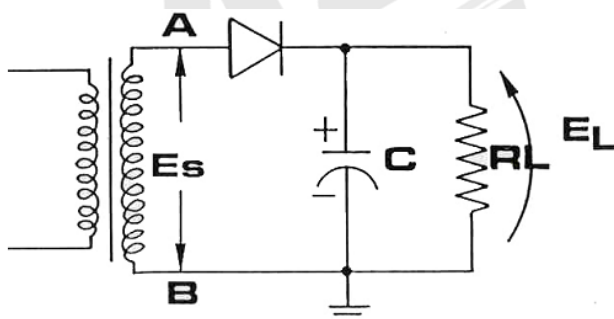
Novamente podemos considerar a ondulação como sendo um sinal não senoidal sobreposto ao nível CC médio.

O valor pico-a-pico da ondulação é igual a E_p , entretanto, a frequência de ondulação é de 120 Hz, quando a frequência da tensão da linha é de 60 Hz.

O período de oscilação é, portanto igual a $\frac{1}{120} = 0,00833$ ou 8,33 ms. O filtro reduzirá a amplitude pico-a-pico da ondulação e aumentará a tensão média CC de saída.

O filtro mais simples e também mais comumente empregado é o filtro a capacitor, que consiste de um capacitor ligado diretamente à carga RL tanto no retificador de meia onda como no de onda completa.

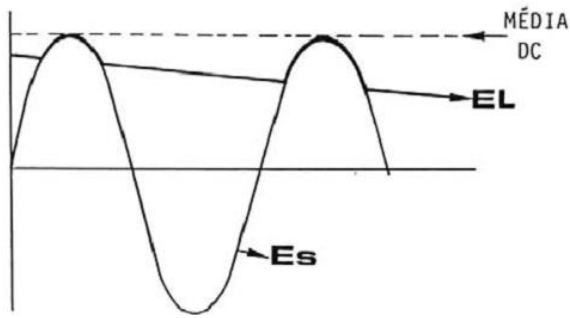
A figura 2-86 mostra o filtro a capacitor.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-86 Filtro a capacitor

As formas de onda de um circuito retificador com filtro são mostradas na figura 2-87.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-87 Forma de onda de tensão num circuito retificador com filtro

Na figura 2-87 vemos a tensão do secundário do transformador bem como a tensão de saída da fonte de força EL. Inicialmente o capacitor C está descarregado, porém quando nele é aplicada a energia, se carrega rapidamente com o valor da tensão de pico do secundário durante o período de condução do diodo. Sempre que a tensão do secundário excede a tensão de carga do capacitor o diodo conduz.

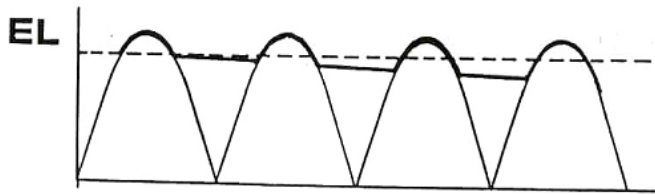
Quando a tensão do secundário cai abaixo do valor da carga do capacitor, o diodo fica polarizado inversamente e não conduz com isso o capacitor se descarrega através da resistência RL. Se a constante de tempo RC do capacitor for suficientemente grande, a quantidade de energia que o capacitor descarregará durante os picos da tensão CA será pequena.

Como resultado teremos uma tensão CC na saída aproximadamente constante. O capacitor reduz bastante a ondulação bem como aumenta a tensão média nos terminais de saída. A tensão CC de saída se aproxima do valor de pico do secundário. A redução na ondulação é proporcional ao tamanho do capacitor. Quanto maior a capacitância, menor será a descarga do capacitor durante o tempo em que o diodo não conduzir. O processo de filtragem da tensão de saída do retificador de onda completa é idêntico ao usado no retificador de meia onda, entretanto no retificador de onda completa o capacitor de filtro tem um tempo de descarga menor, antes de ser carregado novamente, visto que neste circuito cada semiciclo da entrada CA produz um pulso através da carga.

No circuito de meia onda, o tempo de descarga é aproximadamente igual a um período completo da onda senoidal de entrada, ou seja, aproximadamente 16 ms, para uma entrada CA de 60 Hz.

Com isso temos que no circuito retificador de onda completa, para a mesma carga, o mesmo capacitor de filtro e tensão de entrada, a ondulação será muito menor e a tensão

média CC de saída maior do que no retificador de meia onda. A figura 2-88 mostra a saída do retificador de onda completa com filtro.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

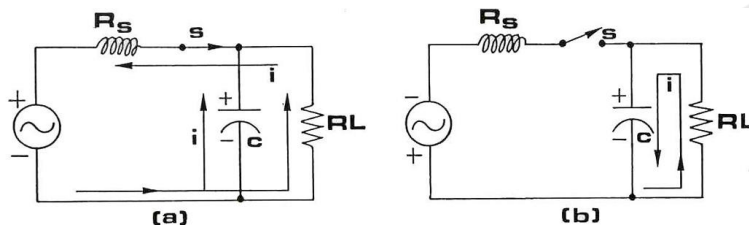
Figura 2-88 Saída do retificador de onda completa com filtro

Teoria de Funcionamento do Filtro a Capacitor

Um método de analisar o funcionamento do filtro é considerar as variações de corrente e tensão em relação ao tempo.

A figura 2-89 mostra um circuito equivalente simplificado de um retificador de meia onda com filtro capacitivo.

Neste esquema simplificado, a fonte CA é representada por um gerador e sua resistência interna R_s , o diodo é representado por uma chave S que é sensível à polaridade e o capacitor C é o filtro através da carga R_L .



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-89 Circuito equivalente de um retificador de meia onda

Quando a polaridade do sinal CA for a apresentada na figura 2-89 a, o diodo conduzirá e atuará como uma chave fechada. Tem-se então corrente circulando que fará com que o capacitor se carregue com a polaridade indicada. Durante o semiciclo seguinte, a polaridade se inverte e o diodo fica polarizado inversamente, podendo ser considerado como uma chave aberta, como mostrado na figura 2-89 b. Nesse período o capacitor se descarrega através da carga R_L . No circuito de carga, o capacitor se carrega de R_s para o pico da tensão aplicada. Como R_s é muito pequena, o capacitor se carrega rapidamente. Durante o semiciclo seguinte, quando o diodo não conduz, o capacitor se descarrega através da carga. Como a resistência de carga R_L é muito maior que R_s , na descarga a constante de tempo é

maior. Para melhor filtragem e mínima ondulação, a constante de tempo de descarga deve ser grande. Este grande tempo de descarga pode ser conseguido com um alto valor de capacitância e resistência, portanto o capacitor deve ser o maior possível.

Com isso a constante de tempo RC será grande o bastante para tornar mínima a descarga do capacitor, durante os períodos em que o diodo não conduzir.

Cálculo do Capacitor de Filtro

Embora filtros mais complexos possam ser construídos, para a maioria das aplicações, o simples capacitor de filtro é mais adequado para atender a filtragem requerida.

As relações entre corrente de carga, tensão de ondulação, valor do capacitor e tempo de descarga, podem ser formulados através de uma simples equação, que é apresentada a seguir:

$$C = \frac{I \cdot t}{E_R}$$

onde:

C = Valor do capacitor de filtro em Farads;

I = Corrente CC, na carga, em ampères;

t = Período da tensão de ondulação CA, em segundos;

E_R = Máxima tensão de ondulação pico-a-pico permitida, em volts.

Para determinarmos I, devemos conhecer o valor da resistência de carga e a tensão CC de saída desejada. O tempo t é o período de descarga do capacitor de filtro e é igual ao período de ondulação CA.

Nos circuitos retificadores de meia onda, a frequência de oscilação é de 60 Hz, tornando t = 0,01667 s.

Nos circuitos retificadores de onda completa, a frequência de oscilação é de 120 Hz tornando t = 0,00833 s.

Exemplo: Considere uma fonte de força com retificador de onda completa, que tenha uma tensão CC de saída igual a 5 V, sendo a máxima ondulação pico-a-pico permitida de 1 %. A corrente de carga é 200 mA. Qual o valor mínimo do capacitor a ser usado?

$$I = 0,2 \text{ A}$$

$$t = 0,00833 \text{ s}$$

$$E_R = 0,01 \times 5 = 0,05 \text{ V}$$

$$C = \frac{It}{E_R} = \frac{0,2 \times 0,00833}{0,05} = 0,0333 \text{ Farads}$$

$$C = 33,33 \text{ MF}$$

Na prática deve-se usar um capacitor de valor um pouco superior a esse.

Outro fator importante a ser considerado na utilização do capacitor de filtro é a tensão de operação do mesmo. Os capacitores em sua maioria são projetados para operarem com tensão abaixo de um limite máximo.

Quando escolhermos a especificação da tensão máxima do capacitor, devemos ter certeza que ela é maior que a tensão de saída da fonte de força. Geralmente é aconselhável deixarmos uma faixa de segurança de 20 %.

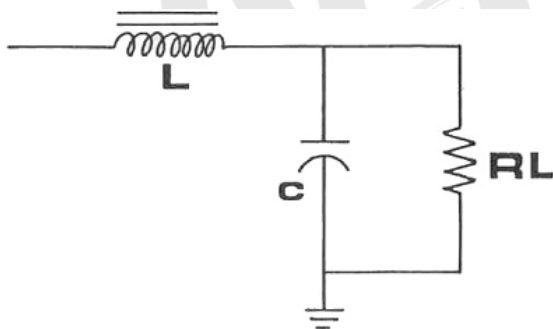
O tipo de capacitor mais comumente usado em filtros é o eletrolítico de alumínio. Porém para aplicações em pequenas correntes, algumas vezes são usados capacitores de tântalum. Tanto os capacitores eletrolíticos como os de tântalum, são capacitores polarizados e devem ser conectados no circuito com a polaridade correta, para que funcionem adequadamente.

Filtros LC e RC

Embora o filtro a capacitor seja o mais simples, pode-se melhorar a filtragem usando-se indutores (Choques) e resistores em combinação com ele.

Um choque pode reduzir muito a amplitude de ondulação, visto que ele se opõe às variações de corrente através dele.

A figura 2-90 mostra um filtro típico com choque de entrada.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-90 Filtro típico com choque de entrada

Para a mesma carga e mesmo retificador, este circuito proporciona maior tensão de saída e ondulação (ripple) mais baixa.

Os choques de filtro consistem de um enrolamento feito sobre um núcleo de ferro laminado. Em consequência, os choques são grandes, pesados e caros, o que os tornam geralmente incompatíveis com os circuitos de estado sólido, que são pequenos e leves. Pode-se também melhorar a qualidade da filtragem usando-se resistores associados a capacitores.

Usando-se resistores no lugar do choque no circuito (figura 2-90), a tensão de ondulação de saída pode ser reduzida a um valor menor que aquele obtido com apenas um capacitor. Quanto maior o valor do resistor, menor a tensão de ondulação, porém, certa quantidade da tensão produzida pela fonte cai sobre esses resistores, o que reduz a tensão disponível na saída.

2.28 TIPOS DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA

A sobrecarga é uma das condições anormais mais comuns de ocorrer no emprego de fontes de força. Ela pode ser resultado de um curto-circuito nos terminais da fonte ou mesmo devido ao mau funcionamento de algum componente do circuito. O método mais usado para proteger as fontes de força contra sobrecarga é o emprego de fusíveis, que é um elemento sensível à corrente, ou seja, ele se abre quando a corrente que o atravessa excede um valor específico.

Fusíveis

Como vimos, o fusível é um elemento dimensionado para proteger o circuito contra uma corrente exclusiva. Ele consiste de um dispositivo condutor conectado em série com o circuito ao qual deverá proteger. Caso a corrente no circuito exceda a um valor pré-determinado para o fusível, o mesmo se romperá, interrompendo o fluxo de corrente. Durante o funcionamento normal, enquanto a corrente estiver abaixo da especificação do fusível, o mesmo simplesmente atuará como um resistor de valor muito baixo.

Um ponto a ser considerado é que os fusíveis não se abrem, ou se queimam exatamente no instante em que a corrente excede o valor especificado. Esse tempo de rompimento dependerá da magnitude e da duração da sobrecarga. Se a corrente através do fusível

exceder a sua especificação apenas ligeiramente, ele levará muito tempo até se aquecer, fundir e se romper.

Porém, se a sobrecarga é muito maior que o valor especificado para o fusível, seu aquecimento e queima serão rápidos. Quanto à velocidade os fusíveis são disponíveis em três faixas: ação retardada, retardo médio e alta velocidade.

Os fusíveis de ação retardada são dimensionados para circuitos que algumas vezes devem suportar sobrecargas de 200 a 400% acima da corrente nominal. Se essa sobrecarga durar menos de 10 segundos, esse tipo de fusível a suportará sem abrir.

Os fusíveis de ação retardada têm sua maior aplicação em circuitos que são submetidos a sobrecargas temporárias, tais como: circuito de partida de motores e circuitos de carga de capacitores.

Os fusíveis de retardo médio são geralmente usados em circuitos que podem suportar uma sobrecarga superior a 200% do valor especificado, por cerca de um segundo. Esses fusíveis são usados em aplicações onde os componentes a serem protegidos poderão ser, ocasionalmente, submetidos a uma corrente ligeiramente superior ao valor máximo de operação, sem se danificarem.

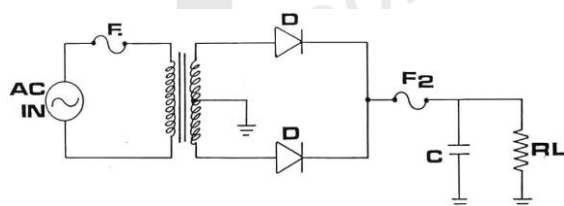
Os fusíveis de retardo médio se abrirão em poucos segundos mediante sobrecargas de 100 a 200% do valor nominal. Os fusíveis de ação rápida são projetados para abrir muito rapidamente, mesmo com sobrecargas bem pequenas. São geralmente empregados na proteção de circuitos delicados ou críticos.

Numa fonte de força a principal aplicação do fusível é na proteção do transformador de força e dos diodos semicondutores. Os fusíveis para a proteção do transformador de força são conectados no circuito do enrolamento primário. Usa-se normalmente o de retardo médio. Qualquer sobrecarga no secundário será refletida como um aumento de corrente no primário e se não forem removidas poderão danificar o transformador.

Se a corrente de carga for excessiva, ou se o capacitor de filtro entrar em curto, por exemplo, pode-se usar um fusível para efetuar a proteção apenas dos diodos retificadores.

Esse fusível é de ação rápida e é conectado em série com a saída do circuito retificador.

A figura 2-91 mostra a fonte de força com os dois diodos de proteção.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-91 Fonte de força com diodos de proteção

No cálculo do fusível a ser utilizado, podemos adotar uma das fórmulas abaixo e adquirir o valor padrão imediatamente superior do encontrado.

Para o fusível de retardo médio:

$$\frac{\text{Máxima corrente permitida}}{0,75}$$

Para o fusível de ação retardada:

$$\frac{\text{Máxima corrente permitida}}{0,85}$$

Disjuntores (Circuit Breakers)

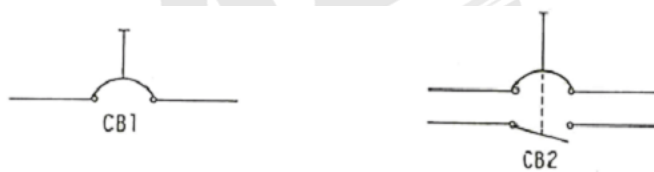
Disjuntores são dispositivos usados para proteção de circuitos. Quando há uma sobrecarga no circuito o disjuntor se abre interrompendo o mesmo. A diferença entre o disjuntor e o fusível é que o primeiro pode ser rearmado mecanicamente, isto é, o disjuntor não se queima, ele se desarma.

Os disjuntores podem ser acionados (desarmados) por magnetismo ou por efeito térmico. Normalmente é por efeito térmico.

Os disjuntores ou circuit breakers têm grande aplicação na aeronáutica. Na linha de alimentação elétrica das aeronaves geralmente cada equipamento possui seu circuit breaker correspondente.

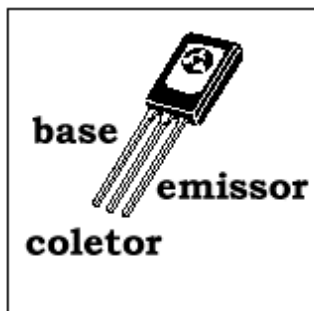
Quando houver o desarme de um disjuntor, o mecânico ou o piloto poderá verificar se existe alguma anormalidade no circuito e, se nada for constatado, o dispositivo poderá ser rearmado. No caso de novo desarme, a existência de defeito está comprovada, exigindo assim uma pesquisa mais detalhada no circuito.

A figura 2-92 mostra os símbolos usados na representação dos disjuntores.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 2-92 Simbologia dos disjuntores



Fonte: <http://www.ifj.unicamp.br/~kleinke/f540/carac/cbip08.gif>

MÓDULO III

TRANSISTOR DE JUNÇÃO

INTRODUÇÃO

Caro aluno,

Neste módulo estudaremos transistores de junção e polarização de transistores.

O transistor de junção bipolar, TJB, (bipolar junction transistor, BJT, em inglês), é o tipo de transistor mais comum, devido sua facilidade de polarização e durabilidade. Recebe este nome porque o processo de condução é realizado por dois tipos de carga - positiva (lacunas) e negativa (electrões).

O transistor de junção bipolar foi o primeiro tipo de transistor a ser produzido. Os primeiros transistores foram produzidos com Germânio e passado algum tempo começou a ser utilizado o Silício.

O objetivo dos inventores foi substituir as válvulas termoiónicas, que consumiam muita energia, tinham baixo rendimento e funcionavam com tensões elevadas.)

Convido você a seguir comigo, aprofundando seus conhecimentos.

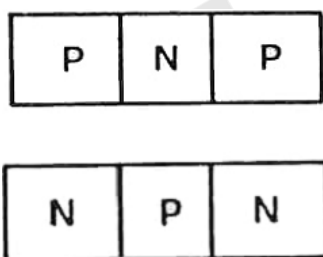
Bons estudos...

Com a compreensão da constituição e comportamento dos elementos semicondutores, os cientistas a partir de 1948, conseguiram construir um dispositivo que podia executar a função de uma válvula eletrônica, como amplificador de corrente. Este dispositivo foi determinado transistor.

Dos primeiros transistores cujas características eram bastante limitadas, até os atuais circuitos integrados, que englobam dezenas ou centenas de diferentes dispositivos num minúsculo sólido, o avanço tecnológico foi muito grande.

3.1 FORMAÇÃO DAS JUNÇÕES PNP E NPN

Um transistor de junção consiste em um cristal de silício ou de germânio no qual existe uma camada de silício do tipo N entre duas camadas de silício do tipo P, ou uma camada P entre duas camadas N. No primeiro caso teremos um transistor chamado PNP e, no segundo, um transistor NPN, como mostra a figura 3-1.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

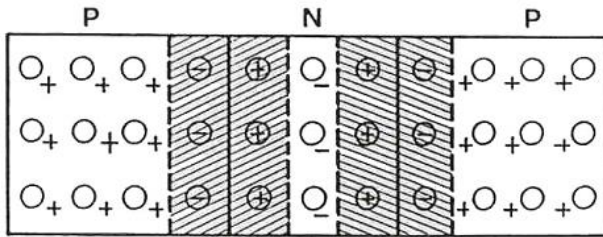
Figura 3-1 Transistores PNP e NPN

Com a formação das três regiões, aparecem automaticamente duas outras pequenas regiões internas, já conhecidas como barreira de potencial ou região de depleção.

As barreiras de potencial são campos eletrostáticos formados nas linhas de junção, da seguinte maneira: na figura 3-2, os elementos P possuem grande quantidade de portadores positivos e o elemento N grande quantidade de portadores negativos. A difusão de elétrons da região N e lacunas das regiões P resulta em recombinações nas linhas das junções, ionizando os átomos das impurezas.

Os átomos ionizados com cargas diferentes (negativos na região P, porque recebem elétrons, e positivos na região N, porque doavam elétrons), formam um campo eletrostático que paralisa o processo de difusão.

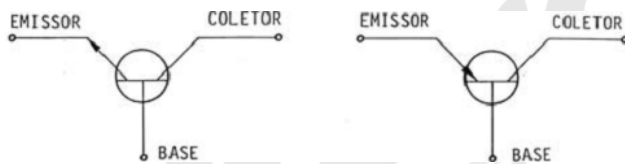
A difusão é o movimento de portadores numa área, onde estão mais concentrados, para uma região onde sua concentração é menor.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-2 Barreiras de potencial num transistor PNP

A figura 3-3 mostra a simbologia usada na representação dos transistores PNP e NPN.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-3 Símbolos dos transistores

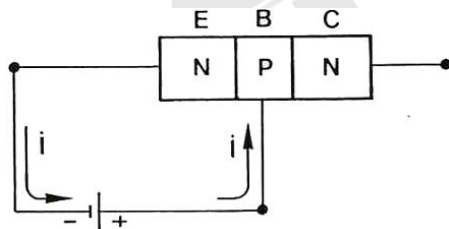
Na representação simbólica do transistor, a seta identifica o emissor, que é o elemento que emite portadores. O elemento oposto ao emissor é chamado coletor, pois recebe os portadores enviados pelo emissor. O elemento intermediário é denominado base.

A base controla o fluxo de portadores entre o emissor e o coletor. A seta sempre aponta para o elemento negativo. Assim, se a seta apontar para o emissor, neste caso negativo teremos um transistor NPN. Se a seta apontar para a base, o coletor e o emissor serão do tipo P teremos então um transistor tipo PNP.

Polarização do Transistor NPN

O transistor só irá funcionar corretamente se tiver uma polarização adequada.

Quando ligamos uma bateria na junção base-emissor, como mostra a figura 3-4, observamos que corresponde a uma polarização direta.

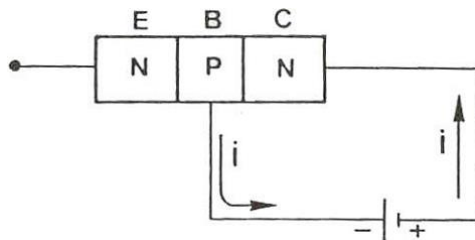


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-4 Transistor NPN em polarização direta

Dessa maneira fluirá então uma corrente através da baixa resistência da junção emissor-base.

Se aplicarmos tensão através da segunda junção, como mostrado na figura 3-5, fluirá uma corrente muito pequena através da resistência da junção base-coletor, pois a polarização é inversa.

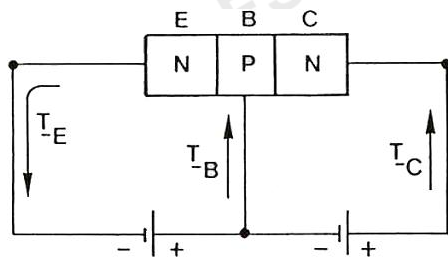


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-5 Transistor NPN em polarização inversa

Esta pequena corrente, que é causada pelos portadores minoritários, é chamada de corrente de fuga.

Consideramos até agora as duas junções polarizadas separadamente. A seguir veremos o comportamento do transistor quando nele aplicamos as duas tensões ao mesmo tempo.

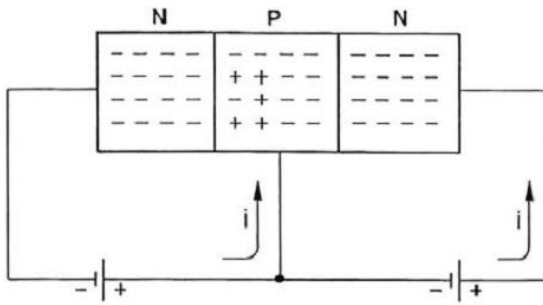


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-6 Transistor NPN polarizado

Analisando a figura 3-6, podemos ver que a corrente que passa pelo emissor (I_E) se divide em dois ramais uma que vai para o terminal da base (I_B) e outra que vai para o coletor (I_C), temos que: $I_E = I_B + I_C$.

Apesar da polarização inversa entre base e coletor, o valor da corrente do coletor é muito superior ao da corrente que fluía quando o transistor era polarizado isoladamente. Nesta situação I_C é aproximadamente 98% de I_E , com isso podemos concluir que a quantidade de corrente I_C depende da polarização direta entre base e emissor. Este fenômeno pode ser entendido analisando-se a figura 3-7.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-7 Portadores em movimento no transistor NPN

Os elétrons na região do emissor são repelidos pelo potencial negativo da fonte em direção à base, passando com facilidade pela junção base-emissor, pois a mesma está polarizada diretamente apresentando assim uma baixa resistência.

Alguns elétrons se recombinam com as lacunas existentes na base, formando a corrente de base.

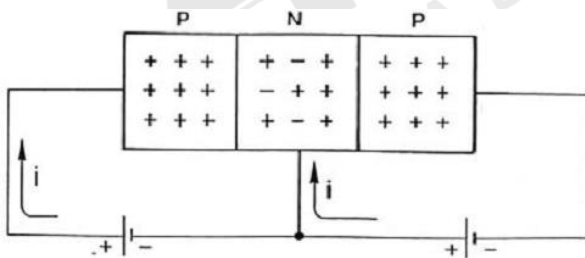
Como o número de lacunas na base é inferior ao número de elétrons que nela penetram, e também devido ao fato da base ter dimensões muito reduzidas, a maioria dos elétrons atinge a junção base-coletor.

Esses elétrons que estão sendo atraídos pelo potencial positivo do coletor ultrapassam a junção base-coletor, chegando ao terminal positivo da fonte.

Este movimento de elétrons nos elementos do transistor constituem as correntes elétricas através do mesmo.

Polarização de um Transistor PNP

A análise da polarização do transistor PNP é análoga ao do NPN, entretanto, para que a junção emissor-base seja polarizada diretamente e a junção base-coletor inversamente, é necessário mudar as polaridades das fontes, com relação às usadas no transistor NPN. Estas polaridades estão apresentadas na figura 3-8.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-8 Portadores no transistor PNP

As lacunas da região do emissor, que são repelidas pelo potencial positivo da fonte em direção à base, ultrapassam a junção emissor-base com facilidade, pois a mesma está polarizada diretamente e sua resistência é baixa. Novamente algumas destas lacunas se recombinam com os elétrons existentes na base, constituindo a corrente da base I_B . Devido ao baixo número de elétrons existentes na base, a maioria das lacunas que nela penetram alcançam a junção base-coletor. Estas lacunas que estão sendo atraídas pelo potencial negativo do coletor ultrapassam a junção base-coletor, chegando ao terminal negativo da fonte.

Portanto enquanto o potencial positivo retira elétrons do emissor, o potencial negativo fornece elétrons ao coletor.

3.2 GANHOS E AMPLIFICAÇÃO DO TRANSISTOR

Cada uma das junções de um transistor apresenta uma queda de tensão, que é denominada conforme a junção. Temos então:

V_{BE} ou V_{EB} = tensão entre base e emissor

V_{BC} ou V_{CB} = tensão entre base e coletor

V_{CE} ou V_{EC} = tensão entre coletor e emissor

A maioria deles é V_{CE} . Podemos dizer que V_{CE} é a soma das outras duas, ou seja: $V_{CE} = V_{BE} + V_{BC}$. Podemos também medir a tensão de um elemento qualquer do transistor em relação à terra. Neste caso temos então:

V_B = tensão entre base e terra

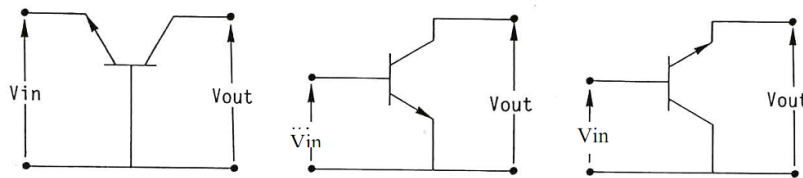
V_E = tensão entre emissor e terra

V_C = tensão entre coletor e terra

Estes termos são aplicados à qualquer tipo de transistor em qualquer configuração.

Tipos de Configuração

O transistor pode ser ligado em um circuito de três formas distintas: base comum, emissor comum ou coletor comum. O nome da configuração é referenciado ao elemento do transistor que é comum aos circuitos de entrada e de saída. A figura 3-9 mostra um transistor NPN nas três configurações, respectivamente: base comum, emissor comum e coletor comum.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-9 Transistores nas configurações **B_C**, **E_C** e **C_C**

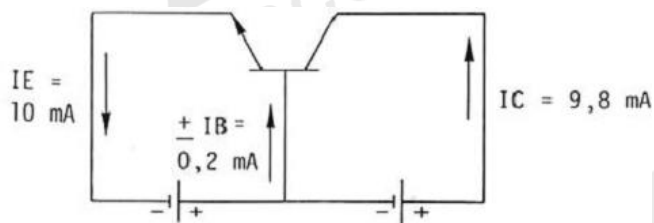
Cada configuração apresenta vantagens e desvantagens que irão determinar a sua aplicação.

Ganhos do Transistor

Como a principal função do transistor é amplificar sinais o mesmo deve apresentar um "ganho" de tensão e de corrente, ou seja, a tensão ou corrente de saída deve ser maior que a tensão ou corrente de entrada.

Normalmente o maior interesse é saber os ganhos referentes à corrente alternada, mas iniciaremos com exemplos do ganho com corrente contínua.

Consideremos o transistor na configuração mostrada na figura 3-10.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-10 Transistor na configuração base comum

Com os valores atribuídos para I_E e I_C temos:

$$\text{Ganho de corrente} = \frac{\text{Corrente de saída}}{\text{Corrente de entrada}} = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\text{Ganho de corrente} = G_i = \frac{9,8}{10} = 0,98$$

Neste caso, o circuito não apresenta ganho de corrente, ou seja, há perda de corrente no circuito porque a corrente de saída é menor que a corrente de entrada.

O ganho de tensão é a relação entre a tensão de saída V_o e a tensão de entrada V_i , ou seja:

$$G_v = \frac{V_o}{V_i}$$

V_o é o produto da corrente de saída (I_c) e a resistência de saída (R_o).

A R_o , que é a junção base-coletor polarizada inversamente, é de valor elevado.

A V_i é o produto da corrente de entrada (I_E) e a resistência de entrada (R_i).

A R_i que é a junção base-emissor polarizada diretamente é de valor baixo.

Para o mesmo circuito de figura 3-10 suponhamos $R_o = 10 \text{ K}$ e $R_i = 30 \Omega$. Temos então que:

$$V_i = I_E \cdot R_i = 10 \text{ mA} \cdot 30 \Omega = 0,3 \text{ V}$$

$$V_o = I_c \cdot R_o = 9,8 \text{ mA} \cdot 10 \text{ K} = 98 \text{ V}$$

$$G_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{98}{0,3} \cong 327$$

O ganho de potência G_p é a relação entre a potência de saída (P_o) e a potência de entrada (P_i). A P_o é o produto da tensão V_o e a corrente I_c . A P_i é o produto da tensão V_i e a corrente I_E .

Com os dados obtidos no exemplo anterior podemos calcular o ganho de potência G_p :

$$\begin{aligned} G_p &= \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_c}{V_i \cdot I_E} = \frac{98 \times 9,8 \text{ mA}}{0,3 \times 10 \text{ mA}} = \\ &= \frac{960,4}{3} = 320,2 \end{aligned}$$

Como podemos ver, apesar de não termos obtido ganho de corrente, os ganhos de tensão e de potência foram altos.

Esses ganhos são provocados pela passagem de corrente de uma junção de baixa resistência (base-emissor) para outra de alta resistência (base-coletor).

Concluimos também que se soubermos os valores de dois ganhos de um determinado transistor, o outro ganho pode ser calculado de forma simples e direta.

Uma vez que $G_p = G_v \cdot G_i$ como consequência teremos:

$$G_i = \frac{G_p}{G_v} \text{ e } G_v = \frac{G_p}{G_i}$$

Como os ganhos podem ser estáticos (referentes à corrente contínua) e dinâmicos (referentes à corrente alternada), usa-se a letra maiúscula para diferenciá-los.

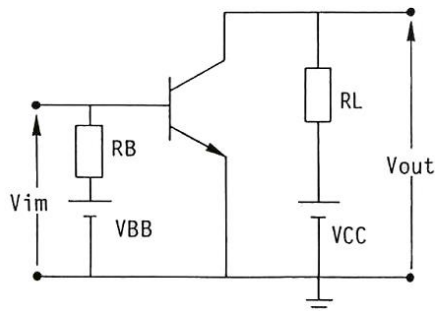
Os ganhos estáticos são identificados pela letra "G" e os dinâmicos pela letra "A".

Os ganhos de corrente também podem ser representados por uma letra grega que também serve para identificar a configuração do transdutor. A letra " α " (alfa) é usada na configuração base comum, a letra " β " (beta) é usada em emissor comum e a letra " γ " (gama) é usada em coletor comum.

3.3 AMPLIFICADOR EM CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM

No circuito do amplificador na configuração emissor comum o sinal de entrada é aplicado entre o emissor e a base e o sinal de saída é retirado entre o coletor e o emissor, ou seja o emissor é o elemento comum à entrada e à saída do circuito.

A figura 3-11 mostra o amplificador na configuração emissor comum.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-11 Amplificador em configuração emissor comum

Analisando o circuito, vemos que a junção base-emissor está polarizada diretamente e a junção base-coletor, inversamente.

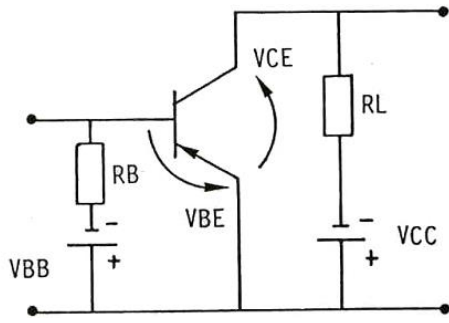
Devido a esta polarização, o circuito de entrada apresenta uma baixa resistência e o circuito de saída uma alta resistência. A resistência de base R_B tem por finalidade limitar a corrente no circuito de base-emissor no valor desejado.

O resistor no circuito do coletor serve para obter variações de V_{CE} com as variações de I_c , desenvolvendo no circuito de saída uma variação de V_{CE} dependente da variação da tensão do sinal de entrada.

Descrição do Funcionamento

O circuito da figura 3-12 refere-se a um amplificador em emissor comum, com transistor PNP.

O coletor é alimentado pela tensão V_{cc} , através de R_L e, através de R_B , V_{BB} polariza diretamente a junção base-emissor



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

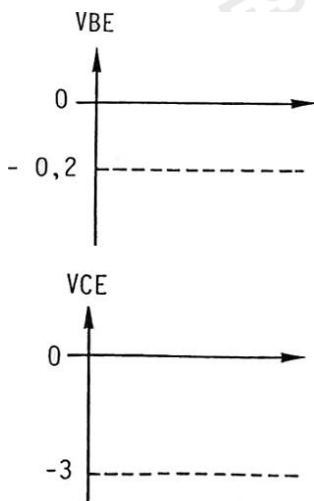
Figura 3-12 Transistor PNP, em configuração emissor comum

O valor da corrente direta base-emissor (I_B), depende dos valores de R_B e da própria tensão da fonte V_{BB} .

O valor da corrente I_C depende praticamente do valor da corrente I_B .

Geralmente o circuito é polarizado para termos uma corrente média de base, em consequência a corrente do coletor também será média.

Essas correntes médias se estabelecem no circuito tensões V_{BE} e V_{CE} constantes como mostrado na figura 3-13.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

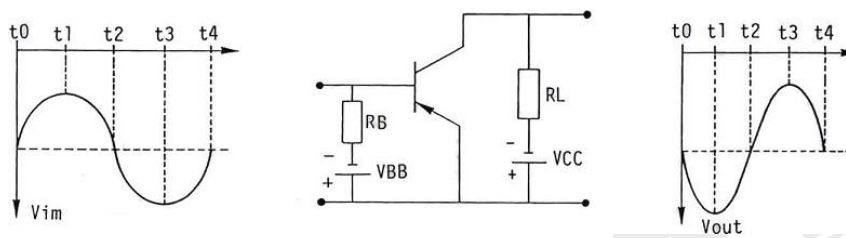
Figura 3-13 Tensões V_{BE} e V_{CE} no transistor PNP em configuração E_C

Se a corrente de base aumentar ou diminuir a corrente do coletor, as tensões V_{RL} e V_{CE} também sofrerão variações proporcionais à estas.

Estas variações nas correntes e tensões do circuito podem ser causadas por um sinal senoidal aplicado à entrada do mesmo.

Faremos a seguir um estudo do comportamento do circuito emissor comum, com um sinal senoidal aplicado entre a base e o emissor.

A figura 3-14 mostra um amplificador emissor comum com transistor PNP e os respectivos gráficos dos sinais de entrada e de saída.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-14 Amplificador emissor comum com sinais de entrada e de saída

Admitamos que no instante inicial o sinal senoidal aplicado ao circuito de base aumente de zero a um máximo positivo, como aparece na figura 3-14, no período de t_0 a t_1 .

Como o circuito utiliza um transistor PNP, o sinal positivo crescente, aplicado na base, diminui a polarização direta base-emissor (V_{BE}), diminuindo a corrente de base (I_B). A diminuição de I_B provoca a diminuição de I_C e da queda de tensão em R_L . Com a diminuição da tensão em R_L , há um aumento da tensão negativa entre o coletor e o emissor (V_{CE}) como mostra o gráfico de saída na figura 3-14.

Quando a tensão de entrada do circuito diminuir do máximo positivo para zero, isto é, entre os tempos t_1 e t_2 , a polarização direta aumenta proporcionalmente, aumentando I_B e conseqüentemente I_C . Com o aumento de I_C , a queda de tensão em R_L também aumenta. Com o aumento da tensão em R_L , a V_{CE} diminui como mostrado no gráfico da tensão de saída na figura 3-14 entre os tempos t_1 e t_2 .

A variação da tensão de entrada entre os tempos t_2 e t_3 continuará a aumentar a polarização direta, diminuindo mais a V_{CE} , como também pode ser visto no gráfico da tensão de saída na figura 3-14.

Entre os tempos t_3 e t_4 , no gráfico do sinal de entrada, a tensão é negativa e está variando do máximo até zero. A tensão V_{CE} tende a aumentar negativamente, devido a diminuição de V_{BE} , que por sua vez tende a diminuir a I_B e a I_C . Com isso a queda da tensão em R_L também diminui.

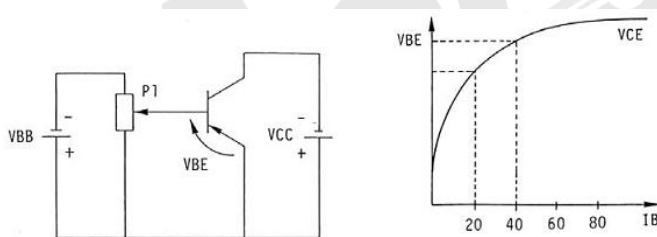
Observando os gráficos de entrada e de saída na figura 3-14, na configuração emissor comum vemos que entre eles existe uma defasagem de 180° . O funcionamento desse amplificador, tal como o de base comum, é caracterizado pela variação da corrente no circuito de base-emissor que produz uma variação de corrente e tensão no circuito coletor. Estas variações, plotadas em gráficos, representam as curvas características de entrada e de saída

de um transistor. Normalmente estas e também outras curvas características são fornecidas pelo fabricante do componente.

3.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DO AMPLIFICADOR EM EMISSOR COMUM

Curva Característica de Entrada

Como vimos, a curva característica de entrada de um transistor em configuração emissor comum é traçada em função das variações da V_{BE} e I_B , com determinada V_{CE} de valor constante.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-15 Circuito e curva característica de entrada do emissor comum

Observando o circuito da figura 3-15 vemos que as variações de I_B e V_{BE} podem ser conseguidas através da atuação de um potenciômetro conectado à base do transistor.

Com a variação do cursor do potenciômetro P1, haverá variação da V_{BE} e de I_B . Variando-se a I_B a partir de $0 \mu A$, passo-a-passo, observam-se as variações de V_{BE} correspondentes.

Com os dados obtidos, plota-se um gráfico semelhante ao da figura 3-15. Através dos gráficos das curvas de entrada do amplificador, podemos obter dados para o cálculo da polarização de base, da resistência de base etc.

A resistência de entrada pode ser obtida em função de uma dada variação de I_B e de sua correspondente variação de V_{BE} da seguinte maneira:

$$R_i = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}$$

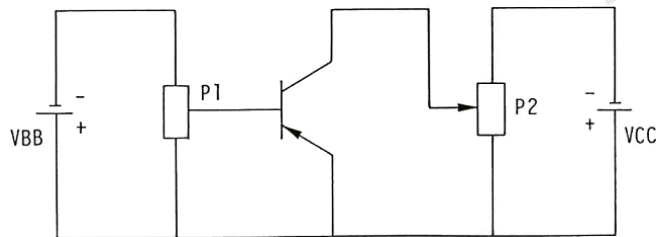
No amplificador em configuração emissor comum o valor da R_i é geralmente baixo, porém maior que o valor da R_i do circuito em base comum.

O resistor de base R_B no circuito da figura 3-15 tem a função de limitar a corrente de base em um determinado valor. O cálculo de R_B pode ser feito da seguinte forma:

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_B}$$

Curva Característica de Saída

As características de saída do amplificador em emissor comum, com relação a tensões e correntes são obtidas com um circuito semelhante ao da figura 3-16.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-16 Circuito para levantamento da curva característica de saída do amplificador em emissor comum

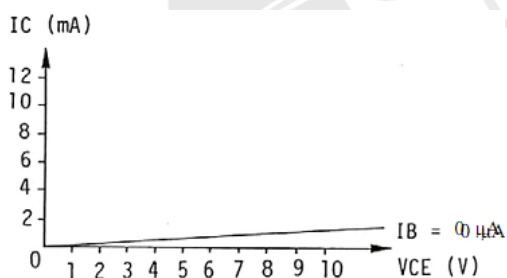
Com o valor de I_B ajustado e mantido constante, varia-se a tensão V_{CE} passo-a-passo, anotando-se as variações de I_C .

Com os dados obtidos das variações de I_C para cada variação da V_{CE} , pode-se traçar a curva de saída para a I_B usada.

Por exemplo, podemos apresentar uma curva com I_B igual a zero e em seguida com $I_B = 20 \mu A$.

Com a I_B ajustada para zero, aumenta-se a V_{CE} de zero até 10 V, anotando-se as variações de I_C em cada lance de variação da V_{CE} , que pode ser de 1 em 1 Volt.

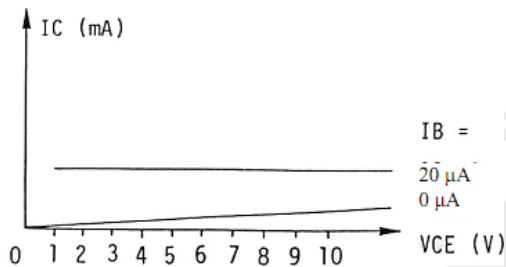
Plotando-se em um gráfico as variações de V_{CE} e I_C com I_B igual a zero e interligando os pontos marcados, teremos uma curva semelhante à da figura 3-17.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-17 Variações de V_{CE} e I_C com I_B igual a zero

Em seguida, ajustando-se a I_B para $20 \mu A$, varia-se novamente a tensão V_{CE} de zero a 10 V anotando-se as correspondentes variações de I_C . Com os dados obtidos plota-se no gráfico a curva característica correspondente às variações de I_C e V_{CE} com I_B igual a $20 \mu A$. Essa curva é mostrada na figura 3-18.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-18 Variações de V_{CE} e I_B I_C com I_B igual a $20 \mu A$

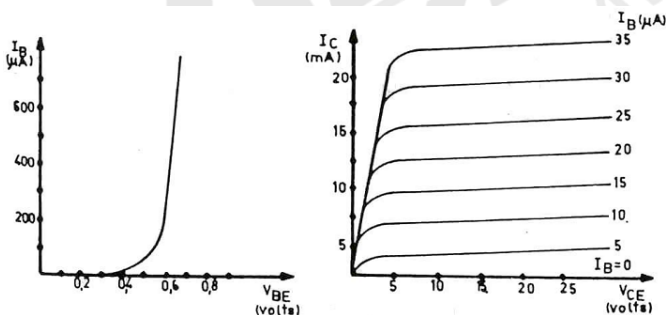
3.5 GANHOS DO TRANSISTOR EM EMISSOR COMUM

Ganho de Corrente

O ganho de corrente de um amplificador é a relação entre a corrente de entrada e a corrente de saída, ou seja, entre I_B e I_C . Como a corrente I_C é bem maior que a corrente I_B , o transistor terá um alto ganho de corrente na configuração emissor comum. Para designar o ganho de corrente usa-se a letra grega "beta" β e o mesmo é determinado pela fórmula:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}, \text{ com } V_{CE} \text{ constante.}$$

Os valores de I_B e I_C podem ser encontrados no gráfico de curvas características do transistor, como mostra a figura 3-19.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-19 Curvas características de ganho de corrente do transistor

Para encontrarmos os dados em curvas para o cálculo de corrente, traça-se primeiro uma perpendicular ao eixo V_{CE} , por exemplo, 10 V, como na figura 3-19. A seguir verifica-se a variação de I_C para uma determinada variação de I_B .

Na figura 3-19, vemos que uma variação de 20 a 25 μA na I_B irá produzir na I_C uma variação de 12,5 mA. Neste caso, o ganho de corrente será:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{15-12,5mA}{25-20\mu A} = 500$$

Ganho de Tensão

Um transistor na configuração emissor comum apresenta um alto grau de tensão. O ganho de tensão, analogamente ao ganho de corrente, é a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada, ou seja:

$$G_v = \frac{V_o}{V_i}$$

Para calcular o ganho de tensão podemos usar ainda a seguinte expressão:

$$G_v = \beta \cdot \frac{R_o}{R_i}$$

Onde $\frac{R_o}{R_i}$ é chamado de ganho de resistência, pois consiste da relação entre a resistência de saída e a resistência de entrada.

Ganho de Potência

Geralmente, o ganho de potência nos circuitos em configuração emissor comum é muito alto.

O ganho de potência é o produto do ganho de corrente (β) pelo ganho de tensão (G_v)

$$G_P = \beta \times G_v$$

3.6 CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS DE UM AMPLIFICADOR EM EMISSOR COMUM

O ponto de operação de um transmissor é também denominado por ponto de trabalho ou ponto quiescente.

Quando em operação sobre o transistor são aplicadas tensões e correntes de modo a se estabelecer uma polarização e fixarmos para o mesmo um ponto de operação.

O ponto quiescente é designado pela letra "Q".

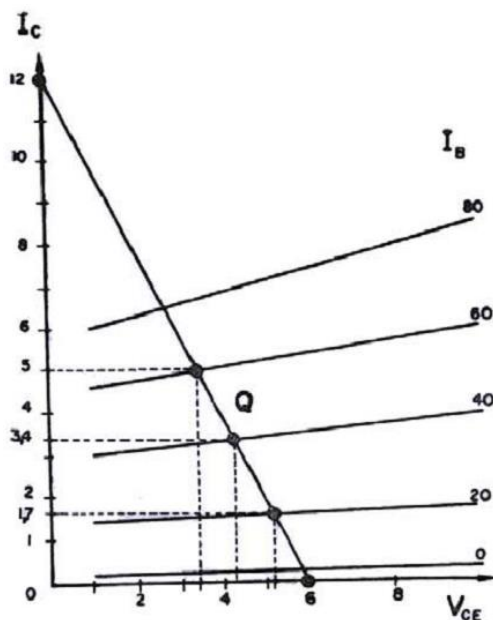
Reta de Carga

A linha ou reta de carga é a reta que interliga, no gráfico de curva de saída, o ponto de máxima I_C ao de máxima V_{CE} , para um determinado circuito amplificador.

O ponto de máxima I_C está relacionado com a condição de saturação do transistor, que é quando as junções coletor e emissor estão diretamente polarizadas e o transistor é considerado um circuito aberto.

Em resumo, a reta de carga traçada no gráfico de curvas de saída nos mostra as condições de funcionamento dinâmico do circuito, entre os limites máximos e mínimos de I_C e V_{CE} . A figura 3-20 mostra a curva característica de saída com a reta de carga para o circuito em emissor comum.

Considerando o gráfico da figura 3-20, adotaremos para V_{CC} o valor de 6 V e para a máxima I_C o valor de 12 mA.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-20 Curva característica com reta de carga para o amplificador na configuração emissor comum

Temos então a reta de carga traçada entre esses dois extremos. Se o I_C máximo é de 12 mA e a V_{CC} é 6 V, o valor da resistência de carga R_L pode ser calculado pela lei de Ohm:

$$R_L = \frac{V_{CC}}{I_C \text{ máxima}} = \frac{6V}{12mA} = 500\Omega$$

Ainda observando o gráfico da figura 3-20, partindo do cruzamento das curvas de I_B com a reta de carga, vemos que com 20 μA de I_B , a I_C será aproximadamente 1,8 mA e a V_{CE} de 5,5 V.

Como a corrente de saída de um amplificador depende da corrente de entrada, devemos escolher qual corrente desejável para o circuito de base.

No caso escolheremos uma I_B de 40 μA . Marcaremos no gráfico de saída, como ponto Q o cruzamento da reta de carga com a curva de 40 μA de I_B . Escolhida a I_B podemos encontrar o valor da V_{BE} no gráfico da curva de entrada que é aproximadamente 0,16 V. Com esses dados o valor da resistência de base (R_B) pode ser encontrado pela fórmula dada a seguir:

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_B} = \frac{1 - 0,16V}{4\mu A} = 21K\Omega$$

Análise do Circuito Emissor Comum Polarizado

O circuito da figura 3-21 mostra um transistor PNP, tipo 2N408. Como polarização o fabricante sugere os seguintes valores:

$$R_B = 21 K\Omega$$

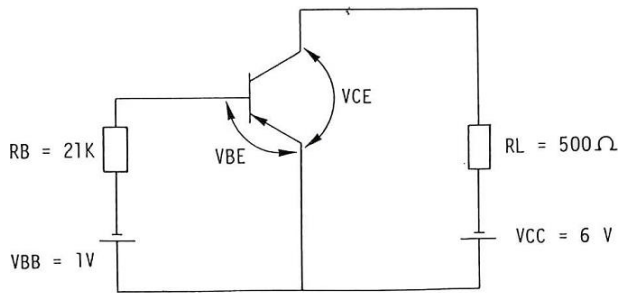
$$V_{BB} = 1 V$$

$$V_{CC} = 6 V$$

Quando o circuito for ligado, o resistor R_B limitará a corrente de base em 40 μA . Essa I_B determinará uma I_C de aproximadamente 3,5 mA, como poderá ser visto no gráfico da figura 3-20, pela projeção do ponto "Q", perpendicularmente ao eixo de I_C .

Sendo $I_C \approx 3,5$ mA, passando através de R_L , a qual podemos considerar 500 Ω , determinará uma queda de tensão que pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$E_{RL} = R_L \times I_C = 500 \times 0,0035 = 1,8 V$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-21 Amplificador em emissor comum com transistor PNP

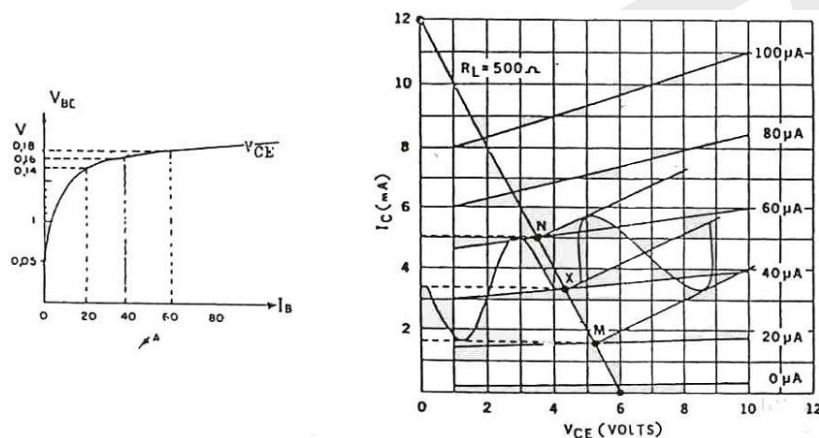
Se a queda de tensão em R_L é de 1,71, a tensão V_{CE} será igual a:

$$V_{CE} = V_{CC} - R_L = 6 - 1,8 = 4,2 \text{ V}$$

Um circuito polarizado com esses valores encontrados tende a permanecer estaticamente nesta situação. Qualquer desequilíbrio de corrente no circuito de base tende a alterar as condições de I_C e V_{CE} , no circuito de saída.

Aplicando-se um sinal senoidal de $0,04 V_{PQ}$ na entrada desse circuito, todas as correntes e tensões estáticas do circuito tendem a variar na mesma relação senoidal.

Estas variações podem ser traçadas no gráfico de curvas de entrada e no de saída conforme mostra a figura 3-22.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-22 Curvas de entrada e de saída em emissor comum

A figura 3-22 mostra o gráfico das variações de I_B em função das variações da V_{BB} , produzidas pelo sinal de $0,04 \text{ pp}$ aplicado à base do transistor.

Através dessas curvas podemos obter dados para calcular os ganhos dinâmicos que se referem a uma condição de funcionamento do circuito.

O ganho dinâmico de um amplificador depende das características do mesmo. Existem amplificadores para ganho de tensão e outros para ganho de corrente.

3.7 GANHOS DINÂMICOS DO CIRCUITO EMISSOR COMUM

Ganho de Corrente

No gráfico da figura 3-22 vemos que uma variação de I_B de 20 μA a 60 μA sobre a linha de carga produz uma variação de I_C de 1,7 a 5 mA. O ganho de corrente do amplificador será aproximadamente igual a 82.

$$A_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{5-1,7}{60-20} = \frac{0,0033}{0,00004} \cong 82$$

Ganho de Tensão

Para o circuito em estudo o ganho de tensão pode ser encontrado através dos gráficos de entrada e de saída do circuito.

No gráfico da figura 3-22 vemos que uma variação de V_{BE} de 0,14 a 0,18 V (ou seja 0,04 V) produzirá uma variação de I_B de 40 a 60 μA . Esta variação de I_B produz na V_{CE} uma variação de 3,5 a 5,3 V.

O ganho de tensão será, portanto:

$$A_V = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta V_{BE}} = \frac{5,3-3,5}{0,18-0,14} = \frac{1,8}{0,04} = 45$$

Ganho de Potência

A potência de entrada para o circuito da figura 3-21 é dada por:

$$P_{in} = \Delta V_{BE} \times \Delta I_B$$

$$\text{Como } \Delta V_{BE} = 0,04 \text{ V}$$

$$P_{in} = 0,04 \times 0,00004 = 1,6 \times 10^{-6} \text{ W}$$

A potência de saída conforme os dados obtidos nos gráficos de saída do amplificador em função do sinal de 0,04 V_{pp} , será:

$$P_{out} = \Delta V_{CE} \times \Delta I_C = 1,8 \times 0,0033 =$$

$$=0,0059 \text{ W} = 59 \times 10^{-4} \text{ W}$$

Com isso o ganho de potência do circuito será:

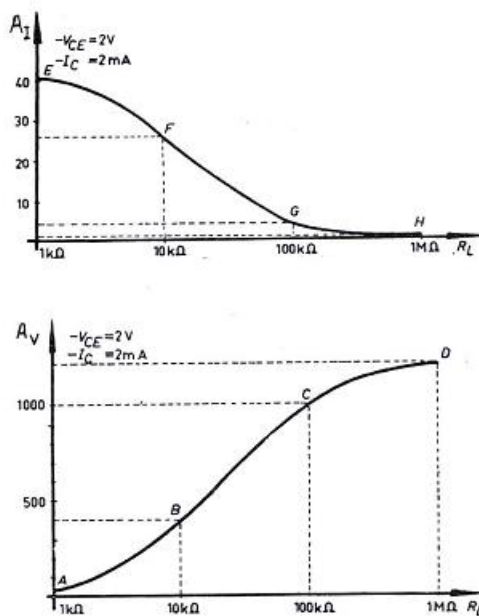
$$A_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{59 \times 10^{-4} \text{ W}}{1,6 \times 10^{-6} \text{ W}} = 3687$$

O amplificador em configuração emissor comum, como verificamos, oferece ampliação alta em relação ao de base comum.

Esta ampliação varia conforme o valor da R_L .

Com R_L de valor alto o ganho de corrente é baixo e o de tensão é alto. Com R_L de valor baixo o ganho de corrente é alto e o de tensão é baixo.

A figura 3-23 mostra os gráficos de ganhos de corrente e tensão, em função do valor de R_L .



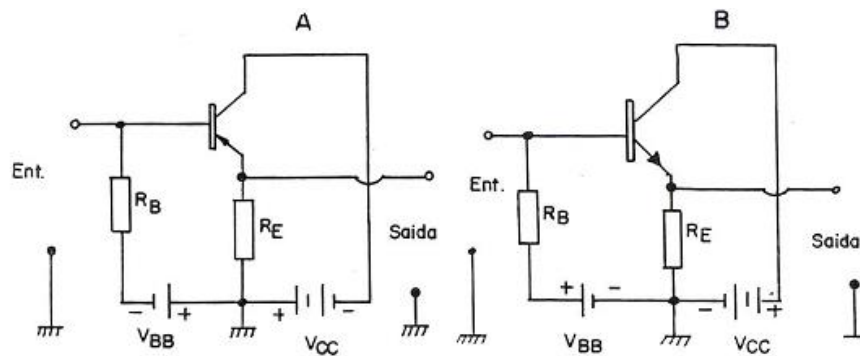
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-23 Ganhos de corrente e tensão em função da resistência de carga

3.8 AMPLIFICADOR EM CONFIGURAÇÃO COLETOR COMUM

No amplificador em configuração coletor comum, o circuito de entrada de sinal é entre a base e o coletor, e o circuito de saída é entre o emissor e o coletor. O coletor é comum aos circuitos de entrada e de saída.

Na figura 3-24 A vemos um circuito coletor comum com um transistor PNP e na figura 3-24 B o mesmo circuito com transistor NPN.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-24 Configuração coletor comum

O transistor em configuração coletor comum é polarizado, como as outras configurações, diretamente entre base e emissor e inversamente entre base e coletor.

Nos circuitos da figura 3-24 a polarização direta de base para emissor é feita por V_{BB} , enquanto que V_{CC} polariza inversamente o circuito base-coletor.

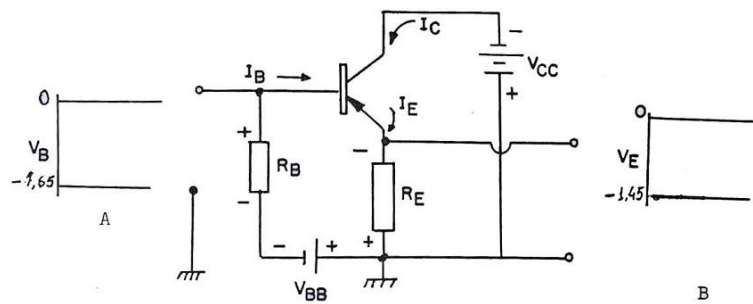
R_B limita a I_B ao valor desejado e R_E , no circuito de emissor, é a resistência de carga. A finalidade desta resistência é permitir que se desenvolva, na saída, uma variação de tensão que depende da variação de tensão que depende do sinal de entrada. Como neste tipo de circuito a tensão de saída é retirada do emissor, ele é também denominado seguidor de emissor.

Funcionamento do Amplificador em Coletor Comum

Na figura 3-25 está esquematizado um circuito amplificador em emissor comum, com transistor PNP, no qual vemos que a fonte de tensão V_{CC} alimenta o coletor e o emissor através de R_E , V_{BB} alimenta a junção base-emissor através de R_B .

Supondo que o circuito esteja polarizado para uma corrente de base média, a corrente de emissor também será média.

Estas correntes médias estabelecem, no circuito, tensões de base e de emissor constantes, conforme pode ser visto nos gráficos A e B da figura 3-25.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-25 Amplificador em configuração coletor comum

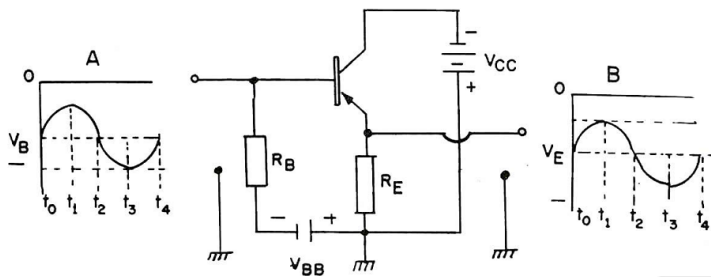
Se V_B variar em função de uma tensão senoidal, a I_B sofrerá variação, variando também a I_E que provocará a variação da tensão em R_E . A tensão em R_E pode ser denominada de V_E (tensão de emissor).

Através do circuito da figura 3-26, estudaremos o comportamento do amplificador em coletor comum, com sinal senoidal aplicado à base. O gráfico "A" representa a tensão do sinal de entrada, dividida em tempos, e o gráfico "B" representa o sinal de saída também dividido em tempos.

Suponhamos inicialmente que o sinal aplicado à base aumente de zero ao máximo positivo, como de t_0 a t_1 , no gráfico "A" da figura 3-26. Sendo o transistor PNP este sinal positivo crescente diminui a polarização direta (V_{BE}), diminuindo a I_B . A diminuição da I_B produz a diminuição da I_E e da tensão em R_E , como mostra o gráfico "B" da figura 3-26 entre os tempos t_0 e t_1 . Com a diminuição da tensão do máximo positivo para zero, como aparece no gráfico "A" entre os tempos t_1 e t_2 , a polarização direta na base aumente proporcionalmente, aumentando a I_B . Com o aumento da I_B há também um aumento da I_E e da queda de tensão em R_E , com um conseqüente aumento relativo de V_E , como pode ser visto no gráfico "B" da figura 3-26, entre os tempos t_1 e t_2 .

A variação da tensão de entrada, entre os tempos t_2 e t_3 , continuará a aumentar a polarização direta (V_{BE}), aumentando mais a I_C , com conseqüente aumento de V_E .

Entre os tempos t_3 e t_4 da tensão de entrada, a polarização direta diminui, diminuindo a I_B , a I_C e a V_E , como mostrado no gráfico "B" entre os tempos t_3 e t_4 .



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-26 Amplificador em configuração coletor comum com sinal aplicado à entrada

Através dos gráficos A e B, verificamos que neste tipo de circuito os sinais de entrada e de saída estão em fase.

Como vimos o funcionamento do amplificador em configuração coletor comum, está ligado às variações de tensão e corrente do emissor, produzidas pelas variações de corrente na base. Estas variações de tensões e correntes são plotadas em gráficos como nas outras configurações. Estes gráficos representam as características do transistor nesta configuração.

Características do Amplificador em Coletor Comum

Estudaremos neste tipo de montagem do transistor, os ganhos relativos à tensão, corrente, potência e resistência.

Ganho de Tensão

O ganho de tensão do amplificador em configuração coletor comum é definido como sendo a relação entre as variações de tensão de saída, que aparece em R_E , e a de entrada (aplicada na base).

Neste tipo de configuração, o valor numérico do ganho de tensão depende do valor de R_E e nunca é maior que a unidade.

Isto acontece porque, conforme vemos no circuito da figura 3-26, o sinal é aplicado na base em série com R_E .

As variações de tensão em R_E produzem uma forte realimentação negativa que tende a diminuir a polarização direta base-emissor.

Ganho de Corrente

Nas curvas características de saída do circuito em configuração coletor comum, que aparece na figura 3-28, vemos que a corrente de saída é a I_E e a de entrada é a I_B . Sabendo-se que o ganho de corrente é a relação entre as correntes de saída e de entrada, concluímos que, neste circuito, há um alto ganho de corrente, o qual poderá ser calculado pela fórmula:

$$A_i = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B}$$

Ganho de Potência

Embora o ganho de tensão desta configuração seja muito baixo, o elevado ganho de corrente determina um ganho de potência considerado alto. O ganho de potência pode ser determinado, multiplicando-se o ganho de corrente pelo ganho de tensão.

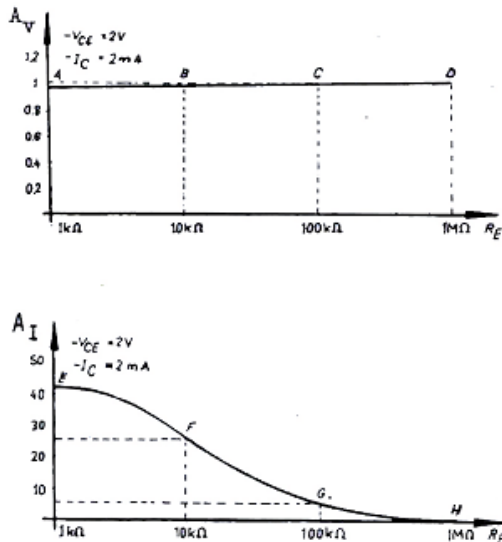
Ganho de Resistência

Sendo o ganho de resistência a relação entre a resistência de saída e a de entrada, faz-se necessário conhecer estes dois valores para a determinação do ganho de resistência.

- 1) Resistência de entrada: a resistência de entrada do circuito em coletor comum é normalmente muito alta, por causa da realimentação negativa do circuito. Também devemos considerar o circuito de entrada base-coletor, que é polarizado inversamente.
- 2) Resistência de saída: a resistência de saída deste tipo de circuito é normalmente pequena e depende quase que exclusivamente do valor de R_E . Podemos concluir que este tipo de configuração também não apresenta ganho de resistência.

As características principais do circuito em coletor comum são: ganho de tensão menor que a unidade, alto ganho de corrente, alto ganho de potência, alta resistência de entrada e baixa resistência de saída.

Na figura 3-27 vemos dois gráficos que mostram os ganhos de tensão e corrente, conforme o valor de R_E .



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-27 Ganhos de tensão e corrente em função da resistência de carga

3.9 LINHA DE CARGA NO CIRCUITO COLETOR COMUM

O gráfico apresentado na figura 3-28 representa a característica de saída do transistor 2N408 em coletor comum. Vemos nele que a corrente de saída é a I_E e a tensão de saída é a V_{CE} . No circuito, vemos que o valor da tensão V_{CC} é de 6 V e R_L é de 500Ω .

A linha de carga liga os pontos de máxima V_{CE} , neste caso 6 V, e máxima I_E , que neste exemplo é de 12 mA. Devemos lembrar que a máxima I_E é a condição do circuito com o transistor saturado ou em curto e a máxima V_{CE} é a condição do circuito com o transistor considerado em circuito aberto.

Para o estudo das características deste circuito, ele foi polarizado estaticamente conforme aparece no gráfico da figura 3-28.

Neste gráfico vemos que a I_B estática é de $40\mu A$. Considerando o valor da tensão V_{BE} em 0,2 V com $40\mu A$ de I_B , o valor de R_B poderá ser calculado.

Observamos no gráfico que, com I_B de $40\mu A$, a I_E é, aproximadamente 2,9 mA. Esta corrente passando por R_L , cujo valor é de 500Ω determinará uma queda de tensão de 1,45 V ($500\Omega \times 2,9\text{ mA} = 1,45\text{ V}$).

Conforme vemos no circuito, o sentido da corrente no resistor R_E faz com que o emissor fique com uma tensão negativa de 1,45 V.

Como o valor de V_{BE} é de 0,2 V, para que a junção base-emissor fique polarizada diretamente, a tensão de base deverá ser de -1,65 V, visto que o emissor está com uma tensão negativa de 1,45 V.

Se a tensão de base deve ser de -1,65 V, podemos retirar esta tensão de V_{CC} , intercalando um resistor (R_B) em série, como limitador da tensão restante, ou seja, 4,35 V.

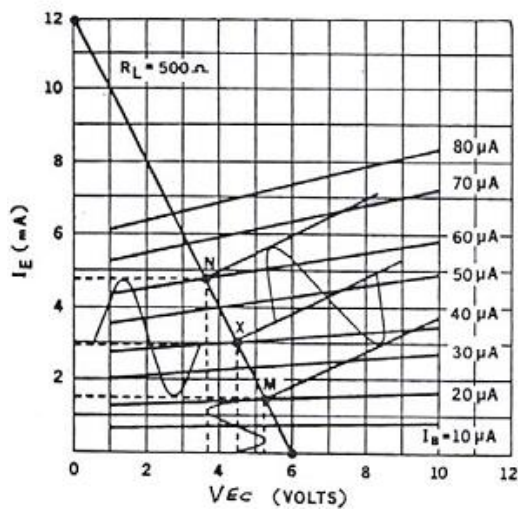
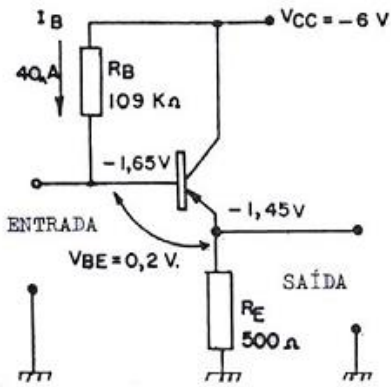
Sabendo-se que a corrente que deverá circular por R_B é a I_B de 40 μA , o seu valor (R_B) pode ser calculado da seguinte forma:

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_B}{I_B} = \frac{6 - 1,65}{40} = \frac{4,35}{4 \times 10^{-5}} \cong 109 K\Omega$$

O comportamento dinâmico deste circuito com transistor PNP pode ser agora analisado. Notamos que a sua condição estática com relação a correntes e tensões é vista nas curvas características, ou medidas, se o circuito fosse montado experimentalmente, conforme os valores de tensão V_{CC} , R_E e R_B , que o constituem.

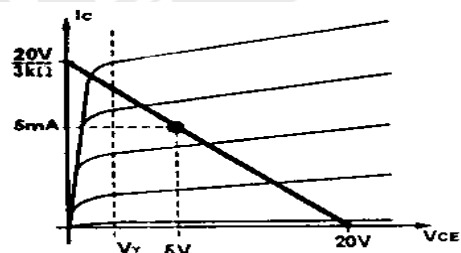
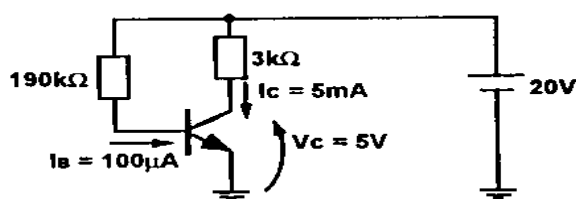
Nas curvas, vemos que com I_B de 40 μA a I_E será de 2,9 mA e a V_{CE} de 4,55 V. Nesta situação, a V_E será igual a -1,45 V ($V_{CC} - V_{CE} = V_E$).

Se um sinal com tensão senoidal for aplicado no circuito de base, a I_B variará, variando a I_E . A variação da I_E produzirá variação na V_E . Estas variações de I_B , I_E e V_{CE} podem ser vistas no gráfico da figura 3-28.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-28 Circuito e curva característica de saída da configuração coletor comum



Fonte: <http://www.lsi.usp.br/~eletroni/frames3/poli/labelo1/polariza/Image35.gif>

3.10 ESTABILIZAÇÃO DA POLARIZAÇÃO DE TRANSISTORES

Ao lançar um transistor no comércio, o fabricante fornece todas as informações sobre ele e as inclui em seus manuais para facilitar o trabalho dos técnicos e projetistas de circuitos.

Uma das principais informações fornecidas é a família de curvas características de saída do transistor. De posse dela, entre outras coisas, podemos traçar a linha de carga e a curva de máxima dissipação de potência. A primeira nos possibilita a escolha do ponto "Q" (ponto quiescente) ou POE (ponto de operação estática) e a segunda nos assegura se o transistor está trabalhando dentro de seus limites.

Aparentemente, para que um transistor não se danifique durante seu funcionamento, baste que ele trabalhe dentro dos limites de dissipação de potência. Entretanto, existem outros aspectos a serem considerados, tais como: corrente, tensão e temperatura.

Portanto, antes de entrarmos no traçado da curva de máxima dissipação de potência, faremos considerações sobre essas limitações.

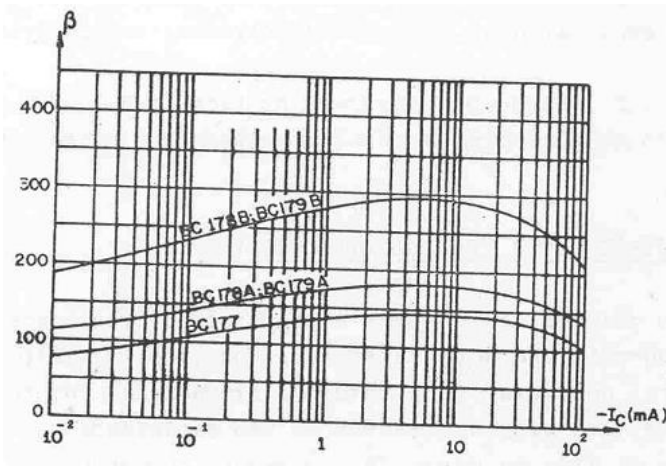
3.11 LIMITAÇÕES DOS TRANSISTORES BIPOLARES

Como qualquer componente eletrônico, o transistor em funcionamento normal, não deve ultrapassar os valores limites de tensão, corrente, potência, temperatura e frequência, fornecidos pelo fabricante, sob pena de desempenho não satisfatório, diminuição do tempo de vida ou mesmo destruição do componente.

Limitações de Correntes

O fabricante especifica a corrente de coletor (máxima absoluta) que pode fluir no transistor, embora esta definição não seja muito clara, uma vez que na realidade, desde que a potência dissipada não ultrapasse o valor também especificado por ele, a corrente do coletor pode ser aumentada até um ponto que não destrua o material do transistor. Entretanto, mesmo sem exceder a potência especificada, a corrente pode ser suficientemente alta a ponto de destruir os fios de conexão dos dispositivos, embora a corrente necessária para tal, seja bem maior que a especificada como corrente máxima absoluta.

Embora o β dependa do transistor, ele pode sofrer variações de acordo com o valor de I_C . Assim, para valores muito elevados de corrente, o β diminui. A figura 3-29 nos mostra três curvas para alguns tipos de transistores.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-29 Ganho em função da I_C para vários transistores

Na figura 3-30, são apresentadas as curvas características de saída e é delimitada a faixa possível de operação, em termos de corrente do coletor. Nesta figura estamos considerando apenas a limitação de corrente do coletor.

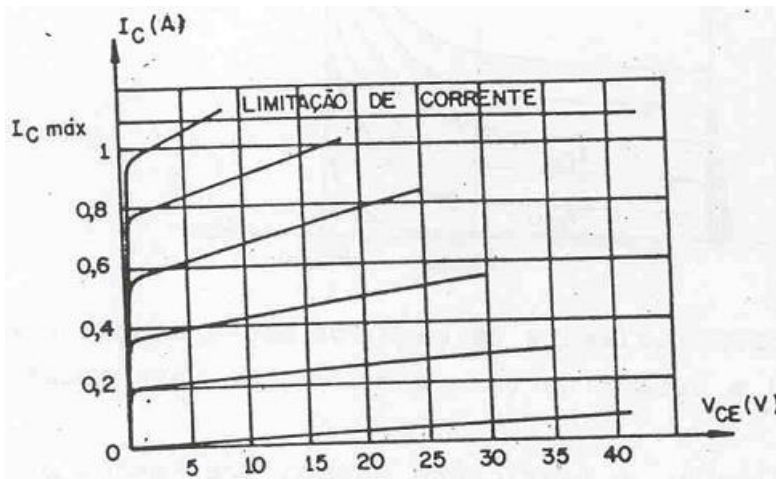
Ainda com relação às especificações de correntes, o fabricante fornece, às vezes, os valores limites das correntes de base e de emissor.

Limitações de Tensões

Como limitação de tensão, geralmente o fabricante fornece os valores máximos das tensões entre os três terminais, ou seja, os valores máximos de V_{BE} , V_{BC} e V_{CE} , quando as junções são polarizadas inversamente.

Sabemos que, no funcionamento normal do transistor, a junção base-emissor é polarizada diretamente, mas o fabricante costuma dar a tensão máxima inversa, caso ela venha a ser polarizado inversamente, fato que ocorre, quando o transistor é usado como chave.

Quanto à junção base-coletor, ela normalmente é polarizada no sentido inverso, havendo, portanto, necessidade de fornecer os valores máximos inversos de V_{BC} e V_{CE} .



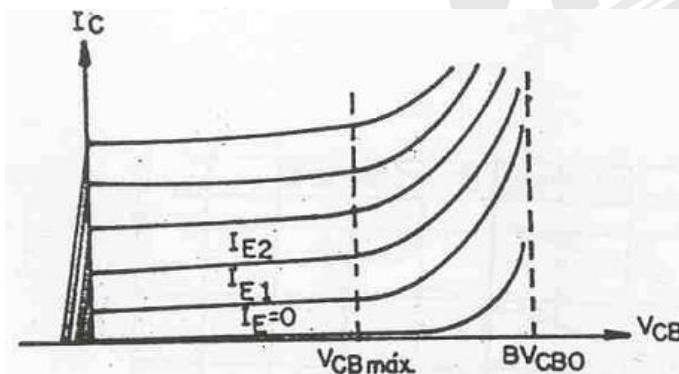
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-30 Delimitação da região de funcionamento de um transistor em função da máxima I_C

Lembramos que $V_{CE} = V_{BC} + V_{BE}$. Portanto, dados os valores de V_{BE} e V_{CE} , V_{BC} estará praticamente definida, pois basta verificar a diferença entre os valores dados para se obter V_{BC} .

Por exemplo, se um transistor de silício está funcionando em um circuito com $V_{BE} = 0,6V$ e $V_{CE} = 10V$, forçosamente a tensão inversa presente na junção base-coletor será: $V_{BC} = V_{CE} - V_{BE} = 10 - 0,6 = 9,4V$. Os limites dessas tensões são fixados, por causa do efeito de ruptura que ocorre quando se aumenta a tensão inversa de uma junção.

Por exemplo, se a tensão inversa entre base e coletor for aumentando, com $I_E = 0$, será atingida a tensão de ruptura (tensão Zener) e haverá um brusco aumento na corrente de coletor. Isto acontece também quando a corrente de emissor é diferente de zero.

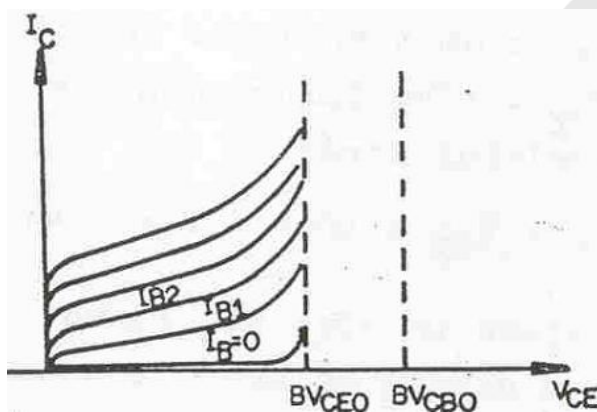


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-31 Curvas características de saída da configuração base comum, destacando a tensão de ruptura da junção base-coletor.

A figura 3-31 mostra a ocorrência do fato com diversos valores de corrente de emissor. Esta figura mostra também que o fabricante fornece a BV_{BCO} , que é a tensão de ruptura entre o coletor e a base. A letra "B" significa ruptura (Breakdown em inglês) e a letra "O" significa que o emissor está aberto (Open).

Geralmente, o fabricante especifica também a tensão máxima permissível entre o coletor e o emissor, com a base aberta. Esta especificação é dada em termos de BV_{CEO} , tensão inversa de ruptura entre o coletor e o emissor. O conjunto de curvas representativas deste fenômeno é ilustrado na figura 3-32.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-32 Curvas características de saída da configuração emissor comum, destacando a tensão de ruptura da junção emissor-coletor.

Limitações de Potência

Além das limitações de corrente e tensão a limitação de potência é das mais importantes para os transistores, bem como para todos os dispositivos semicondutores e até mesmo para todos os componentes elétricos.

No funcionamento do transistor, o calor é gerado na junção base-coletor, onde quase toda a tensão externa é aplicada.

Por exemplo, num circuito em emissor comum, a potência gerada no transistor é dada aproximadamente por $I_C \times V_{CE}$. Essa limitação de potência, ou seja, a máxima potência que o transistor pode dissipar com segurança, depende da temperatura máxima permissível para a junção base-emissor (especificada pelo fabricante), da máxima temperatura ambiente de operação do circuito (avaliada pelo projetista) e dos meios utilizados para dissipar o calor produzido na junção base-emissor.

O fabricante especifica a potência máxima para o transistor, considerando o seu funcionamento à temperatura de 25° C.

3.12 CURVA DE MÁXIMA DISSIPACÃO DE POTÊNCIA

O traçado dessa curva é feito sobre as curvas características de saída do transistor. Para facilitar a compreensão, serão omitidos os valores da corrente de entrada.

Sendo a potência dissipada no transistor igual ao produto de I_C pela V_{CE} , temos:

$$P = I_C \times V_{CE}$$

Se fixarmos a potência máxima que o transistor pode dissipar, em uma determinada temperatura, e considerarmos I_C e V_{CE} como variáveis, teremos:

$$P_{\text{máx}} = I_C \times V_{CE}$$

De posse do valor de $P_{\text{máx}}$ podemos atribuir valores a V_{CE} , encontrar os valores correspondentes de I_C e determinar os vários pontos da curva, que possibilitarão o seu traçado.

Por exemplo, se um transistor pode dissipar no máximo 1W a 25° C, podemos determinar que ele opere com uma V_{CE} de 4 V, e assim determinarmos a sua I_C .

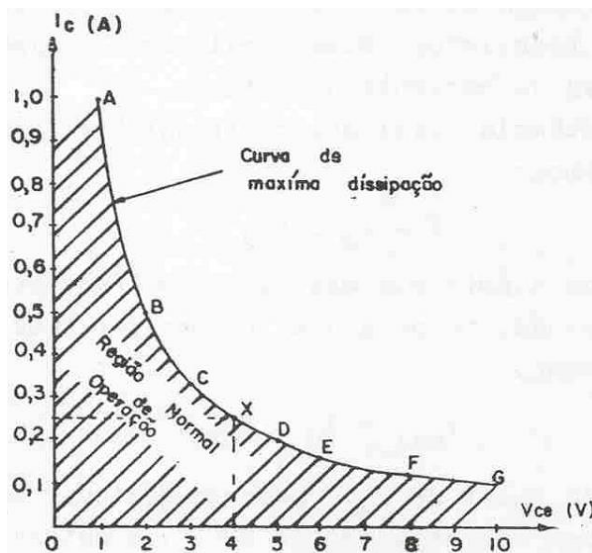
$$I_C = \frac{P_{\text{máx}}}{V_{CE}} = \frac{1W}{4V} = 0,25 A$$

Com o valor suposto de V_{CE} e o valor de I_C encontrado, determinamos o ponto "X", que será um dos pontos da curva, ilustrada na figura 3-33. Se montarmos uma tabela e atribuirmos valores a V_{CE} , encontraremos os valores correspondentes de I_C que, combinados com os valores de tensão, determinarão os pontos A, B, C, D, E, F e G, no gráfico da figura 3-33.

P em W	1	1	1	1	1	1	1
V_{CE} em V	1	2	3	5	6	8	10
I_C em mA	1000	500	333	200	166	125	100

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Tabela para determinar I_C em função de V_{CE} com "P" constante

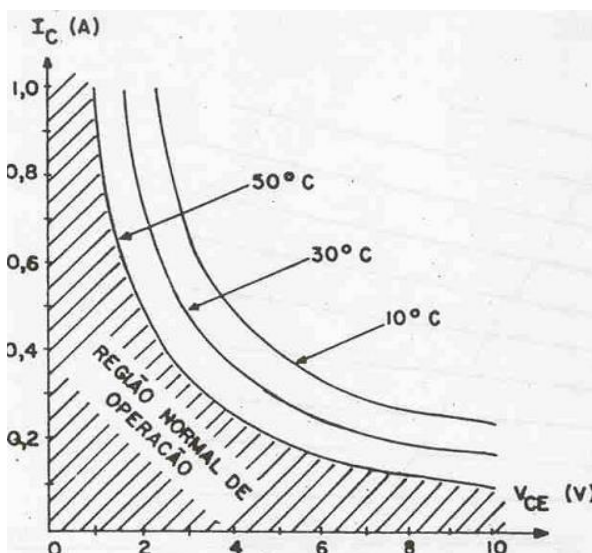


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-33 Curva de máxima dissipação

A curva é obtida, interligando-se os pontos encontrados na tabela. Esta curva é também chamada de curva de potência constante.

Quanto mais alta for a temperatura de trabalho do transistor, menor será a sua região de operação. A figura 3-34 mostra como a variação de temperatura afeta a região de operação do transistor. Em alguns casos, em que o transistor precisa operar com altas correntes (da ordem de Ampères), são usados sistemas de refrigeração para reduzir a temperatura e ampliar a região de operação.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-34 Efeito da variação de temperatura sobre a região de operação do transistor

Linha de Carga

A linha de carga (ou reta de carga) é a linha que cruza a família de curvas de saída. Essa linha possibilita aos técnicos e projetistas, a escolha do ponto "Q", que determina os valores de tensão e corrente que polarizam o transistor.

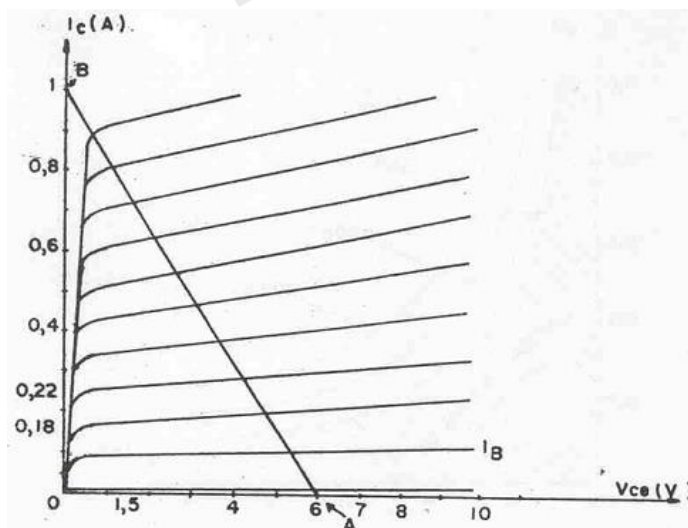
Em qualquer das três configurações ela é traçada, levando-se em conta a curva de máxima dissipação de potência.

Duas situações de funcionamento do transistor determinam as extremidades da linha de carga de um amplificador: corte e saturação. Para encontrar o extremo inferior da reta (ponto "A" no gráfico da figura 3-34), supomos o transistor em corte ($I_C = 0$).

Nesse caso V_{CE} é igual à tensão da fonte de alimentação.

O extremo superior (ponto "B") é encontrado, supondo-se o transistor em saturação. Nessa situação ele apresenta resistência nula em sua junção coletor-emissor, determinando uma V_{CE} igual a zero volt, ficando a corrente de coletor limitada apenas pelo resistor de carga (R_L).

Pelo que já vimos até aqui, fica evidente que a reta de carga é determinada por dois valores: tensão de alimentação e valor de R_L .



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-35 Traçado da reta de carga

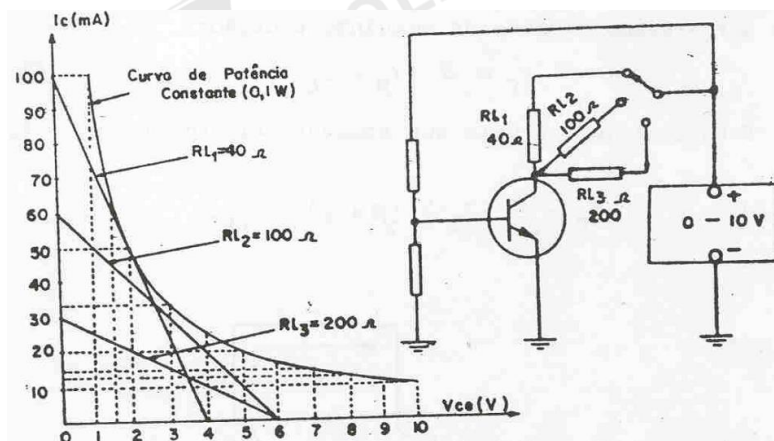
Na escolha da tensão de alimentação e do valor de R_L , devemos observar a máxima dissipação de potência especificada. Para maior segurança, não devemos permitir que a reta toque a curva de máxima dissipação, pois se o circuito de polarização não contar com uma boa estabilidade, qualquer aumento na temperatura ambiente poderá fazer com que a

potência, dissipada pelo transistor utilizado, ultrapasse a especificada pelo fabricante, levando o transistor à sua danificação permanente.

Na figura 3-36 temos a curva de saída com três linhas de carga, referentes a um amplificador na configuração emissor comum, onde podemos selecionar diferentes valores de R_L e de V_{CC} .

Quando queremos que o circuito opere como amplificador de potência, escolhemos valores que determinem uma reta de carga mais inclinada, como a de R_{L1} , aproveitando toda a potência que o transistor pode oferecer. Nesse caso o circuito deve contar com uma ótima estabilização de polarização que, geralmente, exige o emprego de diodos termistores. É bom observar que na especificação da potência máxima de um transistor, feita pelo fabricante, é deixada uma pequena margem de segurança com a qual o técnico e o projetista não devem contar.

Observando ainda a figura 3-36, é fácil concluir que com a mesma V_{CC} (6 V) podemos determinar a reta de carga que mais interessar, variando apenas a R_L , a exemplo das retas correspondentes à R_{L2} e R_{L3} .



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-36 Traçado da reta de carga em função de R_L e V_{CC}

3.13 INSTABILIDADE TÉRMICA DOS TRANSISTORES

Já é de nosso conhecimento que os transistores são instáveis à variação de temperatura. Esse fenômeno é devido às características intrínsecas do material básico, usado na sua confecção.

Por causa dessas características, quando polarizado, o transistor apresenta uma pequena corrente indesejável, chamada de corrente inversa, corrente de fuga ou ainda I_{CBO} . Esta I_{CBO}

é a corrente que flui entre o coletor e a base, estando o emissor em circuito aberto, conforme aparece na figura 3-37.

Quando o transistor é polarizado como na figura 3-38, ao atingir o circuito de base a I_{CBO} sofre uma amplificação, conforme o fator beta do transistor. Esta amplificação da I_{CBO} dá origem à I_{CO} , que é definida como sendo a corrente inversa do transistor, no circuito coletor. O valor de I_{CO} pode ser calculado através da seguinte fórmula:

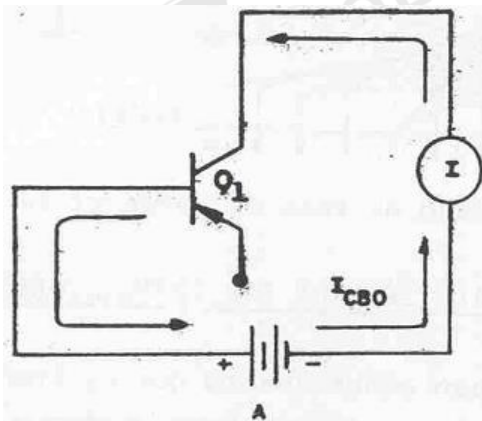
$$I_{CO} = (\beta + 1) I_{CBO}$$

Se o valor de I_{CBO} se mantiver a um nível pequeno, como o normal previsto para uma determinada temperatura, os problemas apresentados não serão prejudiciais ao circuito. Porém, se a I_{CBO} sofrer um aumento, principalmente ocasionado pelo efeito térmico, o resultado será um aumento de I_C (corrente direta de coletor). Isto pode ser provado através da seguinte equação:

$$I_C = \beta \times I_B + I_{CO}$$

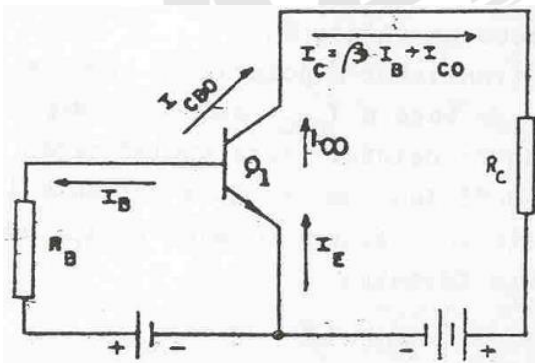
Substituindo I_{CO} pela sua equação correspondente, teremos:

$$I_C = \beta \times I_B + (\beta + 1) I_{CBO}$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-37 Corrente entre base e coletor, com emissor aberto



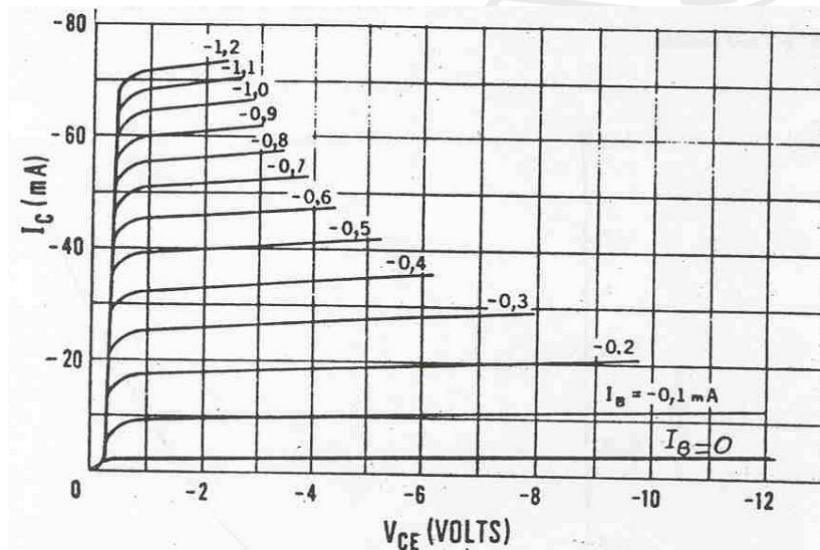
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-38 Correntes inversas no transistor polarizado

No caso da I_C aumentar em função do aumento da I_{CBO} , o ponto "Q" do circuito sofrerá um deslocamento ao longo da reta de carga.

A mudança do ponto "Q" pode ser cumulativa e pode destruir o transistor. As medidas utilizadas para contornar esta situação são os sistemas de polarização automática. É importante frisar que a I_{CO} flui no coletor, independente da corrente de base. Isto pode ser verificado na curva característica de saída do transistor, ilustrada na figura 3-39.

Nesta curva vemos que com I_B igual a zero flui uma pequena I_C .



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-39 Curva característica de saída de um transistor em configuração emissor comum.

A I_{CO} é normalmente especificada pelo fabricante e consta nas características do transistor. Seu valor é fornecido para determinadas temperaturas, geralmente 25° C.

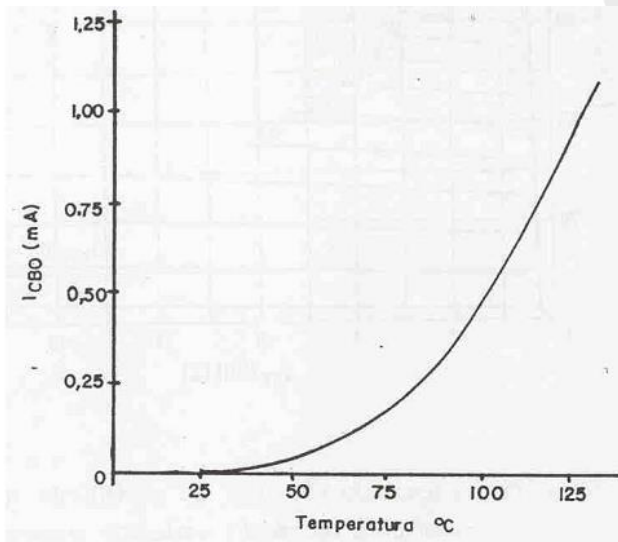
O aumento de temperatura nas junções de um transistor começa, normalmente, por um aumento na temperatura ambiente ou mesmo devido ao funcionamento normal do circuito, ainda que instantâneo. Neste caso, por causa do transiente que leva o transistor a dissipar maior potência.

Em qualquer situação, o circuito deve estar em condições de manter-se em bom funcionamento e, para isto, depende de como ele está polarizado e estabilizado.

Já é de nosso conhecimento que a polarização é estabelecida para um transistor pela especificação dos valores quiescentes da tensão entre coletor e emissor e da corrente de coletor. Uma operação confiável do transistor dentro de um grande intervalo de temperatura requer que a tensão e a corrente de polarização permaneçam estáveis. Todavia,

variações da corrente inversa em função da variação de temperatura, prejudicam a estabilidade da polarização se não forem empregados circuitos de compensação.

A figura 3-40 mostra a variação da I_{CBO} em função da variação de temperatura da junção base-coletor. O valor da corrente de fuga é de 1 mA a 125° C. Em temperaturas abaixo de 10° C a corrente não causa problema.



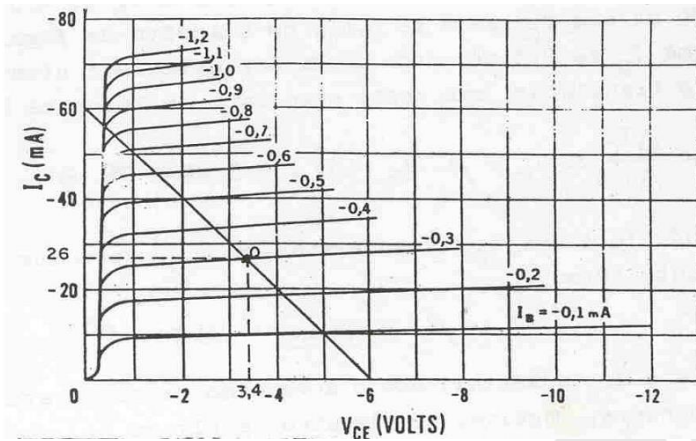
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-40 Variação de I_{CBO} em função da temperatura da junção base-coletor

Análise da Polarização de um Transistor

A polarização de um transistor, em princípio, seria bastante simples. Bastaria aplicar tensões contínuas aos elementos do transistor, de modo que as correntes permanecessem estáticas, em um nível médio e constante. Tomemos como exemplo o transistor 2N408, cujas características de saída aparecem no gráfico da figura 3-41.

Através deste gráfico verificamos as condições de trabalho do transistor. A linha de carga foi traçada entre os limites de 6V, para máxima V_{CE} , e 60 mA, para máxima I_C .

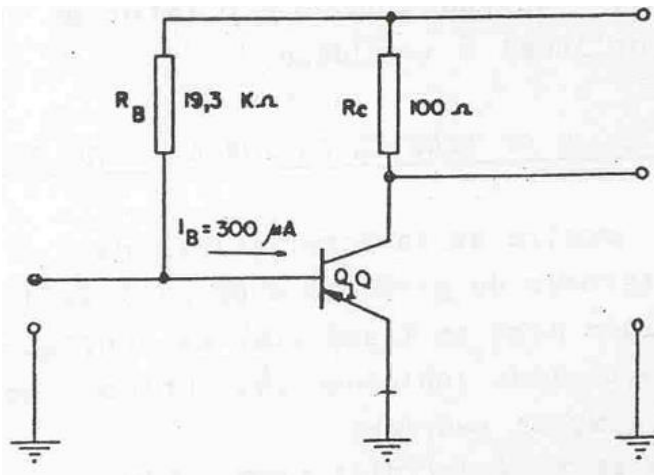


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-41 Curva característica de saída de um transistor em configuração emissor comum, com reta de carga e ponto "Q"

Na figura 3-42, o transistor utilizado é de germânio e a I_B escolhida foi de 0,3 mA. O valor de R_B foi determinado da seguinte forma:

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{6V - 0,2V}{0,3mA} = \frac{5,8V}{0,3mA} = 19,3 K\Omega$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-42 Transistor PNP polarizado

Pela análise do circuito e das curvas características de saída, podemos verificar os valores de tensão e corrente CC, estáticos, para o circuito. Com a projeção de perpendiculares, do ponto de cruzamento de I_B com a linha de carga, para os eixos de I_C e V_{CE} , verificamos que a I_C e a V_{CE} serão, respectivamente, 26 mA e 3,4V.

Nesta situação podemos dizer que, com I_B de 0,3 mA, a I_C será de 26 mA e a V_{CE} será de 3,4 V, no circuito da figura 3-42.

A I_C , para uma I_B de 0,3 mA, pode ainda ser calculada através do fator beta do transistor, que neste caso será em torno de 86.

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \therefore I_C = \beta \times I_B = 86 \times 0,3 \text{ mA} \cong 26 \text{ mA}$$

Já vimos que I_C , considerando-se I_{CO} , pode ser formulada da seguinte forma:

$$I_C = \beta \times I_B - I_{CO}$$

Se a I_{CO} aumentar, com o acréscimo da temperatura, a I_C também aumentará.

Observe, no circuito da figura 3-38, que I_C e I_{CO} têm o mesmo sentido.

Logo, se a I_{CO} aumentar, por qualquer motivo, a I_C aumentará, mudando o ponto "Q" do circuito.

Fator de Estabilidade

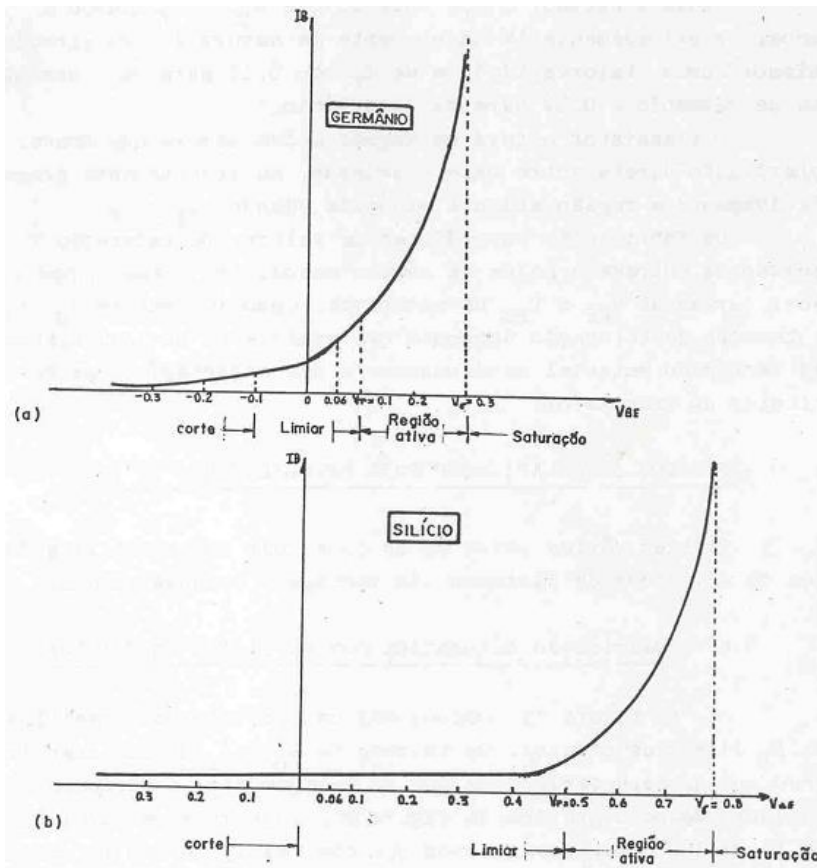
Para a análise da estabilidade da polarização estática de um circuito amplificador, é usada a seguinte equação:

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CO}}$$

Na equação apresentada, "S" é o fator de estabilidade de corrente e seu valor ideal é a unidade.

3.14 VALORES TÍPICOS DE TENSÕES DE JUNÇÃO PARA TRANSISTORES

A figura 3-43 mostra as características da I_C , como função da V_{BE} , para transistores de germânio e de silício tipo NPN, e indica as várias regiões para um transistor na configuração emissor comum. Os valores numéricos indicados são obtidos experimentalmente ou a partir de equações teóricas. A região de corte é definida como sendo a região onde a $I_E = 0$ e $I_C = I_{CO}$, quando a polarização da junção base-emissor não existe ($V_{BE} \leq 0V$).



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-43 Curvas de I_C em função de V_{BE} para transistores de germânio e de silício

Quando a junção base-emissor é polarizada inversamente, a I_B é muito pequena, sendo da ordem de nanoampères ou microampères para os transistores de silício e de germânio, respectivamente.

Nenhuma I_B apreciável flui até que a junção base-emissor seja polarizada diretamente, de modo que: $V_{BE} > V_{\tau}$, onde V_{τ} é chamada de tensão de limiar.

Como a I_C é nominalmente proporcional à I_B , nenhuma corrente apreciável fluirá pelo circuito de coletor, até que exista uma corrente apreciável no circuito de base.

Podemos estimar a V_{τ} , supondo que $V_{BE} = V_{\tau}$ quando a I_C alcançar aproximadamente 1% da corrente de saturação, no circuito em emissor comum. Valores típicos de V_{τ} são 0,1 V para os transistores de germânio e 0,5 V para os de silício.

O transistor estará na região ativa sempre que houver uma polarização direta entre base e emissor, suficientemente grande. A região ativa é atingida efetivamente quando tivermos $V_{BE} > V_{\tau}$.

Os fabricantes especificam os valores de saturação das tensões de entrada e de saída de vários modos. Por exemplo, podem fornecer curvas de V_{CE} e V_{BE} de saturação, como funções de I_B e I_C .

As tensões de saturação dependem não somente do ponto de operação, mas também do material semiconductor e das características de fabricação do transistor.

3.15 MÉTODOS DE POLARIZAÇÃO PARA ESTABILIZAÇÃO DA I_C

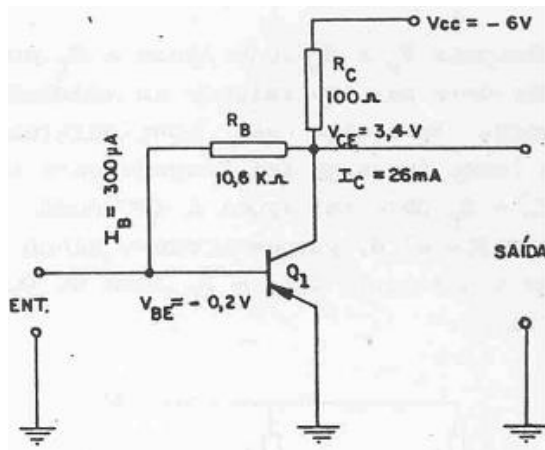
Existem vários meios de se conseguir uma estabilização térmica da I_C . Todos os sistemas têm vantagens e desvantagens.

Polarização Automática com R_B Ligado ao Coletor

Na figura 3-44 podemos ver um circuito de estabilização com R_B ligado ao coletor. Os valores de R_B e R_C devem estar de acordo com as características que se desejam para o circuito. Mas considerando-se o gráfico da figura 3-41, cuja reta de carga é para uma R_C de 100 Ohms, verificamos que com uma I_B de 300 μA , a V_{CE} será de 3,4 V. O cálculo de R_B neste caso é dado pela seguinte equação:

$$R_B = \frac{V_{CE} - V_{BE}}{I_B} = \frac{3,4 - 0,2}{300 \times 10^{-6}} = 10667 \text{ ohms}$$

Em situações normais, o resistor R_B limitará o valor de I_B em 300 μA . Esta I_B produz uma I_C de 26 mA, que determina em R_C uma queda de tensão de 2,6 V. Portanto, a tensão V_{CE} será igual a $V_{CC} - V_{RC} = 3,4$ V, que é o mesmo valor observado no gráfico da figura 3-41. R_B , cujo valor é de 10667 ohms, limita a I_B em 300 μA , desde que a V_{CE} permaneça em 3,4 V. Suponhamos agora um aumento de I_{CO} , que por sua vez tende a aumentar a I_C . Se a I_C aumentasse, aumentaria também a V_{RC} , o que diminuiria a V_{CE} . Com a diminuição da V_{CE} , a corrente através de R_B também seria menor. Com menor I_B , menor seria a I_C . Observamos então que qualquer tentativa de aumento de I_C produz uma diminuição de I_B e a I_C tende a diminuir. O resultado é que a I_C tende a manter-se no ponto de operação escolhido, que no caso é de 26 mA.



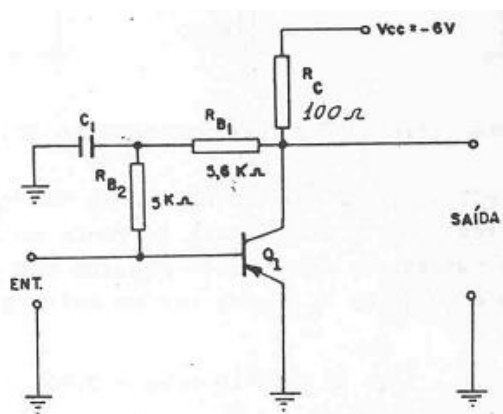
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-44 Polarização automática com R_B ligado ao coletor

O sistema de estabilização por realimentação de CC tirada do coletor é bom, mas tem o inconveniente da realimentação de CA. Neste caso, referimo-nos às variações da V_{CE} em trabalhos dinâmicos.

Para atenuar a realimentação de CA, os projetistas que usam esse sistema, costumam desmembrar R_B em dois resistores.

O uso de um capacitor, como aparece na figura 3-45, também ajuda na redução dessa realimentação.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

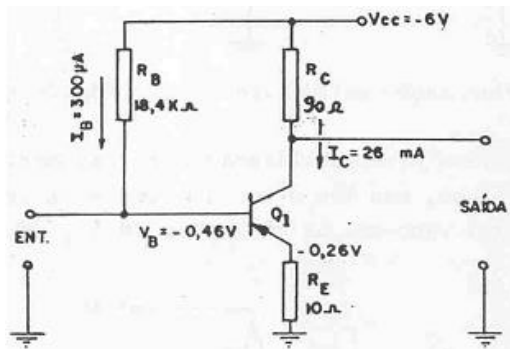
Figura 3-45 Polarização automática com atenuação da realimentação CA

Estabilização por Realimentação de CC com R_E

Os resistores R_C e R_E constituem a R_L do circuito e a soma de seus valores deve ser equivalente ao valor do resistor usado na linha de carga.

Para esse caso, consideraremos o gráfico da figura 3-41, cuja linha de carga foi traçada para um resistor de 100 ohms.

Como o valor de R_E não deve ser muito alto, porque afeta o ganho do circuito, consideraremos como sendo de 10 ohms e R_C será de 90 ohms, conforme pode ser visto na figura 3-46.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-46 Estabilização por realimentação de CC, com R_E

No gráfico, vemos que com uma I_B de 300 μ A, a I_C é igual a 26 mA.

No resistor R_E fluirá esta corrente de 26 mA mais a I_B de 300 μ A, que por ser de valor muito pequeno não entrará em cogitação. A V_E é a queda em R_E e pode ser encontrada pela Lei de Ohm.

$$V_E = R_E \times I_E = 26 \text{ mA} \times 10 \text{ ohms} = 0,26 \text{ V}$$

Sendo a V_E de -0,26 V, para que a V_{BE} seja de 0,2 V, a V_B deve ser igual a -0,46 V.

Se a V_{CC} é de -6 V, R_B deverá limitá-la. Neste caso o valor de R_B é encontrado pela equação:

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_B}{I_B} = \frac{6 - 0,46}{0,0003} = 18460 \text{ ohms}$$

Observando o circuito da figura 3-46, concluímos que ao ser ligado, a I_B será limitada em 300 μ A, determinando uma V_B de -0,46V.

A I_B de 300 μ A produz uma I_C de 26 mA que fluindo em R_E causa, sobre este, uma V_{RE} de -0,26V. Vemos então que sendo a V_E igual a -0,26V e a V_B de -0,46V, a V_{BE} será de -0,2V, o que constitui uma polarização direta.

Através da fórmula $I_C = \beta \times I_B + I_{CO}$, sabemos que se a I_{CO} aumentar por qualquer razão, a I_C também aumentará, saindo o circuito do ponto de operação escolhido.

No circuito da figura 3-46, se a I_C aumentar, a V_E aumenta e a V_{BE} diminui. Com V_{BE} menor, a I_B também será menor. A diminuição da I_B resulta em diminuição da I_C . Concluímos então, que neste circuito, se a I_C tende a aumentar, R_E provoca uma

realimentação negativa, que tende a diminuí-la e assim, o circuito tende a estabilizar-se automaticamente.

Uma das desvantagens de se usar o R_E é que, em circuitos de potência, ele tende a diminuir a potência útil do circuito. Além da estabilização, o uso de R_E tem como vantagem, aumentar a R_i .

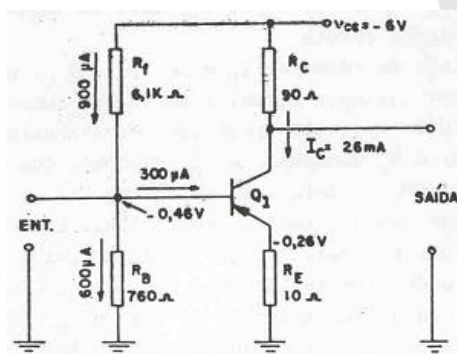
Polarização por Divisor de Tensão

Em um circuito polarizado, a V_B deve manter-se constante para que o circuito se mantenha estável. Um dos sistemas usados para manter constante a V_B , partindo de uma fonte de tensão de valor muito maior que V_B , emprega um divisor de tensão, conforme é visto na figura 3-47.

Conforme as características do divisor de tensão, a V_{RB} será mais estável, se a corrente que flui por ela for muito maior que a da base. O ideal seria uma I_{RB} várias dezenas de vezes maior que a I_B . Há, porém, vários inconvenientes. Uma I_B muito alta resulta em um valor de R_B muito baixo, o que diminui a impedância de entrada do circuito, acarretando sérios problemas para os sistemas de acoplamento entre estágios. Também deve ser considerada a energia que será consumida pelo divisor de tensão.

Em um equipamento existem dezenas de estágios com dezenas de resistores em sistemas de divisores de tensão, consumindo energia inutilmente, já que a potência consumida por eles é só para tentar manter pequenas tensões constantes.

Na prática, usa-se elaborar um divisor de tensão para polarização da base, com I_{RB} igual a I_B ou várias vezes maior que esta.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-47 Polarização por divisor de tensão

Calculemos os valores de R_F e R_B , do divisor de tensão da figura 3-47, utilizando os valores de V_B de $-0,46V$ e I_B de $300 \mu A$. Observe que estes valores já foram vistos em circuitos anteriores, logo, os detalhes sobre eles podem ser recordados.

O valor de R_B , supondo que a I_{RB} seja igual a duas vezes a I_B , é facilmente encontrado pela Lei de Ohm.

$$R_B = \frac{V_B}{I_{RB}} = \frac{0,46V}{600 \mu A} = \frac{0,46V}{6 \times 10^{-4} \mu A} = 760 \text{ ohms}$$

O valor de R_F é calculado pela equação:

$$R_F = \frac{V_{CC} - V_B}{I_{RB} + I_B} = \frac{6V - 0,46V}{300 \mu A + 600 \mu A} = 6150 \text{ ohms}$$

O sistema de polarização mais usado, por apresentar melhor estabilização térmica, é o por divisor de tensão, mostrado na figura 3-47. R_E realimenta negativamente a corrente contínua de base, pelo efeito térmico. R_B tende a manter a V_B em seu nível estável.

3.16 ESTABILIZAÇÃO DA POLARIZAÇÃO DE ESTÁGIOS DE POTÊNCIA

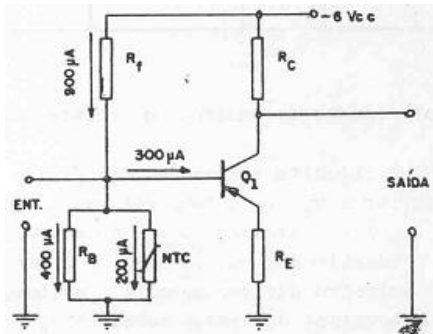
Os projetos de amplificadores de potência requerem uma atenção especial com relação à polarização. Primeiro, porque neste caso o transistor irá trabalhar aquecido, o que poderá desencadear a instabilidade do mesmo. Segundo, porque o uso de uma R_E pode diminuir a capacidade útil de potência do estágio. Dois dispositivos são usados comumente em estágios de potência, para sua estabilização térmica. Tais dispositivos são o diodo retificador e os termistores ou resistores NTC.

Circuitos de Estabilização com Termistores

Já sabemos que a corrente de polarização do transistor é sensível à temperatura. Especificamente, a I_C aumenta com o aumento da temperatura. A estabilização da I_C pode ser feita utilizando-se circuitos externos, com elementos eletricamente sensíveis à temperatura. Um desses elementos é o termistor.

O termistor usado, neste caso, tem uma resistência com coeficiente negativo de temperatura, isto é, o valor de sua resistência diminui com o aumento da temperatura. Este tipo de termistor é chamado de resistor NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo).

O circuito da figura 3-48 tem sua estabilização de polarização controlada por um termistor.



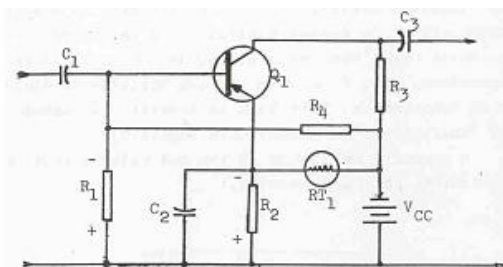
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-48 Polarização de base controlada por NTC

Os valores de R_B e do NTC dependem das características do circuito, mas o seu funcionamento é simples. A V_{BE} no circuito é 0,2V e a I_B é 300 μA . Com o aumento da temperatura ambiente, a I_C tende a aumentar devido ao aumento da I_{CO} . Porém, este aumento da temperatura afeta também o NTC, diminuindo a sua resistência, com o conseqüente aumento da corrente através dele.

Essa maior corrente solicitada aumenta a V_{RF} , diminuindo a V_{BE} e menor serão a I_B e a I_C . Como vemos o efeito térmico que tende a aumentar a I_C no circuito, diminui a resistência do NTC, que provoca uma diminuição da I_B , que por sua vez diminui a I_C . O resultado é que este simples dispositivo tende a manter o circuito no seu ponto de operação.

Controle da Tensão de Emissor



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-49 Polarização de emissor controlada por termistor

O circuito apresentado na figura 3-49 emprega um termistor para variar a V_E com a temperatura, a fim de minimizar as variações da I_E . Este circuito contém dois divisores de tensão: o primeiro é constituído por R_1 e R_4 , e o segundo por R_2 e o termistor R_{T1} .

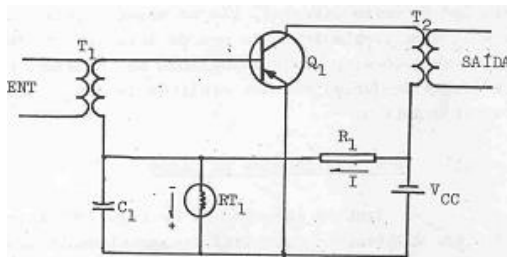
O primeiro divisor permite a aplicação de uma parte da V_{CC} entre o terminal de base e terra. A V_B é desenvolvida em R_1 e determina uma tensão negativa na base de Q_1 .

O segundo divisor de tensão aplica uma parte da V_{CC} no terminal de emissor. A V_E é desenvolvida em R_2 e determina uma tensão negativa no emissor de Q_1 . A tensão direta aplicada ao terminal de base é maior que a inversa aplicada ao terminal emissor, de tal modo que a polarização base-emissor resultante é direta.

Com um aumento de temperatura a I_C aumentaria normalmente, se o transistor não estivesse estabilizado. O aumento da I_C pode ser evitado pela redução da polarização direta. Isto é feito pela ação do divisor de tensão constituído por R_2 e pelo termistor RT_1 . Devido ao aumento da temperatura, a resistência de RT_1 é diminuída, provocando maior fluxo de corrente através do divisor de tensão. O aumento de corrente aumenta o potencial negativo da conexão do resistor R_2 ao emissor. Esta ação aumenta a polarização inversa aplicada ao emissor e diminui a polarização direta base-emissor. O resultado é que a I_C é reduzida. Analogamente, a diminuição da temperatura ocasiona ações inversas e evita o decréscimo da I_C .

C_1 bloqueia a tensão CC do estágio anterior e acopla o sinal CA ao circuito base-emissor. C_2 mantém constante a V_E . R_3 é o resistor de carga do coletor e onde se desenvolve o sinal de saída. C_3 bloqueia a tensão CC do coletor e acopla o sinal CA ao estágio seguinte.

Controle da Tensão de Base



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-50 Amplificador com controle de polarização de base

O circuito apresentado na figura 3-50 emprega um termistor para variar a V_B com a temperatura, minimizando as variações da I_E . Este circuito contém um divisor de tensão constituído por R_1 e RT_1 .

O divisor de tensão aplica uma parte da V_{CC} no circuito base-emissor. O fluxo de corrente dos elétrons através do divisor está na direção da seta. Esta corrente produz uma tensão de polaridade indicada em RT_1 . Este circuito produz polarização direta no transistor.

Se a temperatura do transistor aumentar, a I_E tende a aumentar. Todavia, a resistência de RT_1 diminui com o aumento da temperatura, provocando maior fluxo de corrente através do divisor de tensão. Este aumento de corrente ocasiona um aumento na VR_1 . A tensão de polarização direta é reduzida e assim a I_E também é reduzida.

T_1 acopla o sinal CA ao circuito de base-emissor. C_1 mantém constante a tensão em RT_1 . O primário de T_2 atua como carga do coletor e é onde se desenvolve o sinal de saída que é acoplado ao secundário.

Circuitos de Estabilização com Diodos

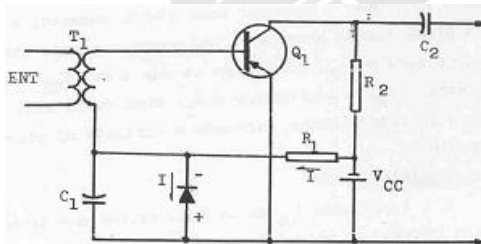
O diodo pode ser usado em circuitos de estabilização. A principal vantagem do seu uso como elemento sensível à temperatura é por ele pode ser feito do mesmo material que o transistor.

Os coeficientes de temperatura das resistências do diodo e do transistor de mesmo material são os mesmos. Esta condição permite uma I_C mais constante em um grande intervalo de temperatura, porque as variações no diodo acompanham as variações no transistor. Os diodos de junção têm uma resistência com coeficiente de temperatura negativo.

Estabilização com um Diodo

O circuito apresentado na figura 3-51 emprega um diodo de junção, diretamente polarizado, como elemento sensível à temperatura, para compensar as variações da resistência da junção base-emissor.

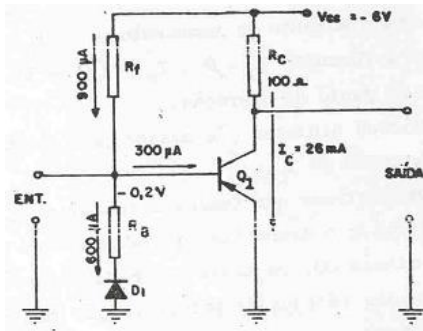
Considere o divisor de tensão constituído por R_1 e D_1 , com a polaridade indicada. Esta tensão é uma polarização direta. Com o aumento da temperatura, a I_C tenderia a aumentar. Todavia, a resistência de D_1 diminui. Como resultado, a VR_1 aumenta. Há uma queda de tensão em D_1 , que provoca redução na polarização direta e, conseqüentemente, na I_C .



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-51 Estabilização com um diodo diretamente polarizado

Os diodos, quando empregados adequadamente na estabilização de um circuito, funcionam mais ou menos como os NTC. A instabilidade térmica que afeta o transistor afeta também a eles. No circuito da figura 3-52 aparece um diodo com função de estabilização térmica.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 3-52 Circuito com estabilização térmica feita por diodo

D_1 tem sua junção semelhante à junção base-emissor de Q_1 . Logo, os diodos serão afetados igualmente pela variação de temperatura.

Analisando o comportamento do circuito, vemos que se a I_C tender a aumentar pelo efeito térmico, a corrente através do diodo também aumentará.

Com maior corrente através do diodo, maior será a V_{RF} , resultando em uma menor V_{BE} e assim, a I_B também será menor e, logicamente a I_C . Como resultado, D_1 tende a manter a I_C estabilizada, mantendo o circuito no ponto de operação escolhido.

3.17 RESUMO

- 1 - A corrente I_{CO} ou de fuga existe nos transistores, devido aos portadores minoritários existentes em suas estruturas.
- 2 - A principal corrente de fuga de um transistor, é a de coletor para base, cuja denominação é I_{CBO} .
- 3 - A corrente I_{CO} , em um circuito amplificador, tende a ser amplificada em uma razão $(\beta + 1) I_{CBO}$.
- 4 - A corrente I_C , considerando-se a I_{CO} , é equacionada como sendo: $I_C = \beta \times I_B + I_{CO}$.
- 5 - Em temperatura constante e normal, conforme a especificada pelo fabricante, a I_{CO} não constitui problema num amplificador.
- 6 - Com o aumento da temperatura, a I_C tende a aumentar de acordo com a fórmula: $I_C = \beta \times I_B + (\beta + 1) \times I_{CO}$, tirando o circuito de seu ponto de operação.
- 7 - Vários sistemas são usados para manter a I_C constante mesmo com o aumento da I_{CO} .

8 - Os sistemas que tendem a manter a I_C constante, consistem em polarizar o transistor de tal maneira que haja uma pequena realimentação CC, ou ainda por estabilização da V_{BE} .

9 - Um dos métodos de estabilização por realimentação CC é polarizar a base com a tensão V_{CE} . Neste caso, se a I_C aumentar estaticamente, a V_{CE} diminui, reduzindo a I_B .

10 - O método mais usado para manter constante a I_C é a realimentação CC por resistência de emissor. Neste caso, se a I_C aumentar, haverá também um aumento da V_E , que diminui a V_{BE} , diminuindo a I_B , que por sua vez diminui a I_C .

11 - Através de um circuito divisor de tensão pode-se manter a V_{BE} dentro dos limites de estabilização. Neste caso, o divisor deve ser projetado levando-se em conta as suas desvantagens, como por exemplo, o alto consumo de energia e a diminuição da impedância de entrada.

12 - O sistema de polarização mais adequado para uma boa estabilização em circuitos amplificadores de baixa potência, é constituído por um R_E e por um divisor de tensão. Este sistema é o mais usado.

13 - Em circuitos de potência, a estabilização térmica da I_C é conseguida através de transistores, diodos e resistores NTC.

14 - Um diodo de junção polarizado inversamente tem uma resistência com coeficiente de temperatura negativo, desde que a tensão de polarização inversa não iguale ou exceda à tensão de ruptura.

15 - Diodos com a mesma característica da junção base-emissor de um transistor podem ser usados em circuitos estabilizadores de polarização.

Neste caso, quando instalado adequadamente, poderá estabilizar a V_{BE} . Isto porque o efeito térmico que agir sobre o transistor, agirá também sobre o diodo.

16 - As correntes e tensões desenvolvidas num amplificador transistorizado estabilizado em temperatura podem ser utilizadas para estabilizar em temperatura outros amplificadores transistorizados.

17 - Os resistores NTC, têm a resistência diminuída com o aumento da temperatura. Logo, se colocados no circuito de base, eles poderão diminuir a V_{BE} que provoca a diminuição da I_B e da I_C . Isto acontece porque o efeito térmico que agirá sobre o transistor, também agirá sobre ele.

18 - A reta de carga é a linha que possibilita a escolha do ponto de operação do transistor.

19 - A curva de máxima dissipação de potência é a curva que possibilita a limitação da região de operação do transistor.

20 - Todo componente elétrico possui uma potência de trabalho especificada pelo fabricante.

Em se tratando de transistores, existem mais razões para se obedecer a essa especificação.

21 - Para cada temperatura de trabalho do transistor, há uma curva de máxima dissipação de potência.

22 - Um aumento de temperatura reduz a região de operação do transistor.

23 - A fórmula para se calcular a potência de dissipação do transistor, é: $P = V_{CE} \times I_C$.

24 - A região de operação de um transistor é a parte onde pode ser traçada a linha de carga.

25 - Na curva de máxima dissipação, a potência é a mesma em todos os pontos.

26 - Os limites de tensões são especificados para transistores, por causa do efeito de ruptura que ocorre quando há um aumento da tensão inversa da junção.

27 - A fim de deixar o transistor operar à temperatura ambiente, são colocados dissipadores de calor em contato com seu corpo.

28 - No traçado da reta de carga fazem-se duas suposições extremas do funcionamento do transistor: corte e saturação.

29 - A reta de carga do amplificador de potência é mais inclinada que a do amplificador de tensão.

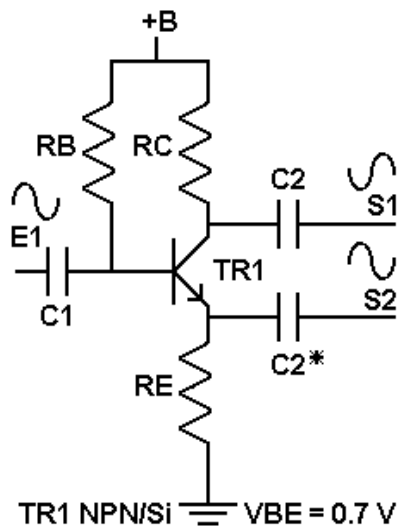
30 - O sistema de estabilização da polarização dos amplificadores de potência deve ser de boa eficiência. Geralmente são empregados diodos, termistores e transistores.

31 - Com a mesma tensão de alimentação podemos traçar várias linhas de carga diferentes, variando apenas o valor de R_L .



Referência Bibliográfica

BRASIL. IAC – Instituto de Aviação Civil. Divisão de Instrução Profissional Matérias Básicas, tradução do AC 65-9A do FAA (Airframe & Powerplant Mechanics-General Handbook). Edição Revisada 2002.



Fonte: <http://physika.info/physika/javascript/circuito02.gif>

MÓDULO IV

AMPLIFICADORES TRANSISTORIZADOS, OSCILADORES TRANSISTORIZADOS E TRANSISTORES ESPECIAIS

INTRODUÇÃO

Caro aluno,

Amplificadores, osciladores transistorizados e transistores especiais serão tema deste nosso último módulo.

Com a invenção dos transístores, as válvulas foram pouco a pouco substituídas por estes novos amplificadores, devido às vantagens de menor consumo de energia, maior durabilidade, menor tamanho e custo menor. Os amplificadores transistorizados têm comportamento diferente dos valvulados, a distorção é diferente e não necessitam de transformadores de saída para casar as impedâncias dos alto-falantes. Hoje os amplificadores transistorizados podem ser construídos com transístores bipolares ou MOSFETs ou ainda circuitos integrados.

Os transistores bipolares, se baseiam em dois tipos de cargas:

Lacunas e elétrons, e são utilizados amplamente em circuitos lineares.

No entanto existem aplicações nas quais os transistores unipolares com a sua alta impedância de entrada são uma alternativa melhor. Este tipo de transistor depende de um só tipo de carga, daí o nome unipolar. Há dois tipos básicos: os transistores de efeito de campo de junção (JFET - Junction Field Effect transistor) e os transistores de efeito de campo de óxido metálico (MOSFET).

Vamos lá?

4.1 CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS AMPLIFICADORES

Os amplificadores podem ser classificados de acordo com:

A frequência de operação:

- Amplificadores de audiofrequência(AF)
- Amplificadores de videofrequência
- Amplificadores de radiofrequência(RF)

A classe de operação:

- Classe A
- Classe B
- Classe C
- Classes intermediárias(A2, B2, AB1, AB2)

O sistema de acoplamento:

- Acoplamento RC Acoplamento a transformador
- Acoplamento por impedância
- Acoplamento direto

O uso:

- Amplificadores de potência ou corrente
- Amplificadores de tensão

4.2 FREQUÊNCIAS DE OPERAÇÃO

As faixas de frequência de operação determinam o tipo de amplificador a ser usado.

Amplificadores de Audiofrequência

Estes amplificadores atuam numa faixa de frequência que vai de 20 Hz a 20 kHz, faixa esta, sensível ao ouvido humano e por esta razão recebe o nome de audiofrequência. Estes amplificadores são encontrados em receptores de rádio, intercomunicadores e outros.

Amplificadores de Videofrequência

Estes amplificadores abrangem uma ampla faixa de frequência que vai de 30 kHz a 6 MHz. Eles são empregados em circuitos que ampliam sinais que devem ser vistos em telas de radares, televisores etc.

Amplificadores de Radiofrequência

Diferenciam-se dos outros dois tipos porque ampliam uma estreita faixa de frequência dentro do espectro de radiofrequência, que vai de 30 kHz até vários GHz. São usados em vários equipamentos. Quando sintonizamos uma emissora de rádio estamos deslocando a estreita faixa de ampliação do circuito, dentro do espectro de frequência.

4.3 CLASSES DE OPERAÇÃO

De acordo com a polarização empregada para o transistor, podemos atribuir as classes de operação.

A classe de operação é determinada pelo circuito de polarização de entrada. Na maioria dos circuitos amplificadores a polarização e a reta de carga têm valores fixos, definidos pelos valores de seus componentes.

Consideraremos, em nossas análises, somente os efeitos do circuito de polarização de entrada.

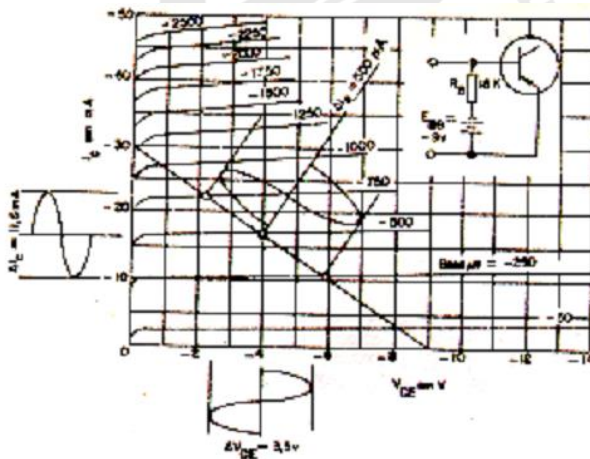
Amplificador Classe "A"

Os amplificadores da classe "A" operam durante os dois semiciclos do sinal de entrada, (360°). São polarizados para trabalhar na região ativa da curva de saída.

Geralmente operam na parte linear das curvas características, a fim de obter na saída uma resposta fiel (não distorcida) do sinal de entrada.

O primeiro passo para a determinação da classificação do amplificador é a construção da reta de carga como mostrado na figura 4-1. Em seguida, deve-se selecionar um ponto quiescente de modo a permitir que um sinal de entrada varie através da parte linear da curva característica. Neste exemplo foi escolhida uma I_B estática de $500 \mu A$ e a V_{CC} é selecionada em seguida para um valor de 9 Volts para o circuito em classe "A".

Veja na figura 4-1 o circuito de entrada e as formas de onda para um ponto "Q" de $500 \mu A$, em classe A.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-1 Circuito de entrada e formas de onda em classe "A"

Em seguida determinaremos o valor de R_B e, para calcular esse valor é necessário que se leve em consideração o valor da V_{BE} do transistor. Assim, a equação correta para o cálculo de R_B é a seguinte:

$$R_B = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{I_B}$$

Na prática, porém, podemos desprezar o valor de V_{BE} , e desta forma teremos:

$$R_B = \frac{V_{CC}}{I_B}$$

Substituindo a V_{CC} e I_B pelos valores de 9V e $500 \mu A$ respectivamente teremos:

$$R_B = \frac{9V}{500 \mu A} = 18k\Omega$$

O circuito de polarização de entrada está completamente mostrado na parte superior direita da figura 4-1.

Quando o sinal de entrada é zero (ver a figura 8-1), a I_B é $-500 \mu\text{A}$, a I_C é -17 mA e a V_{CE} é $-3,9 \text{ V}$ (valores do ponto quiescente).

Uma variação da corrente de entrada para o seu valor máximo negativo de $250 \mu\text{A}$, elevará a I_B para $-750 \mu\text{A}$, logo a I_C aumentará para $-22,2 \text{ mA}$, enquanto que a V_{CE} diminuirá para $-2,3 \text{ V}$.

Quando a I_B diminui para $-250 \mu\text{A}$, a I_C diminui para $-11,8 \text{ mA}$ enquanto que a V_{CE} aumenta para $-5,5 \text{ V}$.

Assim, uma tensão de saída de $3,2 V_{PP}$ e uma variação na corrente de saída de $10,4 \text{ mA}$ são obtidas.

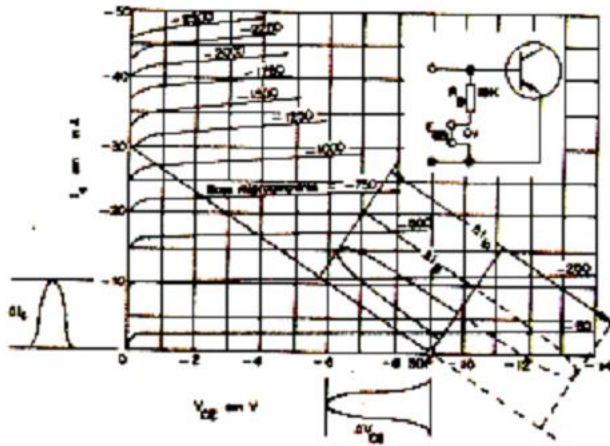
Podemos notar que quando a I_B aumenta negativamente, a I_C fica mais negativa e a V_{CE} menos negativa. Por outro lado, quando a I_B diminui negativamente, a I_C fica menos negativa e a V_{CE} mais negativa. Isto indica que as correntes de entrada e de saída estão em fase enquanto que as tensões de entrada e de saída estão fora de fase. Portanto, há uma inversão de 180° na configuração de emissor comum.

Amplificador Classe "B"

Os amplificadores classe "B" operam na região ativa das curvas, durante um semiciclo do sinal de entrada, e permanecem em corte durante o outro (180°).

Visto que somente metade do sinal de entrada é amplificada, os amplificadores classe "B" são normalmente montados na configuração "Push-pull", que são amplificadores de potência formados por dois transistores que conduzem alternadamente, mas que na saída, produzem um sinal que é idêntico ao sinal de entrada.

O ponto quiescente (POE) é estabelecido no cruzamento da reta de carga com a curva de I_B igual a zero como se vê na figura 4-2.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-2 Circuito de entrada e formas de onda em classe "B"

Uma fonte de polarização de entrada não é requerida, já que a corrente quiescente da base é zero.

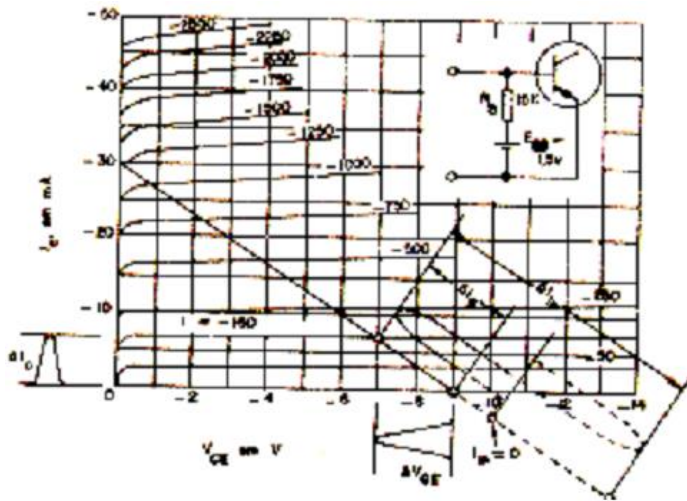
Uma R_B relativamente grande (18 k Ω) é usada para limitar a dissipação do sinal de entrada do circuito de polarização. Assim, o circuito de polarização de entrada contém somente um resistor de polarização, como se vê na figura 4-2.

No ponto quiescente, I_B e I_C são iguais a zero e V_{CE} é igual a -9V. Quando o sinal de entrada se torna negativo, polariza diretamente a junção emissor-base.

Na alternância positiva a junção emissor-base está polarizada inversamente. O transistor fica cortado e parte da corrente de entrada passa através de R_B , durante esta alternância.

Amplificador Classe "C"

A operação em classe "C" é conseguida pela polarização inversa da junção de entrada do transistor. Com polarização inversa aplicada ao transistor, a corrente de base permanece em zero até que a corrente de entrada produza uma queda de tensão através da resistência de entrada. Esta queda de tensão deve estar com polaridade oposta à fonte de polarização do circuito de entrada e deve superar a tensão da fonte.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-3 Circuito de entrada e formas de ondas em classe "C"

Na figura 4-3, I_B permanece em zero até que a corrente de entrada se torne igual a $-100\mu A$. Quando isto ocorre, a V_{BE} é igual a zero.

$$\begin{aligned} V_{BE} &= E_{BB} + (I_{in} \times R_B) = \\ &= 1,5V + (-100\mu A \times 15k) = \\ &= 1,5V + (-1,5V) = 0 \end{aligned}$$

Desta equação podemos deduzir que a junção emissor-base estará polarizada diretamente, quando a corrente de entrada for maior que $-100\mu A$. Um sinal de saída é obtido para a porção de corrente de entrada que é maior que $-100\mu A$.

Na prática, um sinal de entrada muito maior será usado para obter amplificação em classe "C".

Na figura 4-4 vemos as formas de onda de saída, com relação às de entrada para cada classe de operação. Os sinais não foram mostrados com amplificação, nem com inversão de fase, pois nosso interesse está somente no período de condução.

CLASSE	FORMAS DE ONDAS DE ENTR.	FORMAS DE ONDAS DE SAÍDA	PERÍODO DE CONDUÇÃO
A ₁			360°
A ₂			340°
AB ₁			340°
AB ₂			320°
B			180°
B ₂			entre 120° e 180°
C			120°

Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-4 Formas de onda de saída com relação às de entrada para cada classe de operação.

4.4 SISTEMAS DE ACOPLAMENTO

Um simples estágio amplificador, normalmente não é suficiente nas aplicações em aparelhos receptores, transmissores e outros equipamentos eletrônicos.

Um ganho mais elevado é obtido pelo acoplamento de vários estágios amplificadores.

Casamento de Impedâncias

Para que haja a máxima transferência de sinal, o estágio de entrada deve ter a impedância equilibrada com a da fonte de sinal (microfone, antena, etc.) e o estágio final deve ter a impedância equilibrada com a da carga (fone, alto-falante, linha de transmissão, etc.)

Da mesma forma, a impedância de saída de um estágio deve estar "casada" com a impedância de entrada do estágio seguinte.

Além do equilíbrio de impedância, é de vital importância isolar a passagem de corrente contínua, de uma etapa para outra.

Tipos de Acoplamento

- A) Redes RC
- B) Transformadores
- C) Acoplamento por impedância
- D) Acoplamento direto

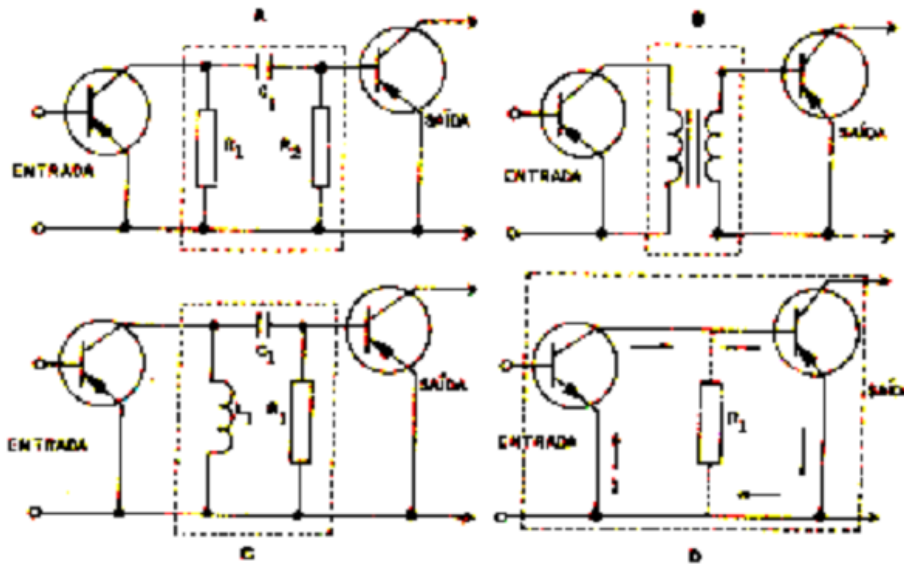
Acoplamento RC

A figura 4-5A apresenta um amplificador de dois estágios acoplados mediante uma rede RC.

O capacitor de acoplamento C_1 tem como primeira função isolar a tensão de CC presente no coletor do primeiro estágio, para que ela não apareça na base do transistor do estágio seguinte e, como segunda função transferir o sinal de um estágio para o outro.

O capacitor de acoplamento deve ter, também, uma reatância reduzida para as tensões de sinal e, portanto, seu valor de capacitância deve ser relativamente alto.

Os valores típicos de capacitância vão de 1 a $30\mu\text{F}$. É necessário que o valor do capacitor seja alto, por causa da baixa impedância de entrada do estágio seguinte.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-5 Amplificador com acoplamento RC

O sinal que sai do primeiro estágio, desenvolve-se no resistor R_B . O capacitor C_1 e o resistor R_1 constituem a rede RC de acoplamento entre os dois estágios.

A eficiência do amplificador acoplado mediante uma rede RC é baixa, por causa da dissipação de potência de CC no resistor de carga.

Resposta de Frequência

As frequências muito baixas são atenuadas pelo capacitor de acoplamento, porque a sua X_C torna-se alta, com a diminuição da frequência. A resposta em altas frequências, para o transistor está limitada pelo efeito "Shunt" da capacitância emissor-coletor do primeiro estágio, e da capacitância base-emissor do segundo estágio.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-6 Capacitância entre os elementos do transistor

Observe na figura 4-6 que C_C e R_B estão em série e em baixas frequências e, que a X_C é consideravelmente alta, provocando assim o máximo de queda de sinal em C_C e o mínimo

em R_B . No entanto, para as altas frequências, aparece uma X_C mínima, em paralelo com RC, resultando numa resistência total mínima possibilitando o desvio de grande parte ou até mesmo de todo o sinal para a terra.

Vantagens e Desvantagens do Acoplamento por Rede RC

O acoplamento RC é bastante usado em circuitos transistorizados, por oferecer uma boa resposta de frequência, sendo de simples confecção e preço relativamente baixo.

Porém, embora esse acoplamento ofereça uma boa resposta em frequência, não é o tipo de maior eficiência, em face das dificuldades em casar as impedâncias entre estágios.

Outra desvantagem desse tipo de acoplamento está no fato de apresentar grandes perdas quando usado em frequências muito baixas.

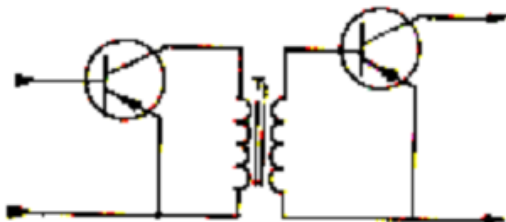
Acoplamento a Transformador

No acoplamento a transformador o enrolamento do primário do transformador (T_1) é a impedância de carga do coletor do primeiro estágio.

O enrolamento secundário de T_1 desenvolve o sinal de CA, para a base do transistor do segundo estágio e também age como caminho de retorno de CC, da base.

A resistência muito baixa, no circuito de base, auxilia a estabilização da polarização no ponto de operação de CC. Com um resistor na entrada do emissor, o fator de estabilidade de corrente é quase ideal.

Como não há resistor de carga de coletor para dissipar potência, a eficiência do amplificador acoplado a transformador se reduz, teoricamente, para 50%. Por este motivo o processo de acoplamento a transformador é muito usado em equipamentos portáteis e operados com baterias.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-7 Acoplamento a transformador

Vantagens e Desvantagens do Acoplamento a Transformador

Os transformadores facilitam o equilíbrio da carga de saída do transistor e o equilíbrio da fonte, à entrada do transistor, para se obter o máximo de ganho de potência, para um determinado estágio.

A resposta de frequência de um estágio acoplado por intermédio de transformador não é tão boa quanto a do estágio acoplado por rede RC.

A resistência "Shunt" do enrolamento primário, nas baixas frequências, causa a queda de resposta nestas frequências. Nas altas frequências, a resposta é reduzida pela capacitância de coletor e pela reatância de saída, entre os enrolamentos do transformador.

Além da resposta de frequência ser pobre, os transformadores são mais caros, mais pesados, e ocupam maior área que os resistores e capacitores empregados no acoplamento RC.

Portanto, o uso do acoplamento a transformador é limitado, normalmente, àquelas aplicações que requerem alta eficiência de potência de saída.

Acoplamento por Impedância

O acoplamento por impedância é similar ao acoplamento por rede RC, com exceção de que o resistor de carga é substituído por um indutor (L_1), como apresentado na figura 4-8.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-8 Acoplamento por impedância

A resistência de carga é somente a resistência do fio do enrolamento, o qual proporciona uma queda mínima de tensão de CC. Grandes valores de indutância devem ser usados, para que seja oferecida uma alta reatância, nas baixas frequências.

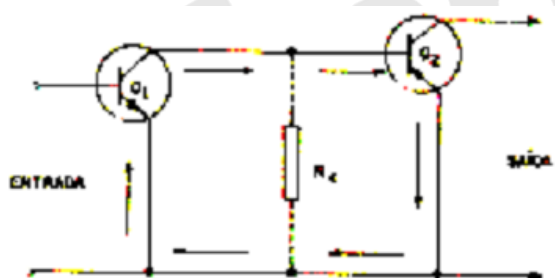
O ganho do estágio acoplado por impedância cresce com o aumento da frequência, já que a reatância indutiva é diretamente proporcional à frequência.

Na faixa de altas frequências, a reatância diminui, por causa da capacitância distribuída no circuito, que desvia o sinal.

Os campos magnéticos que cercam a impedância de carga podem causar, também, um acoplamento indesejável a outros circuitos. Por isso, esses campos devem ser controlados, através de indutâncias apropriadas.

Acoplamento Direto

Quando o transistor de um estágio amplificador é ligado diretamente ao transistor do estágio seguinte dizemos que o acoplamento é direto, como mostrado na figura 4-9.



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-9 Acoplamento direto

Este tipo de acoplamento é usado para a amplificação de sinais chamados de "corrente contínua", em virtude da frequência ser muito baixa.

Observando o circuito da figura 4-9, vemos que um transistor PNP está ligado diretamente a um transistor NPN. A direção do fluxo de corrente é indicada pelas setas. Se a corrente do coletor do primeiro estágio for maior que a corrente de base do estágio seguinte, devemos ligar o resistor R_C (carga do coletor), como está indicado pela linha tracejada. Como o número de componentes necessários no amplificador acoplado diretamente é mínimo, teremos o máximo de economia e também a máxima fidelidade de sinal. Entretanto, o número de estágios que podem ser acoplados diretamente é limitado.

4.5 AMPLIFICADORES DE ÁUDIO

Antes de iniciarmos os estudos destes amplificadores, é interessante lembrar, que a finalidade de um amplificador é a de aumentar a tensão, a corrente, ou o nível de potência de um sinal, a um valor necessário, a fim de operar um dispositivo de saída.

Esse dispositivo pode necessitar de considerável energia ou pode exigir uma alta tensão, com baixa potência, para sua operação.

Os amplificadores de tensão (baixo nível) são estágios de amplificação projetados para produzir um grande valor de tensão, através da carga do circuito de coletor. Para produzir uma alta tensão, utilizável através de um circuito de carga, é necessária que a oposição à variação de IC seja a máxima possível, qualquer que seja a carga (resistor, reatância ou impedância).

Os amplificadores de potência (alto nível) são estágios amplificadores, construídos para fornecer grandes quantidades de potência para a carga no circuito coletor.

Num amplificador de potência, deve haver uma grande corrente no circuito do coletor, uma vez que a potência é o produto da resistência, pelo quadrado da corrente.

Os pré-amplificadores são etapas de baixo nível, que se destinam à amplificação de sinais originários de dispositivos, tais como microfones, detectores, cápsulas magnéticas etc.

4.6 AMPLIFICADORES DE ÁUDIO TRANSISTORIZADOS

Os circuitos amplificadores de áudio são projetados especificamente para ampliar sinais da faixa de áudio frequência, isto é, sinais compreendidos entre 20 Hz e 20kHz.

O circuito de entrada de um amplificador transistorizado deve ser alimentado com a corrente de saída de um pré-amplificador. Neste caso, cada transistor é considerado como um amplificador de corrente ou potência, operando a um nível de corrente ou de potência, mais elevado que o nível do estágio anterior e menos elevado que o do estágio seguinte. Uma vez que os transistores são, essencialmente, dispositivos amplificadores de potência, seu uso nos circuitos de áudio é classificado nas categorias amplificador de áudio de baixo nível e amplificador de áudio de alto nível.

O nível de potência de um estágio amplificador de áudio é determinado pelos requisitos do projeto. Em alguns casos, os amplificadores de baixo nível (também chamados de amplificadores de sinal) podem operar com potências variando de "picowatts" até "miliwatts", enquanto que em outras situações (amplificadores de potência) podem operar com vários Watts.

Circuito Amplificador de Áudio Básico

O circuito da figura 4-10 apresenta um estágio amplificador básico de áudio.

A estabilização para esse amplificador é estabelecida pela corrente de base-emissor. Essa corrente cria uma tensão que polariza diretamente o circuito de entrada.

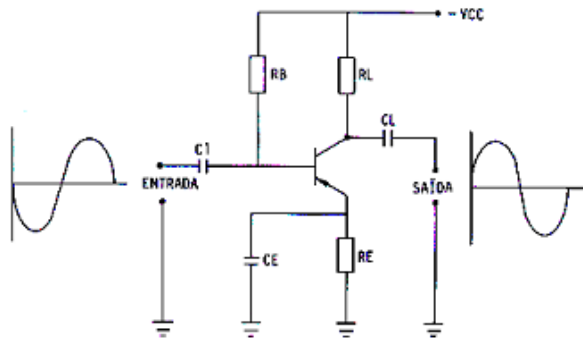
O resistor de base R_B limita a corrente de polarização estabelecendo assim o ponto quiescente.

Durante o semiciclo positivo do sinal de entrada a polarização direta diminui. Isso provoca uma conseqüente diminuição da corrente de coletor, através de R_L , e a tensão em R_L diminui. Assim, a tensão de coletor aumenta, em direção a um valor negativo de V_{CC} . Durante o semiciclo negativo do sinal de entrada, a polarização direta aumenta. Isso faz com que a corrente através de R_L aumente, aumentando também a queda de tensão sobre a mesma, tornando negativa a tensão de coletor.

O capacitor C_1 acopla o sinal de entrada e o capacitor C_2 o sinal de saída.

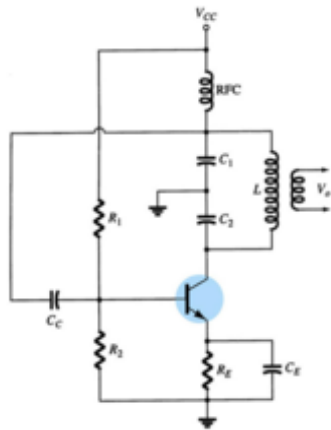
R_E é o resistor de estabilização de emissor e está ligado em paralelo com o capacitor de desacoplamento C_E .

Ainda na figura 4-10 podemos ver que o sinal de saída está 180° defasado do sinal de entrada. Como o sinal de saída é maior que o sinal de entrada, há um ganho de tensão.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-10 Amplificador de áudio básico



Fonte: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/43/Colpitts_TBJ.png/220px-Colpitts_TBJ.png

4.7 OSCILADORES TRANSISTORIZADOS

Os osciladores são dispositivos cuja função principal é transformar energia CC aplicada, em energia AC.

Para que haja essa transformação é necessário que parte do sinal de saída retorne à entrada de forma adequada, ou seja, é necessário que haja uma realimentação positiva (regeneração).

Além da necessidade de uma realimentação positiva, devem ser incorporados ao circuito oscilador a transistor, elementos determinantes da frequência e as necessárias tensões CC de polarização.

O transistor atua como uma chave e conduz periodicamente, sempre que a energia é realimentada desde o circuito sintonizado, a fim de manter as oscilações do circuito tanque. Para determinar a frequência de operação do oscilador, podem ser incorporados ao circuito, conjuntos indutância-capacitância, um cristal ou ainda uma rede resistiva-capacitiva. As tensões de polarização para o oscilador são as mesmas necessárias para um amplificador a transistor.

Um fator de suma importância é a estabilização do ponto "Q" do oscilador a transistor, pois a instabilidade da operação CC afetará consideravelmente a amplitude do sinal de saída, a forma de onda e ainda a estabilidade de frequência.

Os osciladores são usados para uma infinidade de aplicações, sendo as mais comuns o osciloscópio, o gerador de frequência variável, o injetor de sinais, a televisão, o radiotransmissor, o receptor, o radar, o sonar etc.

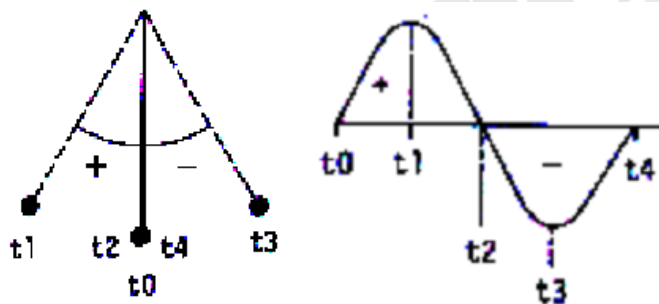
Antes de estudarmos os osciladores eletrônicos, recordaremos os princípios básicos da oscilação.

4.8 PRINCÍPIOS DE OSCILAÇÃO

Oscilação Mecânica

Todo equipamento que recebe ou transmite energia possui um dispositivo oscilador. O exemplo mais clássico de oscilação mecânica é o pêndulo do relógio. Ele oscila mecanicamente de um lado para o outro com intervalos de tempo iguais, afastando-se do ponto central (ou de repouso) igualmente para os dois lados.

A figura 4-11 ilustra o movimento do pêndulo mediante uma onda senoidal.

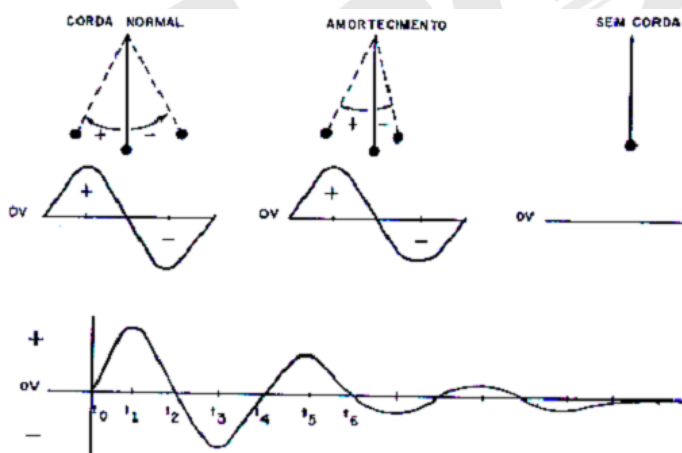


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-11 Movimento de um pêndulo simples

Por convenção dizemos que os movimentos à esquerda são positivos e à direita negativos. Esse movimento se manterá constante enquanto houver corda no relógio e se faltar corda o pêndulo inicialmente diminuirá a distância do ponto central até parar.

Como vimos na figura 4-11 o movimento do pêndulo pode ser comparado com uma onda senoidal. No caso da falta de corda do relógio a onda senoidal será uma "onda amortecida", como mostra a figura 4-12.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-12 Formas de onda do pêndulo

A onda amortecida é uma onda senoidal, mas a amplitude dos ciclos sucessivos vai diminuindo gradativamente, porém, os intervalos de tempo se mantêm constantes, como pode ser visto na figura 4-12.

Se quisermos evitar o amortecimento da onda senoidal ou a parada do movimento devemos adicionar mais energia ao sistema. No caso do relógio, dar mais corda antes que o mesmo pare definitivamente.

Oscilação Eletrônica

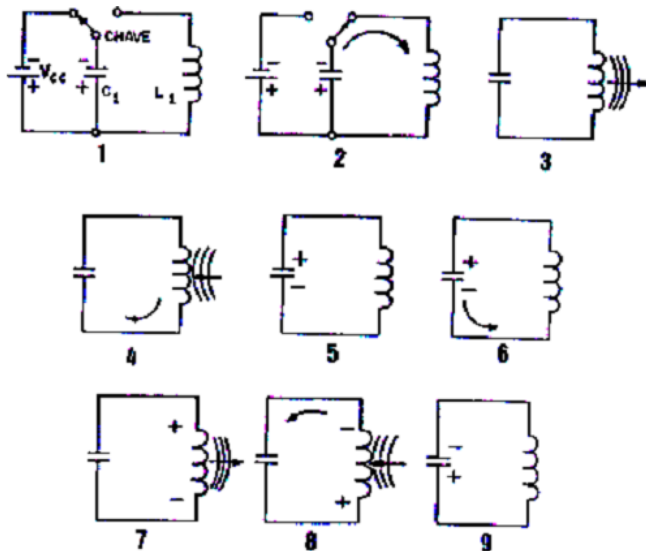
Como foi dito anteriormente o oscilador eletrônico transforma a energia CC em energia CA. Para que haja essa transformação é necessário que parte do sinal de saída retorne à entrada de forma adequada, ou seja, é necessário que haja uma realimentação positiva.

O transistor funciona como uma chave e conduz periodicamente sempre que a energia é realimentada desde o circuito sintonizado, a fim de manter as oscilações do circuito tanque. Para obtenção da frequência de operação do oscilador podem ser incorporados ao circuito, conjuntos indutância-capacitância, um cristal ou ainda uma rede resistiva capacitiva. As tensões de polarização para o oscilador são as mesmas necessárias para um amplificador a transistor.

Um fator muito importante no projeto de osciladores é a estabilização do ponto "Q" do circuito, pois a instabilidade de operação CC afetará a amplitude do sinal de saída bem como a sua frequência. Os circuitos osciladores são largamente usados em radiocomunicação e em eletrônica industrial.

Tanques Ressonantes

A oscilação eletrônica é feita por um circuito que consiste de uma bobina e um capacitor ligado em paralelo.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-13 Funcionamento do circuito oscilador

Funcionamento

Para entendermos como a oscilação se processa, consideremos o que ocorre ao se carregar o capacitor da figura 4-13.

- 1º Passo - O capacitor C_1 se carrega com o valor de V_{CC} , com a polaridade indicada.
- 2º Passo - O capacitor C_1 se descarrega sobre o indutor L_1 .
- 3º Passo - A energia está agora acumulada no indutor, em forma de campo magnético.
- 4º Passo - L_1 induz uma corrente no mesmo sentido mostrado no segundo passo.
- 5º Passo - O capacitor C_1 se carrega com polaridade contrária à do segundo passo.
- 6º Passo - O capacitor se descarrega sobre L_1 com corrente oposta à do segundo passo.
- 7º Passo - A energia está novamente acumulada em L_1 em forma de campo magnético.
- 8º Passo - O indutor induz uma corrente no mesmo sentido do passo 6.
- 9º Passo - O capacitor C_1 fica carregado novamente conforme o passo 1.

Se o capacitor e o indutor fossem ideais (sem perdas), esse processo continuaria indefinidamente, mas na prática não é isso o que ocorre, pois o indutor e o capacitor apresentam uma resistência a qual dissipa parte do sinal em forma de calor, havendo portanto a necessidade de ligar a chave novamente na bateria, a fim de carregar mais uma vez o capacitor C_1 compensando a referida perda de energia.

4.9 REQUISITOS DO CIRCUITO OSCILADOR

Amplificador

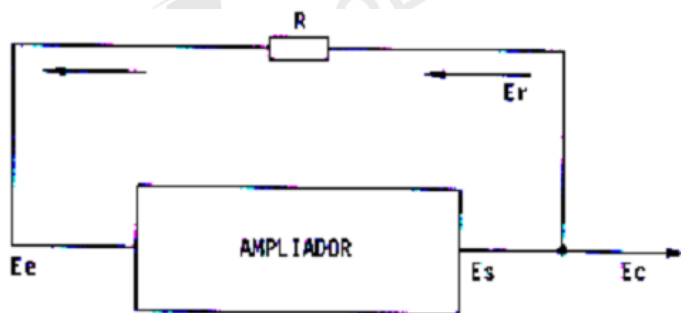
O circuito oscilador é basicamente um amplificador que sofre uma realimentação, ou seja, para gerar uma energia CA, uma porção da energia de saída do amplificador a transistor deve ser retornada ao circuito de entrada, com uma correta relação de fase, para dar uma realimentação regenerativa com a energia de entrada.

A energia enviada à carga será a energia de saída (E_S) menos a energia de realimentação (E_R):

$$E_C = E_S - E_R$$

A potência de realimentação (E_R) não é a potência de saída, pois a rede de alimentação age como um atenuador, causando perdas no sinal realimentado.

Na figura 4-14 temos o diagrama bloco do oscilador, com as potências E_C , E_S e E_R e o resistor de realimentação.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-14 Representação em bloco do oscilador

Como citado anteriormente o resistor "R" simula um atenuador para o sinal realimentado. Se o oscilador necessita, para seu funcionamento de um sinal de entrada (E_e) de 2 mW, sendo a perda na rede de realimentação de 1 mW, a potência do sinal de realimentação deverá ser, no mínimo de 3 mW, ou seja:

$$E_e = E_r - \text{perdas}$$

Quando a potência no amplificador é menor que a unidade, ocorrem oscilações amortecidas que vão se tornando cada vez menores até desaparecerem completamente.

Por exemplo, suponhamos que não haja atenuação do sinal realimentado e que o ganho de potência do amplificador seja 0,9.

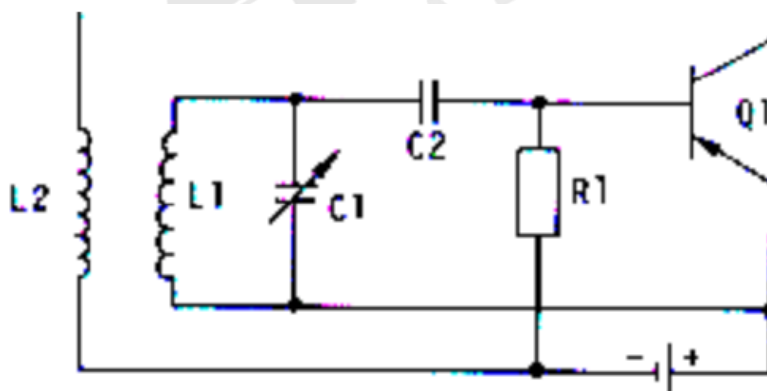
Para um sinal de entrada de 1mW, a potência de saída do primeiro pulso seria de 0,9 mW. Se toda essa potência fosse realimentada para a entrada e fosse amplificada, a potência do segundo pulso seria de 0,81 mW.

Realimentando essa potência para a entrada, teríamos um pulso de 0,73 mW na saída, e assim sucessivamente. Como vemos, o resultado seria um sinal de saída cada vez menor. Concluindo, para manter a oscilação, o fator de ganho de potência do amplificador deve ser maior que a unidade.

4.10 CIRCUITOS OSCILADORES BÁSICOS

Oscilador Armstrong

O oscilador Armstrong é o mais simples dos osciladores a transistor. Seu circuito é mostrado na figura 4-15.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-15 Oscilador Armstrong

Estando o circuito energizado, qualquer pequena variação na corrente de emissor é ampliada por Q_1 e aparece no coletor com uma variação maior.

A variação de corrente através da bobina de coletor (L_2) gera um campo magnético, que é induzido em L_1 . Essa tensão variável é acoplada por C_2 à base de Q_1 , onde é ampliada.

Essa tensão ampliada é novamente aplicada à bobina L_2 que por sua vez a induz em L_1 e assim, sucessivamente.

Este ciclo continuará até que a tensão induzida em L_1 seja suficientemente grande para tornar a base de Q_1 positiva em relação ao emissor. Quando isso ocorre a junção base-emissor fica polarizada inversamente e Q_1 entra em corte. O campo magnético nas bobinas torna-se agora estacionário e não há mais tensão induzida em L_1 .

O capacitor C_2 que se carregou com a tensão induzida, se descarrega através de R_1 . Tão logo se tenha descarregado até um valor suficientemente baixo, que permita ao transistor conduzir novamente, o ciclo de operação se repete.

R_1 e C_2 são selecionados para dar uma constante de tempo que forneça tensão de polarização suficiente para manter Q_1 inoperante durante quase todo ciclo exceto nos picos negativos da tensão de entrada.

A frequência de oscilação é determinada por L_1 e C_1 e L_2 é a bobina de realimentação.

R_1 fornece passagem para a corrente de polarização e C_2 acopla o sinal para o circuito de base e bloqueia a componente CC do mesmo.

A frequência de oscilação do tanque ressonante é calculada pela seguinte fórmula:

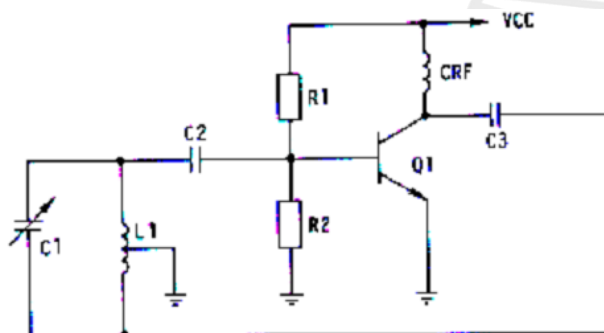
$$F_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{Lc}} = \frac{0,159}{\sqrt{Lc}}$$

Oscilador Hartley

Neste circuito a realimentação é obtida através de uma indutância e temos osciladores desse tipo, alimentados em série e em paralelo. Essas alimentações se referem ao método de obtenção da polarização de coletor.

No circuito alimentado em série a corrente constante e a variável passam pelo circuito tanque.

A figura 4-16 mostra o oscilador Hartley



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-16 Oscilador Hartley

Ao aplicarmos energia ao circuito flui uma corrente instantânea através de Q_1 que é acoplada por C_3 à parte inferior de L_1 . Esta parte de L_1 gera um campo magnético e induz uma tensão na parte superior da mesma, fazendo com que a parte superior do tanque fique positiva.

Isso faz com que a polarização direta da junção base-emissor aumente, fluindo então maior corrente, até que Q_1 atinja a saturação. Neste ponto o capacitor C_1 estará carregado com sua placa superior positiva e a parte inferior de L_1 deixará de induzir tensão, uma vez que não haverá mais nenhuma corrente variável através dela.

A partir daí C_1 começa a se descarregar e quando estiver totalmente descarregado, teremos a energia em forma de campo. Este campo por sua vez, induzirá uma corrente que irá carregar C_1 novamente com polaridade oposta à anterior. Quando a tensão do tanque ultrapassar, em sentido oposto, a polarização base-emissor o transistor entrará em corte.

C_1 começará a se descarregar novamente e o transistor Q_1 sairá do corte. Nesse ponto, com a descarga de C_1 , a parte superior de L_1 estará novamente menos negativa. Teremos então a repetição do ciclo.

O transistor conduz aproximadamente 120° , isto é, permanece em corte a maior parte do ciclo. Ele conduz somente no momento preciso, para repor energia, que é consumida pelos componentes do circuito.

No circuito da figura 4-16, C_1 e L_1 constituem o circuito tanque ressonante.

R_1 e R_2 são os componentes que fornecem a polarização para o transistor Q_1 .

O capacitor C_2 bloqueia a CC e acopla as oscilações para Q_1 , que por sua vez amplifica essas oscilações.

C_3 bloqueia a CC e acopla as variações para L_1 .

O CRF é um "Choque de Radiofrequência" que serve para evitar que as oscilações atinjam a fonte CC.

L_1 (parte inferior) é a bobina de realimentação.

A fórmula para determinação da frequência de oscilação é a mesma usada para o oscilador Armstrong, ou seja:

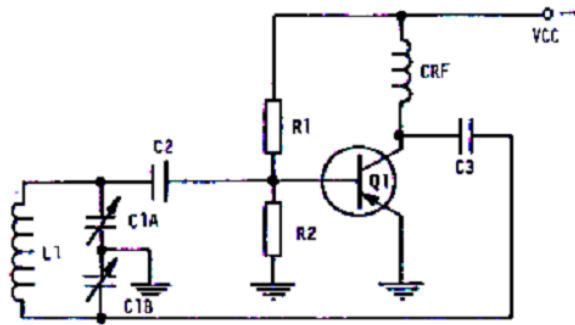
$$F_o = \frac{0,159}{\sqrt{Lc}}$$

Isto, uma vez que o circuito tanque deste oscilador é constituído pelo conjunto L_c .

Oscilador Colpitts

O oscilador Colpitts assemelha-se ao oscilador Hartley, alimentado em paralelo. A diferença está em que o Colpitts, ao invés de ter o conjunto de indutância dividida, para se obter a realimentação, usa um conjunto de capacitância dividida.

O oscilador Colpitts é mostrado na figura 4-17.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-17 Oscilador Colpitts

Os resistores R_1 e R_2 dão a polarização ao transistor Q_1 . O capacitor C_2 bloqueia a componente CC do sinal e acopla as oscilações do tanque à base de Q_1 , que por sua vez amplia essas oscilações.

C_1B constitui o componente que realimenta o circuito tanque e C_3 , além de bloquear a componente CC, acopla as variações do coletor Q_1 ao circuito tanque que é formado por L_1 , C_1A e C_1B .

Oscilador a Cristal

Quando certos cristais são comprimidos ou expandidos em direções específicas, os mesmos geram cargas elétricas em suas superfícies. Este fenômeno é chamado de efeito piezoelétrico.

Se um cristal piezoelétrico, geralmente quartzo, possui eletrodos localizados nas faces opostas e se um potencial é aplicado entre esses eletrodos, serão exercidas forças que farão com que o cristal vibre mecanicamente num movimento de contração e expansão.

Estas vibrações é que darão origem ao aparecimento de cargas elétricas nas superfícies desses cristais.

Para oscilarem perfeitamente, os cristais devem ainda ser submetidos a um tratamento de laboratório, onde sofrerão um determinado tipo de corte, que é um dos fatores determinantes da frequência de oscilação.

Tipos de Cristais

Podemos dizer que a maioria dos cristais apresenta o efeito piezoelétrico, mas poucos são adequados para serem usados como equivalentes de circuitos sintonizados para fins de frequência.

Entre esses poucos cristais encontram-se o quartzo, o sal de Rochelle e a Turmalina.

Dos três tipos citados o sal de Rochelle é o que tem atividade piezoelétrica mais ativa, ou seja, gera uma maior quantidade de tensão por uma dada pressão mecânica. Estas substâncias, porém, são mecânica e eletricamente instáveis, o que as torna inadequadas para o controle de frequências em circuitos osciladores.

Normalmente, em circuitos osciladores o cristal usado é o quartzo, devido ao seu baixo custo, robustez mecânica e a pouca variação de frequência em função da temperatura.

É um dos materiais mais permanentes que se conhece, sendo quimicamente inerte e fisicamente resistente.

De todos os materiais encontrados é o mais satisfatório, embora sua faixa de operação esteja limitada entre 50 kHz e 50 MHz, ou seja, fora da faixa de áudio.

Relação entre Frequência, Espessura e Largura

A frequência de oscilação fundamental de um cristal depende da largura, da espessura e do tipo de corte do cristal. Quanto mais delgado for o cristal, mais elevada será a frequência de oscilação.

A frequência fundamental de oscilação é dada pela fórmula

$$F = \frac{K}{T}$$

onde:

F - Frequência, em MHz;

K - Constante que depende do tipo de corte do cristal;

T - Espessura, que é dada em milésimos de polegada.

A fórmula anterior se refere à vibração com relação à espessura, porém podemos calcular a frequência de oscilação com relação à largura, para isso basta substituir na fórmula dada, a espessura (T) do cristal pela largura (W) do mesmo. De tal modo que temos:

$$F = \frac{K}{W}$$

onde:

W é a largura em milésimos de polegada.

A tabela das constantes de frequência (K) para quatro diferentes tipos de cortes é dada a seguir.

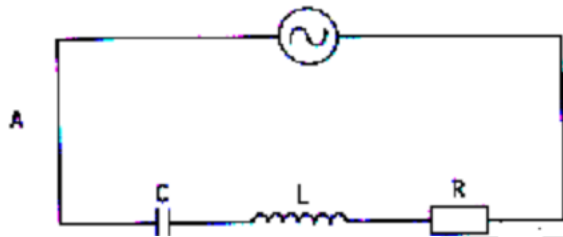
CORTES	(K)
X	112,6
Y	77,2
AT	66,2
BT	100,7

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-18 Tabela dos valores de "K" em função do corte do cristal

Circuito Equivalente do Cristal

Em sua frequência de ressonância o cristal comporta-se como um circuito sintonizado, no que se refere aos circuitos elétricos a ele associados. Portanto um cristal pode ser substituído por um circuito equivalente, o qual é mostrado na figura 4-19.

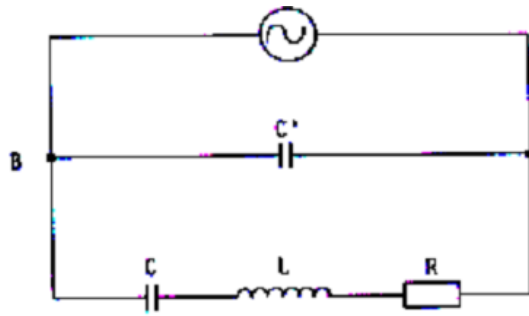


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-19 Circuito equivalente de um cristal sem placas

A figura 4-19 mostra um circuito equivalente de um cristal desprezando-se o efeito das placas que o envolverem.

A figura 4-20 mostra o circuito equivalente de um cristal colocado entre suas placas. Nesta figura vemos o aparecimento da capacitância "C" que representa a capacitância das placas.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

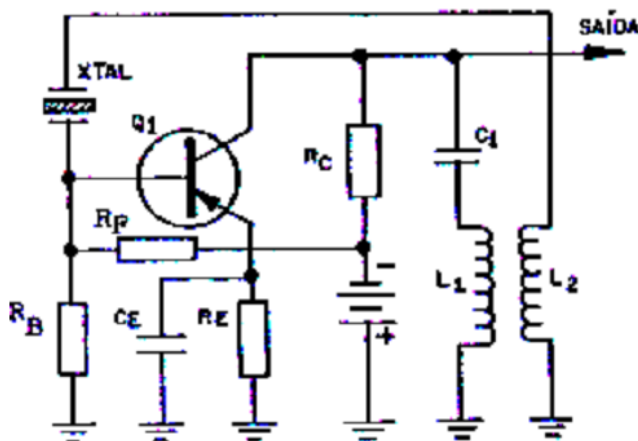
Figura 4-20 Circuito equivalente de um cristal entre as placas

Circuitos Osciladores a Cristal

O oscilador Armstrong a cristal funciona de maneira semelhante ao oscilador Armstrong elementar.

Com a inserção do cristal na trajetória de realimentação, consegue-se um aumento na estabilidade da frequência de operação. O cristal é o elemento determinante da frequência de operação, de tal modo que para se obter frequências diferentes, outros cristais deverão ser usados.

A figura 4-21 mostra o oscilador Armstrong a cristal.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-21 Circuito do oscilador Armstrong a cristal

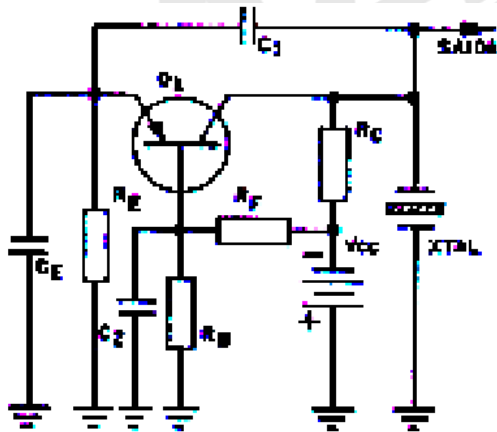
Na figura 4-21 as bobinas L_1 e L_2 são responsáveis pela realimentação.

Os resistores R_B , R_F e R_C fornecem a polarização ao transistor Q_1 . O resistor R_E é desacoplado pelo capacitor C_E , para tensões CA. A impedância do cristal aumenta fora da frequência de ressonância ou de operação, com isso tem-se uma redução na realimentação total, o que evita que o cristal oscile em outra frequência diferente daquela de ressonância.

Oscilador Colpitts

A figura 4-22 mostra um oscilador a cristal na configuração base-comum com a realimentação fornecida do coletor para o emissor, através do capacitor C_1 . Os resistores R_B , R_C e R_E dão as condições adequadas de polarização para o circuito. O capacitor C_2 desacopla o resistor R_B nas tensões CA.

A frequência de oscilação desse circuito não é determinada somente pelo cristal, mas também pela capacitância em paralelo formada pelos capacitores C_1 e C_E . Estes capacitores são normalmente grandes, a fim de reduzir as capacitâncias de entrada e de saída do transistor e assim tornas as oscilações independentes das mudanças dos parâmetros do transistor.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-22 Circuito do oscilador Colpitts a cristal

4.11 MULTIVIBRADOR ASTÁVEL

Introdução

Com o desenvolvimento dos sistemas eletrônicos, houve a necessidade de se criar circuitos que operem ou que forneçam sinais não senoidais. Esses sinais podem ser definidos como variações momentâneas de tensão ou correntes. Estes sinais incluem tensões de onda quadrada, onda retangular ou pulsos.

O multivibrador é um circuito eletrônico capaz de produzir uma tensão de saída em forma de onda quadrada ou retangular. Estes sinais podem ser contínuos, como uma cadeia repetitiva de ondas quadradas ou simples pulsos produzidos em intervalos retangulares de tempo.

Existem diversos tipos de multivibradores, cada um elaborado para uma aplicação específica.

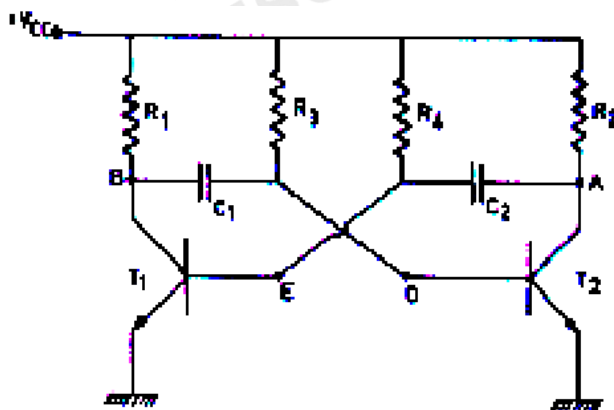
Os circuitos multivibradores são atualmente muito usados em receptores de TV, osciloscópios, computadores e sistemas digitais em geral.

Circuito Multivibrador Astável

O circuito multivibrador astável é aquele que não necessita de pulsos de excitação na entrada, para o seu funcionamento. Basicamente o circuito é formado por dois transistores que conduzem alternadamente. Enquanto um dos transistores é levado ao corte o outro é levado à saturação, pois o corte de um transistor produz um pulso que satura o outro.

Se todos os componentes do circuito fossem exatamente iguais e se os transistores conduzissem exatamente a mesma quantidade de corrente, na prática o circuito nunca oscilaria.

O início das oscilações dá-se devido ao fato de que na prática os elementos nunca são exatamente iguais.

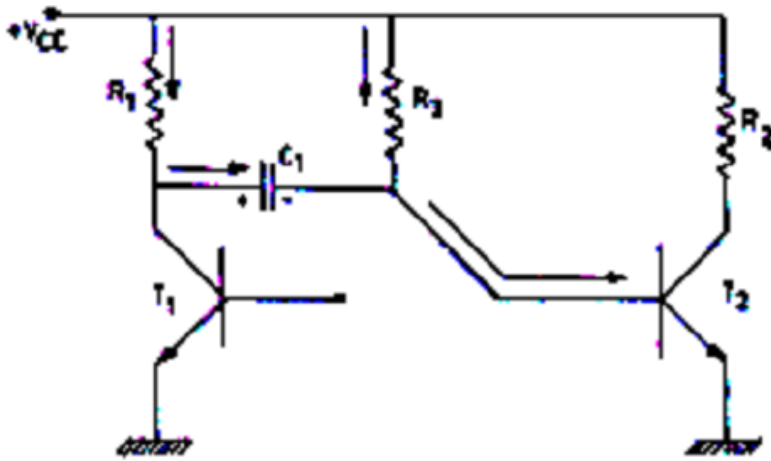


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-23 Multivibrador astável

Funcionamento

Ao conectarmos ao circuito a fonte de alimentação V_{CC} , os capacitores C_1 e C_2 que estavam descarregados, começarão a se carregar através dos resistores R_1 e R_2 fechando-se o circuito através das bases de T_1 e T_2 . A figura 4-23 ilustra melhor esse processo.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-24 Circuito do multivibrador

Para que possamos compreender melhor o funcionamento do circuito, vamos estabelecer as seguintes condições:

- Quando T_1 ou T_2 estiverem cortados, a tensão nos pontos A e B, será aproximadamente a da V_{CC} ;
- Quando T_1 ou T_2 estiverem saturados, a tensão nos pontos A ou B da figura 4-23 será aproximadamente 0,3 volts, recebendo a denominação de V_{CE} de saturação;
- Quando T_1 ou T_2 estiverem cortados, a tensão V_{BE} de início de condução (0,6V), caracterizando o estado em que se encontram T_1 e T_2 ;
- Quando T_1 ou T_2 estiverem saturados, a tensão V_{BE} de T_1 ou T_2 será denominada V_{BE} de saturação, e seu valor 0,7V.

De posse dessas condições, ficará mais simples descrevermos o comportamento do circuito apresentado.

Como ponto de partida, vamos considerar o instante " t_0 ", admitindo que nesse instante T_1 esteja cortado e T_2 saturado, logo teremos no ponto B da figura 4-23 uma tensão igual a V_{CC} e no ponto A igual a 0,3V.

Consideremos agora o estado do circuito após decorrido um tempo " t ", ou seja: $t = t_0 + t$. Ainda com relação às condições adotadas temos que o ponto A estará praticamente em terra (0,3V), logo, C_2 se descarregará através do coletor de T_2 , carregando-se em sentido contrário, agora através de R_4 elevando desta maneira o potencial do ponto E, fazendo com que T_1 que estava cortado, caminhe para a saturação.

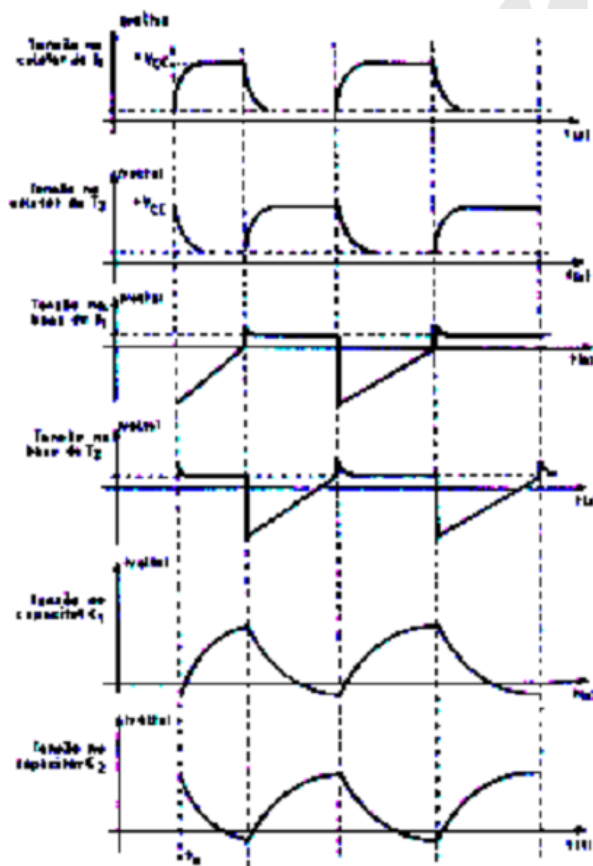
T_1 indo para a saturação, leva T_2 para o corte, dessa maneira o ponto B será de aproximadamente 0,3V (praticamente o ponto B estará em terra), e o capacitor C_1 se descarregará pelo coletor de T_1 , carregando-se agora em sentido contrário por R_3 .

Desta forma o potencial do ponto D irá aumentar e T_2 será levado à saturação fazendo com que T_1 vá para o corte, estabelecendo-se assim um estado oscilatório.

A figura 4-25 mostra as formas de onda de saída do multivibrador astável.

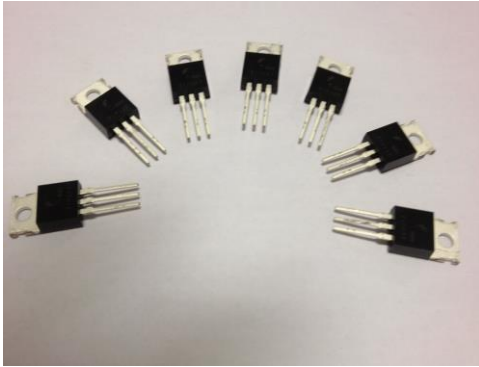
Como principais características do multivibrador astável, podemos citar:

- Tem sua frequência de oscilação controlada pelas constantes de tempo de carga e descarga dos capacitores.
- A saída pode ser retirada de qualquer um dos coletores dos dois transistores usados.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-25 Formas de onda de saída do multivibrador astável



Fonte: http://bimg2.mlstatic.com/transistores-diversos_MLB-F-4122432887_042013.jpg

4.12 TRANSISTORES ESPECIAIS

Os laboratórios das grandes fábricas de dispositivos semicondutores procuram continuamente melhorar as características e diminuir as limitações dos transistores utilizados e também descobrir novos tipos com características diferentes que permitam aplicações até então fora do campo dos transistores e, de maneira geral, dos semicondutores.

Foram então criados numerosos tipos de transistores, muitos dos quais baseados no mesmo princípio de operação do transistor bipolar, mas, fabricados por meio de técnicas novas ou modificações das técnicas já conhecidas. Outros tipos de transistores baseiam-se em princípios diferentes do transistor bipolar. São esses tipos que estudaremos a seguir.

4.13 TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO

O transistor de efeito de campo, conhecido como TEC ou FET (Field Effect Transistor), apresenta características elétricas bastante interessantes que permitem sua utilização numa gama muito grande de aplicações práticas.

A diferença fundamental entre os transistores de efeito de campo e os de junção convencionais é que nos primeiros, a corrente é dada pelo fluxo de portadores de um só tipo. Por este motivo, os transistores de efeito de campo são conhecidos como transistores unipolares em contraposição aos demais que são bipolares.

Construção Física

O mais comum dos transistores de efeito de campo é o tipo de junção, também chamado de TECJ ou JFET. A figura 4-26 ilustra uma sequência da constituição física do TEC. Ele é

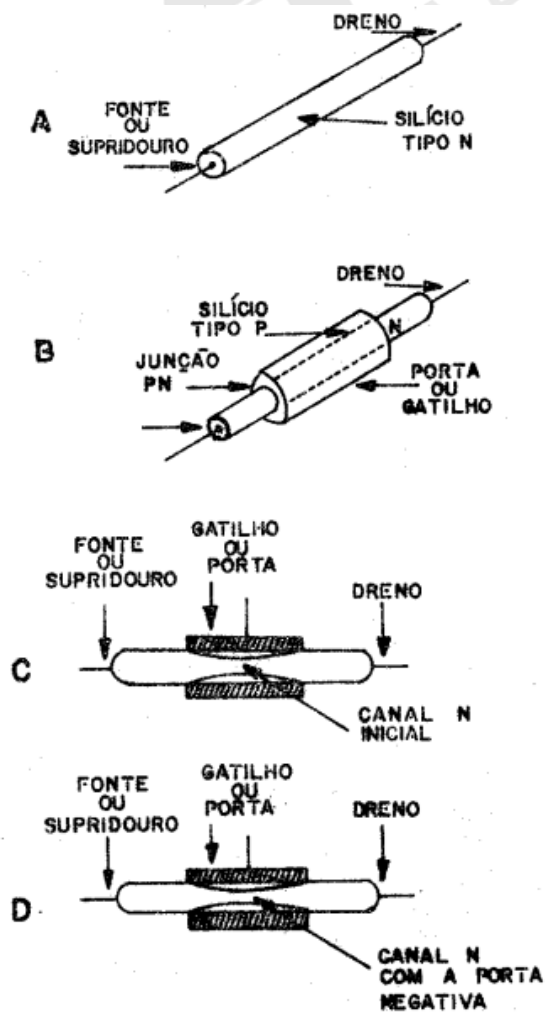
formado por uma minúscula barra de silício, que pode ser tipo "N" ou "P", formando o que é conhecido com o nome de canal.

Em cada extremo da barra são feitos contatos ôhmicos que são chamados de dreno (drain) ou fonte (source). No centro, em torno da barra, é aplicada uma camada de silício do tipo oposto ao do material do canal (tipo N ou P). Neste material é feito contato ôhmico, formando a porta ou gatilho (gate).

A figura 4-27 ilustra a constituição física dos transistores TECJ com canais tipo N e P e os respectivos símbolos. Conforme o material do canal seja do tipo N ou P, a seta aponta respectivamente, para dentro ou para fora do transistor.

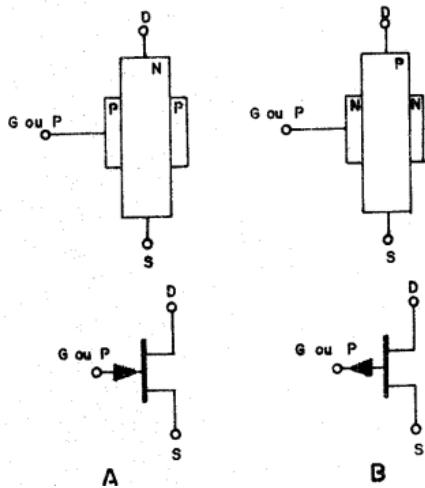
No TEC canal P, por exemplo, a seta é dirigida para fora do transistor. Com efeito, se o material do canal é do tipo N, o gatilho é formado de material tipo P e, portanto, a seta aponta para dentro.

NOTA: Usaremos indistintamente as seguintes nomenclaturas: porta ou gatilho (P de porta ou G de gatilho); fonte ou supridor (S de source ou de supridor).



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-26 Sequência da constituição física do TEC canal N



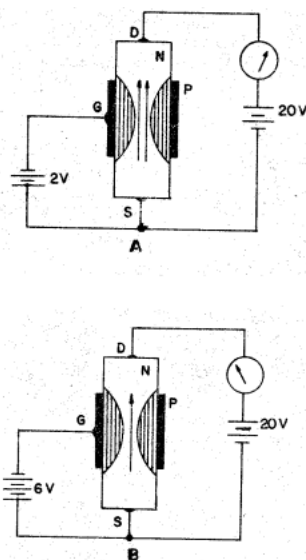
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-27 Constituição física e símbolos dos transistores TEC canal tipo N e canal tipo P

Funcionamento

Podemos observar, na figura 4-28, a polarização normal de funcionamento do TEC canal tipo N.

O gatilho, normalmente polarizado inversamente em relação à fonte, faz com que a entrada tenha alta impedância. A tensão aplicada ao gatilho tem alto poder de controle sobre a corrente fonte-dreno, por causa do aumento da área de depleção e redução da área efetiva de condução.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-28 Variação da corrente em função da polarização inversa

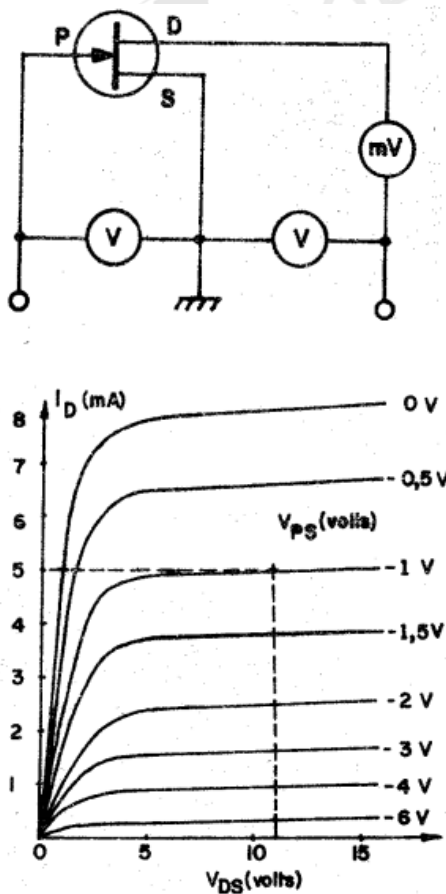
Podemos observar, em A da figura 4-28, onde a polarização é somente de 2 volts, que a corrente através do canal do transistor é grande; ao contrário, em B, onde temos a tensão de -6V no gatilho, a corrente é bem menor. A diferença entre um TEC canal N e outro de canal P é a inversão da polaridade de todas as tensões, da mesma forma como nos transistores comuns do tipo PNP e NPN.

Curvas Características

A figura 4-29 mostra as curvas características de um TEC típico canal N.

Observamos que a corrente de dreno é máxima, ou seja, a corrente de saturação (8 mA), quando a polarização entre gatilho e supridor é igual a zero.

Quando aumentamos a polarização inversa, a corrente no dreno diminui gradativamente até chegar a zero. Isto acontece quando a tensão é de -6V aproximadamente. Esta polarização inversa, necessária para suprimir totalmente a corrente através do transistor, é chamada de tensão de corte.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-29 Curvas características de um TEC canal N

Esta tensão de corte, para a maioria dos transistores TEC está situada entre -6 e -10V. Podemos também verificar, através de curvas, que a variação de tensão do dreno acima do joelho (5 volts) tem pouca influência sobre a corrente de dreno (I_D).

Pelo espaçamento regular que se obtém com polarizações até -2 volts nota-se que o transistor pode amplificar sinais pequenos com um mínimo de distorção.

A resistência interna entre dreno e fonte varia conforme a polarização; assim, temos com zero volts no gatilho (porta) uma resistência interna por volta de 150 ohms, enquanto que com polarização inversa acima de -6 volts obtêm-se valores superiores a 1000 megohms.

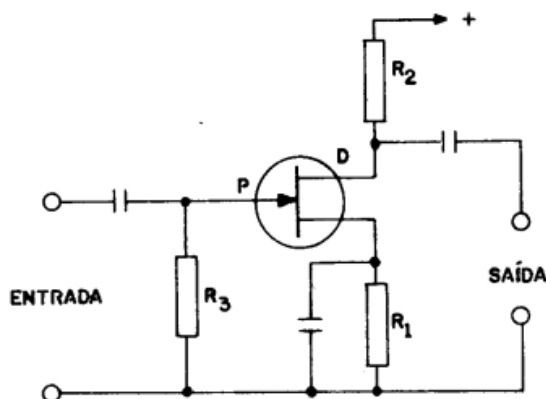
O TEC, da mesma forma como os transistores comuns, também pode ser usado em 3 configurações, sendo que a mais usada é o supridor ligado à massa, que corresponde ao circuito emissor à massa.

Como podemos observar, o circuito é muito semelhante ao de um amplificador usando válvula triodo.

A autopolarização do TEC pode ser feita da mesma maneira como na válvula, isto é, pelo resistor do supridor. Por exemplo, se escolhermos o ponto de trabalho do transistor em 5 miliampéres e verificarmos, pelas curvas características, que para isso é necessária uma polarização no gatilho de -1 volt, o resistor de supridor (R_1) deve ter um valor de:

$$R_1 = \frac{1V}{0,005A} = 200\text{ohms}.$$

O resistor é normalmente escolhido em função da frequência de trabalho. O resistor R_2 corresponde à resistência de carga (R_L). A fase do sinal de saída está 180 graus invertida em relação ao sinal de entrada.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-30 Amplificador típico com TEC

A principal vantagem do transistor de efeito de campo diz respeito à sua impedância de entrada que, na realidade, é dada pela impedância de um diodo inversamente polarizado,

podendo atingir, dependendo do tipo do TEC, valores tão altos como centenas de megohms. Isto possibilita aplicações impossíveis para os transistores bipolares.

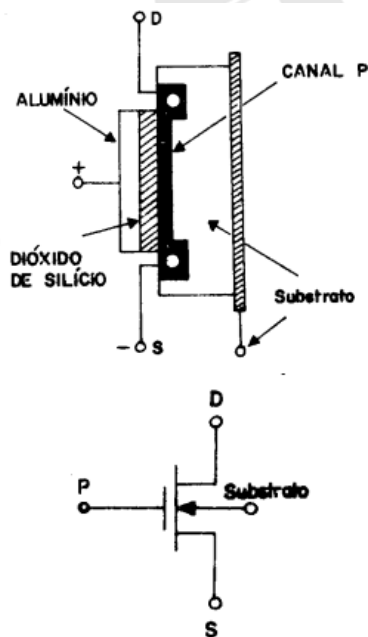
Finalmente devemos apresentar outro tipo de transistor de efeito de campo, o chamado IGFET (Insulated Gate Field Effect Transistor), também chamado MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

O funcionamento deste transistor é diferente do anterior no sentido de que, com tensão VGS nula, não há nenhuma condução no dreno.

Quando aplicamos uma tensão positiva, por exemplo, no caso da figura 4-31, surge na superfície da região N um canal tipo P, correspondente ao dreno e à fonte, possibilitando, então, o deslocamento de buracos entre a fonte e o dreno.

A vantagem deste tipo de transistor é a elevadíssima impedância de entrada, e é com este tipo que se consegue obter os valores mais elevados.

Outra extraordinária vantagem deste último tipo de FET é que ele possibilita a fácil fabricação de complexos arranjos integrados com aplicações sem limites no campo digital.



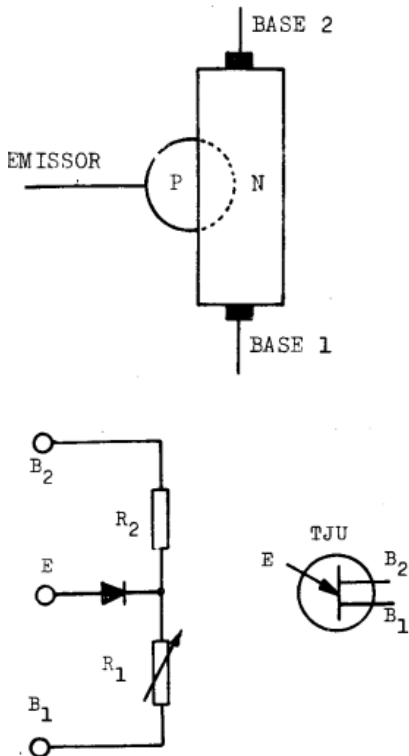
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-31 Constituição e símbolo do MOSFET canal P

4.14 TRANSISTOR DE UNIJUNÇÃO

O transistor de junção única (TJU ou UJT) é um dispositivo semiconductor de três terminais que tem sua principal aplicação em circuitos osciladores não senoidais e de comutação.

A figura 4-32 mostra a constituição física e o símbolo do transistor de unijunção. Ele é constituído por uma pequena barra de silício do tipo N, na qual são feitos contatos ôhmicos nos extremos que são denominados Base 1 (B1) e Base 2 (B2) e na parte lateral é feita uma junção PN, na qual também é feito um contato ôhmico, o que constitui o emissor. Eletricamente, o TJU atua como divisor resistivo de tensão, entre B1 e B2 e um diodo no centro.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

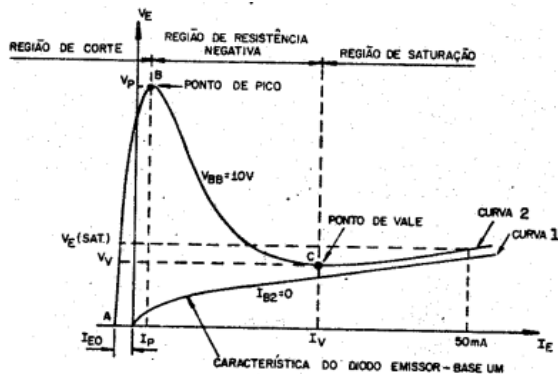
Figura 4-32 Construção física, circuito equivalente e símbolo elétrico do TJU

Curvas Características

Vimos que entre as bases B_1 e B_2 , o dispositivo apresenta a característica de um resistor comum. Quando a base B_2 está aberta, isto é, quando I_{B2} é igual a zero, temos apenas no circuito a junção $E-B_1$, polarizada diretamente pela bateria V_{EE} . Isto significa que, quando I_{B2} for igual a zero, a curva característica relacionando I_E e V_E será a de um diodo comum, como podemos observar na "curva 1" da figura 4-33.

Devemos observar que nesta figura a corrente I_E está representada no eixo das abscissas e a tensão V_E no eixo das ordenadas, o que explica o aparecimento diferente da "curva 1" de um diodo comum.

Além disto, devemos salientar que a "curva 2" foi traçada para uma dada tensão V_{BB} , obtendo-se curvas com aspecto semelhante para diferentes tensões de V_{BB} .



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

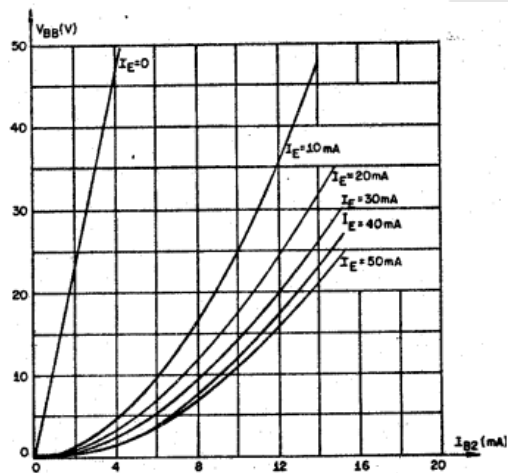
Figura 4-33 Curvas características de um transistor unijunção

Partindo do ponto "A", à medida que a tensão V_E aumenta, a corrente vai aumentando lentamente até que seja atingido o ponto "B" (chamado de ponto de pico), a partir do qual a tensão diminui e a corrente aumenta. Portanto, o trecho BC é caracterizado pelo fato, aparentemente contraditório, de uma diminuição da tensão provocar um aumento de corrente.

Isto é explicado se considerarmos que, no trecho B_C , o dispositivo apresenta uma resistência negativa, característica esta que permite a aplicação do transistor de unijunção em osciladores (geradores dentes-de-serra, multivibradores, etc).

A figura 4-34 mostra as curvas características de saída do transistor de unijunção.

Podemos observar a relação entre a corrente I_{B2} e a tensão de saída, entre as bases, para diferentes valores da corrente no emissor (I_E).



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

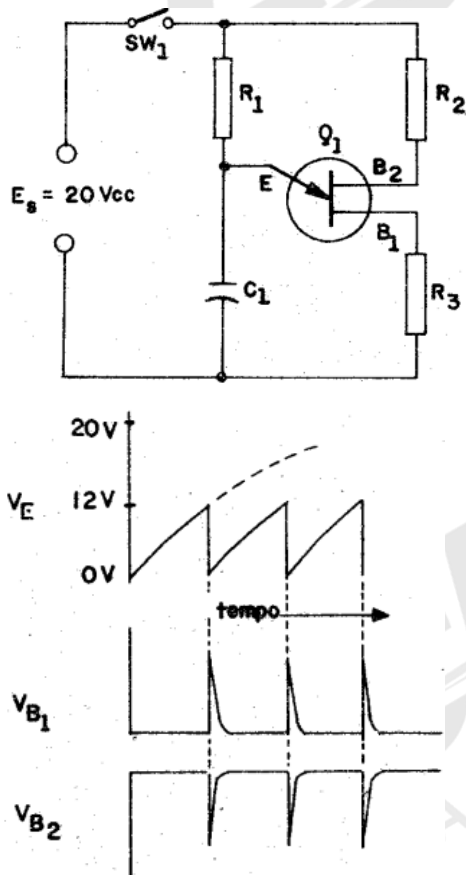
Figura 4-34 Curvas características de um transistor de unijunção, relacionando I_{B2} , V_{BB} e I_E

Aplicação

Um exemplo simples da aplicação do TJU é o circuito da figura 4-35 que é um oscilador de relaxação.

Quando o interruptor é ligado, a ação divisora de tensão, da resistência da barra de silício do TJU, da base um e da base dois, em série produz uma queda de 12 volts, aproximadamente, entre a base um e o lado N da junção do emissor.

Neste momento, a tensão do emissor é zero, por causa do capacitor C1. O capacitor C1 começa a adquirir carga através do resistor R1. Quando a tensão do capacitor chega a 12 volts, a junção do emissor se polariza diretamente e começará a fluir uma corrente pela base um, reduzindo a resistência interna. Esta ação descarrega a energia armazenada no capacitor, através do resistor R3. Logo, o ciclo se repete e o capacitor se recarrega e volta a descarregar-se.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 4-35 Oscilador de relaxação

Cada vez que o emissor se polariza diretamente, diminui a resistência total entre as bases um e dois, o que permite um aumento na corrente que passa pelo TJU.



Fonte: <http://www.minasic.com/novo/?p=463>

MÓDULO V

CIRCUITOS INTEGRADOS E SENSORES

INTRODUÇÃO

Caro aluno,

Uma vez que em aviação o peso e a ocupação do espaço são fatores fundamentais, em qualquer sistema embarcado, é extremamente importante redução do tamanho e peso, sem deixar de lado a robustez e a precisão no funcionamento.

A confecção de dispositivos integrados vem de encontro a essas exigências, na medida em que os circuitos integrados compactam diversos elementos em um só dispositivo ou em uma placa de tamanho reduzido.

Neste módulo, além dos circuitos integrados, iremos estudar os sensores, que são os “órgãos dos sentidos” de nossos sistemas.

Os dispositivos que realizam as diversas funções na aeronave devem receber informação do ambiente externo a ele de forma a poder produzir a resposta desejada, auxiliando a tripulação na condução do voo.

5.1 CIRCUITOS INTEGRADOS

Com a invenção do transistor, os projetistas puderam produzir equipamentos eletrônicos menores, mais versáteis e de maior confiabilidade. Porém o transistor foi apenas o primeiro passo para um avanço tecnológico ainda maior: a implementação do circuito integrado monolítico.

Os circuitos integrados, com as funções próprias de um circuito completo, em um espaço comparável ao que antes era ocupado por um único transistor, estão convertendo-se nos componentes básicos dos equipamentos eletrônicos.

Para a construção de um circuito integrado, efetua-se uma série de operações de difusão gasosa e centenas de circuitos integrados são produzidos simultaneamente em uma pastilha de silício, com cerca de 3 cm de diâmetro.

5.2 MICROELETRÔNICA

Na eletrônica sempre houve uma tendência de miniaturização dos equipamentos. O aparecimento do transistor e do diodo semicondutor, depois da guerra, incentivou mais o desenvolvimento dessa miniaturização.

A utilização dos elementos semicondutores em miniatura foi possível devido às características do transistor permitirem o funcionamento dos circuitos com baixa tensão e potência.

A montagem de transistores e outros componentes em pequenas placas de circuitos impressos proporcionou uma redução significativa no tamanho e peso dos equipamentos. O resultado, mesmo em miniatura, era todavia convencional no que se refere à montagem dos diversos componentes, formando o que se poderia chamar de micromontagem. A partir daí as pesquisas se desenvolveram, chegando atualmente à chamada microeletrônica. Um circuito integrado é um caso particular de microeletrônica, recebendo essa denominação um conjunto inseparável de componentes eletrônicos, em uma única estrutura, a qual não pode ser dividida sem que se destruam suas propriedades eletrônicas. Os circuitos integrados de semicondutores podem ser divididos em dois grupos: os circuitos monolíticos e os circuitos híbridos. Nos circuitos monolíticos todos os componentes dos circuitos são fabricados por meio de uma tecnologia especial dentro de uma mesma pastilha de silício, enquanto que nos circuitos híbridos, várias pastilhas são colocadas em um mesmo invólucro e são conectadas entre si.

5.3 TÉCNICA DE FABRICAÇÃO DE CIRCUITOS INTEGRADOS MONOLÍTICOS

Como mencionado anteriormente os circuitos integrados monolíticos são aqueles em que todos os componentes do circuito são fabricados simultaneamente em um único cristal de silício com menos de 1 mm² de área.

O processo usado atualmente para a fabricação de CI (circuito integrado) é baseado na técnica de difusão do silício, que foi desenvolvida para a fabricação de transistores de silício.

Inicialmente o material é um cristal de silício simples, do tipo P ou do tipo N, como mostrado na figura 5-1 (A).

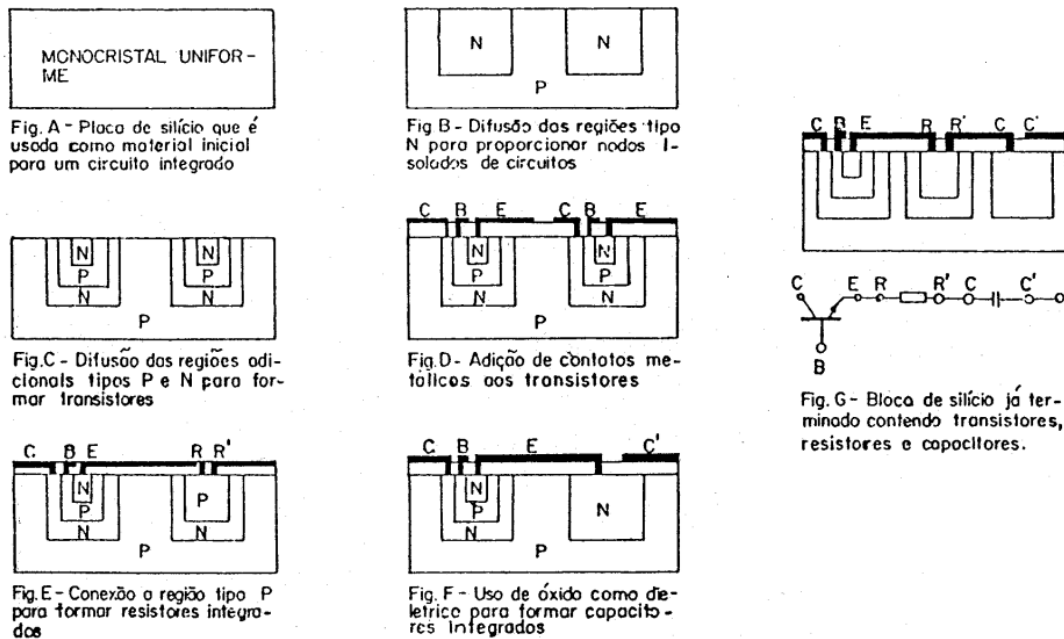
As técnicas de difusão permitem a introdução de impurezas nas profundidades e larguras desejadas no material inicial. A penetração vertical das impurezas é controlada pela temperatura de difusão e pelo tempo. O controle lateral de difusão torna-se possível pela combinação das propriedades de vedação do dióxido de silício com as técnicas fotoquímicas.

Quando determinadas regiões do tipo N são difundidas em um material inicial do tipo P, como mostrado na figura 5-1 (B), são formados núcleos isolados no circuito.

Os díodos formados pela substância P e os núcleos do material tipo N, fornecem o isolamento elétrico entre os núcleos.

A difusão de regiões adicionais do tipo P e do tipo N formam transistores, como mostrado na figura 5-1 (C).

As fases básicas às quais é submetido o silício, durante o processo de fabricação do CI são mostradas na figura 5-1.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 5-1 Fases do processo de fabricação do CI

A placa de silício é então revestida com uma camada de óxido isolante. Essa camada é aberta nos pontos adequados, para permitir a metalização e a interconexão, como mostrado na figura 5-1 (D).

Quando se necessita de resistores no circuito, a difusão do emissor do tipo N é omitida e dois controles ôhmicos são estabelecidos para uma região do tipo P, formada simultaneamente com a difusão da base, como mostrado na figura 5-1 (E).

Quando se necessita de capacitores, o próprio óxido é usado como dielétrico, como mostrado na figura 5-1 (F).

A figura 5-1(G)" mostra a combinação de três tipos de elementos em uma placa simples. Devido ao fato do processo básico de fabricação dos circuitos integrados ser idêntico ao usado para fabricar transistores, em um circuito integrado feito por esse processo, os transistores são similares aos convencionais. Por outro lado, os resistores dos circuitos integrados são completamente diferentes dos comuns.

Nos resistores comuns os diferentes valores ôhmicos são obtidos variando-se a resistência do material condutor. Já nos circuitos integrados, a resistência do material não pode variar para se obter valores diferentes de resistores, porque a resistência do material é determinada pelo valor requerido para a fabricação do transistor e seu valor ôhmico depende basicamente de sua forma geométrica.

O valor do resistor é determinado pelo produto de sua espessura de difusão "S" pela razão entre o comprimento "L" e a largura "W", ou seja:

$$R = S \cdot \frac{L}{W}$$

O valor da capacitância de um capacitor integrado é dado pelo produto de sua superfície "A" e a razão entre a constante dielétrica do material difundido "E" e a espessura do óxido "d", ou seja:

$$C = A \cdot \frac{E}{d}$$

5.4 TIPOS DE ENCAPSULAMENTO E CONTAGEM DE PINOS

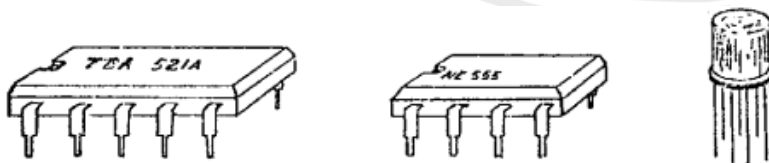
O invólucro de um circuito integrado desempenha quatro funções importantes:

- Protege a pastilha de silício contra a ação do meio ambiente, que de certo modo pode alterar as características do CI;
- Protege mecanicamente a pastilha do circuito integrado;
- Possibilita um meio simples de interligar o CI com os outros componentes do circuito;
- Dissipa o calor dentro da pastilha, durante o funcionamento do CI.

Na figura 5-2 são mostrados alguns dos invólucros usados na prática.

Os dois primeiros CI's possuem invólucro do tipo "dual" em linha, sendo a cápsula geralmente de material plástico e moldado em torno dos terminais do suporte onde a pastilha de silício foi montada.

O último CI mostrado na figura possui invólucro do tipo TO (metálico), extensivamente usado em muitos tipos de transistores.

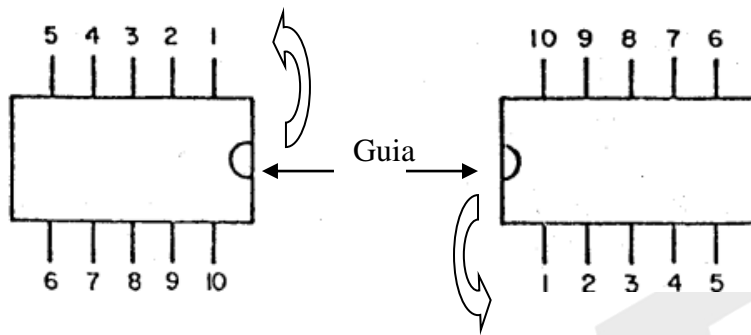


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 5-2 Invólucros usados em CI's

A identificação dos terminais dos elementos que constituem o CI é feita pela numeração dos pinos, que são contados por um sistema padronizado.

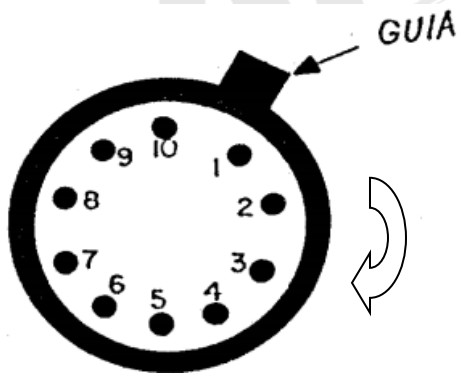
A contagem de pinos de circuitos integrados com encapsulamento do tipo "dual" é feita, a partir da marcação guia de referência pino a pino, no sentido anti-horário, tal como mostrado na figura 5-3.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 5-3 Contagem de pinos em CI's

Já para o CI com encapsulamento do tipo TO a contagem é feita do pino guia no sentido horário, quando a vista interior de sua base estiver voltada para o observador. Essa contagem é mostrada na figura 5-4.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 5-4 Contagem de pinos para CI com encapsulamento do tipo TO.

5.5 SENSORES

A grande maioria dos circuitos eletrônicos serve para, de alguma forma, interagir com o meio ambiente e com o usuário. Isto acontece particularmente na aviação, onde os instrumentos de voo devem interpretar condições externas e internas da aeronave e traduzi-las em sinais inteligíveis para que o piloto ou operador possa tomar as decisões adequadas em relação à pilotagem ou operação de equipamentos.

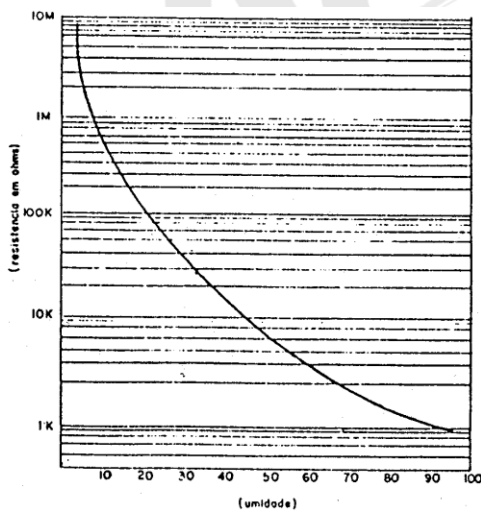
Assim como nós temos nossos órgãos dos sentidos, para que possamos interpretar os sinais do meio ambiente, os circuitos eletrônicos recebem esses sinais através de sensores, que são basicamente transdutores dos mais variados tipos de sinais para sinais elétricos ou eletrônicos que possam ser processados por um circuito.

5.6 SENSOR DE UMIDADE

Existem certos materiais semicondutores cuja resistência varia com a umidade relativa do ar. Estes materiais têm certo padrão específico de carga elétrica em suas moléculas que os níveis de energia entre elas são controlados mediante a umidade do ar.

Este tipo de dispositivo semicondutor é fabricado na forma de película delgada, depositada sobre os eletrodos que estão dispostos um ao lado do outro. A resistência entre os eletrodos varia com a quantidade de umidade do meio ambiente, pela qual é possível medir a umidade relativa do ar.

A figura 5-5 mostra uma curva característica, dada pelo fabricante. Por essa curva pode-se observar que o sensor de umidade apresenta uma resistência elevada que decresce rapidamente com o aumento da umidade.



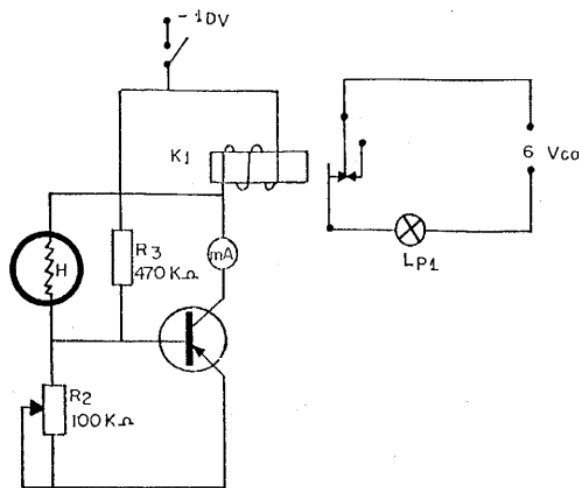
Umidade relativa do ar em %

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 5-5 Curva de variação da resistência com a umidade

A figura 5-6 mostra um circuito que pode ser usado, por exemplo, para medir a umidade relativa do ar de um depósito de componentes eletrônicos.

A lâmpada L_1 acenderá todas as vezes que a umidade do ar atingir níveis prejudiciais aos componentes eletrônicos do depósito.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 5-6 Circuito medidor da umidade relativa do ar

O circuito da figura 5-6 possui o funcionamento descrito a seguir.

Havendo um aumento da umidade relativa do ar, a resistência do sensor de umidade diminui, ocasionando um aumento da polarização direta base-emissor e com isso também um aumento de I_C .

Se o miliamperímetro estiver graduado em porcentagem de umidade do ar, teremos desta forma uma indicação precisa dessa umidade.

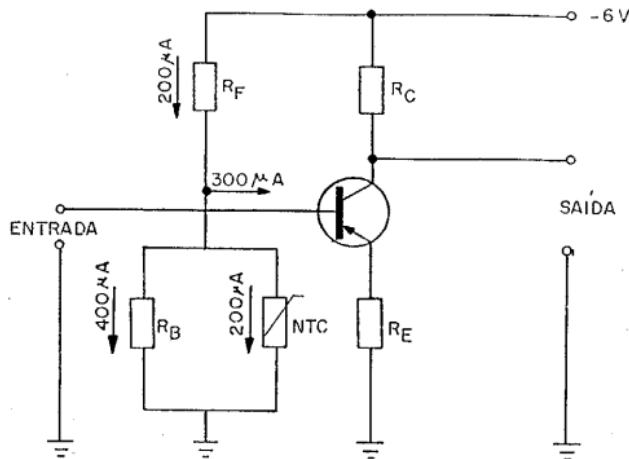
Porém, se a umidade do ar continuar a aumentar, o relé K_1 será ativado através do aumento de I_C , fazendo com que a lâmpada L_1 acenda, indicando que a umidade está sendo prejudicial aos componentes.

5.7 TERMISTORES

Os termistores são componentes eletrônicos que têm a capacidade de alterar a resistência ôhmica com a variação da temperatura.

Existem termistores com coeficiente de temperatura positiva (PTC) e negativo (NTC), ou seja, no primeiro caso teremos um aumento de resistência quando ocorrer um aumento de temperatura e no segundo caso teremos uma diminuição no valor ôhmico do termistor quando ocorrer um aumento de temperatura.

Os termistores são amplamente utilizados em circuitos de polarização de transistores pois neste caso, eles compensariam as variações da polarização devido ao aumento ou diminuição da temperatura.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

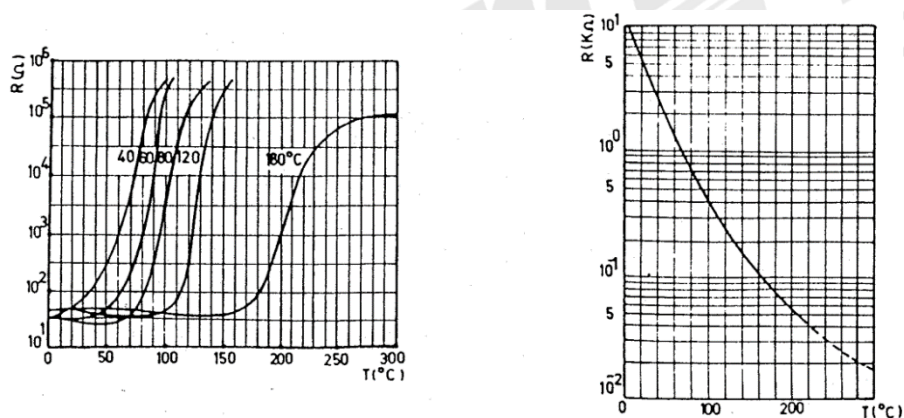
Figura 5-7 Circuito com estabilização de polarização

Os termistores com coeficiente negativo de temperatura (NTC) são os mais utilizados. Um circuito com estabilização de polarização através de um NTC é mostrado na figura 5-7. A tensão V_{BE} do circuito é 0,2V e a I_B é 300 mA. Com o aumento da temperatura ambiente a I_C tende a aumentar devido ao aumento da I_{CO} . Porém, esse aumento da temperatura afeta também o NTC, diminuindo sua resistência, ocasionando um aumento da corrente através dele.

Essa maior corrente solicitada aumenta a queda de tensão em R_F , diminuindo a V_{BE} e com isso menores serão a I_B e a I_C .

O resultado é que este dispositivo tende a manter o circuito no seu ponto de operação.

A figura 5-8 a seguir mostra as curvas características de um NTC e um PTC respectivamente.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 5-8 Curvas características de um NTC e de um PTC

5.8 DISPOSITIVOS FOTOSSENSÍVEIS

Diz-se que um dispositivo é fotossensível se o mesmo alterar suas características mediante a incidência de luz.

Dentro do grupo de componentes fotossensíveis, destacam-se as células fotoelétricas que podem ser a gás ou a vácuo, as células fotocondutivas que podem ser do tipo fotoresistor, fotodiodo e fototransistor e as células fotovoltaicas.

Células Fotocondutivas

Estas células baseiam-se no fenômeno que ocorre quando um fluxo luminoso incide sobre um material semiconductor.

No momento da incidência de luz sobre o material, as partículas luminosas chamadas de fótons fornecem aos elétrons energia suficiente para produzir a ruptura das ligações covalentes. Assim, um elétron que abandona a ligação deixa uma lacuna em seu lugar. Portanto a ação dos fótons ocasiona a produção de pares elétron-lacuna, o que provoca o aumento da condutividade no semiconductor.

Este fenômeno é conhecido como fotocondutividade.

Entre os dispositivos que funcionam baseados no fenômeno da fotocondutividade temos os fotorresistores, fotodiodos e os fototransistores.

Fotorresistores

Os fotorresistores são constituídos de material semiconductor.

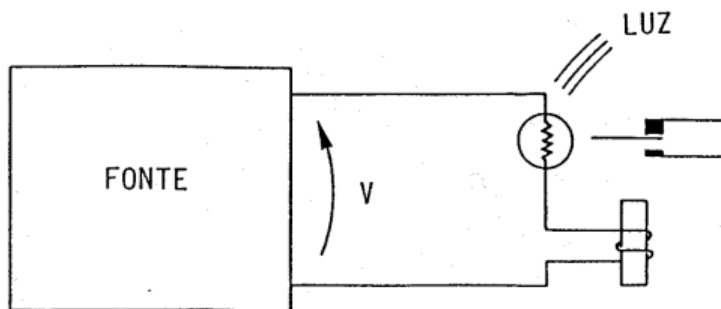
Quando um fluxo luminoso incide sobre eles a sua condutividade aumenta, ou seja, a sua resistência diminui.

Os materiais mais utilizados para a construção dos fotorresistores são o sulfato de cádmio e o sulfeto de chumbo.

Os fotorresistores são caracterizados pelas iniciais LDR (Light Dependent Resistor), ou seja, resistor dependente da luz.

Os fotorresistores são geralmente aplicados em circuitos para a operação de relés.

A figura 5-9 ilustra esse processo.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

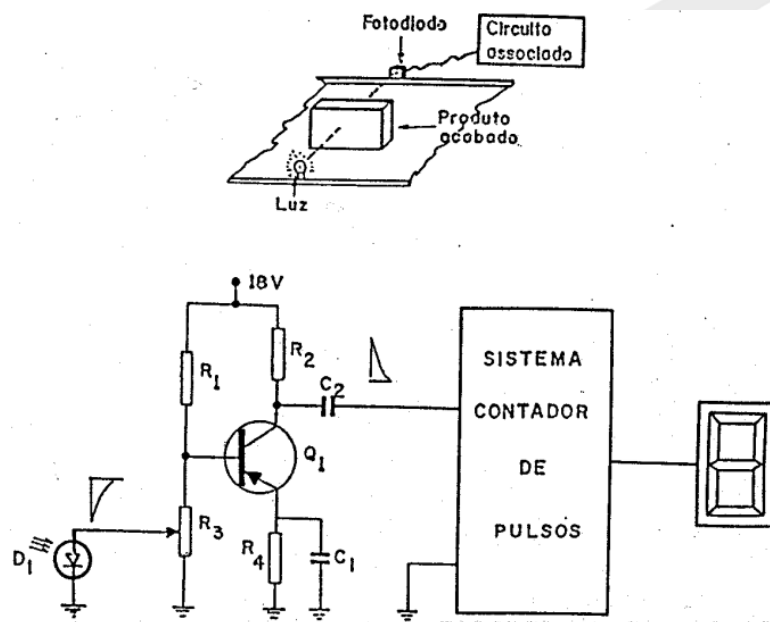
Figura 5-9 Circuito de aplicação do fotorresistor

Quando não há fluxo luminoso, a resistência do LDR é alta e a corrente que circula na bobina do relé não é suficiente para acioná-lo. Quando um fluxo luminoso incide sobre o fotorresistor a sua resistência diminui, a corrente aumenta atingindo um valor suficiente para acionar o relé.

Conseqüentemente, com esse simples circuito é possível efetuar o controle automático de portas, alarmes de segurança, controles de iluminação de ambientes etc.

Fotodiodo

Os fotodiodos são constituídos de maneira análoga aos diodos de função já estudados.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 5-10 Aplicação do fotodiodo

A única diferença é que a junção PN é influenciada pela intensidade da luz, através de uma janela de material transparente adaptada na parte superior de seu invólucro.

Alguns fotodiodos possuem nesta janela uma pequena lente convergente que concentra ainda mais os feixes de luz.

O fotodiodo, em condições normais é polarizado no sentido inverso e, portanto, circula através do diodo apenas a corrente de fuga.

Quando um feixe luminoso incide na junção, são quebradas ligações covalentes, aumentando a concentração de portadores minoritários e conseqüentemente, a corrente de fuga aumenta.

Esse aumento da corrente vai atuar num circuito acoplado ao fotodiodo.

O circuito representado na figura 5-10 tem por objetivo processar a contagem de produtos que estão sendo transportados por uma correia

O fluxo luminoso proveniente de uma lâmpada é interrompido quando o produto se interpõe entre a lâmpada e o fotodiodo.

Quando isso ocorre a corrente através do diodo diminui, fazendo com que a tensão estática aplicada na base do transistor amplificador aumente. Isso provoca um aumento da polarização direta base-emissor, logo, a I_C aumenta, fazendo com que a tensão coletor-terra diminua.

Desta forma temos na saída do circuito um pulso que é acoplado ao contador. Estes pulsos serão registrados pelo contador, o qual informará a quantidade de objetos.

Fototransistores

Esses dispositivos são constituídos por duas junções PN acondicionados num invólucro, tendo uma pequena lente que converge o fluxo luminoso sobre a junção base-emissor, a qual é denominada junção fotossensível.

Quando a luz incide na junção base-emissor, sua condutividade aumenta, ocasionando um aumento na corrente de coletor.

Quanto mais intenso for o fluxo luminoso, mais intensa será a corrente de coletor.

Devido a sua amplificação, o fototransistor fornece dez vezes mais corrente que o fotodiodo, sob as mesmas circunstâncias.

Os fototransistores possuem as mesmas aplicações dos fotodiodos tais como a leitura ótica, controle automático de brilho etc. Todavia, apresentam a vantagem de não necessitar de ampliação adicional.

Células Fotovoltaicas

Como o nome indica, essas células produzem uma tensão elétrica quando submetidas a ação de um fluxo luminoso.

Uma das aplicações mais típicas das células fotovoltaicas é nos chamados fotômetros que são instrumentos usados pelos fotógrafos para obterem informações sobre a iluminação do ambiente.

Quando a luz incide sobre a fotocélula, que é normalmente de selênio, é produzida uma tensão que é aplicada a um milivoltímetro graduado em unidades de intensidade de luz.

Uma aplicação moderna de grande importância das células fotovoltaicas é nas chamadas "baterias solares".

Células são colocadas, em grande número, lado a lado e ligadas de maneira conveniente, em série, em paralelo ou em combinação série-paralelo.

Quando exposto à luz solar, o conjunto pode fornecer energia suficiente para o funcionamento dos instrumentos de um farol, de uma estação meteorológica e principalmente de um satélite artificial.



Referência Bibliográfica

BRASIL. IAC – Instituto de Aviação Civil. Divisão de Instrução Profissional Matérias Básicas, tradução do AC 65-9A do FAA (Airframe & Powerplant Mechanics-General Handbook). Edição Revisada 2002.



No Próximo Módulo

Caro aluno,

No próximo módulo, você entenderá como podemos alimentar adequadamente os circuitos de forma a aumentar a confiabilidade e a eficiência de nossos circuitos embarcados.

Vamos lá!



Fonte: <http://www.hardware.com.br/artigos/pc-baixo-consumo/pagina2.html>

MÓDULO VI

REGULADORES DE TENSÃO

APRESENTAÇÃO

Caro aluno,

Os circuitos eletrônicos podem desempenhar uma infinidade de funções de acordo com a finalidade para a qual foram planejados. Sua funcionalidade, no entanto, depende de alimentação elétrica e muitos desses circuitos devem ter uma alimentação estabilizada e dentro de limites restritos para que possam funcionar adequadamente.

Neste módulo, você vai conhecer os reguladores de tensão, que procuram garantir a alimentação compatível para que os circuitos eletrônicos trabalhem de acordo com o seu projeto.

6.1 O DIODO ZENER COMO REGULADOR DE TENSÃO

O diodo Zener é um dispositivo semicondutor, de dois terminais, diferente dos diodos comuns, tanto na sua construção física, quanto no seu funcionamento.

O Zener possui uma junção maior que a do diodo comum, o que possibilita uma dissipação de potência.

Quanto ao seu funcionamento, foi projetado para operar na região inversa da curva característica e assim sendo, sua polarização normal é a polarização inversa.

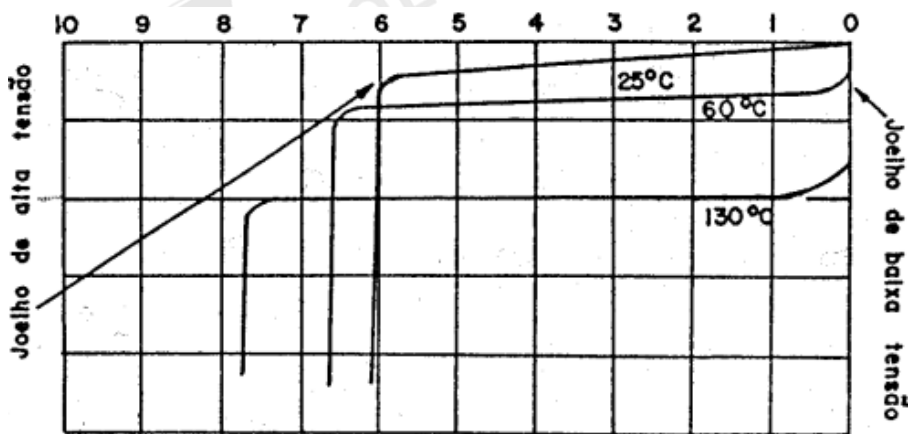
Apesar do seu funcionamento diferir um pouco do diodo comum, o Zener pode operar do mesmo modo que o diodo anteriormente estudado.

Os diodos Zener operando na região inversa da curva característica são também chamados diodos de referência, ou ainda diodos de avalanche.

6.2 CARACTERÍSTICAS DO DIODO ZENER

A diferença essencial, entre um diodo Zener e um diodo comum, está no grau de definição do ponto (tensão) de Zener.

O diodo Zener possui um joelho de alta tensão, de curvatura bastante acentuada, ao passo que outros diodos possuem uma curvatura mais suave, como se vê na figura 6-1.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 6-1 Curva na região inversa do diodo comum

Outra característica importante do diodo Zener é a maior largura física da junção. A razão de ser desta característica está na potência que a junção pode dissipar.

Por exemplo, um diodo comum de Ge, com uma corrente de 1 mA, dissipa:

$$P_j = 1 \text{ mA} \times 0,25 \text{ V} = 0,25 \text{ mW}$$

Como o diodo Zener opera com tensões mais elevadas (6 volts), teríamos, com a mesma corrente de 1 mA, a potência:

$$P_j = 1 \text{ mA} \times 6 \text{ V} = 6 \text{ mW}$$

Por este motivo é que a junção do diodo Zener deve ser maior que a de um diodo comum, a fim de possibilitar uma dissipação maior.

O diodo Zener pode ser usado em substituição à válvula reguladora de tensão (VR), como mostra a figura 15. Isso se deve à característica do Zener que mantém a tensão constante, dentro de determinados limites, quando está operando na região de Zener.

Funcionamento

O diodo comum não deve atingir a zona Zener, sob pena de possível destruição, enquanto que o Zener é projetado e fabricado para trabalhar nesta região.

Quando o diodo Zener é polarizado inversamente, uma corrente muito pequena circula através dele - é a corrente de fuga. À medida que a tensão inversa cresce, também cresce o campo elétrico existente na região de transição. Este campo pode acelerar, suficientemente, os elétrons livres, fazendo com que eles adquiram bastante energia, para provocar por choque, o rompimento das ligações covalentes.

Consideremos de início, a situação de um elétron livre. Quando este elétron sofre a ação de um campo elétrico, adquire uma aceleração suficiente, para romper uma ligação covalente. Com isso, passam a existir três portadores - uma lacuna e dois elétrons. Estes dois elétrons podem ser acelerados e provocar o rompimento de duas outras ligações, fornecendo agora, sete portadores - quatro elétrons e três lacunas. Em pouquíssimo tempo ocorre uma multiplicação de portadores de carga - avalanche - a corrente cresce, sendo limitada somente pela resistência externa do circuito.

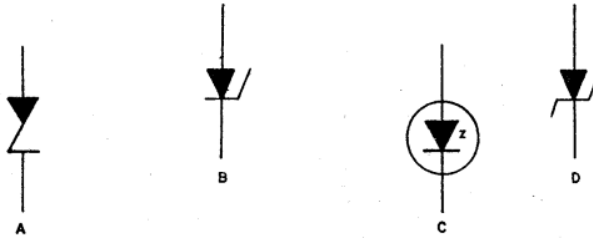
A tensão sobre o diodo se mantém aproximadamente constante, o que indica que o diodo possui uma resistência muito pequena nessa região. Esse fenômeno é chamado "ruptura da junção por avalanche" ou mais comumente "ruptura por avalanche".

Dependendo da construção da junção, da tensão aplicada e da corrente, pode produzir-se a ruptura, mesmo que os elétrons livres não tenham sido acelerados o suficiente para romper as ligações covalentes. É o caso em que o campo elétrico, produzido pela aplicação da tensão inversa, é suficiente para provocar, ele próprio, a quebra das ligações covalentes e, portanto, a rápida multiplicação dos portadores de carga.

Este tipo de ruptura é chamado de "ruptura Zener" e o ponto no qual ela se inicia é chamado "ponto de tensão Zener".

Nesse caso a corrente também aumenta bruscamente e a tensão no diodo se mantém quase constante.

Praticamente a ruptura por avalanche distingue-se da ruptura Zener, pelo seu coeficiente de temperatura. Costuma-se chamar de região de Zener ou tensão de Zener, à região e à tensão nas quais a corrente inversa cresce rapidamente e a tensão se mantém quase constante, qualquer que seja o motivo real da ruptura.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 6-2 Símbolos do diodo Zener

Como o diodo Zener possui mais de um símbolo para sua representação, vamos escolher para emprego em nosso curso o símbolo "D" da figura 6-2.

6.3 ESPECIFICAÇÕES DA TENSÃO ZENER

Existem diodos Zener comerciais, com tensão variando de alguns volts até centenas de volts. Para aplicações práticas deste dispositivo, é desejado que a região de ruptura seja bem definida e que a tensão se mantenha a mais estável possível, durante a ruptura. Por esse motivo, prefere-se fabricar diodos Zener de silício e não de germânio, pois estas características são mais definidas no Si, que no Ge.

Cada diodo Zener comercial possui sua tensão característica. Entretanto, esta tensão varia ligeiramente com a corrente, pois a característica não é exatamente vertical.

Vejamos a curva característica do diodo OAZ203, na figura 6-3. O fabricante fornece os seguintes dados:

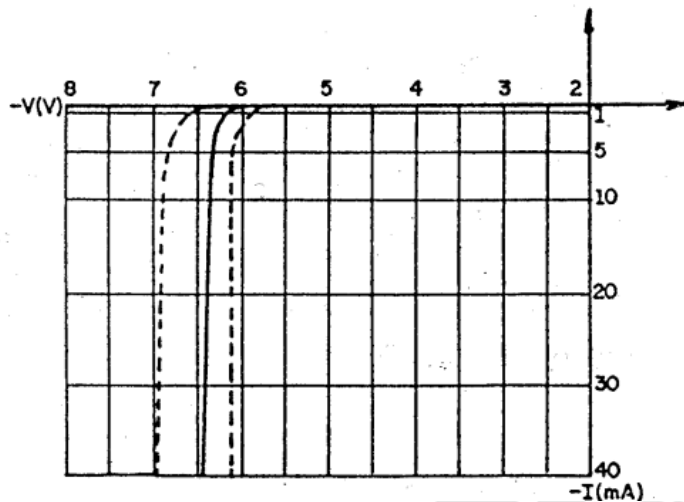
I_z = corrente de Zener

V_z = tensão de Zener

Para I_z de 1mA temos V_z de 6,2V

Para I_z de 5mA temos V_z de 6,3V

Para I_z de 20mA temos V_z de 6,4V



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 6-3 Curva característica inversa do diodo Zener OAZ203

Falamos anteriormente em tensão média, porque os valores da tensão Zener variam para o mesmo tipo de diodo, de unidade para unidade, dentro das tolerâncias de fabricação, que podem ser de 10%, 5%, 1%, ou ainda menores dependendo do tipo de diodo. Isto obriga o fabricante a fornecer os valores máximos e mínimos para a tensão Zener conforme mostra a figura 6-3.

Observe também na tabela a seguir, as características do diodo OAZ203, à 25° C.

Tensão Zener	Valores Típicos		
	Mínimo	Médio	Máximo
$I_z = 1\text{mA}$	$V_z = 5,8\text{V}$	6,2V	6,6V
$I_z = 5\text{mA}$	$V_z = 6,1\text{V}$	6,3V	6,8V
$I_z = 10\text{mA}$	$V_z = 6,1\text{V}$	6,4V	6,9V

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

6.4 IMPEDÂNCIA DINÂMICA

O fato da tensão Zener não se manter exatamente constante, com a variação da corrente inversa, indica que o diodo Zener não tem uma resistência nula, na região inversa, porém apresenta certa resistência, embora baixa. É a impedância dinâmica, que corresponde à inclinação da curva característica.

A impedância dinâmica também varia de diodo para diodo, dependendo de sua tensão Zener e, para um mesmo diodo, varia com a corrente.

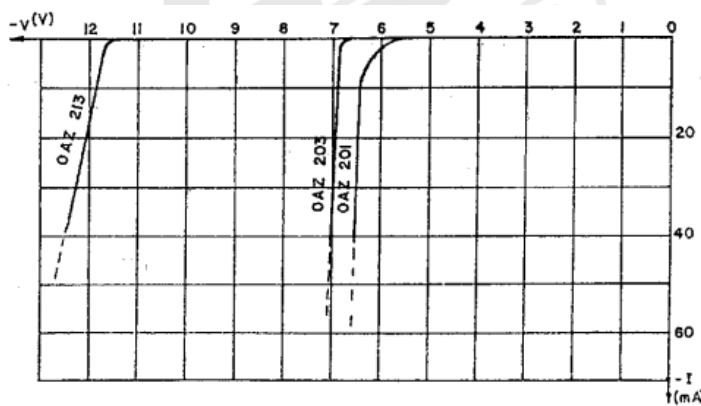
Por exemplo, na figura 6-4, a curva característica do diodo OAZ201, para tensão Zener baixa, apresenta uma R_z de 340 ohms para uma I_z de 1 mA. Quando a corrente cresce, a

curva característica se aproxima de uma linha vertical e a impedância dinâmica diminui. Ainda para o mesmo diodo temos: R_z de 40 ohms para I_z de 5 mA - R_z de 4,7 ohms para I_z de 20 mA - estes valores de R_z são os valores médios, correspondendo às tensões médias de Zener.

Para diodos de V_z mais elevadas, nas baixas correntes, R_z é mais baixa, porque o joelho da curva é quase reto: R_z de 21 ohms para I_z de 1 mA, para o diodo OAZ213.

Quando a corrente se eleva, a curva característica não é tão vertical, quanto àquela dos diodos de baixa tensão. A impedância é maior para diodos de alta tensão (7 ohms para 20 mA, para o diodo OAZ213).

Como do ponto de vista dos circuitos que utilizam o Zener, é geralmente mais interessante ter diodos, cuja impedância seja a menor possível, o projetista deve ter cuidado na hora da escolha do diodo e da corrente de operação, a fim de obter a mínima variação de tensão, quando a corrente se modifica.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 6-4 Curvas características de três diodos Zener

Efeito da Temperatura

Conforme já sabemos, muitas características dos dispositivos semicondutores dependem da temperatura. O efeito causador da ruptura determina o sentido da variação. Se a ruptura for por avalanche, a tensão Zener cresce com a temperatura, isto é, o coeficiente de temperatura é positivo. Se a ruptura for do tipo Zener, a tensão Zener decresce com a temperatura, o que equivale ao coeficiente negativo de temperatura.

Nas aplicações práticas, se a temperatura do equipamento onde é utilizado o diodo Zener variar, é importante saber qual será o sentido da variação da tensão Zener. Às vezes, deve ser procurado, um ponto onde a tensão não varie, ou pelo menos varie o mínimo possível (ponto de coeficiente nulo de temperatura).

O coeficiente de temperatura varia de diodo para diodo, pois depende da tensão Zener e, para um mesmo diodo, ele varia de acordo com a corrente de operação.

Os diodos Zener com tensões maiores que 6 volts têm coeficientes positivos de temperatura, enquanto que os de tensões menores que 4,5 volts têm coeficientes negativos de temperatura. Por exemplo, o diodo OAZ203, com tensão Zener de 6,3 volts, tem os seguintes coeficientes de temperatura: para I_z de 1mA, o coeficiente é de +0,5 mV/ grau centígrado, o que significa um acréscimo de 0,5 mV, para cada grau centígrado de aumento de temperatura. À medida que a corrente cresce, o coeficiente de temperatura também cresce.

Corrente	Coeficiente
5 mA	+ 1,7 mV/°C
20 mA	+ 2,6 mV/°C

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Para diodos de tensões mais elevadas, o coeficiente é também mais elevado. Vejamos, por exemplo, os coeficientes para o diodo OAZ213, com tensão Zener média de 12,2 V.

Corrente	Coeficiente
1 mA	+ 9,2 mV/°C
5 mA	+ 9,3 mV/°C
20 mA	+ 9,4 mV/°C

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Para diodos, cuja tensão Zener está compreendida entre 4,5 e 6 volts, o coeficiente de temperatura passa de negativo para positivo, à medida que a corrente cresce. O diodo OAZ201, com tensão média de 5,6 volts, tem os coeficientes a seguir.

Corrente	Coeficiente
1 mA	- 1,6 mV/°C
20 mA	+ 1,0 mV/°C

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Com estes dados que o fabricante fornece é possível fixar a corrente de operação, de tal modo que o coeficiente de temperatura seja o mais próximo de zero. Por exemplo, no caso do diodo OAZ201, poder-se-ia escolher uma corrente compreendida entre 5 e 20 mA, intervalo no qual o coeficiente de temperatura, passando do negativo para o positivo, em algum ponto se anulará.

6.5 LIMITAÇÕES DO DIODO ZENER

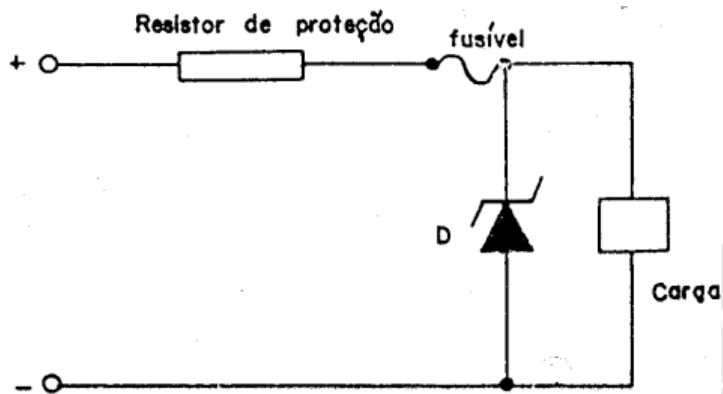
As limitações do diodo Zener são: a corrente máxima direta (caso venha a trabalhar naquela região), a corrente máxima inversa e a máxima dissipação. Esse último dado é muito importante e depende da temperatura na qual o diodo vai operar. Para os diodos de potência, depende também dos meios utilizados para dissipar o calor produzido, conforme já assinalamos no caso dos diodos retificadores e conforme será visto no apêndice.

Quando se necessita de tensão Zener elevada, é preferível, às vezes, colocar vários diodos de baixa tensão, em série, em vez de usar um diodo de alta tensão, pois esses últimos têm coeficiente de temperatura maior, impedância dinâmica maior e necessitariam ser de maior dissipação. Os diodos de baixa tensão, em série, podem ter dissipações mais baixas, por dividirem entre si a dissipação total.

Notamos que existem diodos Zener de tolerância muito pequena, em relação à tensão e de grande estabilidade, em relação à temperatura, que servem como elementos de referência de grande precisão. São constituídos geralmente de dois ou três diodos, em série, colocados no mesmo invólucro, sendo um ou dois no sentido direto, a fim de conseguir uma compensação dos efeitos de temperatura.

6.6 APLICAÇÕES DO DIODO ZENER

Inúmeras são as aplicações do diodo Zener, substituindo nos circuitos transistorizados, a válvula reguladora de tensão, sua correspondente em equipamentos. O aproveitamento da característica da região Zener (tensão constante com corrente variável) leva, com efeito, à aplicação mais importante do diodo Zener que é a regulação de tensão em fontes reguladas. Entre outras aplicações, citamos o seu emprego como chave, em circuitos limitadores, em circuitos de estabilização da polaridade de transistores, na proteção de circuitos e de medidores, na supressão de faísca e na regulação de tensão alternada.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 6-5 Diodo Zener em proteção de circuitos

Proteção de Circuitos

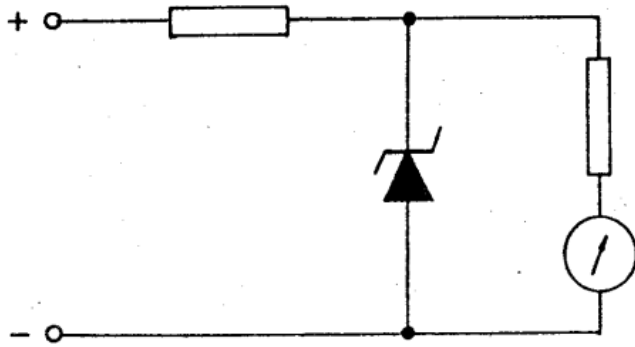
Os circuitos elétricos e eletrônicos costumam ser protegidos contra sobrecarga de tensão ou corrente por fusíveis que interrompem a corrente quando esta ultrapassar um valor prefixado.

Em certos casos, torna-se difícil escolher um fusível que interrompa o circuito no momento de uma sobrecarga e, ainda assim, não chegar a fundir quando operado continuamente no valor máximo de corrente perto da sobrecarga.

Uma solução para esse problema consiste em escolher um fusível que esteja afastado do ponto de fusão, quando o circuito opera no valor máximo de corrente e colocar em paralelo com a carga um diodo Zener com tensão um pouco superior à tensão máxima permissível para a carga, como mostrado na figura 6-5.

Havendo uma elevação da tensão, essa tensão é ultrapassada, é atingida a tensão Zener, o diodo oferece uma resistência muito menor que a carga, a corrente aumenta muito e funde o fusível que abre o circuito.

Uma aplicação baseada no mesmo princípio exposto acima é a proteção de medidores com diodo Zener. Para evitar que uma tensão alta demais possa ser aplicada inadvertidamente a um medidor colocado em uma escala baixa, que poderia danificar o sensível sistema de medição, coloca-se um diodo Zener em paralelo com o medidor, cuja tensão seja um pouco maior que a tensão máxima aceitável. Se esta tensão for ultrapassada, o diodo Zener a conduzirá e toda a corrente passará por ele, deixando o medidor fora do circuito. Veja a figura 6-6.



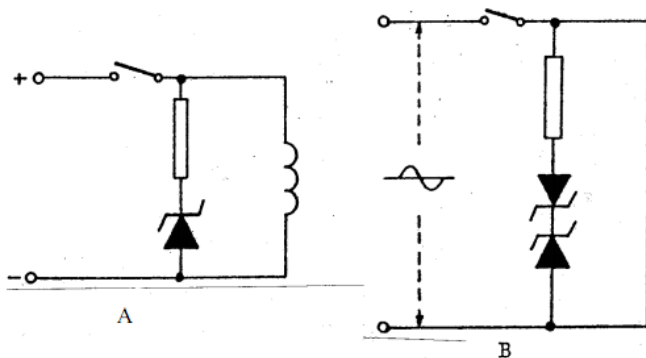
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 6-6 Diodo Zener como proteção de medidores

Supressão de Faíscas

Quando são interrompidos circuitos em que existem cargas indutivas (transformadores, relés, solenoides), aparecem oscilações transitórias, com amplitudes que podem ultrapassar o valor normal de funcionamento e provocar faíscas nos contatos do interruptor.

Para evitar a aplicação dessas altas tensões ao circuito e o faiscamento dos contatos, pode-se colocar um diodo Zener em paralelo com a carga indutiva, com um resistor de proteção em série, para absorver a oscilação, tanto com alimentação CC (figura 6-7 A) ou CA (figura 6-7 B).



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

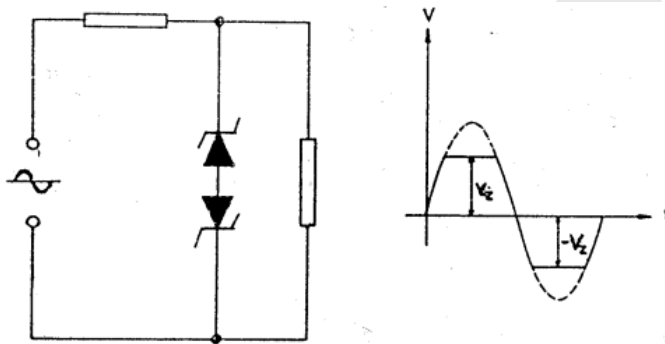
Figura 6-7 Diodo Zener como supressor de faíscas

Regulação da Tensão Alternada

Quando a rede de alimentação (CA) varia a sua tensão, o efeito pode ser prejudicial em muitos casos, citando-se como exemplo, a alimentação de lâmpadas fornecedoras de luz para células fotoelétricas, porque uma ligeira variação na tensão da rede modifica a intensidade luminosa da lâmpada e a resposta da célula fotoelétrica.

Para diminuir essas variações, usam-se dois diodos Zener, em oposição (figura 6-8). Na alternância positiva, o diodo de cima entra na região Zener, quando a tensão alternada iguala a tensão de ruptura, estando o outro diodo sempre polarizado diretamente e funcionando praticamente como um curto-circuito.

Na alternância negativa, o diodo de cima funciona como um curto e o outro limita a tensão no valor Zener. Quando a tensão de CA altera seu valor, seja para mais ou para menos, os diodos Zener limitam a onda de tensão sempre nos mesmos valores, fixados pelas suas tensões Zener.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 6-8 Diodos Zener em circuito de regulação de tensão alternada

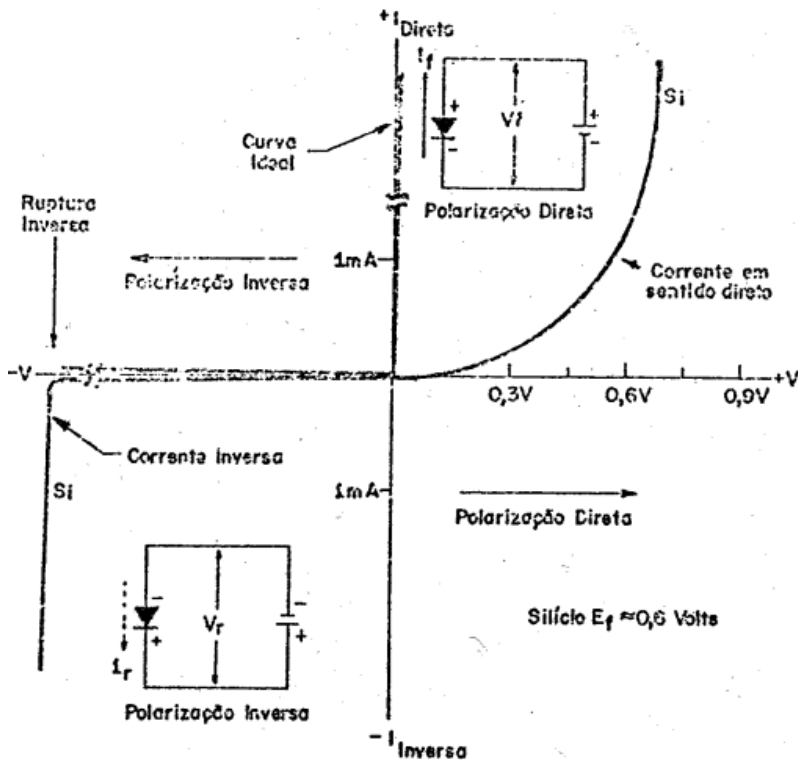
6.7 DIODOS ZENER COMERCIAIS

Existem diodos comerciais, com tensões Zener variando de alguns volts até centenas de volts, dissipações permissíveis, variando de algumas centenas de mW até alguns W e correntes máximas de algumas centenas de mA até dezenas de Ampères. A figura 6-10 apresenta um quadro comparativo de alguns diodos Zener comerciais da IBRAPE.

Curva Característica do Diodo Zener

A curva característica do diodo Zener é bem semelhante à curva do diodo comum. As poucas diferenças existentes são a regularidade da intensidade de corrente, até que atinja o ponto de Zener e a queda brusca na região inversa da curva (mais intensa que nos diodos comuns).

O diodo Zener, quando trabalha na região direta, trabalha como um diodo comum. Na região inversa, entretanto, há uma alta resistência até que atinja o ponto de ruptura, daí em diante a resistência é baixa.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 6-9 Curva característica do diodo Zener

Características a 25° C									
Diodo	Tensão Zener			Para corrente Zener -I (mA)	Impedância dinâmica R (Ω)	Para corrente Zener -I (mA)	Coeficiente de temperatura (mV/°C)	Para corrente Zener -I (mA)	Dissipação (mW)
	Mínima (V)	Média (V)	Máxima (V)						
BZZ10	5,3	6,0	6,6	1	27	5	+ 1,0	5	280
OAZ201	5,2	5,6	6,0	5	45	5	- 0,6	5	320
OAZ202	5,6	6,0	6,3	5	24	5	+ 0,6	5	320
OAZ203	6,1	6,3	6,8	5	9,5	5	+1,7	5	320
OAZ213	9,4	12,2	15,3	5	12	5	+ 9,3	5	320
BZZ14	5,3	5,6	6,0	20	<13	20	Min.Max. - 0,4 +2,5	20	8W

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 6-10 Quadro comparativo de alguns diodos Zener da IBRAPE

6.8 REGULADOR ELETRÔNICO DE TENSÃO

No estudo anterior sobre reguladores com Zener, pudemos ver que, embora o Zener regule a tensão, razoavelmente, há necessidade de se elaborar um circuito mais complexo que resulta da combinação de diodos Zener e de transistores.

Esta combinação apresenta como resultado uma regulação quase perfeita.

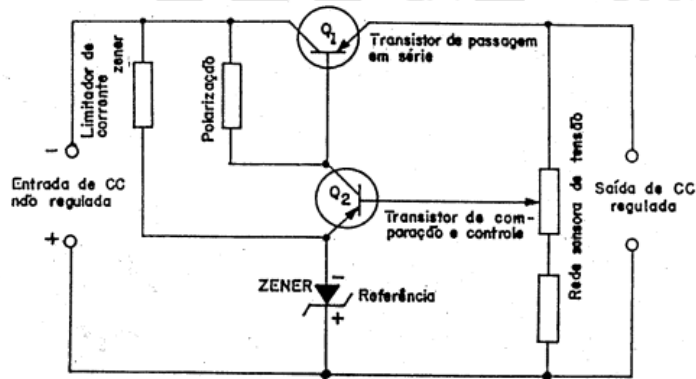
O regulador que vamos estudar nesta unidade é um regulador eletrônico em série.

Uma tensão bastante constante na saída, às vezes torna-se necessária, pois existem equipamentos bastante sensíveis, nos quais um mínimo de variação na sua alimentação é o bastante para que afete o seu funcionamento ideal.

Funcionamento

O circuito que analisaremos a seguir é um dispositivo conhecido como regulador em série. Observe que o transistor Q_1 está ligado diretamente ao terminal negativo da fonte de força não regulada. O terminal positivo passa diretamente para a saída do regulador. O transistor Q_1 é denominado "transistor de passagem" e sua resistência depende do grau de polarização direta.

Quando sua base se faz mais negativa, com respeito ao emissor, sua resistência diminui.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 6-11 Regulador em série

A tensão de entrada está dividida entre a rede sensora e o transistor em série com esta rede. O resistor de passagem se comporta como um resistor variável. Toda variação de tensão que poderia ocorrer na saída ocorre na V_{CE} de Q_1 .

Q_2 é denominado "transistor de controle" e determina a quantidade de polarização de base de Q_1 e, portanto, a resistência em série de Q_1 .

A tensão de entrada do regulador é sempre maior que a tensão requerida para a saída. Observe que o potenciômetro e o resistor em série com Q_1 ligam-se diretamente aos terminais de saída de CC. Estes resistores são conhecidos como "rede sensora" ou "detectora de tensão".

Quando diminui a corrente contínua de carga, a tensão contínua de saída tende a aumentar. À medida que há esse aumento, a rede detectora varia a polarização da base de Q_2 e isto

torna a base mais positiva. Como consequência, a resistência de Q_1 aumenta, para compensar a tendência ao aumento da tensão de saída.

Quando a carga requer uma corrente considerável, a tensão da rede sensora tende a diminuir, variando a polarização de Q_2 , de tal forma que a base de Q_1 torna-se mais negativa. Assim, a resistência de Q_1 diminui, reduzindo a queda de tensão em Q_1 , compensando a tendência de diminuir a tensão de carga.

O diodo Zener possui duas funções. A primeira é regular as variações na tensão contínua de entrada, como já foi visto anteriormente. A segunda e mais importante função é manter uma tensão constante no emissor de Q_2 . Esta tensão é quase igual a normal que se desenvolve na base de Q_1 , mediante a rede sensora.

Quando a tensão contínua de saída tende a aumentar ou diminuir, a diferença entre esta tensão de referência e a da rede sensora, controla a corrente de base de Q_1 , assim pois, a resistência de Q_1 varia em forma ascendente ou descendente, dependendo da forma de variação da tensão de entrada, para mais ou para menos, com a variação da corrente de carga ou com a variação da tensão de linha.

Este tipo de regulador possui a vantagem de poder regular maiores tensões contínuas de saída, com mais capacidade de corrente que o regulador que usa apenas o diodo Zener. Este tipo de regulador permite fazer variar a tensão regulada, para alguns valores desejados.

2.9 RESUMO

O diodo Zener é um dispositivo semicondutor de dois terminais, projetado para funcionar na região inversa da curva característica.

Região Zener é a região onde a corrente de Zener aumenta e a tensão permanece constante.

Cada diodo Zener possui sua tensão característica.

Existem dois tipos de ruptura: uma por avalanche e outra por Zener.

É desejável escolher-se diodos, cuja impedância dinâmica seja a menor possível.

Se a ruptura for por avalanche, a tensão Zener cresce com a temperatura. Se a ruptura for do tipo Zener, a tensão Zener decresce com a temperatura.

Diodos Zener com tensões acima de 6 V possuem coeficientes de temperatura positivos.

Diodos Zener com tensões abaixo de 4,5V possuem coeficientes de temperatura negativos.

Para diodos, cuja tensão Zener está compreendida entre 4,5 e 6 volts, o coeficiente de temperatura passa de negativo para positivo, à medida que a corrente cresce.

As limitações do Zener são corrente máxima direta, corrente máxima inversa e a máxima dissipação.

O Zener é o substituto da válvula reguladora de tensão (VR).

A principal aplicação do Zener é como regulador de tensão.

O regulador eletrônico é uma combinação de dispositivos semicondutores que regulam com bastante precisão tensões de corrente contínua.

Em um regulador eletrônico, o diodo Zener possui duas funções: fornecer uma tensão de referência para a base do transistor de controle e regular as variações da tensão de entrada.

Os resistores na saída do regulador constituem a rede sensora ou detectora de tensão.

É possível variar a tensão de saída regulada, através do controle do potenciômetro ligado à base do transistor de controle.

A figura 6-12 apresenta o aspecto externo de um diodo Zener.



Fonte: http://serialink.com.br/loja/product_info.php?products_id=185

Figura 6-12 Diodos Zener



Fonte: <http://www.sabereletronica.com.br/artigos/1532-todos-os-tipos-de-sensores>

MÓDULO VII

DIODOS ESPECIAIS

APRESENTAÇÃO

Caro aluno,

Uma das vantagens da microeletrônica é a versatilidade na confecção dos mais diversos tipos de dispositivos. Os diodos, que basicamente são dispositivos que permitem a passagem de corrente em um sentido e oferecem resistência extremamente elevada no sentido oposto, são exemplos de dispositivos que podem ser concebidos de diversas formas.

Neste capítulo, você conhecerá diodos especiais, que podem ser utilizados não apenas como controladores de fluxo de corrente, mas também como sensores e até mesmo para emitir luz. Sua aplicação na aviação é muito ampla.

7.1 THYRISTORES (SCR)

O Thyristor é um comutador quase ideal, é retificador e amplificador ao mesmo tempo. Constitui-se um componente de escolha para a eletrônica de potência. Concebido, originalmente para substituir a válvula "thyatron" à gás, o thyristor se impôs, rapidamente, em diversos domínios, cujos mais importantes são a comutação pura e simples, a variação de velocidade dos motores e a variação da intensidade luminosa.

O thyristor permanece normalmente bloqueado, até o momento em que se deseja que ele se torne condutor.

O termo "thyristor" designa uma família de elementos semicondutores, cujas características, originalmente, estão próximas às das antigas válvulas thyatrons. O nome thyristor é uma contração de THYRatron e transISTOR.

Os thyristores, também conhecidos por SCR (Silicon Controlled Rectifier) são elementos unidirecionais a três saídas (anodo, cátodo e gatilho).

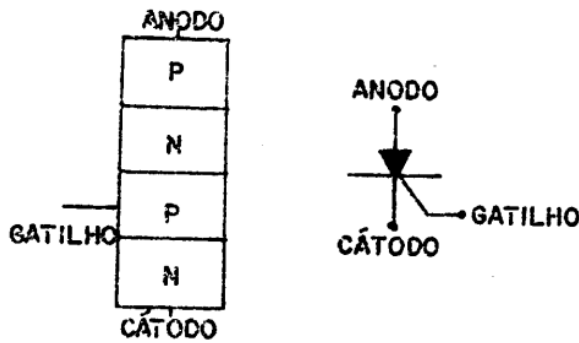
Os TRIACS, são chamados "thyristores triodos bidirecionais". O nome Triac provém da contração de "TRIode AC Switch".

Fazem parte ainda da família dos thyristores, os fotothyristores ou thyristores fotossensíveis, os thyristores bloqueáveis, os comutadores unilaterial e bilateral SUS e SBS (Silicon Unilateral Switch e Silicon Bilateral Switch, respectivamente) e o diodo Shockley, também conhecido por diodo thyristor ou diodo de quatro camadas.

Estrutura e Símbolo do Thyristor

O thyristor é um semicondutor de silício a quatro camadas alternadas.

Duas conexões principais são realizadas para o anodo e o cátodo. A condução, no sentido direto (corrente de cátodo para anodo) é comandada por um eletrodo, chamado gatilho (em inglês - gate). Após a aplicação de um sinal de comando no gatilho, o thyristor deixa passar por ele uma corrente unidirecional, isto é, só num sentido. A exemplo dos diodos comuns, o sentido é, repetimos, do cátodo para o anodo.



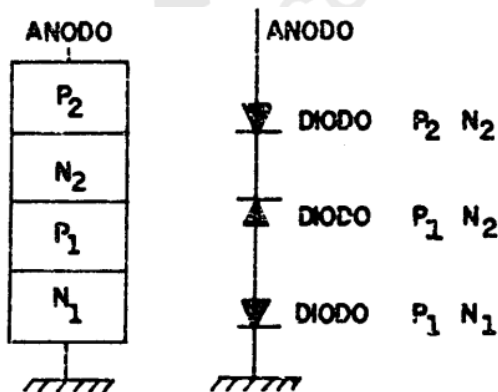
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-1 Estrutura e símbolo do thyristor

Thyristor sob Tensão

O thyristor pode ser comparado com dois diodos, montados em oposição, conforme mostrado na figura 7-2.

Para simplificação da análise que se segue, vamos admitir que o cátodo está ligado à massa e o gatilho está desligado, isto é, no ar.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-2 Comparação do thyristor com diodos

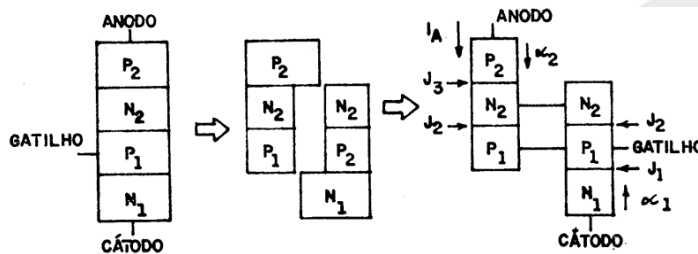
As camadas P_1N_2 formam o diodo em oposição, que assegura a não condução do dispositivo.

Se o anodo está positivo, os diodos P_2N_2 e P_1N_1 estão polarizados diretamente, porém, o diodo P_1N_2 bloqueia a condução. Se, ao contrário, o anodo é negativo, os diodos P_2N_2 e P_1N_1 estão polarizados inversamente. Por causa da tensão de avalanche de P_1N_1 ser baixa, a limitação da corrente inversa de fuga é feita por P_2N_2 . Na prática, a tensão máxima é limitada pela tensão de avalanche dos diodos P_2N_2 e P_1N_1 . Neste caso, só haverá condução se a tensão inversa alcançar a tensão de ruptura dos diodos, o que poderá danificá-lo.

Thyristor sob Tensão Direta

O comportamento do thyristor é melhor compreendido se fizermos uma analogia com dois transistores PNP e NPN.

Veja a figura 7-3.



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-3 Thyristor sob tensão direta

Estes dois transistores são montados de modo que uma realimentação positiva seja realizada. Suponhamos que a região P₂ seja positiva em relação à região N₁. As junções J₃ e J₁ ficam polarizadas diretamente e deixam passar, respectivamente, os portadores positivos e negativos para as regiões N₂ e P₁. Estes, após se espalharem pelas bases de cada um dos transistores, alcançam a junção J₂, onde a carga espacial cria um intenso campo.

Se α_2 é o ganho de corrente, que dá a fração da corrente de buracos injetados no emissor e que atinge o coletor do PNP, e se de outra parte α_1 é o ganho de corrente, que dá a fração de corrente de elétrons injetados no emissor e que atinge o coletor do NPN, podemos escrever que:

$$I_{C2} = I_A \cdot \alpha_2 \text{ e } I_{C1} = I_A \cdot \alpha_1$$

A corrente total de anodo é, evidentemente, a soma de I_{C1} e I_{C2} , as quais se somam à corrente de fuga residual (I_{CX}), através da junção central. A I_A será então:

$$I_A = \alpha_1 \cdot I_A + \alpha_2 \cdot I_A + I_{CX} \quad \text{que nos dá:}$$

$$I_A = \frac{I_{CX}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

Para a maioria dos transistores de silício, o ganho é baixo para as baixas correntes e cresce muito quando a corrente aumenta. Portanto, se I_{CX} é baixa, o denominador da equação anterior está próximo de 1 (para as pequenas correntes), e a corrente I_A permanece um pouco superior à corrente de fuga.

A estrutura PNP, ainda que polarizada diretamente, está bloqueada e oferece uma grande impedância à passagem da corrente.

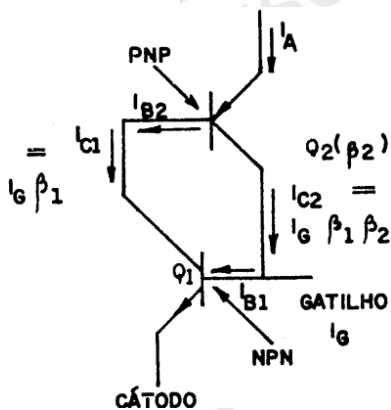
Quando, por qualquer razão, I_{CX} aumenta, a corrente e os ganhos aumentam também. A soma $\alpha_1 + \alpha_2$ tende para 1 e a corrente I_A tende para o infinito. Em realidade, ela toma um valor bem elevado, que é limitado somente pelo circuito exterior. O thyristor está então no estado de condução, dizendo-se então que ele está desbloqueado.

Observação: Este tipo de disparo do thyristor é desaconselhado na maioria dos casos.

Princípio de Disparo pelo Gatilho

O disparo do thyristor pelo gatilho é o mais comumente utilizado. A explicação será mais clara, se observarmos a figura 7-4.

O thyristor estando polarizado diretamente, uma impulsão positiva (I_G) de comando será injetada no gatilho. O transistor Q_1 , recebendo a I_G , como corrente de base, tem sua corrente de coletor igual a $I \cdot \beta_1$, onde β_1 é o seu ganho de corrente (montagem emissor comum). Esta corrente é, por sua vez, injetada na base do transistor Q_2 , que produz uma I_{C2} igual a $I_G \cdot \beta_1 \cdot \beta_2$, onde β_2 é o ganho de corrente de Q_2 . Esta corrente é então reaplicada à base de Q_1 . Duas situações podem ocorrer:



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-4 Disparo pelo gatilho

Se o produto $\beta_1 \cdot \beta_2$ for menor que 1, o dispositivo não será disparado.

Se o produto $\beta_1 \cdot \beta_2$ tender à unidade (1), o processo de amplificação irá se manifestar e o thyristor irá conduzir.

Desde que o disparo do thyristor ocorreu, a realimentação dos transistores os faz conduzir à saturação. Eles se mantêm neste estado, mesmo que a impulsão inicial do gatilho desapareça e que o circuito exterior mantenha a corrente I_A .

Como um Thyristor Pode Ser Disparado

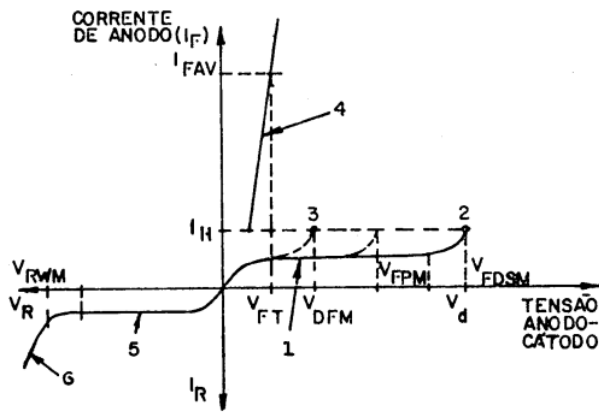
Como já vimos, o thyristor dispõe dos seguintes estados: bloqueado, quando polarizado diretamente e não tenha sido disparado; bloqueado, quando polarizado inversamente; condutor, se polarizado diretamente e tenha sido disparado.

Quando o thyristor passa do estado bloqueado para o de condutor, é porque o transistor de silício teve um ganho de corrente, o qual fez aumentar a corrente de emissor. Consequentemente, todos os mecanismos capazes de provocar um aumento da corrente I_E são utilizados. Os principais são:

1. TENSÃO - Quando a tensão cátodo-anodo do thyristor aumenta, chega a um ponto onde a corrente de fuga é suficiente para provocar um crescimento abrupto da I_E . Este modo de disparo é principalmente empregado com diodos de quatro camadas (diodos-thyristores).
2. AUMENTO DA TENSÃO - Sabemos que toda junção PN apresenta uma certa capacitância de junção. Se aplicarmos uma tensão brusca entre anodo e cátodo, carrega-se esta capacitância com uma corrente proporcional à variação de tensão e logo que esta tensão seja suficiente, o thyristor dispara.
3. TEMPERATURA - A corrente inversa de fuga em transistor de silício, aumenta com o aumento da temperatura. Quando a corrente de fuga for suficiente, teremos o disparo do thyristor.
4. EFEITO TRANSISTOR - É o modo clássico de disparar um thyristor, injetando-se portadores suplementares na base do transistor equivalente, ou seja, no gatilho do thyristor.
5. EFEITO FOTOELÉTRICO - Provocando-se a criação de pares elétronlacuna, um foco de luz pode disparar um thyristor. Neste caso utiliza-se um fotothyristor; que consiste em um tipo de thyristor, no qual existe uma "janela", ou seja, uma lente transparente aos raios luminosos.

7.2 CURVA CARACTERÍSTICA DE UM THYRISTOR

A curva típica de um thyristor, elemento unidirecional, é mostrada na figura 7-5. Ela representa a corrente I_A em função da tensão anodo-cátodo.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-5 Curva característica de um thyristor

V_F = Tensão direta em bloqueio;

V_{FDSM} = Valor máximo de tensão direta (em bloqueio);

V_{FT} = Tensão sobre o thyristor desbloqueado (em condução);

I_H = Corrente mínima de condução;

V_R = Tensão inversa;

V_{RWM} = Tensão máxima inversa.

(1) Quando a tensão "V" é nula, a I_A também será nula. A tensão "V", ao crescer no sentido direto, será denominada V_F ("F" de forward, em inglês).

(2) É necessário atingir um valor mínimo (V_d), para disparar o thyristor.

(3) Se aplicarmos uma corrente de comando no gatilho, deslocaremos o ponto V_D para a esquerda. Ver a figura 7-5.

(4) Nesse momento, o thyristor torna-se condutor e a queda de tensão entre seus bornes diminui, enquanto que a corrente I_A aumenta. Esta corrente direta será denominada I_F .

(5) Se polarizarmos inversamente o thyristor, com a aplicação de uma tensão V_R ("R" de reverse, em inglês), observa-se o aparecimento de uma pequena corrente de fuga (I_R),

(6) até que uma tensão máxima inversa que se for aplicada ao thyristor o destruirá.

O thyristor é, portanto, condutor somente no primeiro quadrante. Note-se que o disparo direto foi provocado pelo aumento da tensão direta.

Disparo do Thyristor (SCR)

O processo de disparo pode ser considerado separadamente do mecanismo de condução do anodo.

O desempenho do circuito de controle dependerá, porém, sob certo aspecto, do circuito do anodo.

Um SCR nunca disparará, se o circuito do anodo limitar a sua corrente a um valor menor que I_H (corrente de manutenção). Com correntes de anodo inferiores a I_H , um SCR comportar-se-á como um transistor. Quando a corrente de disparo for interrompida, a corrente de anodo cessará.

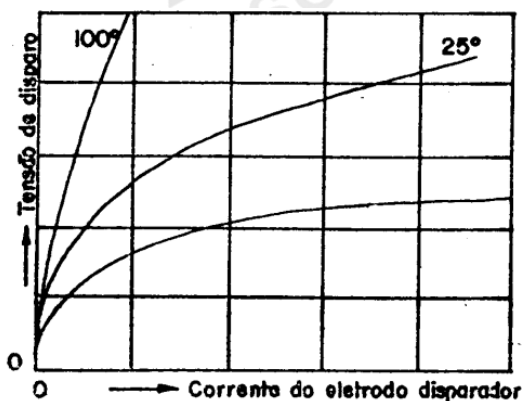
Entre os terminais de disparo e de cátodo, há uma junção PN. Esta junção comporta-se como um diodo e suas características são pouco afetadas pela presença das outras duas camadas, mesmo quando existe uma diferença de potencial entre anodo e cátodo.

A figura 7-6 mostra uma característica típica do - diodo **gatilho cátodo**, obtida com a aplicação de uma tensão positiva ao primeiro eletrodo.

A curva se aplica para as condições "ligado" e "desligado" do SCR, já que a alteração de impedância entre ambas é pequena.

A característica de impedância varia com a temperatura, para diferentes SCR do mesmo tipo, mas, sempre dentro dos limites apresentados nas publicações.

Na figura 7-6, podemos ver a característica desse diodo em diferentes temperaturas.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

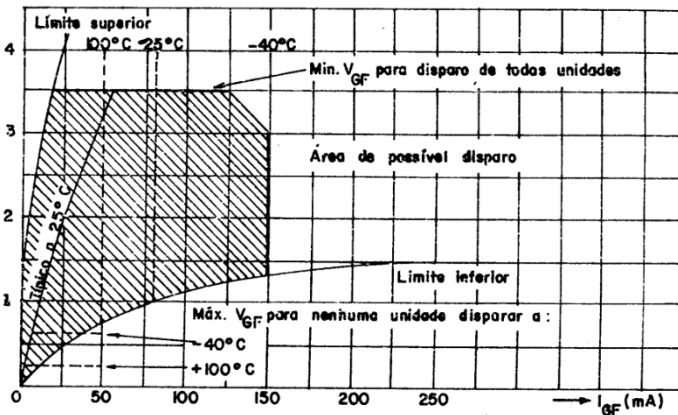
Figura 7-6 Variações da característica de impedância em temperaturas diferentes

Consideremos um SCR com a característica de impedância conforme a figura 7-6. Se uma tensão positiva for aplicada entre o anodo e o cátodo, e a tensão dos disparados for aumentada, a corrente deste eletrodo aumentará segundo a curva da figura 7-6.

Em certo ponto da curva haverá o disparo e este ponto é bastante independente da tensão do anodo, isto é, quando a I_{GF} atingir o valor de disparo, o SCR disparará, qualquer que seja a tensão positiva do anodo.

Evidentemente há um valor de potencial mínimo de **não disparo**.

Os valores de corrente e tensão do gatilho, em que há o disparo, variarão de um a outro SCR do mesmo tipo, isto se deve à variação da impedância do gatilho, entre os limites mostrados na figura 7-7 e à diferença de sensibilidade entre os SCR's.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-7 Limites da variação da impedância do gatilho

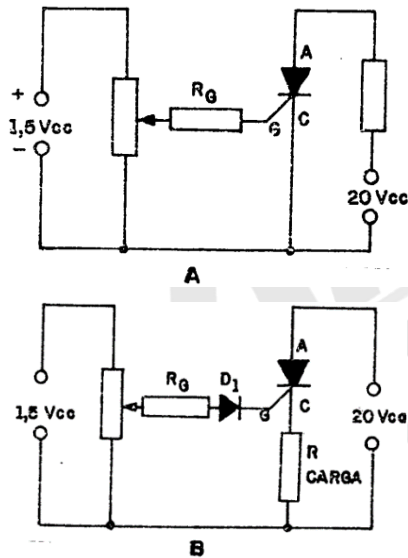
Fora da área hachurada da figura 7-7 e dentro dos limites de R_G , quaisquer valores de corrente e de tensão dispararão qualquer SCR desse tipo particular. Tensões e correntes que se localizem no interior da área hachurada dispararão alguns, mas não todos os diodos da série.

Os limites da área de disparo eventual são definidos, com referência às características mostradas na figura 7-7, na sequência a seguir.

1. LIMITES DE TENSÃO - A tensão limite é a requerida para disparar o SCR, que é menos sensível à tensão, na mais baixa temperatura de operação. Em temperaturas mais altas, a variação da tensão requerida não é muito grande e é possível simplificar o diagrama, considerando a tensão constante e igual à requerida na mais baixa temperatura de operação.
2. LIMITES DE CORRENTE - A corrente limite é a requerida para disparar o SCR menos sensível à corrente, na mais baixa temperatura de operação. Nas mais altas temperaturas é requerida menor corrente e os limites para -40, +25 e +100 graus centígrados são mostrados na figura 7-7.
3. LIMITES DE BAIXO NÍVEL - Estes limites indicam níveis de tensão, abaixo dos quais nenhum SCR disparará, nas temperaturas indicadas. As características discutidas até agora determinam o limite inferior do nível de disparo, sob todas as condições. O limite superior é determinado por uma combinação da potência média de disparo (pico de disparo), e das máximas correntes e tensões diretas do gatilho.

4. MÉTODOS DE DISPARO DO SCR - Um circuito de disparo, quando bem projetado, deve disparar o SCR sem exceder a qualquer dos valores máximos de tensão e corrente do componente.

- a) Disparo por corrente contínua - Quando o valor da tensão entre o gatilho e o cátodo, isto é, V_G atingir o valor de disparo, o SCR conduzirá. Se a tensão V_G for reduzida a zero, o SCR continuará a conduzir, por causa da baixa impedância de sua estrutura interna.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-8 Disparo por corrente contínua

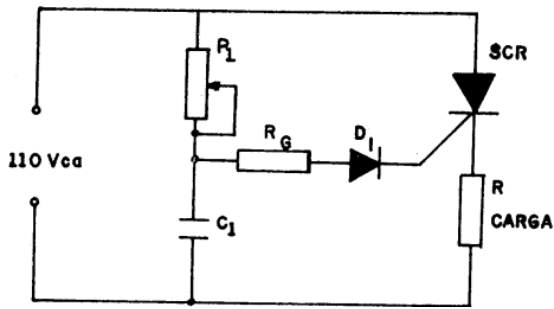
O SCR será bloqueado se a tensão positiva de anodo for reduzida até que a corrente de anodo seja menor que I_H .

No circuito da figura 7-8 B, a carga a ser alimentada foi colocada no circuito do cátodo (a carga está representada por um resistor). Neste caso, quando o SCR dispara, a tensão no cátodo se torna mais positiva que a tensão no gatilho. O diodo D_1 é, então, colocado no circuito de porta (ou gatilho) para evitar a sua ruptura.

Se a tensão que alimenta o anodo for de corrente alternada, o SCR conduzirá durante as alternâncias positivas e bloqueará, sempre que a tensão de anodo cair abaixo da tensão de manutenção.

- b) Disparo por corrente alternada - Se o anodo de um SCR for alimentado com tensão alternada, o disparo poderá ser efetuado também com tensão de CA.

Neste caso pode-se obter um melhor controle da energia consumida na carga. O circuito básico de controle de energia com SCR é visto na figura 7-9.



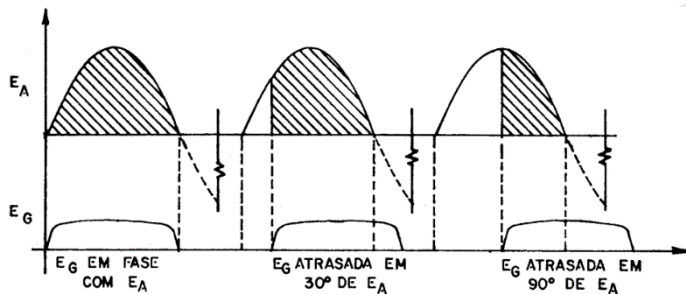
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-9 Disparo por corrente alternada

Podemos observar que a tensão do gatilho (V_G) pode sofrer um deslocamento de fase, com relação à fase da tensão no anodo. Este deslocamento de fase é efetuado pela rede $R_1 C_1$. Devido a este deslocamento de fase, a corrente através do SCR pode circular durante um tempo menor do que 180° do ciclo da tensão aplicada.

Através do gráfico da figura 7-10 podemos ver o trabalho do SCR. Vemos em E_A a alternância positiva da tensão aplicada no circuito. E_G é a tensão entre gatilho e cátodo e conforme o valor de R_1 poderá estar atrasada de E_A , num ângulo de 0° a 90° .

Podemos ver, ainda, como pode ser variado o tempo de condução do SCR, pelo deslocamento da fase de E_G . O controle da fase entre E_G e E_A , no circuito da figura 7-9, é efetuado através do potenciômetro R_1 .

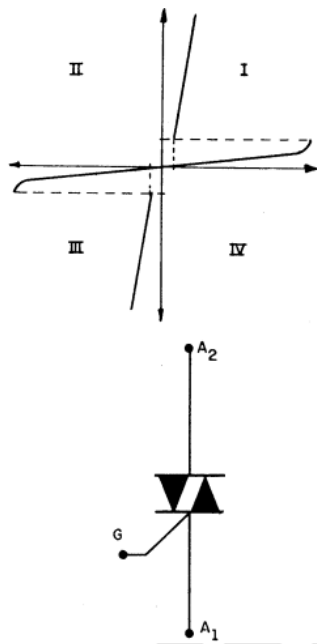


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-10 Trabalho do SCR

7.3 0 TRIAC

O triac é um dispositivo semicondutor a três eletrodos, sendo um de comando (o gatilho) e dois de condução principal. Este dispositivo pode passar de um estado bloqueado a um regime de condução nos dois sentidos de polarização e voltar ao estado bloqueado, por inversão da tensão ou pela diminuição da corrente, abaixo do valor da corrente de manutenção (I_{T1}).



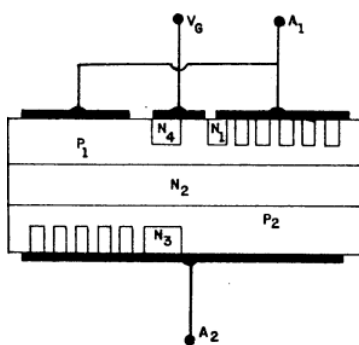
Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-11 Curvas e símbolo do triac

O triac é, portanto uma versão bidirecional do thyristor. Em sua representação elétrica, podemos compará-lo com associação antiparalela de dois thyristores.

Estrutura do Triac

Para se realizar um triac, recorre-se a diversas estruturas de camadas espalhadas, como na figura 7-12.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-12 Estrutura de um triac

As junções N_1P_1 e N_2P_2 constituem um Thyristor, e as junções N_3P_2 e N_2P_1 constituem o outro. As junções N_4P_1 e N_2P_2 formam o thyristor de disparo.

O Disparo do Triac

Se nós aplicarmos a tensão V_1 ao anodo A_1 , V_2 ao anodo A_2 e a tensão V_G ao gatilho, e se tomarmos V_1 como referência de massa ($V_1 = 0$), podemos definir quatro quadrantes de polarização. Veja na figura 7-13.

QUADRANTE	V_2	V_G
I	+	+
II	+	-
III	-	-
IV	-	+

Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

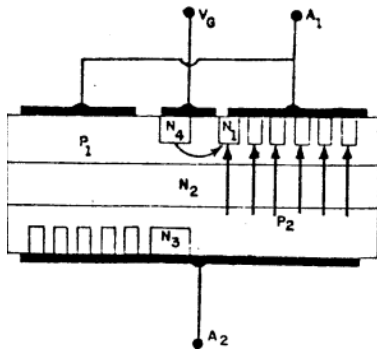
Figura 7-13 Quadrantes de polarização

Disparo no Primeiro Quadrante (+ +)

O triac dispara como um thyristor normal. A zona P_1 é o gatilho e a junção N_1P_1 injeta os portadores, disparando o thyristor entre P_2 e N_1 (Ver na figura 7-14)

A corrente de disparo I_G mínima é função da repartição das lacunas entre N_1 e P_1 , ou seja, do valor da resistência "R" shunt entre o gatilho e A_1 .

Neste quadrante, o thyristor se comporta como um thyristor $N_1P_1N_2P_2$.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-14 Esquema de um triac

Disparo do Segundo Quadrante (+ -)

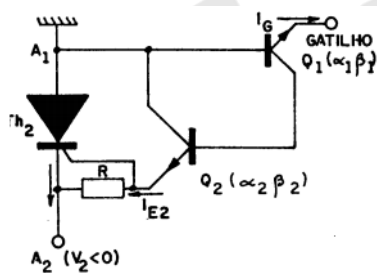
A corrente de disparo circula de P_1 para N_4 e dispara o thyristor $N_4P_1N_2P_2$ (figura 7-14). Devido à geometria, a corrente principal de $N_4P_1N_2P_2$ polariza as bases P_1N_2 e o thyristor $N_1P_1N_2P_2$ conduz. Este último tendo uma impedância mais baixa abre $N_4P_1N_2P_2$ (por I_H),

salvo se a corrente de gatilho for mantida. Assim, a corrente principal, flui como para o primeiro quadrante, entre P_2 e N_1 .

Disparo do Terceiro Quadrante (- -)

Neste caso, a situação é um pouco mais complexa. Usemos como referência o esquema da figura 7-14.

O potencial de P_1 é superior ao de N_1 . A junção P_1N_4 está, portanto polarizada diretamente e injeta seus portadores. O thyristor que iremos disparar é composto das camadas $N_3P_2N_2P_1$ (cátodo em N_3 e anodo em P_1).



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-15 Disparo do terceiro quadrante

A junção de gatilho efetiva deste thyristor é o diodo N_3P_2 e para que ocorra o disparo é, portanto necessário, que N_3P_2 injete seus portadores. Uma melhor compreensão será possível, através da figura 7-15.

O transistor Q_1 é formado das camadas $N_4P_1N_2$ e T_2 das camadas $P_2N_2P_1$. O resistor "R" é a impedância entre N_3 e P_2 . Para que o thyristor Th_2 dispare, é necessário que a corrente de emissor de Q_2 atravessando R polarize suficientemente a junção gate-cátodo de Th_2 .

Temos, portanto:

$$I_{B2} = \alpha_1 \cdot I_G$$

$$I_{E2} = \beta_2 I_{B2} = \alpha_1 \beta_1 I_G \text{ onde:}$$

I_{E2} é a corrente de gatilho real de Th_2 ;

I_G é a corrente injetada no gatilho do triac.

Nota-se que o transistor Q_1 tem suas junções emissor-base e coletor-base polarizadas diretamente, estando, portanto saturado e α_1 é um "alfa" forçado. Portanto, de um modo geral, $\alpha_1 \beta_2$ não é muito diferente da unidade, se bem que os triacs têm neste quadrante, sensibilidades próximas às dos quadrantes precedentes.

Em conclusão: Th_2 é disparado por uma corrente I_{E2} , criada através dos transistores Q_1 e Q_2 por I_G .

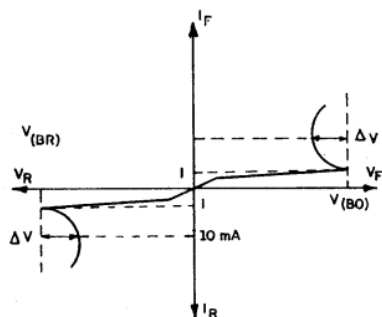
Disparo no Quarto Quadrante (- +)

O processo de disparo é idêntico ao do terceiro quadrante, sendo que a camada N_1 faz o que no terceiro quadrante foi feito pela camada N_4 . Entretanto, a zona de $N_3P_2N_2P_1$ susceptível de disparar é fisicamente grande e, portanto, a sensibilidade será reduzida.

7.4 DIAC

O Diac é um elemento simétrico, que conseqüentemente não possui polaridade. Sua etimologia é a contração de "Diode Alternative Current". Sua estrutura é muito simples, sendo bastante similar à de um transistor bipolar. A diferença é que a concentração de impurezas é aproximadamente a mesma em ambas as junções e que não existe nenhum contato na camada que no transistor constitui a base.

As concentrações iguais de impurezas resultam em características de bloqueio-condução, segundo a figura 7-16.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-16 Curvas características e símbolo do Diac

A tensão de retorno é geralmente próxima de 30 volts. Tensões mais baixas são difíceis de obter, com uma resistência negativa suficiente, enquanto que valores mais elevados reduziram as possibilidades de controle.

Quando se aplica uma tensão positiva ou negativa sobre os terminais de um Diac, se produz um fluxo muito pequeno de corrente de fuga $I_{(BO)}$, até que a tensão chega ao ponto de ruptura $V_{(BO)}$. Neste momento, a junção polarizada inversamente sofre uma ruptura por avalanche e acima deste ponto, a característica "tensão x corrente" equivale a

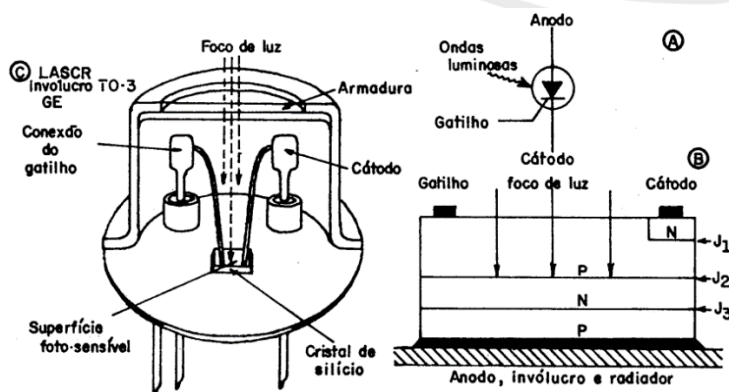
uma resistência negativa, ou seja, a corrente aumenta consideravelmente enquanto a tensão diminui.

Os Diacs são muito usados em dispositivos de disparo para controle de fase de Triacs (em controles graduais de luminosidade), controle de velocidade de motores universais, controle de calefação, e diversas outras aplicações similares.

7.5 FOTOTHYRISTORES

Para disparar um thyristor, injeta-se uma corrente na base de um dos transistores que o constitui, o que leva à saturação. Pode-se ainda dispará-lo, criando-se através da luz, uma corrente em sua base. Para isto, criamos pares de elétrons-lacunas que serão separados por um campo elétrico ao nível da junção, e que são injetados na base do transistor considerado, sob a forma de portadores majoritários, criando assim a corrente de base. Quanto maior for o número de elétrons-lacunas criados, maior será esta corrente. Isto é conseguido escolhendo-se um comprimento de onda ótimo, próximo de $1 \mu\text{m}$, e tendo-se uma superfície de junção, a maior possível com polarização inversa e exposta aos raios luminosos.

O fotothyristor é o único elemento capaz de comutar sob a influência da luz, que possui dois estados estáveis. Na figura 7-17, vemos a estrutura, o símbolo e o aspecto de um fotothyristor.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-17 Estrutura, símbolo e aspecto de um fotothyristor

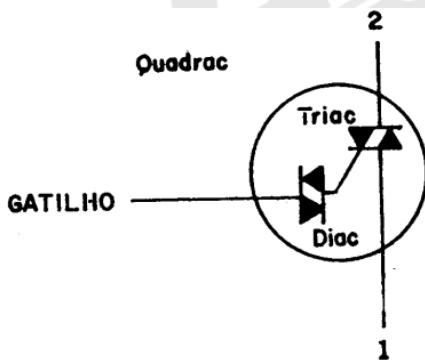
7.6 THYRISTOR BLOQUEÁVEL

O thyristor bloqueável pode ser disparado quando lhe aplicamos uma tensão positiva ao seu eletrodo de comando e será rebloqueado se aplicarmos uma impulsão negativa a este mesmo eletrodo.

7.7 QUADRAC

A partir dos thyristores, triacs e diodos, os fabricantes idealizaram dispositivos compostos, visando simplificar os esquemas de aplicações e o uso prático dos elementos.

Normalmente utiliza-se um diac para disparar um triac. Pode-se muito bem conceber um elemento composto, compreendendo estes dois componentes. Este é o quadrac, cujo esquema é apresentado na figura 7-18.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

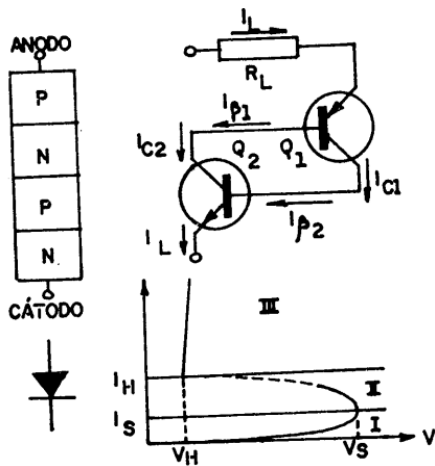
Figura 7-18 Esquema de um quadrac

7.8 DIODO SHOCKLEY

O diodo Shockley, também conhecido como diodo thyristor ou diodo de quatro camadas, é um dispositivo bipolar PNPN comparável em todos os sentidos a um thyristor, porém, estando disponíveis somente os bornes de anodo e cátodo.

Quando aplicarmos em seus bornes (entre cátodo e anodo), uma tensão crescente, mas inferior a certo nível V_S , sua resistência será elevada e somente uma pequena corrente o atravessará.

Esta corrente é da ordem de alguns microampères. Este é o seu primeiro estado estável, pois o diodo está bloqueado.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-19 Estrutura, curva e símbolo de um diodo Shockley

Quando a tensão V_S é atingida, chegamos na segunda zona, na qual o diodo apresenta uma região negativa. Este é um estado instável.

A resistência do diodo vai decrescendo rapidamente e a partir do ponto I_H ela não tem mais do que alguns ohms. O diodo está plenamente condutor e assim permanece enquanto existir a corrente de manutenção, cujo valor mínimo é I_H . Esta é a terceira zona cujo funcionamento é estável. A queda de tensão introduzida pelo dispositivo é da ordem de 1V para os diodos de germânio e 1,3V a 1,7V para os de silício.

O rebloqueio efetua-se se reduzindo a corrente, abaixo do valor de I_H ou a tensão, abaixo de V_H .

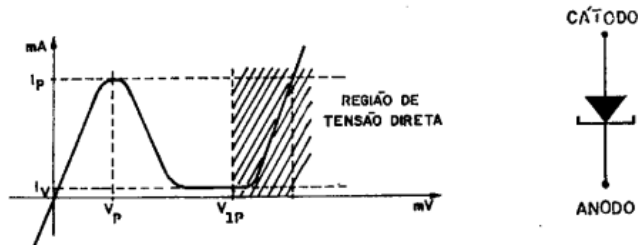
As tensões V_S são da ordem de 20 a 100V, enquanto que I_H é da ordem de 1 a 50 mA.

7-9 DIODO TÚNEL

Um diodo túnel é um pequeno dispositivo formado por uma junção PN, que tem uma elevada concentração de impurezas nos materiais semicondutores P e N. Esta alta densidade de impurezas faz tão estreita a região de depleção da junção (ou região de carga espacial), que as cargas elétricas podem se transferir através dela, mediante um efeito mecânico-quântico denominado "efeito túnel". Este efeito túnel produz uma zona de resistência negativa, sobre a curva característica do diodo de referência, que o habilita para desempenhar as funções de amplificação, geração de pulsos e geração de energia de RF.

Características

Na figura 7-20 temos a característica típica de uma curva tensão-corrente de um diodo túnel e seu símbolo.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-20 Curva característica de um diodo túnel e seu símbolo

Os diodos normais, quando polarizados inversamente, são percorridos por uma pequena corrente até que se atinja a tensão de ruptura.

Com polarização direta, a condução começa aproximadamente com 300 mV. Nos diodos túnel, ao contrário, uma pequena polarização inversa faz com que os elétrons de valência dos átomos do material semiconductor próximo à junção, atravessem a mesma por efeito túnel. Assim, o diodo túnel é altamente condutor para todas as polarizações inversas. Do mesmo modo, com pequenas polarizações diretas, os elétrons da região N passam por "efeito túnel" através da junção à região do tipo P, e a corrente do diodo cresce rapidamente até um valor de pico (I_p).

Com valores intermediários de polarização o diodo túnel apresenta uma característica de resistência negativa e a corrente cai a um valor mínimo, denominado I_v (corrente de vale).

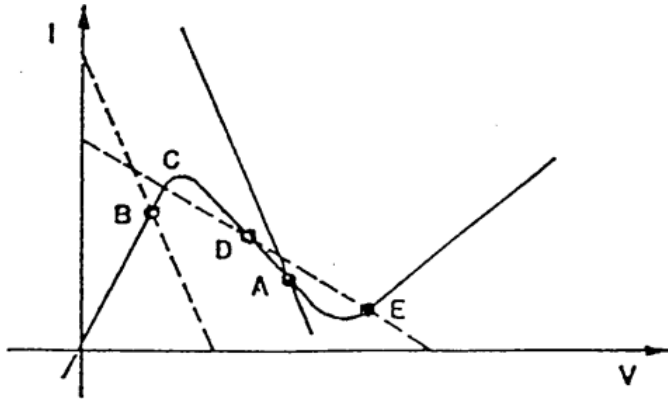
Com valores crescentes de polarização, o diodo túnel apresenta uma característica diódica. Devido à redução da corrente com o aumento da polarização na região de resistência negativa, o diodo túnel tem a capacidade de amplificar, oscilar e comutar.

Ponto de Funcionamento

Quando se usa um diodo túnel em circuitos tais como amplificadores e osciladores, deve-se estabelecer um ponto de funcionamento na região de resistência negativa.

A linha de carga de CC, mostrada em linha cheia na figura 7-21 deve ter uma inclinação tal, que intercepte a região de resistência negativa somente em um ponto.

A linha de carga de CA pode ser bem inclinada, com uma só interseção (B) como no caso de um amplificador, ou um pouco inclinada, com três interseções (C, D, E) como ocorre em um oscilador.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-21 Linhas de carga

7.10 DIODOS EMISSORES DE LUZ (LED)

Num diodo com polarização direta, os elétrons livres atravessam a junção e combinam-se com as lacunas. À medida que esses elétrons caem de um nível mais alto de energia para um mais baixo, eles irradiam energia. Nos diodos comuns essa energia é dissipada na forma de calor. Mas no diodo emissor de luz (LED), a energia é irradiada na forma de luz.

Os LEDs substituíram as lâmpadas de incandescência em várias aplicações devido a sua baixa tensão, vida longa e rápido chaveamento liga-desliga.

Os diodos comuns são feitos de silício, um material opaco que bloqueia a passagem da luz. Os LEDs são diferentes. Usando-se elementos como o gálio, o arsênio e o fósforo, um fabricante pode produzir LEDs que irradiam no vermelho, verde, amarelo, azul, laranja ou infravermelho (invisível).

Os LEDs que produzem radiação visível são úteis em instrumentos, calculadoras etc. Os LEDs infravermelhos encontram aplicação em sistemas de alarme contra roubo e outras áreas que exijam radiação invisível.

Tensão e Corrente do LED

Os LEDs têm uma queda de tensão típica de 1,5 a 2,5 V para correntes entre 10 e 50 mA.

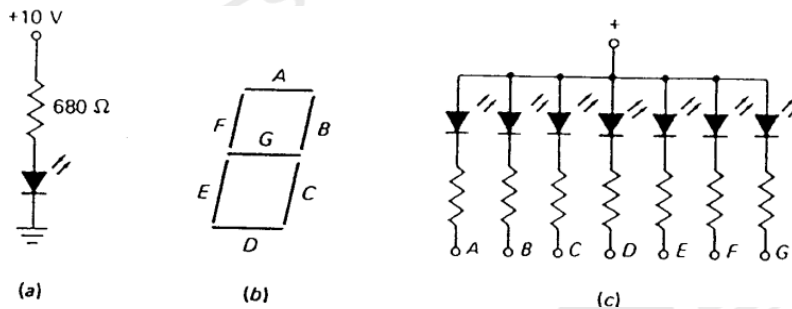
A queda de tensão exata depende da corrente, da cor, da tolerância do LED. A menos que seja feita alguma recomendação em contrário, use uma queda nominal de 2 V quando estiver verificando defeitos ou analisando circuitos com LEDs. Se tiver que fazer algum projeto, consulte a folha de dados, porque as tensões do LED têm uma grande tolerância. A figura 44(a) mostra o símbolo esquemático de um LED, as setas para fora simbolizam a luz irradiada. Admitindo uma queda no LED de 2 V, pode-se calcular a corrente do LED, do seguinte modo:

$$I = \frac{10V - 2V}{680\Omega} = 11,8m$$

Tipicamente, a corrente do LED está entre 10 e 50 mA porque essa faixa produz luz suficiente para a maioria das aplicações.

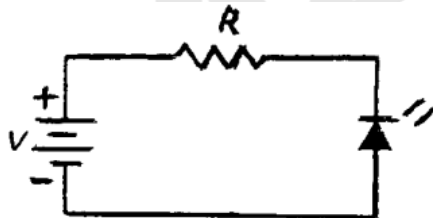
O brilho de um LED depende da corrente. Idealmente, a melhor forma de se controlar o brilho é vincular o LED a uma fonte de corrente. A melhor coisa para se obter uma fonte de corrente é uma grande tensão de alimentação seguida de uma grande resistência em série. Neste caso, a corrente do LED é dada por:

$$I = \frac{V_S - V_{LED}}{R_S}$$



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-22 (a) Um circuito com LED. (b) Indicador de sete-segmentos. (c) Diagrama esquemático



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 7-23 Fotodiodo

Quanto maior a tensão da fonte, menor o efeito que V_{LED} produz. Em outras palavras, um alto valor de V_S encobre a variação na tensão do LED.

Por exemplo, um TIL222 é um LED verde com uma queda mínima de 1,8V e uma queda máxima de 3V para uma corrente de aproximadamente 25 mA.

Se ligarmos um TIL222 a uma fonte de 20 V e a um resistor de 750, a corrente variará de 22,7 a 24,3 mA. Isto implica um brilho que é essencialmente o mesmo para todos os TIL222. Por outro lado, suponhamos que no circuito se utilize uma fonte de 5V e um resistor de 120. A corrente variará então cerca de 16,7 a 26,7 Ma. Isto causará uma variação sensível no brilho. Portanto, para se obter um brilho aproximadamente constante com LEDs, devemos utilizar tanto uma fonte de tensão como uma resistência em série o maior possível.

Indicador de Sete-segmentos

A figura 7-22(b) mostra um indicador de sete-segmentos que contém sete LEDs retangulares (de A a G). Cada LED é chamado de um segmento porque ele faz parte do dígito que está sendo exibido. A figura 7-22(c) é o diagrama esquemático de um indicador de sete-segmentos, são incluídos resistores externos em série para limitar as correntes a níveis seguros.

Aterrando-se um ou mais resistores, podemos formar qualquer dígito de 0 a 9. Por exemplo, aterrando A, B e C, obtemos o 7. Aterrando A, B, C, D e G produzimos um 3. Um indicador de sete-segmentos também pode exibir as letras maiúsculas A, C, E e F, mais as letras minúsculas b e d. Os instrutores de microprocessadores frequentemente usam uma exibição de sete-segmentos para mostrar todos os dígitos de 0 a 9, mais A, b, C, d, E e F.

7.11 RESUMO

- 1 - O thyristor (SCR), é um comutador quase ideal. Uma de suas várias funções é controlar a energia consumida em vários tipos de máquinas.
- 2 - O termo thyristor, designa uma família de elementos semicondutores, cujas características estão próximas às das antigas válvulas thyatron.
- 3 - O nome thyristor é uma contração de THYRatron e transISTOR.
- 4 - O thyristor básico é denominado SCR (retificador controlado de silício).
- 5 - Dos vários tipos de thyristores, os que se destacam atualmente são os SCR, triac, fotothyristor, diac e diodo Shockley.

- 6 - O SCR é um diodo semiconductor de silício, a quatro camadas alternadas PNP, com três terminais de saída, que são denominados anodo, cátodo e gatilho.
- 7 - Quando o anodo de um SCR é positivo em relação ao cátodo, duas junções internas ficam polarizadas diretamente e uma junção fica polarizada inversamente. Neste caso, o diodo poderá conduzir desde que o potencial de anodo seja suficiente para romper a junção com polarização inversa.
- 8 - O SCR poderá conduzir facilmente se estiver polarizado diretamente e se um potencial positivo for aplicado ao gatilho.
- 9 - Um SCR poderá disparar (conduzir) quando um sinal de comando é aplicado ao terminal gatilho, mas o seu bloqueio, só poderá ocorrer, diminuindo-se a corrente de anodo a um determinado nível.
- 10 - A tensão de disparo de um SCR depende da tensão VG, mas o seu bloqueio não depende desta tensão.
- 11 - Um SCR pode controlar a energia dissipada em uma carga, através de um sistema que defasa a tensão VG com relação a tensão de anodo.
- 12 - O triac é um dispositivo semiconductor de três terminais, sendo um de comando e dois de condução principal.
- 13 - Este dispositivo pode passar de um estado bloqueado a um regime de condução nos dois sentidos de polarização.
- 14 - O triac poderá conduzir nos dois sentidos, desde que comandado, mas o seu bloqueio só se efetuará pela inserção da tensão de anodo ou pela diminuição da corrente, abaixo do valor da corrente de manutenção.
- 15 - O triac pode ser disparado por uma corrente negativa ou positiva no gatilho.
- 16 - O diac é um dispositivo semiconductor de dois terminais, que não possui polaridade. A sua condução é bidirecional.
- 17 - A condução de um diac é por ruptura das junções que o constituem.
- 18 - Quando conduz, o diac apresenta uma região de resistência negativa.
- 19 - Os diacs são muito usados em sistemas de disparo para controle de fase de triacs em controles de energia.
- 20 - Os fotothyristores, são SCR, cujo disparo é efetuado por um foco luminoso.
- 21 - O quadrac é um dispositivo semiconductor cuja estrutura é constituída de triacs e diacs.
- 22 - O diodo Shockley é aparentemente um thyristor SCR com apenas dois terminais.

23 - O diodo Shockley, tem três estados: o primeiro é o de não condução, o segundo é o de disparar quando apresentar um estado de resistência negativa e o terceiro é quando a sua condução é normal e igual a um diodo convencional.

24 - O bloqueio de um diodo Shockley é através da redução de IH.

25 - O diodo túnel é um pequeno dispositivo formado por uma junção PN, com alta concentração de impurezas.

26 - O diodo túnel, altamente dopado, quando polarizado diretamente, apresenta inicialmente uma região de resistência negativa.

27 - A região de resistência negativa é devido à diminuição da corrente com o aumento da tensão direta.

28 - Devido a esta característica, o diodo túnel pode ser usado como amplificador ou oscilador.



Referência Bibliográfica

BRASIL. IAC – Instituto de Aviação Civil. Divisão de Instrução Profissional Matérias Básicas, tradução do AC 65-9A do FAA (Airframe & Powerplant Mechanics-General Handbook). Edição Revisada 2002.

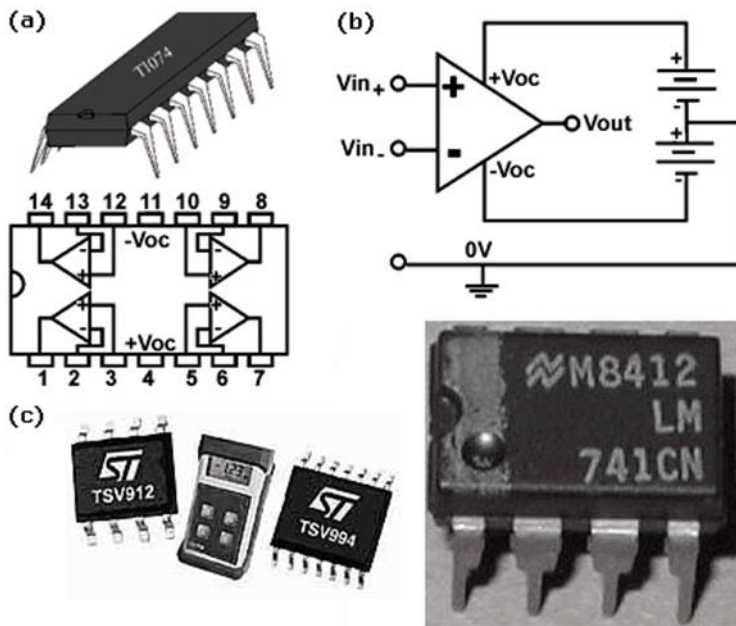


No Próximo Módulo

Caro aluno,

No próximo módulo, você vai entender um pouco de medida em decibéis e conhecerá outro dispositivo muito versátil na eletrônica, o amplificador operacional.

Vamos juntos?



Fonte: <http://www.almbpg.com/?afilho=acaofilho&afilho=ampop>

MÓDULO VIII

DECIBÉIS E AMPLIADORES OPERACIONAIS

INTRODUÇÃO

Caro aluno,

O amplificador operacional é idealmente um dispositivo que reúne algumas características básicas que permitem que o mesmo seja usado em uma infinidade de aplicações. O amplificador operacional ideal possui, por exemplo, impedância de entrada infinita, impedância de saída nula e ganho infinito. Ou seja, poderia amplificar infinitamente um sinal, sem interferir na sua fonte ou no dispositivo para o qual ele fornece a saída.

Esse dispositivo, na verdade, não existe com essas características, mas consegue-se implementar dispositivos que possuam uma elevada impedância de entrada, uma impedância de saída muito baixa e um ganho bastante alto. Os amplificadores operacionais podem então ser utilizados tal como os dispositivos ideais, desde que se conheçam suas limitações e as limitações do circuito no qual serão utilizados.

Neste módulo, além de conhecer os amplificadores operacionais, você vai entender um pouco a respeito de uma medida de amplificação muito usada em eletrônica, os decibéis.

8.1 DECIBÉIS

É muito comum ouvirmos, em eletrônica, frases como: "O atenuador reduz de 5 dB", "Resposta plana de frequência dentro de 3 dB", "Amplificador com ganho de 10 dB", "Antena com ganho de 9 dB", etc. Mas quantos são os que realmente têm uma exata noção do valor destes valores? Você se familiarizará, a partir de agora com o termo decibel (dB).

O decibel é a décima parte do Bel, unidade usada para se fazer a comparação entre quantidades de energia, seja na forma de potência ou de som. Quando nos referirmos a decibel, entenderemos como sendo dez vezes o logaritmo¹ decimal da relação entre dois níveis de potência expressos em Watt.

$$N^{\circ} \text{ dB} = 10 \times \log (P_2: P_1)$$

Na expressão anterior, queremos dizer que o número de decibéis é igual a dez vezes o logaritmo decimal da divisão da potência P_2 pela potência P_1 , expressas em Watts.

Antes de prosseguirmos neste assunto, torna-se mister tecermos algumas considerações sobre a forma com que o ouvido humano reage aos diferentes estímulos sonoros.

Imaginemos um aparelho fornecendo-nos uma potência de 10 Watts e observemos a sensação auditiva. Se aumentarmos a potência sonora, até os nossos ouvidos sentirem o dobro do nível sonoro anterior, ao medirmos a potência, verificaremos que se trata de 100 W e não 20 W, como seria de se supor.

Se aumentarmos ainda mais a potência até que dobre novamente, mediremos 1000 W, e assim, sucessivamente.

Isso mostra que o ouvido humano reage ao som, não de maneira linear, mas muito aproximadamente, de acordo com uma curva logarítmica, razão pela qual os engenheiros, ao estabelecerem uma fórmula para a comparação de duas intensidades sonoras, tiveram que fazer com que ela obedecesse à mesma curva matemática que os logaritmos.

Aplicações

Inicialmente a aplicação do decibel restringia-se somente ao áudio. Mais tarde generalizou-se pela simplificação que ele traz, passando a ser aplicado em antenas, amplificadores, linhas de transmissão, etc.

Vejamos alguns exemplos de aplicação do dB:

a) Um amplificador requer 2 W de potência para excitá-lo na entrada. Sabendo-se que a potência de saída do amplificador é de 8 W, qual será o ganho do amplificador em dB?

Solução:

$$P_0 = 2 \text{ W} \quad P_1 = 8 \text{ W} \quad G(\text{dB}) = ?$$

$$G(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_1}{P_0}$$

$$G(\text{dB}) = 10 \log \frac{8}{2} = 10 \log 4$$

$$G(\text{dB}) = 10 (0,602) = 6,02$$

b) Um transmissor entrega uma potência de 500 W, mas na antena chegam apenas 455 W. Qual é o ganho de potência em dB?

Solução:

$$P_0 = 500 \text{ W} \quad P_1 = 455 \text{ W} \quad G(\text{dB}) = ?$$

$$G(\text{dB}) = 10 \log \frac{455}{500}$$

$$G(\text{dB}) = 10 \log 0,91$$

$$G(\text{dB}) = -10(0,041) = -0,41$$

Façamos algumas considerações sobre os dois resultados obtidos nos exercícios anteriores. O primeiro resultado significa que a potência de saída do amplificador está 6,02 dB acima do nível de potência de entrada.

No segundo resultado, observamos o aparecimento do sinal “-“ (menos). Este sinal indica que não se trata de ganho de potência, mas sim uma atenuação (perda de potência) e o resultado em si, significa que a potência que chega à antena está 0,41 dB abaixo do nível de potência entregue pelo transmissor.

8.2 RELAÇÕES DE TENSÃO E CORRENTE

A partir da definição de ganho em potência e do conhecimento de que: $P = E \times I = I^2 \times R = E^2 / R$, podemos deduzir o ganho de tensão e ganho de corrente, sobre impedâncias iguais.

$$G(\text{dB}) = 10 \log P_1 / P_0$$

Supondo $R_1 = R_0$ e substituindo-os pelos valores de P_0 e de P_1 pelos valores correspondentes em tensão e resistência, teremos:

$$G(\text{dB}) = \frac{10 \log(E_1^2 \cdot R_0)}{(E_0^2 \cdot R_1)}$$

$G(\text{dB}) = 10 \log(E_1^2 : E_0^2)$ que pode ser escrito como:

$$G(\text{dB}) = 20 \log(E_1 : E_0).$$

Da mesma forma podemos deduzir para o ganho de corrente:

$$G(\text{dB}) = 20 \log(I_1 : I_0)$$

8.3 NÍVEIS DE REFERÊNCIA

O decibel, sendo essencialmente uma relação, ou mais exatamente, dez vezes o logaritmo decimal da relação entre duas potências, exige que se explicita ou subentenda-se uma referência, de acordo com convenções existentes. Por exemplo, quando se diz que o ganho de um amplificador é de tantos dB, isto equivale a expressar em dB o sinal de saída, tomando-se como referência o sinal de entrada.

Existem também alguns níveis de tensão ou de potência padronizados, escolhidos como referência e frequentemente os níveis de tensão ou de potência são expressos em relação a tais referências.

Os níveis mais comuns são 1 miliwatt e 6 miliwatt. O nível de 0,006 W corresponde a zero dB, enquanto que o nível 0,001 W corresponde ao nível zero dBm. Em outras palavras: dBm significa, dB relativo a 1 miliwatt.

Alguns exemplos a seguir elucidarão o emprego do dB e do dBm no cálculo do ganho ou atenuação de um circuito ou equipamento:

a) Sabendo-se que a potência de saída de um amplificador é 5 miliwatt, calcular o nível de potência de saída do amplificador, em dB.

Solução:

$$P_0 = 1 \text{ mW}$$

$$P_1 = 5 \text{ mW}$$

$$G(\text{dBm}) = ?$$

$$G(\text{dBm}) = 10 \log(5 : 1) = 10 \log 5$$

$$G(\text{dBm}) = 10 \times 0,6990$$

$$G(\text{dBm}) = 6,99 = \sim 7$$

Então, o nível de potência de saída do amplificador, está a 7 dB acima do nível de referência de 0,001 W.

b) Sabendo-se que um amplificador tem uma potência de saída de 6 Watts, calcular o seu ganho em dB.

Solução:

$$P_1 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

$$P_0 = 6 \text{ W}$$

$$G \text{ (dB)} = ?$$

$$G \text{ (dB)} = 10 \log (6 : 6 \cdot 10^{-3}) = 10 \log 10^3$$

$$G \text{ (dB)} = 30 \log 10$$

$$G \text{ (dB)} = 30$$

Este resultado indica que a potência de saída do amplificador está a 30 dB acima do nível de potência de referência de 0,006 W.

8.4 MEDIDA DE POTÊNCIA

O dBm é usado para descrever níveis de potência em decibéis, com referência a potência de 1mW sobre 600 ohms. Um miliwatt é representado como zero dBm, 10 miliwatts como 10 dBm, e 100 miliwatts como 20 dBm.

As figuras 8-1 e 8-2 são úteis na conversão direta de Volts rms em dBm (8-1) ou mW para dBm (8-2). A diagonal de cada gráfico marca os valores de tensão (8-1) ou a junção de dBm e miliwatts (8-2)

a) Para converter 10 volts rms em dBm, localize 10 volts na escala inferior da figura 8-1, movendo para cima (verticalmente) até encontrar a linha diagonal. Deste ponto mova horizontalmente para a esquerda, até encontrar +22 dBm.

b) Para converter 1000 mW em dBm, localize 1000 na parte inferior da figura 8-2.

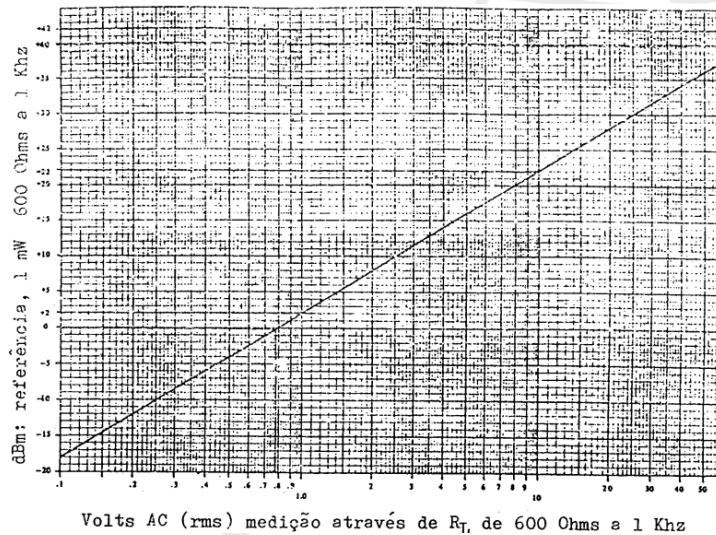
Siga a linha de 1000 mW até encontrar a linha diagonal. Deste ponto, mova horizontalmente até +30 dBm na margem esquerda do gráfico.

c) Para converter +15 dBm em mW, localize +15 dBm na margem esquerda do gráfico (figura 8-2), movendo horizontalmente até encontrar a linha diagonal. Deste ponto, mova verticalmente para baixo, até encontrar a linha inferior que corresponde ao ponto 33,3 mW da escala.

d) Para cargas diferentes de 600 ohms, um fator de correção, baseado na razão de 600 ohms para o atual valor de carga, deve ser somado ou subtraído dos valores encontrados para 600 ohms, com o auxílio do gráfico apropriado. A fórmula para encontrar o fator de correção é:

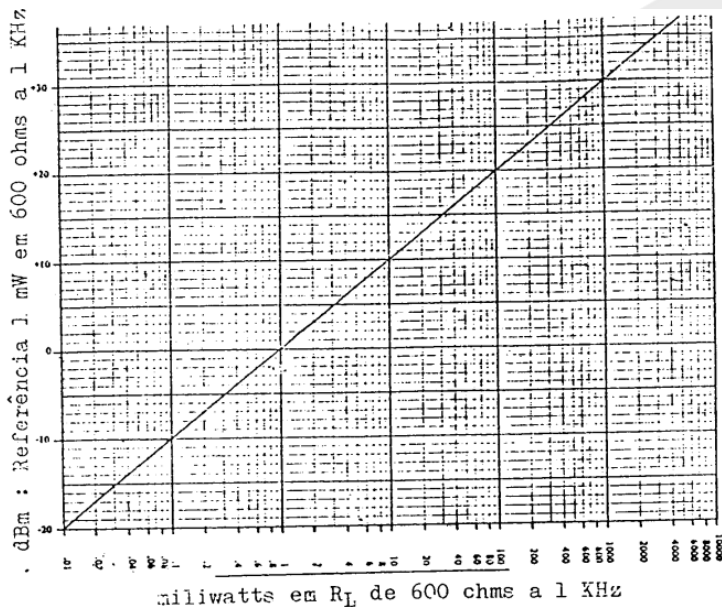
$$F.C. = 10 \log (600 : R_1), \text{ onde } R_1 \text{ é a atual resistência de carga.}$$

Como exemplo do uso do fator de correção, consideremos um amplificador com uma carga de 8 ohms que dissipa 1000 mW (1W).



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-1 Conversão de volts rms em dBm



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-2 Conversão de mW em dBm 15-3

A figura 8-2 nos mostra que corresponde a +30 dBm numa carga de 600 ohms. Para determinarmos o verdadeiro valor em dBm sobre a resistência de 8 ohms, devemos calcular primeiramente o fator de correção.

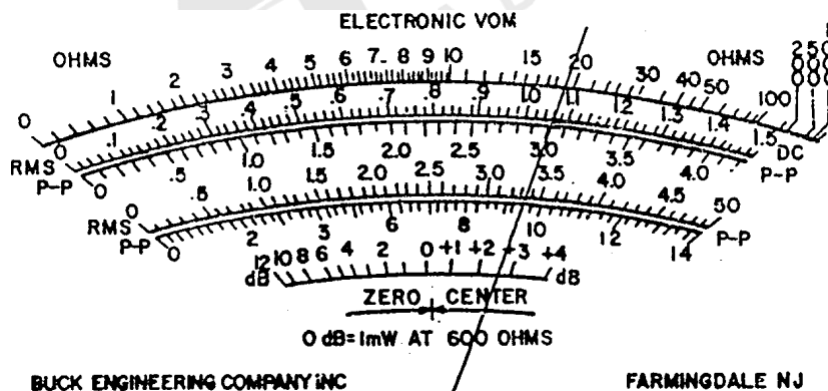
$$\begin{aligned} \text{F.C.} &= 10 \log (600 : 8) = 10 \log 75 = \\ &= 10 (1,875) = 18,75 \end{aligned}$$

Como a nossa impedância é inferior a 600 ohms, teríamos que, do valor encontrado no gráfico, subtrair o fator de correção.

8.5 MEDIDORES DE POTÊNCIA

Um medidor de dB, mede, na realidade, tensão de CA e inclui-se uma escala de decibéis no mostrador do medidor, de modo que a leitura possa fazer-se em decibéis, em lugar de volts de CA.

A figura 8-3 ilustra um volt ohmímetro eletrônico com a escala inferior graduada em dB.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-3 Mostrador de um volt ohmímetro eletrônico

8.6 RESUMO TEÓRICO DE LOGARITMOS

- Logaritmo de um número, real e positivo N , em uma base a positiva e diferente da unidade, é o expoente real x que se deve elevar essa base a para obter o número N .
- Somente números positivos têm logaritmos.
- O valor do logaritmo de um número pode ser obtido por calculadoras, softwares de computadores ou por tabelas pré-calculadas.
- Todas as vezes que nos defrontarmos com logaritmos negativos, devemos transformá-los em logaritmos preparados a fim de facilitar o cálculo.

e) O decibel é muito usado em eletrônica, para comparação de níveis de tensão e de potência, sempre relacionados com um padrão de referência.

f) Quando medirmos a potência dissipada sobre uma impedância diferente de 600 ohms, devemos calcular o fator de correção, que deve ser somado ou subtraído dos valores em dBm, encontrados nos gráficos "dBm x volts rms" e "dBm x mW".

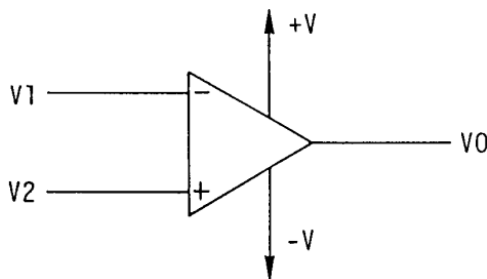
8.7 AMPLIADORES OPERACIONAIS

Um Amplificador Operacional, Amplificador Operacional ou simplesmente Amp OP é um amplificador de ganho muito elevado que pode ser empregado para realizar operações matemáticas, como multiplicação, integração, diferenciação e também para uma infinidade de funções.

Com esse dispositivo podem ser conseguidos amplificadores capazes de operar com sinais que vão desde corrente contínua até vários megaHertz.

Simbologia

Na figura 8-4 é mostrado o símbolo do amplificador operacional.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-4 Símbolo do amplificador operacional

O dispositivo amplia, na saída (V_0), a diferença dos sinais aplicados às entradas (V_1 e V_2). Os terminais de alimentação (+V e -V) recebem tensão externa para o funcionamento do Amp Op.

8.8 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

O amplificador operacional ideal apresenta as seguintes características:

- Impedância de entrada infinita;

- Impedância de saída nula;
- Ganho de tensão infinito;
- Atraso nulo;
- Tensão de saída nula de $V_2 = V_1$;
- Resposta em frequência infinita.

Os Amp Op reais são aproximações tão boas quanto possível do ideal que, na prática, produzem resultados satisfatórios.

8.9 ALIMENTAÇÃO

Na maioria das aplicações usa-se uma fonte simétrica ($\pm V$), porém há casos em que a fonte simples pode ser usada.

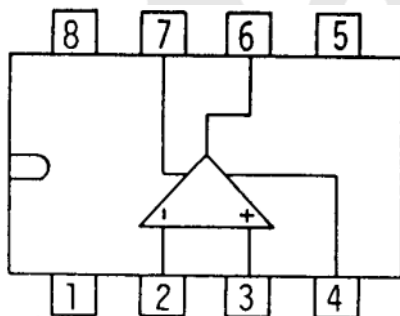
A alimentação pode ser obtida das seguintes maneiras:

- Duas fontes iguais, perfeitamente sincronizadas;
- Circuito divisor de tensão, com resistores exatamente iguais;
- Uma fonte simétrica, com valores típicos entre $\pm 10 V$ e $\pm 20 V$.

8.10 PINAGEM

O amplificador operacional mais difundido é o 741. É um circuito integrado monolítico construído numa única base de silício.

Caracteriza-se por apresentar um alto ganho e uma elevada impedância de entrada. Esse amplificador operacional é encontrado com diversas denominações: μA 741, LM 741, CA 741, MC 741 e TBA 221B.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-5 Pinagem do amplificador operacional 741

Pinos:

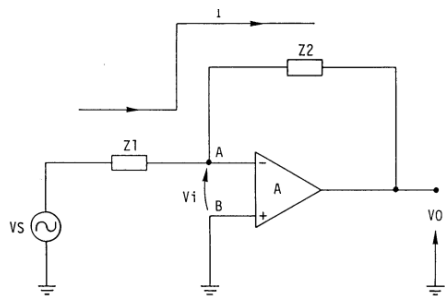
- 1 - Ajuste de offset;
- 2 - Entrada inversora (V_1);
- 3 - Entrada não inversora (V_2);
- 4 - Alimentação (- V);
- 5 - Ajuste de offset;
- 6 - Saída (V_o);
- 7 - Alimentação (+ V);
- 8 - Sem uso.

O ajuste de offset serve para compensar diferenças entre os dois sinais de entrada.

8.11 AMPLIADOR OPERACIONAL COMO AMPLIFICADOR

Aproveitando as características elétricas do Amp Op ideal descritas anteriormente, podemos realizar arranjos com outros dispositivos de forma a obtermos os mais variados resultados, tais como a amplificação de um sinal por um fator pré-determinado.

O amplificador operacional como amplificador é mostrado na figura 8-6.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-6 Amplificador operacional típico

Desejamos um sinal de saída V_o proporcional a diferença entre os sinais de entrada ($V_B - V_A$) ou V_{BA} . Como o Amp Op apresenta uma impedância de entrada infinita, a corrente I que passa em Z_1 é a mesma que passa em Z_2 , pois devido à grande impedância de entrada do dispositivo (impedância entre A e B), nenhuma parte da corrente é drenada de A para B, que está conectado ao terra. Então, pela lei de Ohm, podemos calcular a corrente em Z_1 e em Z_2 e então igualá-las, obtendo a relação entre as tensões. Lembre-se que a tensão em A, é igual a V_i . Daí, podemos tirar a seguinte relação:

$$\frac{V_s - V_i}{Z_1} = \frac{V_o - V_i}{Z_2} \text{ ou seja:}$$

$$\frac{-Z_2}{Z_1} = \frac{V_o - V_i}{V_s - V_i} = (1)$$

Como o amplificador operacional ideal apresenta ganho infinito (∞) podemos dizer que a tensão de saída é muitíssimo maior que a diferença de tensões de entrada (V_i) e esta então pode ser desprezada na equação (1), que pode ser expressa como:

$$-\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{V_o}{V_s}$$

Como o ganho do circuito é a relação entre o sinal de saída e o de entrada, temos que o ganho A do circuito, é igual a:

$$A = -\frac{Z_2}{Z_1}$$

O sinal negativo na fórmula deve-se ao fato do extremo de Z_2 estar aplicado no terminal inversor do amplificador operacional (ponto A).

Com essa demonstração chegamos a algumas conclusões importantes:

1) Podemos determinar o ganho em malha aberta (sem realimentação):

$$A = \frac{-V_o}{V_i}$$

2) O ganho do amplificador em malha fechada será $A = -(Z_2/Z_1) = -V_o/V_i$

3) A tensão de saída poderá ser negativa, dependendo da aplicação do sinal de entrada: $V_o = -A \cdot V_i$

4) Se $Z_1 = Z_2$, o circuito comporta-se como um simples inversor: $V_o = -V_s$

5) Se $Z_1 < Z_2$, o circuito amplifica e inverte

6) Se $Z_1 > Z_2$, o circuito atenua e inverte

7) Podemos implementar um amplificador com um ganho determinado escolhendo adequadamente Z_1 e Z_2 . Por exemplo, se quisermos dobrar a tensão, escolhemos Z_2 de valor correspondente ao dobro de Z_1 .

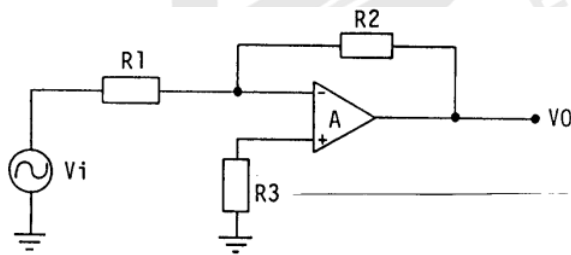
8.12 APLICAÇÕES DOS AMPLIADORES OPERACIONAIS

Aplicações Lineares

Circuitos analógicos ou lineares são os que processam ou manipulam sinais cujas amplitudes assumem valores que podem variar continuamente dentro de certo período. Nessa categoria encontram-se os osciladores, os amplificadores, os filtros ativos, os circuitos somadores e outros. Aplicações lineares de Amp Op são circuitos que exercem funções analógicas.

Amplificador com Inversão

O circuito da figura 8-7 mostra um amplificador com inversão.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-7 Amplificador com inversão

Suponhamos que os componentes do circuito da figura 8-7 assumam os seguintes valores: $R_1 = 20\text{K}$, $R_2 = 100\text{K}$ e $R_3 = 0$. Com isso tem-se que o ganho (A) será:

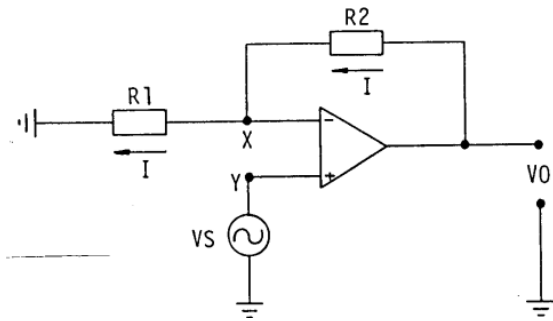
$$A = \frac{-R_2}{R_1} = -5$$

Se desejarmos usar R_3 , o seu valor deverá ser o equivalente ao circuito com R_1 e R_2 em paralelo:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Portanto, se o sinal de entrada aplicado ao circuito for de 1V, a saída será de -5V. Esse circuito então executa também a função de multiplicador.

Amplificador sem Inversão



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-8 Amplificador sem inversão

Pelo circuito da figura 8-8 vemos que $I = \frac{V_s}{R_1}$, teremos, nesse circuito que:

$$V_o = V_{R2} + V_s.$$

Porém, como $V_{R2} = \frac{V_s}{R_1} \cdot R_2$ temos que:

$$V_s \cdot \frac{R_2}{R_1} + V_s = V_o \therefore V_o = V_s \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\text{Por outro lado: } \frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

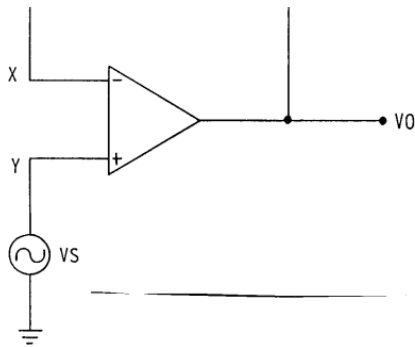
$$\text{Ou seja: } A = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Obs. Lembre-se de que a grande impedância de entrada do Amp Op faz com que a tensão em X seja praticamente igual à tensão em Y, que é V_s .

Amplificador com Ganho Unitário

A princípio, poderia se pensar que um amplificador de ganho unitário não teria utilidade. De fato, a tensão de saída é igual à de entrada, mas a grande vantagem desse dispositivo é que o amplificador com ganho unitário apresenta uma elevada impedância de entrada derivada do Amp Op e baixa impedância de saída, características que são relevantes em determinados circuitos.

O amplificador com ganho unitário é mostrado na figura 8-9.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-9 Amplificador com ganho unitário

No circuito, $A = \frac{V_o}{V_s}$

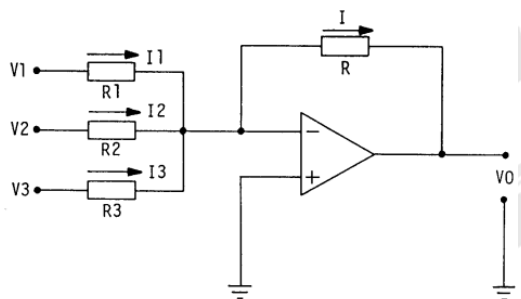
como $V_o = V_s$ temos $A = 1$

O amplificador nessa configuração é empregado como isolador ou "buffer". O circuito isolador permite que possamos medir tensões em circuitos de alta impedância utilizando um voltímetro de baixa impedância.

Circuito Somador

Como o nome indica, o circuito somador tem por objetivo fornecer na saída uma tensão cujo valor é igual à soma das tensões aplicadas à entrada.

Tal circuito é mostrado na figura 8-10.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-10 Circuito somador

Observando o circuito podemos escrever a equação da tensão de saída:

$$V_o = -I \times R = -(I_1 + I_2 + I_3) \times R$$

Ou ainda:

$$V_o = -\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}\right) \times R$$

Se implementarmos o circuito com $R_1 = R_2 = R_3 = R$ teremos:

$$V_O = -(V_1 + V_2 + V_3)$$

Valores adequadamente escolhidos para os resistores podem ser utilizados para se implementar somas com peso. Por exemplo, se escolhermos $R_2 = R_3 = R$ e $R_1 =$ a metade desse valor ($R_1 = 1/2 R$), teremos $V_O = -(2 \cdot V_1 + V_2 + V_3)$.

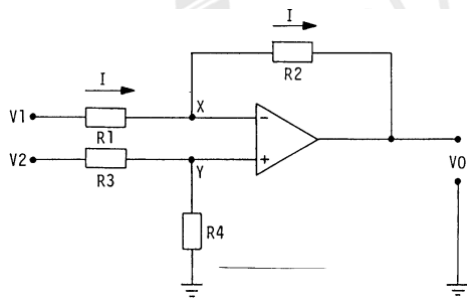
Circuito Subtrator

É o circuito projetado para fornecer na saída um valor de tensão igual à diferença entre as tensões de entrada.

Para que o circuito funcione como subtrator é necessário que a seguinte relação seja obedecida:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

O circuito subtrator é mostrado na figura 8-11.



Fonte: IAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-11 Circuito subtrator

Consideremos inicialmente todos os resistores iguais a "R".

Temos então que: $I = \frac{V_{R_1}}{R_1} = \frac{V_{R_2}}{R_2}$,

Mas como $V_{R_1} = V_1 - V_X$ e $V_{R_2} = V_X - V_O$

A corrente "I" será: $I = \frac{V_1 - V_X}{R} = \frac{V_X - V_O}{R}$

Logo: $V_1 - V_X = V_X - V_O$

e $V_O = 2 V_X - V_1$

Se $V_y = \frac{V_2}{2}$ e $V_O = 2(\frac{V_2}{2}) - V_1$

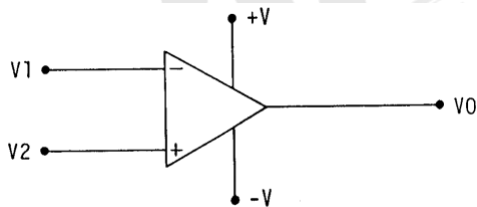
Finalmente tem-se que: $V_O = V_2 - V_1$

Aplicações não Lineares

Circuitos não lineares são aqueles que nos fornecerem saídas não necessariamente proporcionais ou dependentes da forma de onda de entrada. Um exemplo de aplicação não linear é o circuito comparador. Este tipo de circuito não tem finalidade de utilizar os valores de entrada para amplificá-los, atenuá-los, somá-los ou subtraí-los, mas tão somente informar se são iguais ou diferentes.

Circuitos comparadores - São circuitos cuja função principal é comparar o sinal de entrada V_1 com um sinal de referência V_2 .

A figura 8-12 mostra um circuito comparador.

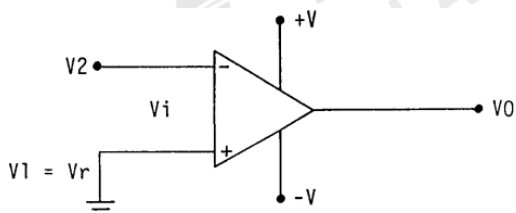


Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-12 Circuito comparador

Num Amp Op ideal, o ganho é infinito, porém o Amp Op real só pode fornecer no máximo a tensão de alimentação $+V$. Se os sinais de entrada forem iguais, a diferença entre eles será zero, que amplificado resulta em zero na saída V_o . No entanto, qualquer diferença entre os sinais de entrada, será amplificada “infinitamente”, dando como saída a tensão máxima que o Amp Op pode fornecer, ou seja $+V$. Assim, se na saída tivermos $+V$, sabemos que os sinais de entrada são diferentes, ao passo que se na saída tivermos 0, isto significa que os sinais de entrada são iguais.

Comparador com tensão de referência nula - Um circuito comparador com tensão de referência nula é mostrado na figura 8-13.



Fonte: LAC – Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional

Figura 8-13 Circuito comparador com tensão de referência nula

Este circuito é uma particularização do circuito comparador, no qual uma das entradas é ligada ao terra, sendo, portanto, sempre zero. Esta entrada, no exemplo V_1 , é tomada como referência para a avaliação de V_2 .

No circuito temos que quando a tensão V_2 for positiva a saída V_O será negativa.

E quando V_2 for negativa teremos uma V_O positiva.



Referência Bibliográfica

BRASIL. IAC – Instituto de Aviação Civil. Divisão de Instrução Profissional Matérias Básicas, tradução do AC 65-9A do FAA (Airframe & Powerplant Mechanics-General Handbook). Edição Revisada 2002.



Encerrando a Disciplina

Caro aluno,

Encerramos aqui a disciplina de Eletrônica I.

Espero que tenha sido proveitoso o seu aprendizado, mas não fique com dúvidas. Anote e busque os esclarecimentos necessários.

A eletrônica está presente em quase todos os campos da atividade humana e, de forma bastante acentuada nas modernas aeronaves.

Foi um prazer estar com você!

Prof. Rodrigo Costa