



Universidade Estadual de Campinas

Instituto de Física Gleb Wataghin

Aula apostilada de projeto e montagem do circuito multivibrador astável
(Relatório Final I)



Aluno: Gabriel Lopes Stockler Ney (R.A. 070955)

[gabrielstockler@yahoo.com.br]



Orientador: Eng. Pedro Miguel Raggio Santos

[praggio@ifi.unicamp.br]

2º semestre de 2009

Guia do RP (relatório parcial):

- 1 – Resultados atingidos.
- 2 - Fotos da experiência.
- 3 – Dificuldades encontradas.
- 4 – Pesquisa realizada.
- 5 – Descrição do trabalho.
- 6 – Declaração do orientador.
- 7 – Aula apostilada de projeto e montagem do circuito multivibrador astável.
- 8 – Anexo.

1) Resultados atingidos:

Montou-se o multivibrador, no qual se inseriu dois LEDs para ilustrar o funcionamento do circuito através do “efeito pisca-pisca”. Utilizando outros valores de componentes e um potenciômetro foi montado outro multivibrador, onde o potenciômetro tem o papel de variar a resistência de uma das bases do circuito, variando assim o tempo de carga de um dos capacitores. O resultado disso é um achatamento ou expansão da onda quadrada a ser vista no osciloscópio.

Logo, resumidamente, pode-se falar que foram construídos dois multivibradores astáveis. O primeiro, com o intuito de ilustrar de maneira prática uma aplicação do circuito, o “pisca-pisca”. Já com o segundo, através da variação de um dos períodos, busca-se um maior poder didático.

2) Fotos da experiência:

Seguem as fotos de todo o processo de elaboração do circuito multivibrador astável.

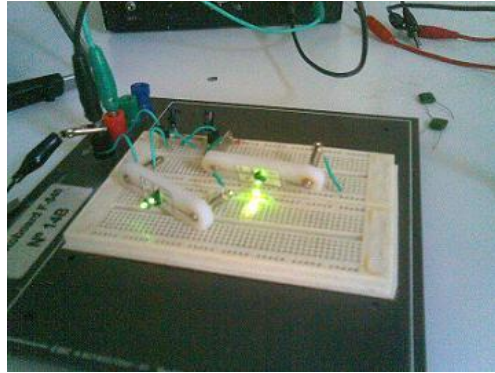


Fig. 01: Multivibrador montado no protoboard.



Fig. 02: Laboratório de física da Unicamp, sala onde foram realizados os testes do circuito.

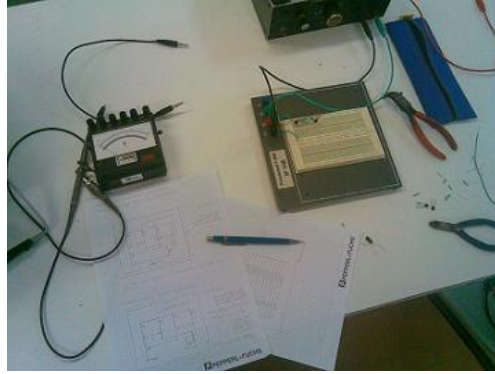


Fig. 03: Planejamento e seleção de componentes para o circuito.

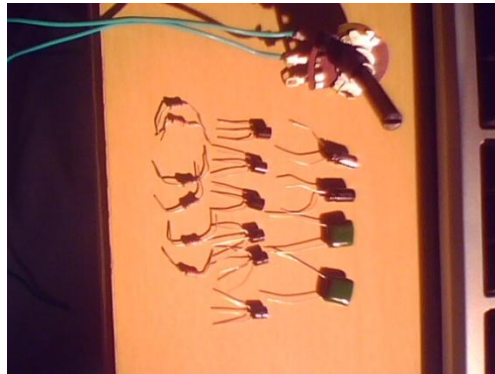


Fig. 04: Componentes utilizados na montagem do circuito.



Fig. 05: Placa de circuito impresso secando para ser pintada e, logo depois, corroída.

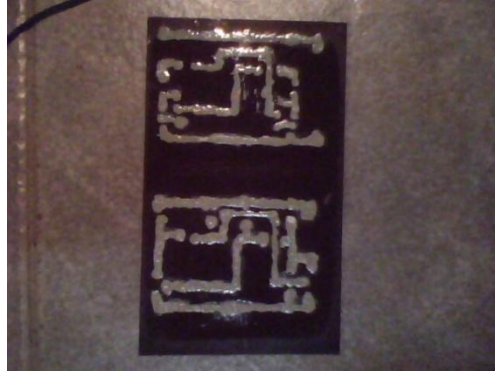


Fig. 06: Placa de circuito impresso corroída.

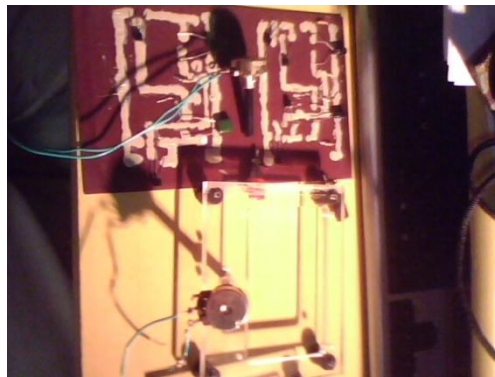


Fig. 07: Placa corroída, componentes eletrônicos e base de acrílico para apresentação.

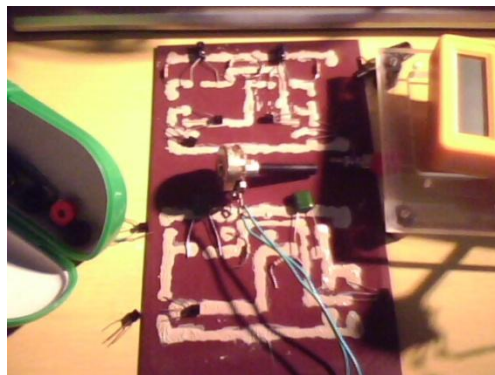


Fig. 08: Placa com o circuito impresso mais componentes do multivibrador.

3) Dificuldades encontradas:

No início do processo de elaboração da apostila, a principal dificuldade encontrada foi a falta de material disponível sobre o circuito. As poucas referências encontradas, em português, eram muito sucintas ou mal formuladas. Após semanas de busca, e com a ajuda de amigos e parentes, pude encontrar um material muito bom em inglês, a apostila do curso de eletrônica da marinha americana, que se encontra em anexo.

O fato de a principal referência estar escrita em inglês exigiu um esforço maior no processo de entendimento, tive que buscar dicionários para entender alguns termos técnicos específicos.

Na montagem experimental a principal dificuldade foi a necessidade aumentar o fator de multiplicação do transistor, devido ao valor da capacitância ser “alto”. A solução encontrada foi associar dois transistores de modo a multiplicar os seus fatores de multiplicação, ou seja, amplificar o sinal. Isso foi conseguindo através da associação em Darlington dos transistores, que está mais bem explicado em anexo (Configuração Darlington).

Uma questão final do circuito foi definir onde colocar o potenciômetro de modo a não distorcer as medidas. A posição encontrada, conforme detalhado na apostila, foi em série com uma das resistências de base.

4) Pesquisa realizada:

● Componentes eletrônicos:

→ George Mann - ABC dos transistores – 2ª Ed. Atualizada;

→ <http://pt.wikipedia.org/wiki/Resistor>;

→ <http://pt.wikipedia.org/wiki/Capacitor>;

- <http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/134>;
- <http://www.scribd.com/doc/7155293/Eletronica-Transistores>;
- <http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ee640/7a%20Aula.pdf>.

● **Circuito RC:**

- <http://www.breadboardcompanion.com/uploads/activity.pdf>;
- <http://www.ifi.unicamp.br/leb/f32909/F329-%20EXP09-2009-circuito%20RC.pdf>;
- <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?topic=31>;
- http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/mod07/m_s06.html.

● **Multivibradores:**

- <http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/227>;
- <http://www.eletronica24h.com.br/cursoEI/cursoEI2/aulas/Aula04.html>;
- http://flip.flop.nom.br/circuitos/multivibrador_astavel;
- http://www.mauajr.com/alunos/listas/Del_471_analogico/P1/astvl00.pdf;
- <http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ee610/10a%20Aula.pdf>;
- <http://www.slideshare.net/jimnaturesa/multivibradores-presentation>;
- <http://pt.wikipedia.org/wiki/Multivibrador>.

Todos os sites foram baixados e armazenados, devido à volatilidade do mundo virtual. Todo o material está organizado no arquivo sites.zip colocado em anexo no ensino aberto.

5) Descrição do trabalho:

O trabalho realizado buscou satisfazer os mais curiosos e interessados e, ao mesmo tempo, uma aplicação didática no segundo grau. Elaborar uma aula sobre o circuito multivibrador astável foi um grande desafio, que, acredito eu, enriqueça ainda mais as aulas de física no ensino médio.

No processo de desenho do circuito, utilizou-se uma tinta óleo como elemento isolante do cobre, e assim corroeu-se a placa através do uso do percloreto de ferro. Conforme mostra a figura 07, uma base de acrílico foi feita para tornar o circuito mais “limpo”, e, conseqüentemente, facilitar o processo de explicação/entendimento no dia da apresentação.

Foram construídos dois multivibradores. O primeiro é um astável simétrico, nele as resistências de base são iguais e valem $47k\Omega$, as resistências dos coletores valem $2,2k\Omega$. Os capacitores são iguais e possuem capacitâncias de $10\mu F$. Fazendo alguns cálculos, detalhadamente explicados na apostila (item 7), temos que a frequência é da ordem de $1,5Hz$ (calculada a partir da equação [24], da apostila), que é visível ao olho humano, sendo assim, é visível a piscada do LED.

No segundo multivibrador a montagem é parecida com a do primeiro, as resistências de base valem $100k\Omega$, as resistências do capacitor valem $2,2k\Omega$ e as capacitâncias valem $0,1\mu F$. A diferença é dada pela associação em série de um potenciômetro de $100k\Omega$ com uma das resistências de base, variando assim o valor total da resistência e, conseqüentemente, a frequência do circuito. No caso em que o potenciômetro possui uma resistência nula a frequência é da ordem de $72Hz$ (também calculada a partir da equação [24], da apostila), e no caso em que o potenciômetro tem resistência máxima a frequência chega a $48Hz$. Ambas as

freqüências são muito altas para se observar o LED piscar, logo, através do osciloscópio, pode-se observar a variação diretamente na onda quadrada produzida pelo circuito.

Um dos objetivos do projeto foi a elaboração de uma apostila completa sobre o circuito. Na apostila está descrito todo o trabalho, desde as teorias mais simples que rondam o multivibrador até algumas dicas de montagem.

Por uma questão meramente organizacional optei por não repetir todo o conteúdo da apostila nesse item. A apostila se encontra no item 7, e nela está descrita toda a teoria envolvida no projeto, assim como instruções e dicas para futuras reproduções do mesmo.

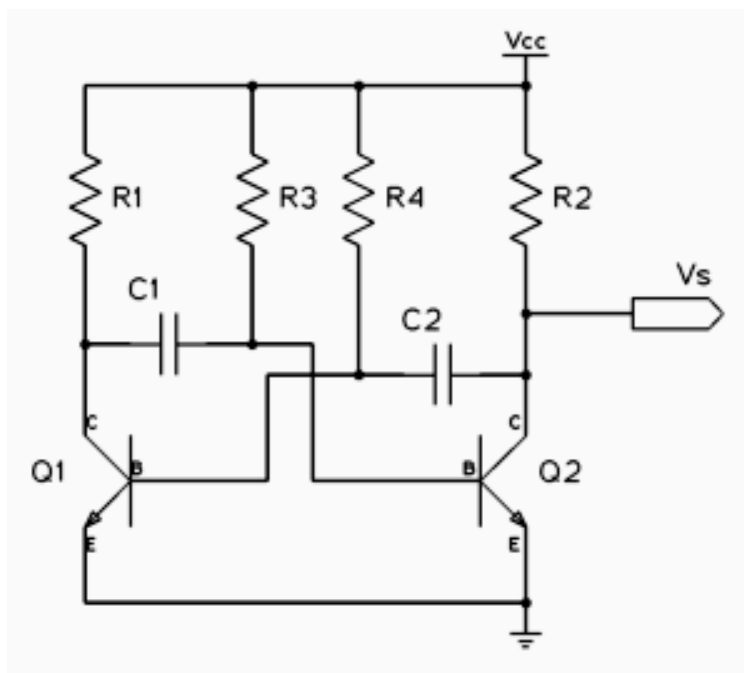
6) O meu orientador realizou os seguintes comentários:

“O aluno atendeu aos requisitos de esquematizar uma aula para ensino de multivibradores, com apostila e dispositivos didáticos ilustrativos do funcionamento do mesmo.”

7) Aula apostilada de projeto e montagem do circuito multivibrador astável:

Aula apostilada de projeto e montagem do circuito multivibrador astável:

Disciplina: Tópicos de Ensino de Física (F 609)



Aluno: Gabriel Lopes Stockler Ney (R.A. 070955)

Orientador: Eng. Pedro Miguel Raggio Santos

Coordenador: Prof. José Joaquim Lunazzi

Índice:

1. Componentes eletrônicos:
 - a. Resistor
 - b. Capacitor
 - c. Transistor
 - d. Representação gráfica dos componentes

2. Circuito RC:
 - a. Carga e descarga do circuito RC
 - b. A constante de tempo
 - c. Teoria x realidade

3. Multivibradores:
 - a. Multivibrador astável
 - b. Astável simétrico
 - c. Distorções de onda

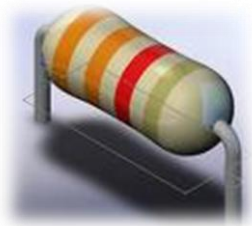
4. Projetando o multivibrador astável:
 - a. Material
 - b. Frequências
 - c. Configuração Darlington
 - d. Oscilações variáveis (potenciômetro)
 - e. Montagem

5. Referências bibliográficas

1 – Componentes Eletrônicos:

Para se entender e, conseqüentemente, construir um multivibrador, é fundamental entender o papel de cada componente no circuito. Tendo em vista essa necessidade, faremos uma descrição de cada componente individualmente.

a) Resistor:



O resistor é um componente amplamente utilizado na eletrônica, o qual consiste em transformar corrente (energia elétrica) em calor (energia térmica). Um exemplo clássico é a famosa “resistência de chuveiro”, que aquece a água do chuveiro através do calor liberado pelo resistor carregado.

Nos circuitos Elétricos, em geral, a função do resistor é se opor ao fluxo de corrente elétrica, sendo usado para evitar o curto-circuito. A ele é associado um valor que indica a intensidade com a qual bloqueia a passagem de corrente, esse valor é denominado resistência (R) que é dada por:

$$R = \rho \frac{L}{A} [1],$$

onde “ ρ ” é a resistividade do material, “L” o comprimento e “A” a área da secção transversal do resistor. A resistência (R) é medida, no sistema internacional, em Ohms (Ω).

Alguns resistores podem assumir resistências distintas de acordo com o uso de uma chave giratória, esses resistores são chamados de potenciômetros e serão utilizados na montagem do multivibrador. Detalhes sobre valores de resistência e resistores variáveis estão no anexo.

b) Capacitor:



O capacitor é um dispositivo capaz de armazenar energia em forma de campo elétrico. Assim como o resistor, é amplamente utilizado na eletrônica. Ele é composto por duas placas condutoras, entre as quais existe um material isolante denominado dielétrico.

Análogo à resistência (R) do resistor, temos a capacitância (C) no capacitor, que é dada por:

$$C = \frac{Q}{V} \quad [2],$$

onde "Q" é a carga armazenada entre as placas do capacitor e "V" a tensão entre elas. A capacitância (C) é medida, no sistema internacional, em Farads (F).

A energia acumulada entre as placas do capacitor é dada por:

$$dW = V dq \quad (\text{Trabalho no processo de carga do capacitor})$$

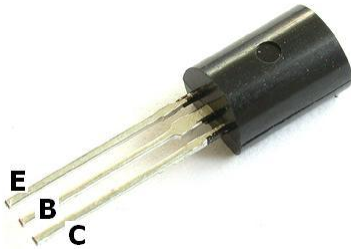
$$\rightarrow dW = \frac{q}{C} dQ \rightarrow W = \int_0^Q \frac{q}{C} dq \rightarrow W = \frac{Q^2}{2C} \quad (\text{Energia acumulada}),$$

$$E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{V^2 C}{2} \quad [3],$$

onde "V" é a tensão entre as placas e "C" a capacitância. A energia (E) é medida, no sistema internacional, em Joules (J).

Os capacitores são classificados de acordo com o material dielétrico utilizado. Detalhes sobre classificação de capacitores, e o processo de identificação do valor da capacitância, estão presentes no anexo.

c) Transistor:



O transistor é, para muitos, a maior invenção da história moderna. Praticamente todos os circuitos, presentes no mercado, possuem milhares ou milhões de transistores, por exemplo, um processador moderno da Intel possui cerca de 400 milhões de transistores. A evolução dos transistores foi a grande responsável pelo aumento na velocidade dos processadores e pelo avanço dos amplificadores.

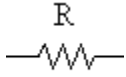
O transistor é, basicamente, composto por um coletor, uma base e um emissor. A base funciona como uma “chave elétrica” da corrente que flui na direção coletor-emissor, ou seja, através do controle da carga presente na base, pode-se permitir ou não passagem de corrente entre o coletor e o emissor.

O material atualmente utilizado na produção do transistor é o silício, através de manipulação laboratorial o silício é purificado e polarizado, gerado assim o silício P (positivo) e o silício N (negativo). Sobrepondo as camadas N e P formam-se os transistores NPN e PNP. A diferença básica entre os transistores NPN e PNP é o modo de acionamento. Para acionar o transistor NPN a tensão da base tem que ser mais positiva que a tensão no emissor, já no transistor PNP, a tensão da base tem que ser mais negativa.

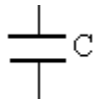
O original “*transfer resistor*” (resistor de transferência), recebeu esse nome devido à variância da impedância (resistência) de acordo com a polarização pré-estabelecida. Assim a corrente, que flui entre o coletor e o emissor, é, também, pré-determinada. A corrente na base é responsável por pré-estabelecer tais parâmetros, daí temos a possibilidade de amplificação do sinal.

d) Representação gráfica dos componentes:

- Resistor:



- Capacitor:



- Transistores:

- NPN:



- PNP:



Abaixo temos a representação mais detalhada de um transistor NPN, transistor esse que será utilizado na montagem no multivibrador.

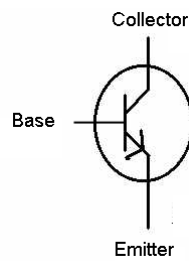


Figura 1: Representação gráfica do transistor NPN.

2 – Circuito RC:

O circuito RC pode ser visto como o “coração” do multivibrador. É através da configuração dele que se pode determinar o período de oscilação do circuito. Para entender o como fazer esse cálculo é necessário antes entender como funciona o circuito RC.

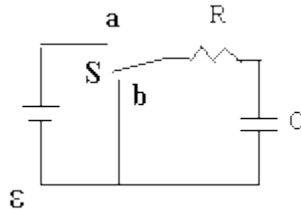


Figura 2: Circuito RC série.

Na figura 2 temos a representação do circuito RC série, que consiste na associação, em série, do resistor “R” com o capacitor “C”. Inicialmente consideraremos a chave “S” fechada em “a”, sendo assim, o capacitor será carregado pela corrente vinda da fonte “ε”.

a) Carga e descarga do circuito RC

No processo de carga do capacitor, para cada carga “dq” fornecida pela bateria está associado um trabalho “dW”, dado por:

$$dW = \varepsilon dq \quad [4].$$

O trabalho realizado pela bateria é observado no resistor em forma de dissipação energética, e no acúmulo de energia no capacitor, fenômenos descritos pelas equações 5 e 6, onde “i” é a corrente que passa pelo resistor e “V” a diferença de potencial entre as placas do capacitor:

$$E_1 = R i^2 dt \quad [5], \text{ energia dissipada no resistor.}$$

$$E_2 = V dq = \frac{q}{C} dq \quad [6], \text{ energia armazenada no capacitor.}$$

Através da conservação de energia e utilizando a equação [7] para substituir “i” da equação [5], temos:

$$i = \frac{dq}{dt} \text{ [7]},$$

$$\varepsilon dq = R i^2 dt + \frac{q}{C} dq \rightarrow \varepsilon dq = R \frac{dq^2}{dt^2} dt + \frac{q}{C} dq \rightarrow \varepsilon dq = R \frac{dq^2}{dt} + \frac{q}{C} dq \text{ [8]}.$$

Dividindo os dois lados da equação por “dq”, temos:

$$\varepsilon = R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} \text{ [9]}.$$

A equação [9] é uma equação diferencial de primeira ordem, e sua solução resulta na equação da carga, no processo de carga, no capacitor.

$$q(t) = \varepsilon C \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \text{ [10]}, \text{ equação da carga, no processo de carga, no capacitor.}$$

Calculando a derivada temporal da equação [10], obtemos a equação da corrente, no processo de carga, do capacitor.

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R} \left(e^{-\frac{t}{RC}}\right) \text{ [11]}, \text{ equação da corrente, no processo de carga, no capacitor.}$$

Através de uma análise simples da equação [10], por exemplo, podemos obter a forma do gráfico que a descreve. Fazendo “t” tender ao infinito, temos:

$$t \rightarrow \infty : q(t) = \varepsilon C - \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\varepsilon C e^{-\frac{t}{RC}}\right) = \varepsilon C \text{ [12]}.$$

Fazendo agora “t” tender a zero, temos:

$$t \rightarrow 0 : q(t) = \varepsilon C - \lim_{t \rightarrow 0} \left(\varepsilon C e^{-\frac{t}{RC}}\right) = 0 \text{ [13]}.$$

Observando as equações [12] e [13], podemos desenhar o gráfico $(q(t) \times t)$ no processo de carga do capacitor:

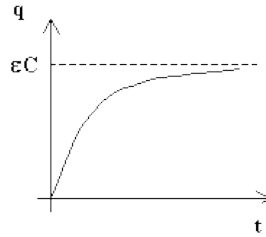


Figura 03: gráfico $(q(t) \times t)$ no processo de carga do capacitor.

Através da mesma análise pode-se determinar a equação da carga no processo de descarga do capacitor. Com o capacitor carregado, liga-se a chave “S” em “b” (figura 02). O capacitor, então, realiza um trabalho dado por:

$$dW = \frac{q}{C} dq \quad [14], \text{ trabalho associado a cada carga “}dq\text{” cedida pelo capacitor.}$$

Utilizando as equações [5] e [14], por conservação de energia, temos:

$$\frac{q}{C} dq = R i^2 dt \rightarrow \frac{q}{C} dq = R \frac{dq^2}{dt^2} dt \rightarrow \frac{q}{C} dq = R \frac{dq^2}{dt} \rightarrow \frac{q}{C} = R \frac{dq}{dt} \quad [15].$$

Reorganizando a equação [15], temos:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{q}{RC} \quad [16].$$

A equação [16] é também uma equação diferencial de primeira ordem, e sua solução resulta na equação da carga, no processo de descarga, no capacitor:

$$q(t) = \varepsilon C \left(e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad [17], \text{ equação da carga, no processo de descarga, no capacitor.}$$

Analogamente, calculando a derivada temporal da equação [17], temos:

$$i(t) = -\frac{\varepsilon}{R} \left(e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad [18], \text{ equação da corrente, no processo de descarga, no capacitor.}$$

Através de uma análise similar à de construção do gráfico da figura 03, pode-se obter o gráfico ($q(t) \times t$) no processo de descarga do capacitor. A curva começa em " $q = \varepsilon C$ " e, com o passar do tempo, tende a zero.

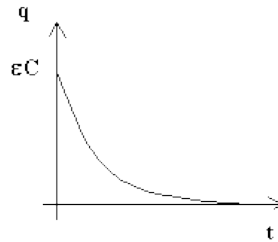


Figura 04: gráfico ($q(t) \times t$) no processo de descarga do capacitor.

a) A constante de tempo:

A constante de tempo, comumente representada pela letra grega " τ ", é definida como o tempo que o capacitor leva para atingir uma fração $\left(1 - \frac{1}{e}\right)$, ou, aproximadamente, 63%, da sua carga máxima. Sendo assim, através da equação [10] e da definição de " τ ", temos:

$$q_{(\tau)} = \varepsilon C \left(1 - e^{-\frac{\tau}{RC}}\right) = \varepsilon C \left(1 - \frac{1}{e}\right) = \varepsilon C(1 - e^{-1}) \rightarrow \tau = RC \text{ [19].}$$

No sistema internacional de unidades (SI), a constante de tempo, assim como o próprio tempo, é medida em segundos (s).

b) Teoria x realidade:

A função desse tópico é descrever o que acontece, com o circuito RC, na prática. Ou seja, mostrar que parte da teoria, de carga e descarga, por exemplo, não se aplica em situações reais.

Uma situação clássica, é que, teoricamente, devido ao formato da equação [10], o capacitor levaria um tempo infinito para completar seu processo de carga. Na prática, entretanto, um tempo “ $t = 5RC$ ” é suficiente para carregá-lo.

A principal observação a ser feita, que interfere diretamente na descrição do multivibrador, é a respeito da carga e descarga do capacitor. Ao contrário do que a teoria nos leva a crer, no multivibrador, por exemplo, o capacitor não se carrega e se descarrega completamente. Pode-se verificar, através do uso do osciloscópio, que, na realidade, o capacitor começa o processo de carga quando está com $\frac{1}{3}$ de sua capacidade completa, e, analogamente, inicia o processo de descarga quando está com $\frac{2}{3}$. O tempo de carga, do capacitor é dado pela equação [20], onde “ RC ” é a constante de tempo do circuito RC, “ V_1 ” a voltagem inicial e “ V_2 ” a voltagem final.

$$t = RC \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \text{ [20].}$$

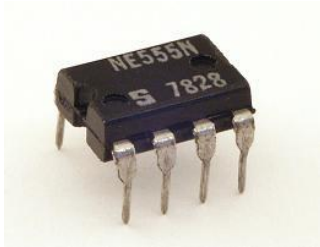
Sabendo-se que o capacitor armazena um potencial máximo entre suas placas dado por $V = \varepsilon C$, e que o processo de carga ocorre entre $\frac{1}{3}$ e $\frac{2}{3}$ da sua capacidade total, obtemos a equação [21].

$$t = RC \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = RC \ln\left(\frac{\frac{2\varepsilon C}{3}}{\frac{\varepsilon C}{3}}\right) = RC \ln(2) \rightarrow t = 0,69 RC \text{ [21].}$$

Observa-se que o tempo de carga, na equação [21], não depende da força eletromotriz da fonte. Ou seja, o tempo de carga e, analogamente, descarga do capacitor depende, exclusivamente, da constante de tempo “ $\tau = RC$ ”.

A equação [21] é freqüentemente utilizada pelos projetistas de circuitos eletrônicos. No projeto do multivibrador astável, por exemplo, ela será a responsável por fornecer o período de oscilação do sistema.

3 – Multivibradores:



Na eletrônica, de modo geral, os multivibradores são circuitos capazes de gerar ondas quadradas ou retangulares. “A circuit that is designed to go quickly from cutoff to saturation will produce a square or rectangular wave at its output”¹ (Um circuito que é projetado para alternar rapidamente entre a saturação e o corte, irá produzir uma onda quadrada ou retangular), essa passagem é o princípio de funcionamento dos multivibradores.

Os multivibradores são classificados de acordo com o número de estados estacionários do circuito, são eles astável (não possui estados estáveis), monoestável (possui um estado estável) e biestável (possui dois estados estáveis). Estudaremos agora o multivibrador astável.

a) Multivibrador astável:

Como o próprio nome propõe, e conforme afirmado acima, o multivibrador astável é um circuito que não possui estados estáveis, ou seja, é um circuito de funcionamento contínuo.

O multivibrador astável é composto por quatro resistores, dois capacitores e dois transistores, representado graficamente na figura 05. Os transistores funcionam como chaves elétricas, alternando o processo de carga e descarga dos capacitores. Esses, por sua vez, definem, através do seu tempo de carga, o período de oscilação do circuito. Os transistores utilizados nesse multivibrador serão do tipo NPN.

¹ Navy Electricity and Electronics Training Series – Module 9, page 108.

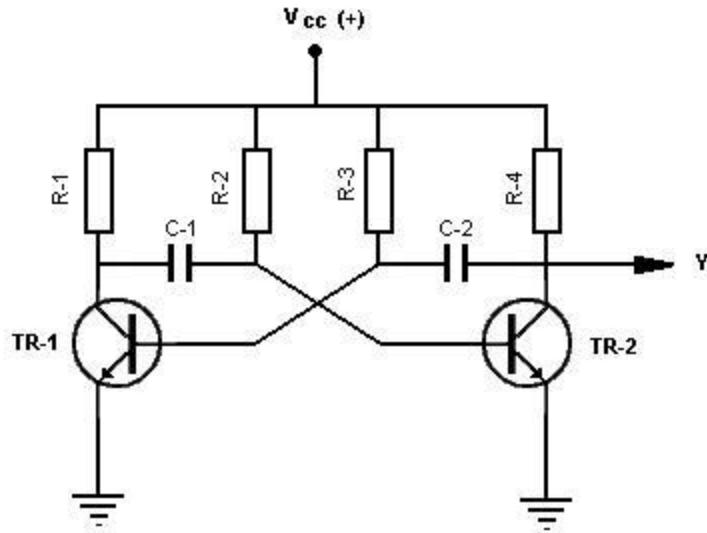


Figura 05: Circuito multivibrador astável.

No multivibrador, independente da simetria do circuito, na prática, sempre haverá uma pequena discrepância entre os valores dos componentes, o que fará com que ocorra um desequilíbrio e, conseqüentemente, um enquadramento inicial em um dos dois estados, “TR-1”, ou “TR-2”, saturado (conduzindo) e, respectivamente, “TR-2”, ou “TR-1”, cortado. A figura 06 representa o momento inicial em que “TR-1” está saturado.

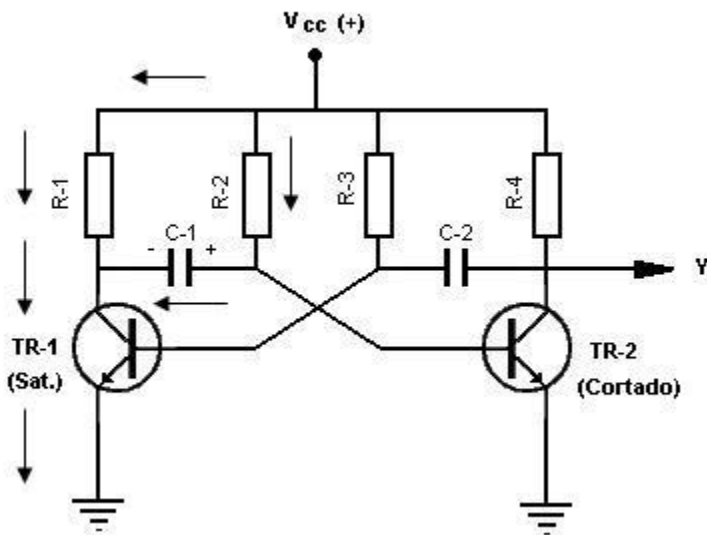


Figura 06: Instante inicial do multivibrador, “TR-1” saturado.

Conforme mostra a figura 06, o capacitor “C-1” inicia o seu processo de carga tendendo a “ $+V_{cc}$ ”, enquanto “C-2” tende a “ $-V_{cc}$ ”, ambos com constantes de tempo dadas por “ $\tau_1 = R_2C_1$ ” e “ $\tau_2 = R_4C_2$ ”. Pode-se observar, na figura 06, que o terminal direito de “C-1” vai ficando positivo com o passar do tempo. Quando “C-1” for suficientemente positivo, “TR-2” começa a conduzir e passa do corte à saturação. Assim que “TR-2” satura, o terminal direito de “C-2” é levado a “0 V”(zero volts), e, conseqüentemente, o terminal esquerdo levado a “ $-V_{cc}$ ”, causando assim o corte de “TR-1”.

Espelhando a figura 06, e através da mesma seqüência lógica, temos o segundo estado do multivibrador astável (figura 07).

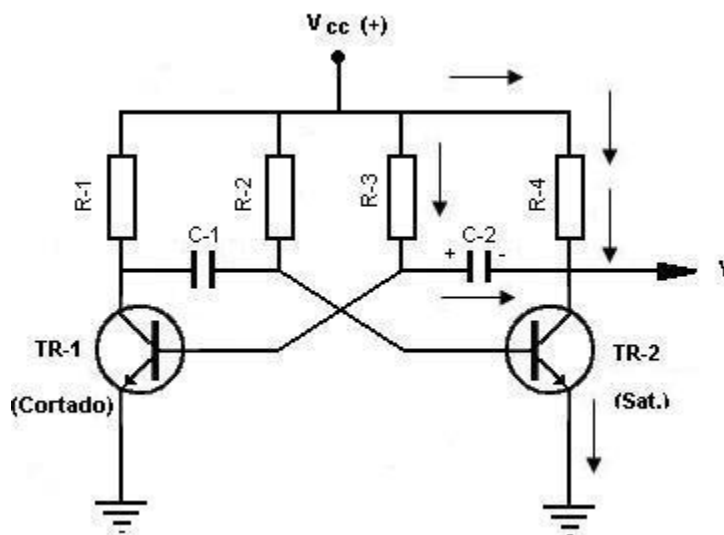


Figura 07: Instante logo após a saturação de “TR-2”

Agora “C-2” parte de “ $-V_{cc}$ ” e tende a “ $+V_{cc}$ ”, enquanto “C-1” tende a “ $-V_{cc}$ ”. Quando “C-2” for suficientemente positivo, “TR-1” volta a conduzir e, conseqüentemente, volta ao estado de saturação.

Como se pode observar, o circuito fica oscilando entre o corte e a saturação dos transistores. Para garantir que o circuito oscile livremente, conforme descrito acima, a

constante de tempo " τ_2 " deve ser suficientemente menor que " τ_1 ", assim quando "C-1" levar "TR-2" à saturação, situação inicial (figura 06), "C-2" já estará carregado com " $-V_{cc}$ ". Analogamente, agora no segundo estado (figura 07), a constante de tempo " $\tau_3 = R_3 C_2$ " deve ser suficientemente maior que " $\tau_4 = R_1 C_1$ ", pois assim quando "C-2" fazer "TR-1" saturar, "C-1" já estará carregado com " $-V_{cc}$ ".

O ciclo completo, entre os estados 1 (figura 06) e 2 (figura 07), ocorre num período " T " dado pela equação [22], onde " T_1 " é dado por "C-1" e " T_2 " por "C-2".

$$T = T_1 + T_2 \quad [22].$$

Sabendo que os períodos " T_1 " e " T_2 " são calculados a partir da equação [21], e utilizando a relação dada pela equação [22], temos:

$$T = T_1 + T_2 \rightarrow T = 0,69 R_2 C_1 + 0,69 R_3 C_2$$

$$\rightarrow T = 0,69 (R_2 C_1 + R_3 C_2) \quad [23], \text{ equação do período de oscilação do circuito.}$$

Para obter a frequência de oscilação do circuito, calcula-se o inverso do período.

$$f = \frac{1}{T} \rightarrow f = \frac{1}{0,69 (R_2 C_1 + R_3 C_2)} \quad [24], \text{ equação da frequência de oscilação do circuito.}$$

A saída "Y" (figura 05) gera uma onda retangular ou quadrada, ora a tensão é nula, outrora vale " $+V_{cc}$ ". Uma pequena distorção, no processo de subida da tensão, pode ocorrer devido ao tempo de carga do capacitor.

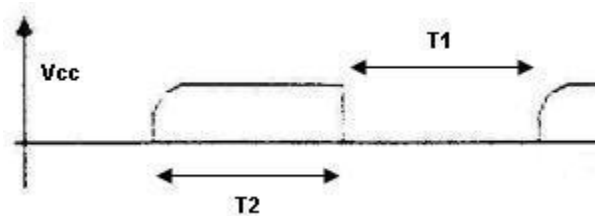


Figura 08: Onda retangular com pequena distorção na subida da tensão.

a) Astável simétrico:

No multivibrador astável simétrico tem-se que, " $R_2 = R_3$ ", " $R_1 = R_4$ " e " $C_1 = C_2$ ". Uma consequência destas condições é que " $T_1 = T_2$ ", ou seja, a onda de saída do circuito (figura 08) estará 50% do tempo em " V_{cc} " e os outros 50% em "0".

Pode-se simplificar a equação [23], gerando assim a equação [24].

$$T = 0,69 (R_2 C_1 + R_3 C_2) \rightarrow T = 0,69 (R_2 C_1 + R_2 C_1) \rightarrow T = 0,69 (2 R_2 C_1)$$

$$\rightarrow T = 1,38 (R_2 C_1) \text{ [24], equação do período de oscilação do astável simétrico.}$$

Novamente, através da relação entre frequência e período, temos:

$$f = \frac{1}{T} \rightarrow f = \frac{1}{1,38 (R_2 C_1)} \text{ [25], equação da frequência de oscilação do astável}$$

simétrico.

b) Distorção de onda:

Para evitar distorções, como as da figura 09, nos astáveis simétricos, devem ser tomados alguns cuidados na escolha dos valores dos componentes do circuito.

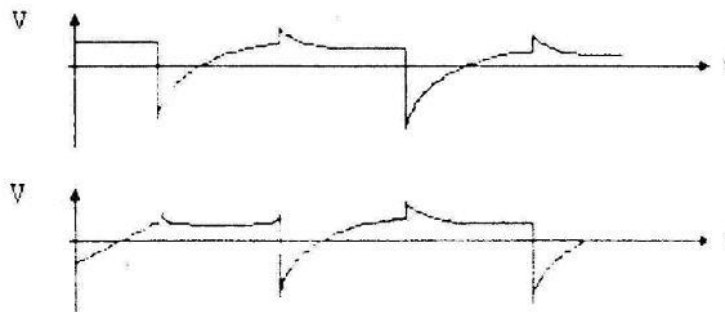


Figura 09: Distorções no sinal de saída do multivibrador.

Uma primeira relação que deve ser respeitada é dada pela equação [26].

$$0,69 R_2 C_1 > 4 R_1 C_1 \quad [26].$$

O transistor que conduz deve estar saturado, o que implica na relação dada pela equação [27], onde " β_{min} " é uma propriedade intrínseca do transistor (fator de multiplicação da corrente na base).

$$R_2 < \beta_{min} R_1 \quad [27].$$

Reorganizando a equação [26], e aplicando nela a equação [27], temos:

$$0,69 R_2 C_1 > 4 R_1 C_1 \rightarrow R_2 > 5,8 R_1 \rightarrow 5,8 R_1 < R_2 < \beta_{min} R_1 \quad [28]$$

Um transistor comum tem " β_{min} " próximo de 100.

Para minimizar as distorções de onda, é recomendado o uso da equação [28] no projeto de qualquer multivibrador astável simétrico.

4 – Projetando o multivibrador astável:

Alguns problemas podem surgir durante a experimentação do multivibrador, sendo a função desse tópico abranger grande parte deles, assim como, guiar o mais leigo a um processo de construção eficiente.

a) Material:

O circuito multivibrador astável, devido ao pequeno número de componentes eletrônicos, pode ser construído em cima de um circuito impresso ou de diversos outros materiais (madeira, polietileno de alto impacto, acrílico, dentre outros).

O material necessário para a construção são basicamente os componentes eletrônicos, e são eles: dois capacitores, dois resistores de base, dois resistores do coletor, dois transistores e dois LEDs. De modo que os valores dos componentes respeitem as relações citadas no item anterior.

b) Freqüências:

Um ponto fundamental no projeto de um multivibrador astável é calcular o valor da freqüência de oscilação do circuito.

Freqüência é definida como o número de ciclos por segundo (Hz). Se o circuito tiver uma freqüência muito alta, da ordem de 100Hz por exemplo, ficará impossível a visualização das piscadas do LED, pois ele piscará cem vezes em um segundo.

O ideal é conseguir obter uma freqüência entre zero e três Hertz, pois assim ficarão visíveis ao olho humano as piscadas do LED. Respeitando sempre as relações entre os valores dos componentes.

c) Configuração Darlington:

Em alguns casos, a amplificação ou ganho de um determinado transistor não é suficiente para fazer o multivibrador funcionar corretamente. Logo, pode ser necessário o aumento desse ganho, esta melhoria no transistor consiste na associação de dois transistores que damos o nome de Darlington.

“O arranjo desta configuração é conectar dois transistores do mesmo tipo de maneira que se o ganho de corrente de um transistor for β_1 e o do outro for β_2 então o

ganho de corrente do arranjo será igual a $\beta_D = \beta_1 \beta_2$. A conexão Darlington atua como um novo dispositivo, cujo ganho de corrente é o produto dos ganhos individuais.”²

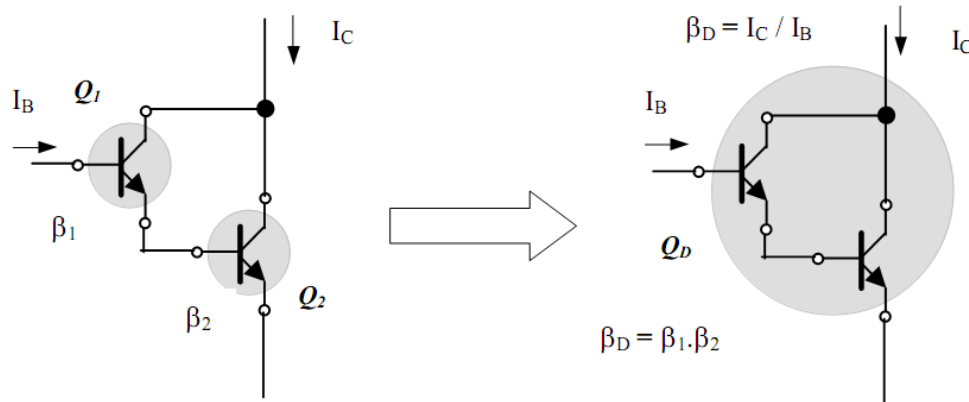


Figura 10: Representação gráfica da configuração Darlington.

Ao fim da apostila serão sugeridos alguns valores para os componentes eletrônicos, sendo necessário um ganho de corrente para o funcionamento pleno, ou seja, usaremos a configuração Darlington na sugestão de componentes.

d) Oscilações variáveis (potenciômetro):

Conforme visto nos itens anteriores, a frequência do circuito é dada pelo inverso da soma dos períodos dos núcleos RC do multivibrador. Ou seja, se mudarmos o valor de uma, ou das duas resistências de base do multivibrador, estaremos mudando também o valor da frequência do sistema.

Podemos colocar um potenciômetro em série com alguma das resistências de base do circuito, e assim mudar gradativamente o valor da resistência e, conseqüentemente, a frequência do multivibrador.

² <http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ee640/7a%20Aula.pdf>

De acordo com a equação [23], temos:

$$T = 0,69 (R_2 C_1 + R_3 C_2) \text{ [23].}$$

Logo se R_3 , ou R_2 , for variável, o período de oscilação do circuito será também variável e, portanto, a frequência será, também, variável.

Fica interessante ligar um osciloscópio ao circuito nessa configuração, pois assim pode-se observar a variação da frequência diretamente na tela do osciloscópio, pela contração ou expansão da onda quadrada.

e) Montagem:

A função desse tópico é, basicamente, fornecer uma sugestão para os valores dos componentes, reduzindo assim a chance de erros de projeto.

Segue abaixo a sugestão para os componentes eletrônicos, e fonte, do multivibrador:

→ Resistências de base (R_2, R_3) = 47k Ω ;

→ Resistências do coletor (R_1, R_4) = 2,2k Ω ;

→ Capacitâncias (C_1, C_2) = 10 μ F;

→ Transistores NPN, BC 517, associados em Darlington (2 conjuntos com 2 transistores em cada);

→ Dois LEDs comuns de qualquer cor;

→ Fonte de aproximadamente 9V.

Quanto aos LEDs, uma boa dica é inseri-los entre a resistência do coletor e o próprio coletor, ou, indiferentemente, em série com o emissor final.

5 – Referências bibliográficas:

● Web-sites:

- <http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/227>;
- <http://www.eletronica24h.com.br/cursoEI/cursoEI2/aulas/Aula04.html>;
- <http://www.ifi.unicamp.br/leb/f32909/F329-%20EXP09-2009-circuito%20RC.pdf>;
- http://flip.flop.nom.br/circuitos/multivibrador_astavel;
- http://www.mauajr.com/alunos/listas/Del_471_analogico/P1/astvI00.pdf;
- <http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ee610/10a%20Aula.pdf>;
- <http://www.slideshare.net/jimnaturesa/multivibradores-presentation>;
- <http://pt.wikipedia.org/wiki/Multivibrador>.

● Apostilas e livros:

- George Mann - ABC dos transistores – 2ª Ed. Atualizada – (Fonte incomparável sobre os transistores. Através desse livro pude entender o funcionamento dos mesmos);
- David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker – Fundamentos da Física, Vol.3 – 8ª Ed. – (Principal fonte sobre circuitos RC);
- Navy Electricity and Electronics Training Series – Module 9 – (Material base para elaboração da apostila, apesar de estar escrito em outra língua, contribui de forma ímpar para a elaboração da mesma).

8) Anexo:



**NONRESIDENT
TRAINING
COURSE**

SEPTEMBER 1998



Navy Electricity and Electronics Training Series

Module 9—Introduction to Wave- Generation and Wave-Shaping

NAVEDTRA 14181

beam to move in both a vertical and horizontal (diagonal) direction at the same time. This then is how a sawtooth wave is made to appear on an oscilloscope. You should refer to NEETS, Module 6, *Electronic Emission, Tubes, and Power Supplies*, Chapter 2, for a review of oscilloscopes.

Trapezoidal Wave

A TRAPEZOIDAL wave looks like a sawtooth wave on top of a square or rectangular wave, as shown in figure 3-1, view (E). The leading edge of a trapezoidal wave is called the JUMP voltage. The next portion of the wave is the linear rise or SLOPE. The trailing edge is called the FALL or DECAY. A trapezoidal wave is used to furnish deflection current in the electromagnetic cathode ray tube and is found in television and radar display systems. Electromagnetic cathode ray tubes use coils for the deflection system, and a linear rise in current is required for an accurate horizontal display. The square or rectangular wave portion provides the jump voltage for a linear rise in current through the resistance of the coil. This will be explained further in a discussion of the trapezoidal sweep generator.

Triggers

A trigger is a very narrow pulse, as shown in figure 3-1, view (F). Trigger pulses are normally used to turn other circuits on or off.

WAVEFORM GENERATOR

Nonsinusoidal oscillators generate complex waveforms such as those just discussed. Because the outputs of these oscillators are generally characterized by a sudden change, or relaxation, these oscillators are often called RELAXATION OSCILLATORS. The pulse repetition rate of these oscillators is usually governed by the charge and discharge timing of a capacitor in series with a resistor. However, some oscillators contain inductors that, along with circuit resistance, affect the output frequency. These RC and LC networks within oscillator circuits are used for frequency determination. Within this category of relaxation oscillators are MULTIVIBRATORS, BLOCKING OSCILLATORS, and SAWTOOTH- and TRAPEZOIDAL-WAVE GENERATORS.

Many electronic circuits are not in an "on" condition all of the time. In computers, for example, waveforms must be turned on and off for specific lengths of time. The time intervals vary from tenths of microseconds to several thousand microseconds. Square and rectangular waveforms are normally used to turn such circuits on and off because the sharp leading and trailing edges make them ideal for timing purposes.

MULTIVIBRATORS

The type of circuit most often used to generate square or rectangular waves is the multivibrator. A multivibrator, as shown in figure 3-3, is basically two amplifier circuits arranged with regenerative feedback. One of the amplifiers is conducting while the other is cut off.

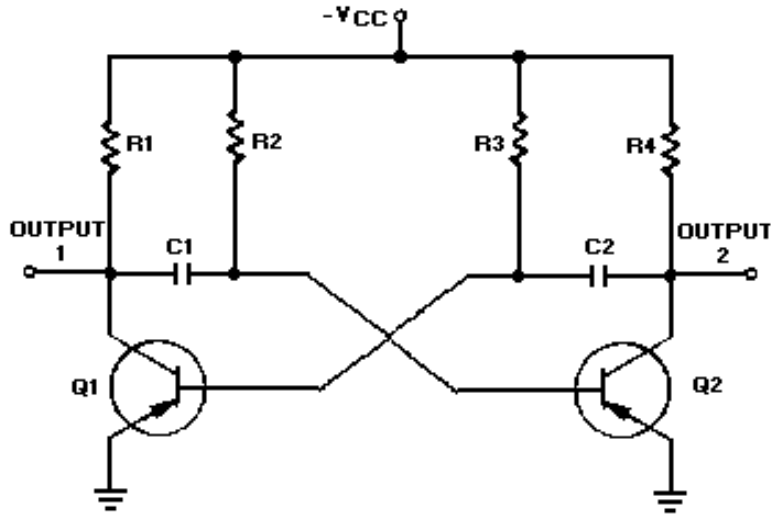


Figure 3-3.—Astable Multivibrator.

When an input signal to one amplifier is large enough, the transistor can be driven into cutoff, and its collector voltage will be almost V_{CC} . However, when the transistor is driven into saturation, its collector voltage will be about 0 volts. A circuit that is designed to go quickly from cutoff to saturation will produce a square or rectangular wave at its output. This principle is used in multivibrators.

Multivibrators are classified according to the number of steady (stable) states of the circuit. A steady state exists when circuit operation is essentially constant; that is, one transistor remains in conduction and the other remains cut off until an external signal is applied. The three types of multivibrators are the ASTABLE, MONOSTABLE, and BISTABLE.

The astable circuit has no stable state. With no external signal applied, the transistors alternately switch from cutoff to saturation at a frequency determined by the RC time constants of the coupling circuits.

The monostable circuit has one stable state; one transistor conducts while the other is cut off. A signal must be applied to change this condition. After a period of time, determined by the internal RC components, the circuit will return to its original condition where it remains until the next signal arrives.

The bistable multivibrator has two stable states. It remains in one of the stable states until a trigger is applied. It then FLIPS to the other stable condition and remains there until another trigger is applied. The multivibrator then changes back (FLOPS) to its first stable state.

- Q1. What type circuit is used to produce square or rectangular waves?*
- Q2. What type of multivibrator does not have a stable state?*
- Q3. What type of multivibrator has one stable state?*
- Q4. What type of multivibrator has two stable states?*

Astable Multivibrator

An astable multivibrator is also known as a FREE-RUNNING MULTIVIBRATOR. It is called free-running because it alternates between two different output voltage levels during the time it is on. The

output remains at each voltage level for a definite period of time. If you looked at this output on an oscilloscope, you would see continuous square or rectangular waveforms. The astable multivibrator has two outputs, but NO inputs.

Let's look at the multivibrator in figure 3-3 again. This is an astable multivibrator. The astable multivibrator is said to oscillate. To understand why the astable multivibrator oscillates, assume that transistor Q1 saturates and transistor Q2 cuts off when the circuit is energized. This situation is shown in figure 3-4. We assume Q1 saturates and Q2 is in cutoff because the circuit is symmetrical; that is, $R1 = R4$, $R2 = R3$, $C1 = C2$, and $Q1 = Q2$. It is impossible to tell which transistor will actually conduct when the circuit is energized. For this reason, either of the transistors may be assumed to conduct for circuit analysis purposes.

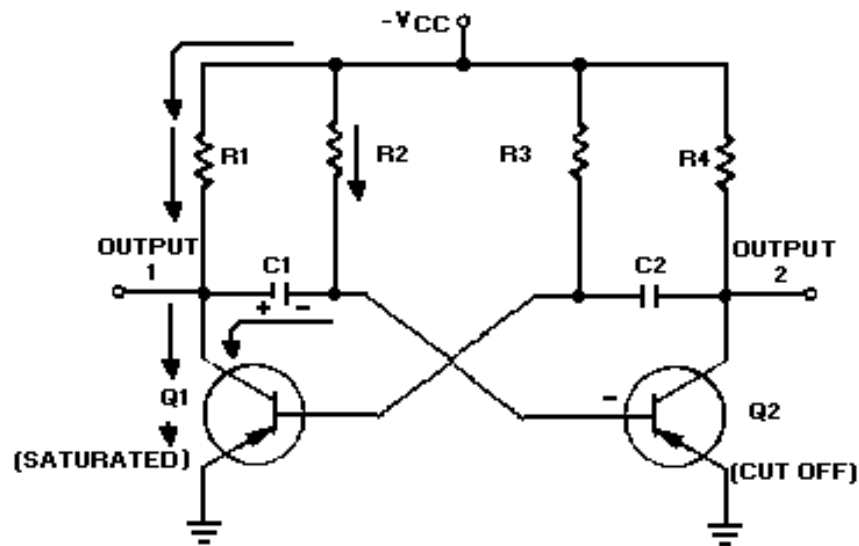


Figure 3-4.—Astable multivibrator (Q1 saturated).

Essentially, all the current in the circuit flows through $Q1$; $Q1$ offers almost no resistance to current flow. Notice that capacitor $C1$ is charging. Since $Q1$ offers almost no resistance in its saturated state, the rate of charge of $C1$ depends only on the time constant of $R2$ and $C1$ (recall that $TC = RC$). Notice that the right-hand side of capacitor $C1$ is connected to the base of transistor $Q2$, which is now at cutoff.

Let's analyze what is happening. The right-hand side of capacitor $C1$ is becoming increasingly negative. If the base of $Q2$ becomes sufficiently negative, $Q2$ will conduct. After a certain period of time, the base of $Q2$ will become sufficiently negative to cause $Q2$ to change states from cutoff to conduction. The time necessary for $Q2$ to become saturated is determined by the time constant $R2C1$.

The next state is shown in figure 3-5. The negative voltage accumulated on the right side on capacitor $C1$ has caused $Q2$ to conduct. Now the following sequence of events takes place almost instantaneously. $Q2$ starts conducting and quickly saturates, and the voltage at output 2 changes from approximately $-V_{CC}$ to approximately 0 volts. This change in voltage is coupled through $C2$ to the base of $Q1$, forcing $Q1$ to cutoff. Now $Q1$ is in cutoff and $Q2$ is in saturation. This is the circuit situation shown in figure 3-6.

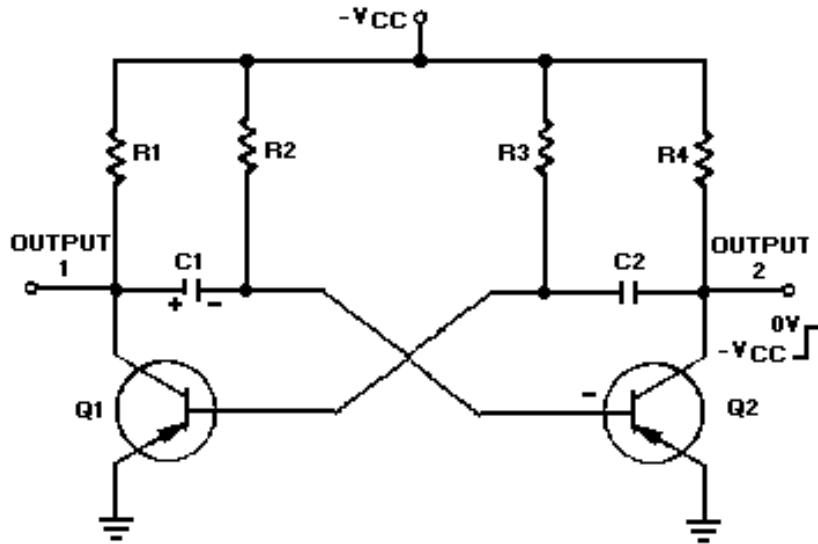


Figure 3-5.—Astable multivibrator.

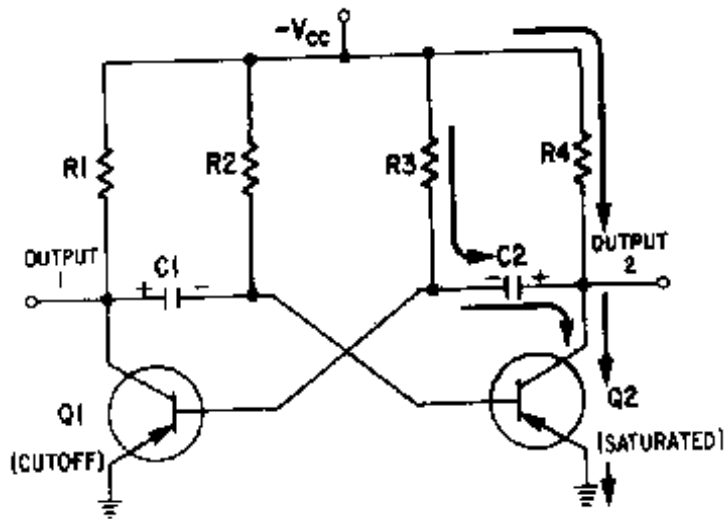


Figure 3-6.—Astable multivibrator. (Q2 saturated).

Notice that figure 3-6 is the mirror image of figure 3-4. In figure 3-6 the left side of capacitor C2 becomes more negative at a rate determined by the time constant $R3C2$. As the left side of C2 becomes more negative, the base of Q1 also becomes more negative. When the base of Q1 becomes negative enough to allow Q1 to conduct, Q1 will again go into saturation. The resulting change in voltage at output 1 will cause Q2 to return to the cutoff state.

Look at the output waveform from transistor Q2, as shown in figure 3-7. The output voltage (from either output of the multivibrator) alternates from approximately 0 volts to approximately $-V_{CC}$, remaining in each state for a definite period of time. The time may range from a microsecond to as much as a second or two. In some applications, the time period of higher voltage ($-V_{CC}$) and the time period of lower voltage (0 volts) will be equal. Other applications require differing higher- and lower-voltage times. For example, timing and gating circuits often have different pulse widths as shown in figure 3-8.

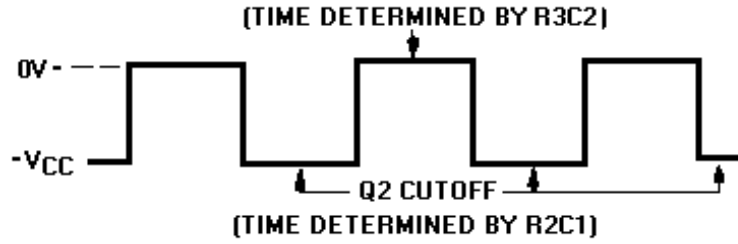


Figure 3-7.—Square wave output from Q2.

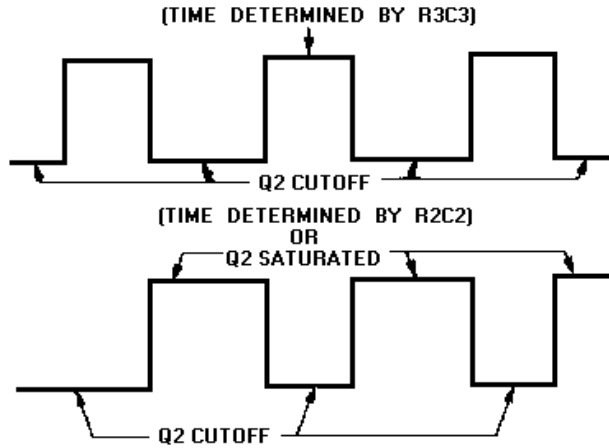


Figure 3-8.—Rectangular waves.

FREQUENCY STABILITY.—Some astable multivibrators must have a high degree of frequency stability. One way to obtain a high degree of frequency stability is to apply triggers. Figure 3-9, view (A), shows the diagram of a triggered, astable multivibrator. At time T_0 , a negative input trigger to the base of Q1 (through C1) causes Q1 to go into saturation, which drives Q2 to cutoff. The circuit will remain in this condition as long as the base voltage of Q2 is positive. The length of time the base of Q2 will remain positive is determined by C3, R3, and R6. Observe the parallel paths for C3 to discharge.

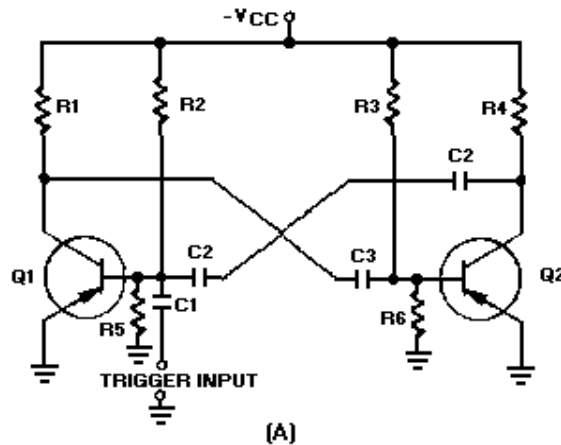


Figure 3-9A.—Triggered astable multivibrator and output.

View (B) of figure 3-9 shows the waveforms associated with the circuit. At time T1, Q2 comes out of cutoff and goes into saturation. Also, Q1 is caused to come out of saturation and is cut off. The base voltage waveform of Q1 shows a positive potential that is holding Q1 at cutoff. This voltage would normally hold Q1 at cutoff until a point between T2 and T3. However, at time T2 another trigger is applied to the base of Q1, causing it to begin conducting. Q1 goes into saturation and Q2 is caused to cut off. This action repeats each time a trigger (T2, T4, T6) is applied.

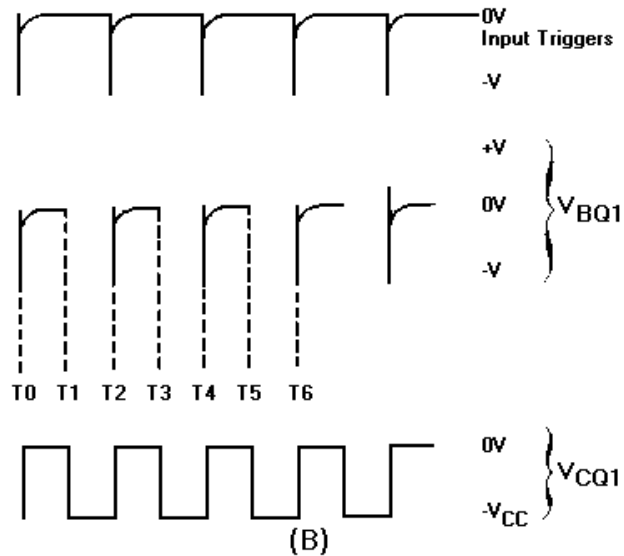


Figure 3-9B.—Triggered astable multivibrator and output.

The prt of the input triggers must be shorter than the natural free-running prt of the astable multivibrator, or the trigger prf must be slightly higher than the free-running prf of the circuit. This is to make certain the triggers control the prt of the output.

Monostable Multivibrator

The monostable multivibrator (sometimes called a ONE-SHOT MULTIVIBRATOR) is a square- or rectangular-wave generator with just one stable condition. With no input signal (quiescent condition) one amplifier conducts and the other is in cutoff. The monostable multivibrator is basically used for pulse stretching. It is used in computer logic systems and communication navigation equipment.

The operation of the monostable multivibrator is relatively simple. The input is triggered with a pulse of voltage. The output changes from one voltage level to a different voltage level. The output remains at this new voltage level for a definite period of time. Then the circuit automatically reverts to its original condition and remains that way until another trigger pulse is applied to the input. The monostable multivibrator actually takes this series of input triggers and converts them to uniform square pulses, as shown in figure 3-10. All of the square output pulses are of the same amplitude and time duration.

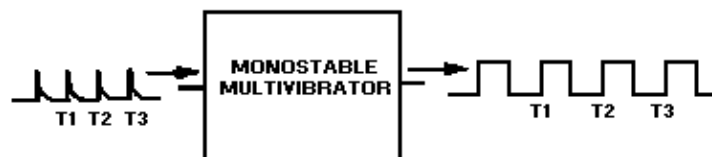
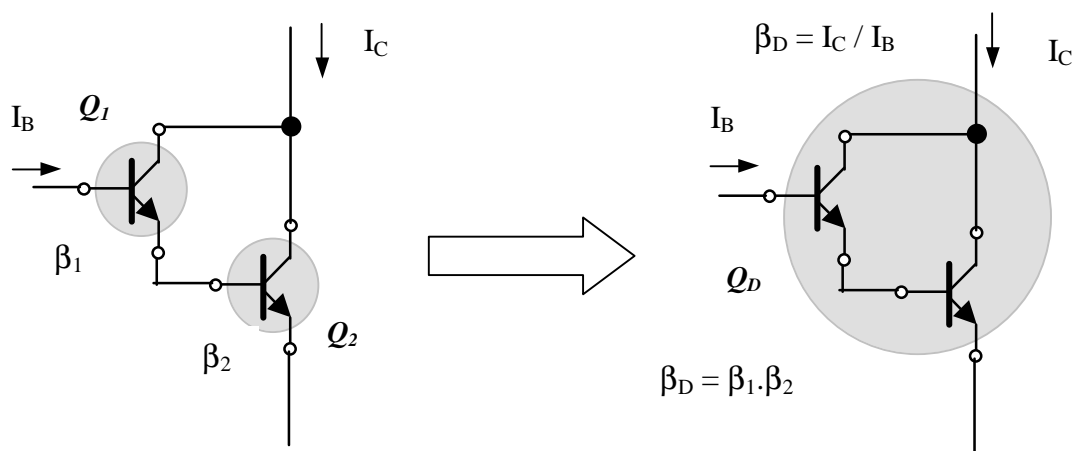


Figure 3-10.—Monostable multivibrator block diagram.

✓ Configuração Darlington

A principal função desta configuração é conseguir alta impedância de entrada e alto ganho de corrente.

O arranjo desta configuração é conectar dois transistores do mesmo tipo de maneira que se o ganho de corrente de um transistor for β_1 e o do outro for β_2 então o ganho de corrente do arranjo será igual a $\beta_D = \beta_1 \cdot \beta_2$. A conexão Darlington atua como um novo dispositivo, cujo ganho de corrente é o produto dos ganhos individuais. A figura abaixo mostra esta configuração.



Obs: 1) Esta configuração pode ser feita também com transistores PNP.

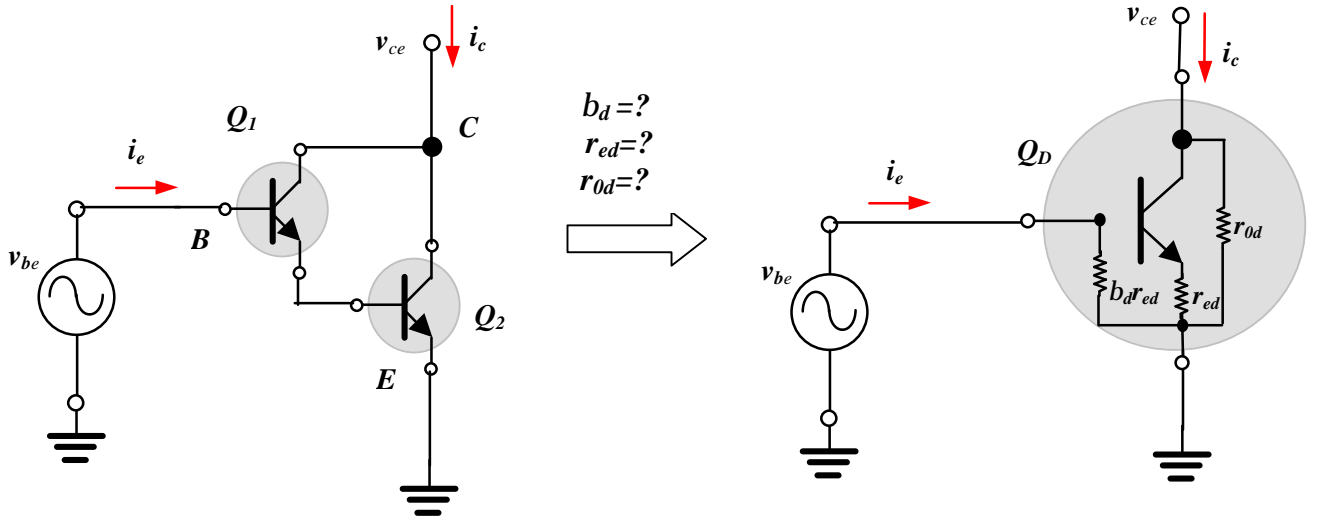
2) Como o transistor Q_1 opera com baixas corrente, e comumente encontrado na prática um resistor entre a base e o emissor de Q_2 , assim β_1 não é reduzido.

A figura abaixo fornece as especificações de data sheets para um par Darlington típico.

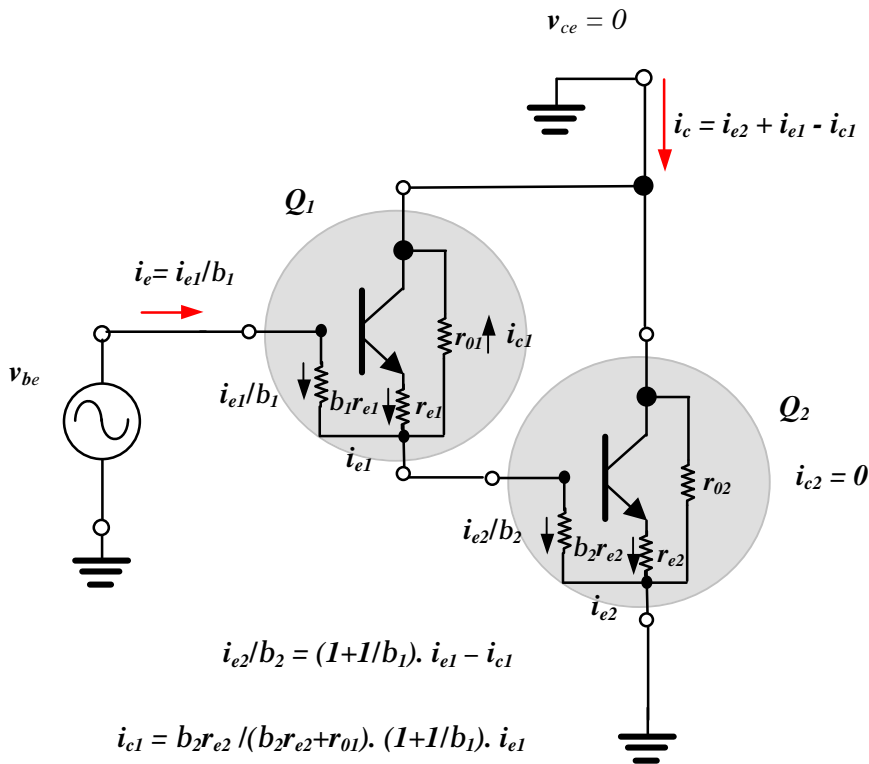
Tipo 2N999 – Transistor Darlington NPN

Parâmetro	Condições de teste	Mim.	Max.
V_{BE}	$I_C = 100mA$		1,8V
h_{FE}	$I_C = 10mA$	4000	
(β_D)	$I_C = 100mA$	7000	70.000

Podemos representar esta conexão da mesma forma que fazemos para um transistor. Para isto, considere a figura abaixo e vamos determinar a sua impedância de entrada, a sua transresistância ($r_{ed} = v_{be} / i_c$ com $v_{ce} = 0$), o seu ganho de corrente AC ($b_d = i_c / i_e$ com $v_{ce} = 0$) e sua impedância de saída (r_{od}).



Utilizando o modelo do transistor para determinar inicialmente o ganho de corrente AC (b_d) e a transresistância do par. Então,



Da figura temos, a corrente de entrada é dada por:

$$i_e = i_{e1}/b_1 \quad (104)$$

A corrente i_{c1} é igual a corrente que sai do emissor de Q_1 ($(1+1/b_1) \cdot i_{e1}$) dividida pelo divisor resistivo r_{01} e $b_2 r_{e2}$ então,

$$i_{c1} = b_2 r_{e2} / (b_2 r_{e2} + r_{01}) \cdot (1 + 1/b_1) \cdot i_{e1} \quad (105)$$

Esta equação pode ser bem aproximada usando o fato de que:

$$b_2 r_{e2} = b_2 V_T / I_{C2} \text{ mas}$$

$$I_{C2} = b_{2DC} I_{B2} = b_{2DC} I_{E1} \gg b_{2DC} I_{C1} \gg b_2 I_{C1} \text{ logo}$$

$$b_2 r_{e2} \gg V_T / I_{C1} = r_{e1} \quad (106)$$

Substituindo (106) em (105) resulta,

$$i_{c1} \gg r_{e1} / (r_{e1} + r_{01}) \cdot (1 + 1/b_1) \cdot i_{e1}$$

$$i_{c1} \gg r_{e1} / r_{01} \cdot i_{e1} \quad (107)$$

A corrente de base de Q_2 é dada por:

$$i_{e2}/b_2 = (1 + 1/b_1) \cdot i_{e1} - i_{c1}$$

$$i_{e2} \gg b_2 i_{e1} - b_2 i_{c1} \quad (108)$$

Substituindo (107) em (108) resulta,

$$i_{e2} \gg b_2 (1 - r_{e1} / r_{01}) \cdot i_{e1} \gg b_2 i_{e1} \quad (109)$$

A corrente de saída é dada por:

$$i_c = i_{e2} + i_{e1} - i_{c1} \quad (110)$$

Substituindo (107) e (109) em (110) resulta,

$$i_c \gg b_2 i_{e1} + i_{e1} - r_{e1} / r_{01} \cdot i_{e1} = (b_2 + 1 - r_{e1} / r_{01}) \cdot i_{e1}$$

$$i_c \gg b_2 \cdot i_{e1} \quad (111)$$

Substituindo (104) em (111) resulta,

$$b_d = i_c / i_e \gg b_1 \cdot b_2 \quad (112)$$