

1 – Título

Prática 1 – Aplicações das Funções Lógicas

2 – Objetivos

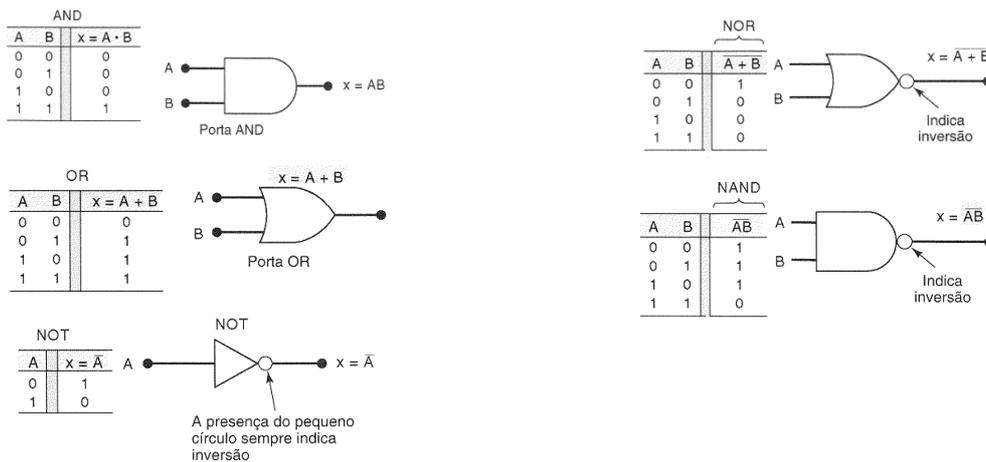
Identificação do encapsulamento dos Circuitos Integrados (CIs) que serão utilizados no decorrer das aulas práticas, interpretação e leitura de folhas de especificações. Destacando-se também a necessidade de todos os circuitos integrados serem alimentados com as tensões corretas, para que possam funcionar adequadamente.

Aplicação dos conceitos aprendidos sobre simplificação de circuitos (Mapas de Karnaugh) e implementação de funções lógicas.

3 - Fundamentos Teóricos

Revisão

Funções Lógicas Básicas (Fig. 1):



Mapas de Karnaugh

O processo para realização de uma função através de um circuito digital começa na descrição verbal do circuito (descrição do comportamento de suas possíveis saídas, em função das diversas combinações possíveis de seus sinais de entrada), a partir do que é possível montar sua tabela verdade. A partir da tabela verdade é possível criar os mapas de Karnaugh (Mapas K), que são utilizados para simplificação da função lógica original. A cada posição do Mapa K corresponde uma posição da tabela verdade. Os mapas K são preenchidos com "0" ou com "1", de acordo com sua tabela verdade. Quando existe uma posição que não é referenciada na tabela verdade, dizemos que esta posição é "don'tcare" ("não importa"), sendo preenchida com uma letra X. Esta marcação permite que ela assumo o valor de "0" ou de "1", de acordo com a simplificação a ser adotada. Ao lado, um exemplo de Mapa K para 4 variáveis. Obs: Ao analisar o Mapa K, devemos escolher as expressões que retornem um menor número de termos, simplificando assim a lógica combinacional.

	$\bar{C}\bar{D}$	$\bar{C}D$	CD	$C\bar{D}$
$\bar{A}\bar{B}$	0	1	0	0
$\bar{A}B$	0	1	0	0
AB	0	1	1	0
$A\bar{B}$	0	0	0	0

Quando existe uma posição que não é referenciada na tabela verdade, dizemos que esta posição é "don'tcare" ("não importa"), sendo preenchida com uma letra X. Esta marcação permite que ela assumo o valor de "0" ou de "1", de acordo com a simplificação a ser adotada. Ao lado, um exemplo de Mapa K para 4 variáveis. Obs: Ao analisar o Mapa K, devemos escolher as expressões que retornem um menor número de termos, simplificando assim a lógica combinacional.

4 – Trabalho preparatório

Projeto de um sistema de aquecimento de água

Um determinado processo industrial deve utilizar uma quantidade pré-determinada de água aquecida a uma temperatura específica, superior à temperatura ambiente. Para isto, o tanque onde a água será armazenada e aquecida é dotado de dois sensores de nível: o sensor de nível mínimo (LL) e o sensor de nível máximo (LH). Além disto, existe no tanque um sensor de temperatura (T), que deverá indicar ao sistema se a temperatura atingiu o patamar desejado. Existem no tanque ainda duas válvulas, uma de entrada (VENT) e uma de saída (VS), além de um aquecedor (AQ). O sistema é ilustrado na Fig. 2. Uma chave (S), não mostrada na figura, deve ser utilizada para suspender o processo de saída de água, o que poderá ser eventualmente necessário.

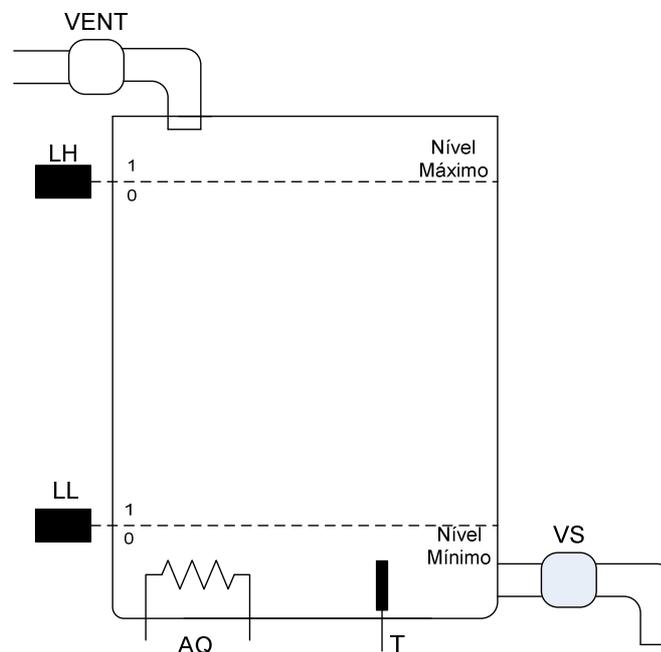


Fig. 2 – O sistema de aquecimento de água.

A operação deste sistema se dá como segue:

- Se estiver com o nível igual ou inferior ao mínimo, o tanque recebe água à temperatura ambiente, através de VENT. A válvula deve permanecer aberta até o reservatório atingir o nível máximo, quando então é fechada.
- Depois de alcançado o nível máximo do reservatório, o aquecedor AQ deve ser ligado, até que a temperatura da água atinja o valor desejado.
- Após atingir o valor de temperatura especificado, o tanque passa a se descarregar através de VS, fornecendo assim a água na temperatura desejada às demais etapas do processo. Isto ocorre até que o nível atinja novamente o valor mínimo, quando então o processo se reinicia automaticamente. Lembrar que, nesta etapa, o aquecedor já foi desligado.
- A chave S, quando ligada (ON), suspende a saída de líquido do reservatório (na etapa de descarga, logicamente). Ela não tem influência sobre a válvula de entrada nem sobre o aquecedor.

Universidade Federal de Juiz de Fora

Considere que o tanque possui isolamento térmico suficiente para não permitir que a água esfrie durante a fase de descarga do reservatório, mesmo quando a chave S suspender o processo.

Para projetar um circuito lógico para um sistema de controle, deve-se primeiro determinar o número de variáveis de entrada e o número de variáveis de saída. Após, deve-se construir uma tabela com todas as condições de projeto e a partir daí simplificar as funções de saída utilizando os Mapas K para finalmente obtermos o circuito real.

Tanto na tabela-verdade como no mapa-K, não desprezar as condições *don't care*. Pense naquelas condições que, pelas características do problema, não irão ocorrer. Isto simplifica consideravelmente o projeto.

Os elementos indicados como sensores (LL, LH e T) são considerados sinais de entrada, assim como a chave S. Os sinais de saída são aqueles que podem atuar efetivamente no processo de modo a alterar sua situação. No caso, são os sinais de comando das válvulas (VENT e VS) e do aquecedor (AQ).

Tab. 1 – Descrição das entradas.

Entradas	Nível lógico	Condição
LL (sensor de nível baixo)	1	Sensor está imerso
	0	Sensor não está imerso
LH (sensor de nível alto)	1	Sensor está imerso
	0	Sensor não está imerso
T (sensor de temperatura)	1	Temperatura acima do limiar
	0	Temperatura abaixo do limiar
S (chave)	1	Chave ligada (ON)
	0	Chave desligada (OFF)

Tab. 2 – Descrição das saídas.

Saídas	Nível lógico	Condição
VENT (válvula de entrada)	1	Válvula aberta
	0	Válvula fechada
VS (válvula de saída)	1	Válvula aberta
	0	Válvula fechada
AQ (aquecedor)	1	Aquecedor ligado
	0	Aquecedor desligado

Tab. 3 – Tabela-verdade do sistema.

Entradas				Saídas		
LL (A)	LH (B)	T (C)	S (D)	VENT	VS	AQ
0	0	0	0			
0	0	0	1			
0	0	1	0			
0	0	1	1			
0	1	0	0			
0	1	0	1			
0	1	1	0			
0	1	1	1			
1	0	0	0			
1	0	0	1			
1	0	1	0			
1	0	1	1			
1	1	0	0			
1	1	0	1			
1	1	1	0			
1	1	1	1			

Mapas K:

VENT

	$\bar{C}\bar{D}$	$\bar{C}D$	CD	$C\bar{D}$
$\bar{A}\bar{B}$				
$\bar{A}B$				
AB				
$A\bar{B}$				

VS

	$\bar{C}\bar{D}$	$\bar{C}D$	CD	$C\bar{D}$
$\bar{A}\bar{B}$				
$\bar{A}B$				
AB				
$A\bar{B}$				

AQ

	$\bar{C}\bar{D}$	$\bar{C}D$	CD	$C\bar{D}$
$\bar{A}\bar{B}$				
$\bar{A}B$				
AB				
$A\bar{B}$				

5 – Execução

Realizar a montagem em sala de aula, simulando os sensores por meio das chaves virtuais do módulo Elvis, e visualizando as saídas através dos LEDs do módulo.

Importante: tenha em mente que você terá à disposição apenas portas AND e OR de duas entradas, além dos inversores.

6 - Relatório e conclusões

Deverá ser apresentado de acordo com o que foi estabelecido, onde deve constar:

- ✓ A tabela-verdade obtida para o problema, os Mapas K e as simplificações adotadas.
- ✓ Uma figura representando o respectivo circuito lógico utilizado e um diagrama dispondo quais circuitos integrados foram utilizados, inclusive o nome e as pinagens que contém estes CIs.
- ✓ Como conclusão, deve ser discutida a validade dos métodos empregados para a resolução dos problemas.

7 – Bibliografia

TOCCI, Ronald J. ; WIDMER, Neal S.; MOSS, Gregory L. – “Sistemas Digitais – Princípios e Aplicações”. 10ª ed. Prentice-Hall.

1- Título

Prática 2 – Contador Decimal.

2- Objetivo

Verificação do funcionamento de um contador decimal TTL. Aplicações na contagem de eventos e divisão de frequência.

3- Fundamentos teóricos

Contadores são circuitos extensamente utilizados em Eletrônica Digital. Aplicações típicas incluem a contagem de eventos, a divisão de frequências e mesmo aplicações de temporização. Muitas vezes os contadores são blocos constituintes de circuitos mais complexos.

O 74LS90 é um contador de décadas (decimal) de uso bastante difundido, e será utilizado nesta atividade. Sua lógica interna e pinagem são fornecidas na Fig. 1.

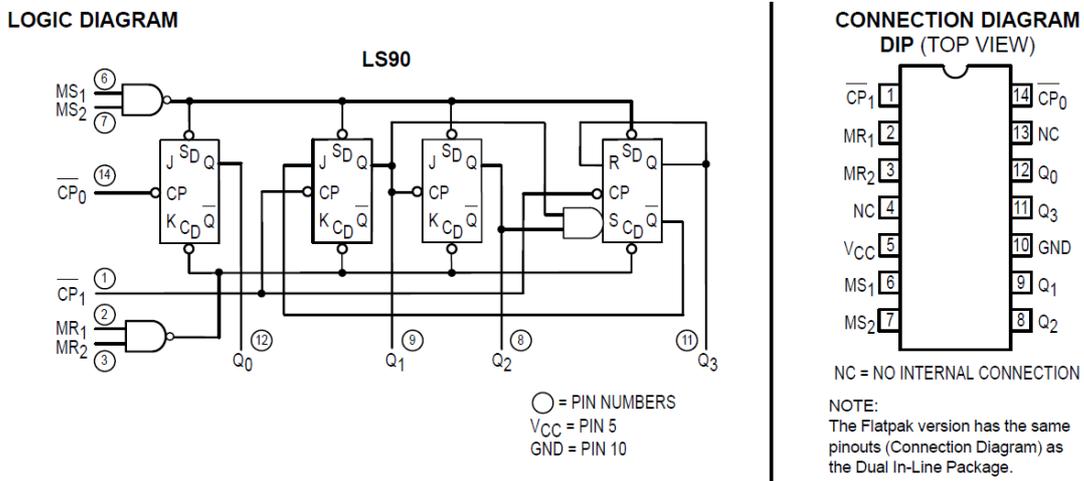


Fig. 1 – O CI 74LS90 – lógica interna e pinagem.

Da figura, algumas observações importantes:

- O circuito dispõe de 2 pinos de Reset (MR₁ e MR₂), ativos em nível alto. Logo, tais pinos deverão permanecer em nível baixo se não forem utilizados. Da mesma forma, os 2 pinos de Preset (MS₁ e MS₂) deverão permanecer em nível baixo se não forem utilizados.
- O sinal de clock do primeiro flip-flop (responsável pelo bit menos significativo, Q₀) é CP₀, e é independente do sinal de clock dos outros 3 flipflops (CP₁). Para que se tenha um contador decimal de 4 bits, é necessário conectar a saída Q₀ em CP₁.
- Note que a alimentação deste chip não é nos vértices, como na maioria dos chips TTL.

Nesta prática, usaremos dois tipos distintos de fontes de clock: automático (sinal periódico, vindo de outro circuito digital) e manual (através de chave). No segundo caso, uma chave *push-button* deverá ser conectada à entrada de clock do contador, mudando manualmente os níveis lógicos e gatilhando, desta forma, os flip-flops, como exemplifica a Fig. 2.

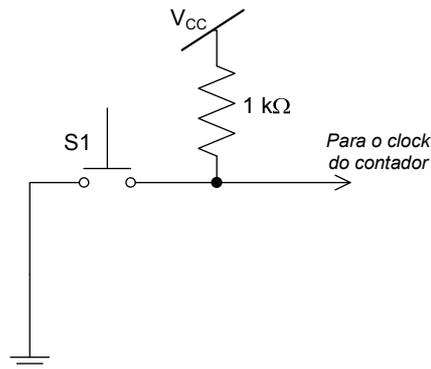


Fig. 2 – Circuito para clock manual (sem *anti-bounce*).

No entanto, problemas devidos à trepidação das chaves mecânicas (*bouncing*) poderão produzir transições indesejadas nos flip-flops, fazendo eventualmente com que o circuito execute mais de uma contagem por pulso dado nas chaves.

Para corrigir este problema, existem algumas soluções possíveis, denominadas circuitos *anti-bounce*. É deixada ao aluno a proposta de pesquisar os diferentes circuitos anti-bounce relatados na literatura técnica.

4- Trabalho Preparatório

Estudar cuidadosamente o diagrama lógico da Fig. 1 e, a partir daí, montar um diagrama com as conexões de um contador 74LS90. O contador deverá ter seu pino de clock CPO (pino 14) ligado ao clock externo (manual ou automático). O clock CP1 deverá ser ligado à saída Q0, para o contador operar como decimal. Deverá ser previsto um sinal de Reset por chave, que será ativo em nível ALTO. Os sinais de Preset não serão utilizados (lembrar de deixá-los inativos).

Um diagrama bem montado, indicando os sinais e os seus respectivos pinos, é uma condição necessária para o bom andamento da execução, que consiste na montagem efetiva do referido circuito.

5- Execução

5.1 – Clock automático

Monte o circuito conforme o esquema elaborado no trabalho preparatório. Você deverá obter o sinal de clock automático a partir da saída SYNC no módulo ELVIS. Esta saída fornece uma onda quadrada (nível TTL) na mesma frequência de um sinal ajustado no gerador de funções. Ajuste, portanto, um sinal de frequência 1 Hz (independente da forma e amplitude).

Ligue as saídas Q₃ – Q₀ do contador nas entradas digitais do módulo, e verifique os resultados no mostrador de LEDs virtual (DigInt). Observe se a sequência corresponde à contagem binária de 0 a 9 (atenção para a ordem de significância dos bits).

Em seguida, mude a frequência do sinal de clock para 10 kHz. No osciloscópio, com a sonda do canal 0 (CH0) ligada ao sinal de clock, verifique, com o outro canal (CH1) a frequência do sinal em Q₀, Q₁, Q₂ e Q₃, comprovando assim a divisão na frequência original do sinal de clock. Registre as

frequências lidas na Tabela 1. Repita o procedimento para frequências de clock de 20 kHz e 50 kHz. É importante que você sincronize o osciloscópio pelo canal ligado ao sinal de clock, para conseguir ver corretamente na tela os sinais das saídas Q₃ – Q₀ (evitando assim que o sinal fique “andando” na tela).

Tabela 1 – Frequências dos sinais nas saídas do contador.

Clock	Q0	Q1	Q2	Q3
10 kHz				
20 kHz				
50 kHz				

5.2 – Clock manual

Mantendo o mesmo circuito usado anteriormente, mude a fonte de clock para o circuito da Fig. 2. A intenção é verificar a ocorrência de trepidações da chave mecânica. Observe se o contador irá incrementar a contagem em uma unidade a cada pulso na chave.

Em seguida, ligue o sinal do clock a uma saída digital do módulo Elvis. Comande os pulsos manuais através do painel DigOut. Verifique se ocorreram trepidações.

6- Relatório e Conclusões

Deve conter, pelo menos:

- ✓ Resultados obtidos na execução do trabalho.
- ✓ Um diagrama de formas de onda relacionando o sinal de clock com as 4 saídas.
- ✓ Exemplos de circuitos que podem implementar a função *anti-bounce*.
- ✓ Sugestões de aplicações práticas em que os contadores podem ser empregados.

7- Bibliografia

TOCCI, Ronald J. ; WIDMER, Neal S.; MOSS, Gregory L. –“Sistemas Digitais – Princípios e Aplicações”. 10ª ed. Prentice-Hall.

1 Título

Prática 3 – Aplicações do CI 555

2 Objetivos

Apresentar o Circuito Integrado 555 e suas aplicações. Desenvolver um sistema de minuteria eletrônica (timer).

3 Fundamentos Teóricos

O circuito 555 é um circuito integrado projetado para aplicações gerais de temporização. Ele é tão versátil e possui tantas aplicações que se tornou um padrão industrial, podendo trabalhar em dois modos de operação: monoestável (possui um estado estável) e astável (não possui estado estável). Sua tensão de alimentação situa-se entre 4,5 e 18 V, o que o torna compatível com a família TTL de circuitos integrados e ideal para aplicações em circuitos alimentados por baterias. A saída deste CI pode fornecer ou drenar correntes de até 200 mA, podendo assim comandar diretamente relês, lâmpadas e outros tipos de cargas relativamente elevadas. Sua frequência máxima de Trabalho é em torno de 1 MHz.

3.1 Pinagem do 555

Na Figura 1 é mostrada a pinagem do 555 que é apresentado em um encapsulamento plástico de 8 pinos. Na mesma figura é possível visualizar os componentes internos do 555 e as respectivas ligações com os seus pinos externos.

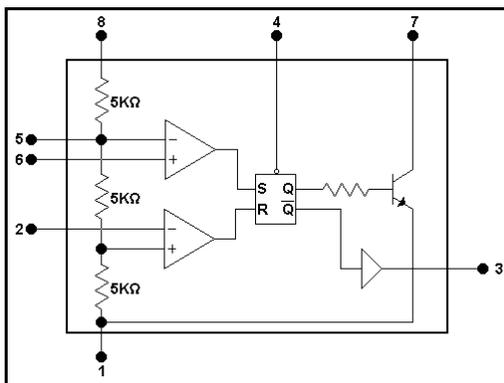


Tabela 1 – Pinagem do 555.

Pino	Nome
1	Terra
2	Disparo
3	Saída
4	Reset
5	Controle
6	Limiar
7	Descarga
8	Vcc

Figura 1 – Pinagem e Componentes Internos do 555.

Conforme pode ser observado na Figura 1, o 555 é formado internamente por três resistores de 5 kΩ, dois comparadores de tensão, um flip-flop RS, um buffer de corrente e um transistor de descarga.

Pode-se citar como principais aplicações:

- Temporizador de Precisão
- Gerador de Atraso
- Gerador de Pulsos
- Modulador por Largura de Pulso

Para descrever o funcionamento deste circuito, iremos utilizar duas configurações básicas do 555, o multivibrador monoestável e o astável.

3.2 Multivibrador Monoestável – Temporizador

A configuração do 555 como multivibrador monoestável pode ser observada na Figura 2. Esta configuração é geralmente utilizada como temporizador ou na produção de um gerador de atraso.

O multivibrador monoestável é um circuito que possui um estado estável e outro semi-estável. Quando o circuito é levado ao estado semi-estável, através de alguma “perturbação” externa, ele permanece um período de tempo neste estado e depois retorna ao seu estado estável, permanecendo assim até que uma nova perturbação externa seja aplicada.

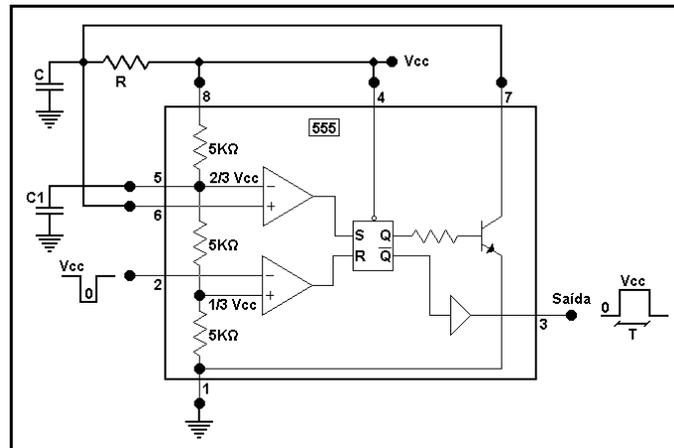


Figura 2 – Multivibrador Monoestável com 555.

3.2.1 Análise do Circuito do Multivibrador Monoestável

Considerações iniciais:

- $V_C = 0 \text{ V}$ (tensão inicial no capacitor C);
- $Q = V_{cc}$
- $!Q = 0 \text{ V}$

Nota: Neste texto será utilizada a notação de !Q para indicar a saída Q Barrada do FF RS.

Devido ao divisor de tensão interno formado pelos três resistores de $5 \text{ k}\Omega$, independentemente da tensão de alimentação (V_{cc}), ocorre uma distribuição de $(1/3)V_{cc}$ e $(2/3)V_{cc}$ nos pontos indicados. Assim, na saída do comparador de tensão inferior, teremos 0 V , que é aplicado na entrada R do FF. Na saída do comparador de tensão superior, teremos também 0 V , que é aplicada na entrada S do FF, já que a tensão sobre o capacitor, V_C , é nula, devido ao fato de que na base do transistor de descarga é aplicado um tensão de valor igual a V_{cc} , o que faz com que este transistor sature e aterre o pino 7 do 555. Como teremos $R = S = 0 \text{ V}$, as saídas do FF permaneceram em $Q = V_{cc}$ e $!Q = 0 \text{ V}$. Na saída do 555 (pino 3), teremos uma tensão de 0 V , que é o estado estável para este circuito.

Quando aplica-se no pino 2 do 555 um pulso de tensão que leva este pino à 0 V , a saída do comparador inferior irá para V_{cc} , o que faz com que o FF receba $R = V_{cc}$ e $S = 0 \text{ V}$, fazendo com que suas saídas comutem para $Q = 0 \text{ V}$ e $!Q = V_{cc}$, com isso a saída do circuito (pino 3) irá para um nível igual a V_{cc} . Como o pulso aplicado no pino 2 possui uma curta duração, ele logo retorna a V_{cc} e a saída do comparador a 0 V , o que faz com que o FF memorize esta situação ($R = S = 0 \text{ V}$). Com a saída $Q = 0 \text{ V}$, o transistor será levado ao corte, o que faz com que o capacitor inicie um processo de carga através de R. Quando a tensão neste capacitor superar $(2/3)V_{cc}$ da entrada inversora do comparador superior, sua saída irá comutar para V_{cc} , fazendo com que seja aplicado na entrada S um nível de tensão igual a V_{cc} e na entrada R um nível igual a 0 V . Assim, as saídas passam a ser $Q = V_{cc}$ e $!Q = 0 \text{ V}$, o que faz com que o transistor de descarga entre novamente em saturação, descarregando quase que imediatamente a tensão do capacitor. Neste ponto, o circuito retorna ao seu estado estável e fica aguardando a aplicação de uma nova perturbação. Na Figura 3 é possível visualizar as principais formas de onda do circuito do monoestável com o 555.

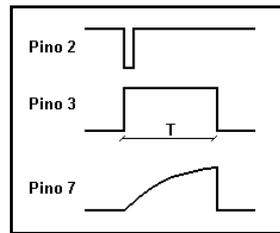


Figura 3 – Formas de Onda do Monoestável.

3.2.2 Cálculo do Tempo T

A partir da equação geral do transitório, podemos deduzir uma fórmula que irá permitir determinar o tempo em que o circuito do monoestável permanece no seu estado instável.

Assim, temos:

$$V_c = V(\infty) + [V(0) - V(\infty)] * e^{-t/R*C} \quad \text{Eq. 1}$$

As condições para a equação 1 serão: $V(0) = 0 \text{ V}$; $V(\infty) = V_{cc}$ e $V_c = (2/3)V_{cc}$.

Substituindo, teremos:

$$\frac{2}{3} * V_{cc} = V_{cc} (1 - e^{-t/R*C}) \quad \text{Eq. 2}$$

Esta equação pode ser reduzida a:

$$t = 1,1 * R * C \quad \text{Eq. 3}$$

A equação 3, é aquela que define o tempo no qual a saída permanece no seu estado instável, ou seja, em V_{cc} . Com isso, pode-se calcular o valor de R e de C em função do tempo desejado. O valor do capacitor C1 é geralmente de 10 nF, servindo como capacitor de estabilização da tensão no pino 5.

3.3 Multivibrador Astável

A configuração do 555 como astável pode ser visualizada na Figura 4. Este circuito diferentemente do monoestável, não possui nenhum estado estável, por isso, sua saída oscila entre V_{cc} e 0 V, produzindo uma seqüências de pulsos retangulares.

3.3.1 Análise do Circuito do Multivibrador Astável

Considerações iniciais:

- $V_c = 0 \text{ V}$ (tensão inicial no capacitor C);
- $Q = 0 \text{ V}$
- $!Q = V_{cc}$

Ao ligar o circuito, a tensão nos pinos 2 e 6 é menor que as referências internas de $(1/3)V_{cc}$ e $(2/3)V_{cc}$. Assim, o comparador superior terá uma saída de 0 V e o inferior uma saída de V_{cc} , fazendo com que as saídas do FF permaneçam com $Q = 0 \text{ V}$ e $!Q = V_{cc}$, pois, $R = V_{cc}$ e $S = 0 \text{ V}$. Como o transistor de descarga encontra-se em corte, o capacitor irá se carregar, através dos resistores R1 e R2. Quando a tensão V_c ultrapassar $(1/3)V_{cc}$, a saída do comparador inferior comuta para 0 V e o FF memoriza as saídas anteriores.

Contudo, o processo de carga do capacitor ainda não cessou e a tensão nos seus terminais continua a aumentar. Quando V_c atingir o valor de $(2/3)V_{cc}$, a saída do comparador superior passará para V_{cc} , neste caso, teremos $S = V_{cc}$ e $R = 0 \text{ V}$, o que faz com que as saídas do FF comutem para $Q = V_{cc}$ e $!Q = 0 \text{ V}$. Desta forma o transistor de descarga entra em saturação e inicia o processo de descarga do capacitor através do resistor R2. É interessante

reforçar que pelo resistor R1 continua circulando corrente, que é drenada pelo pino 7, juntamente com a corrente de descarga do capacitor. Quando a tensão do capacitor atingir $(1/3)V_{cc}$, o comparador inferior comuta para V_{cc} e o superior que no início da descarga do capacitor passou para 0 V, aplicam $S = 0$ V e $R = V_{cc}$, reiniciando novamente o processo. Na Figura 5 são mostradas as formas de onda referentes ao funcionamento do 555 como astável.

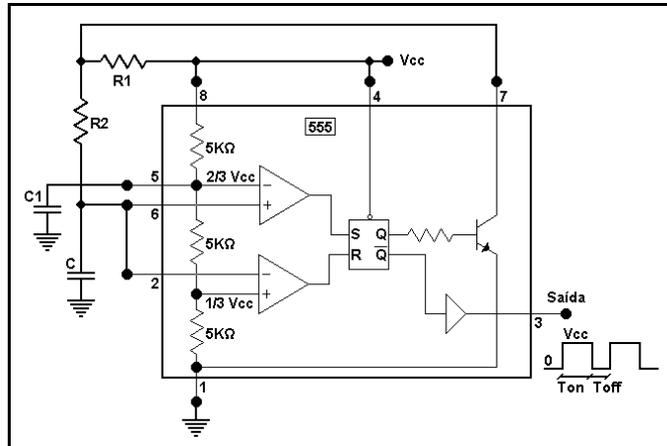


Figura 4 – Circuito do Multivibrador Astável com 555.

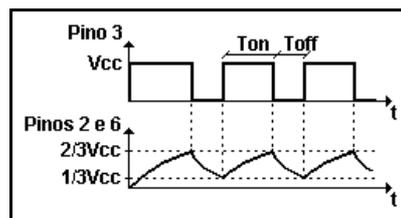


Figura 5 – Formas de Ondas do Circuito do Astável.

3.3.2 Cálculo dos Tempos Ton e Toff

Existem dois instantes de tempo a serem considerados nesta análise, um de $(1/3)V_{cc}$ até $(2/3)V_{cc}$ e ou outro de $(2/3)V_{cc}$ até $(1/3)V_{cc}$. Utilizaremos a equação geral do transitório aplicada aos dois espaços de tempo.

- De $(1/3)V_{cc}$ até $(2/3)V_{cc}$

Aplicando as condições iniciais, $V(\infty) = V_{cc}$, $V(0) = (1/3)V_{cc}$ e $V_c = (2/3)V_{cc}$, na equação 1, teremos:

$$\frac{2}{3} * V_{cc} = V_{cc} + \left(\frac{V_{cc}}{3} - V_{cc} \right) * e^{-t/R * C} \quad \text{Eq. 4}$$

Esta equação pode ser reduzida a:

$$T_{on} = 0,693 * (R1 + R2) * C \quad \text{Eq. 5}$$

Esta equação fornece o tempo no qual a saída permanece em V_{cc} , tempo em que a tensão do capacitor vai de $(1/3)V_{cc}$ até $(2/3)V_{cc}$, sendo carregado pelos resistores R1 e R2.

- De $(2/3)V_{cc}$ até $(1/3)V_{cc}$

Aplicando as condições iniciais, $V(\infty) = 0$ V, $V(0) = (2/3)V_{cc}$ e $V_c = (1/3)V_{cc}$, na equação 1, teremos:

$$\frac{1}{3} * V_{cc} = 0 + \left(\frac{2}{3} * V_{cc} - 0 \right) * e^{-t/R*C} \quad \text{Eq. 6}$$

Esta equação pode ser reduzida a:

$$T_{off} = 0,693 * R2 * C \quad \text{Eq. 7}$$

Esta equação fornece o tempo no qual a saída permanece em 0 V, tempo em que a tensão do capacitor vai de $(2/3)V_{cc}$ até $(1/3)V_{cc}$, sendo descarregado pelo resistor R2.

O período de oscilação do circuito será a soma dos tempos T_{on} e T_{off} , que pode ser resumido à seguinte equação:

$$T = 0,693 * (R1 + 2 * R2) * C \quad \text{Eq. 8}$$

4 Trabalho Preparatório

4.1 Multivibrador Astável

1. Com base no circuito multivibrador astável da Figura 6 e para cada combinação de resistores da Tabela 2, calcule o tempo em que a saída permanece em nível alto (T_{ON}), em nível baixo (T_{OFF}) e a frequência do sinal, preenchendo os respectivos campos desta tabela;
2. Com base no circuito multivibrador astável simétrico da Figura 7 e para cada combinação de resistores da Tabela 3, calcule o tempo em que a saída permanece em nível alto (T_{ON}), em nível baixo (T_{OFF}) e a frequência do sinal, preenchendo os respectivos campos desta tabela;

4.2 Multivibrador Monoestável

1. Com base nos valores dos componentes utilizados, calcule o tempo (em segundos) mínimo e máximo no qual a saída permanecerá no nível de $+V_{cc}$, preenchendo a Tabela 4;

5 Execução

5.1 Multivibrador Astável

Procedimentos:

1. Monte o circuito da Figura 6 que é um multivibrador astável com 555, ligando o canal 1 do osciloscópio no pino 3 (saída) e o canal 2 do osciloscópio no pino 2, de forma que se possa observar a carga e descarga do capacitor;
2. Os valores de R1 e de R2 estão indicados na Tabela 2. verifique a validade das equações teóricas, medindo os referidos tempos e a frequência do sinal de saída;
3. Observe, no canal 2 do osciloscópio, que não importa os valores dos resistores utilizados, a tensão de carga e descarga do capacitor está situada sempre entre $(2/3)V_{cc}$ e $(1/3)V_{cc}$;
4. Conforme podemos observar, os tempos T_{ON} e T_{OFF} são diferentes devido aos circuitos de carga e descarga do capacitor serem diferentes. Para produzir uma forma de onda quadrada perfeita, devemos colocar em paralelo com o resistor R2 um diodo, de forma que

este componente não participe do circuito de carga do capacitor e fazer $R1=R2$. Após a inserção do diodo, conforme mostra a Figura 7, preencha a Tabela 3.

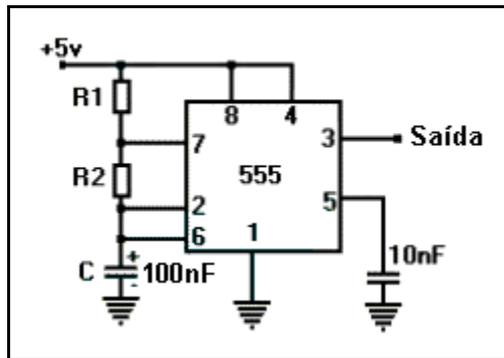


Figura 6 – Multivibrador Astável.

Tabela 2 – Valores dos Tempos T_{ON} e T_{OFF}

Resistores		Valores Calculados			Valores Medidos		
R1	R2	T_{ON} (s)	T_{OFF} (s)	Freq (Hz)	T_{ON} (s)	T_{OFF} (s)	Freq (Hz)
10 k Ω	10 k Ω						
10 k Ω	2,7 k Ω						
2,7 k Ω	10 k Ω						
2,7 k Ω	2,7 k Ω						

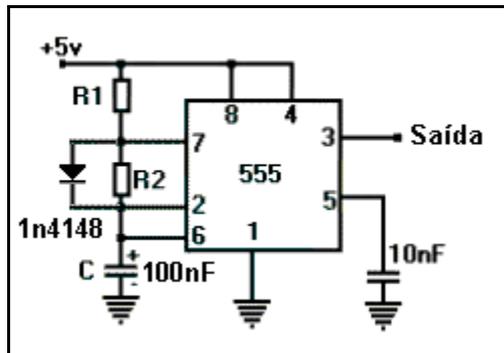


Figura 7 – Multivibrador Astável Simétrico.

Tabela 3 - Valores dos Tempos T_{ON} e T_{OFF} com o Diodo

Resistores		Valores Calculados			Valores Medidos		
R1	R2	T_{ON} (s)	T_{OFF} (s)	Freq (Hz)	T_{ON} (s)	T_{OFF} (s)	Freq (Hz)
10 k Ω	10 k Ω						
2,7 k Ω	2,7 k Ω						

5.2 Timer com o CI 555

Procedimentos:

1. Monte o circuito da Figura 8.
2. Com a utilização de um cronômetro ou de um relógio comum, realize as medidas dos tempos mínimo e máximo. Variar o potenciômetro e aplicar um pulso rápido na chave de “Liga”, para produzir a perturbação necessária;
3. Após realizar as medições, ligue o circuito e teste o funcionamento do timer.

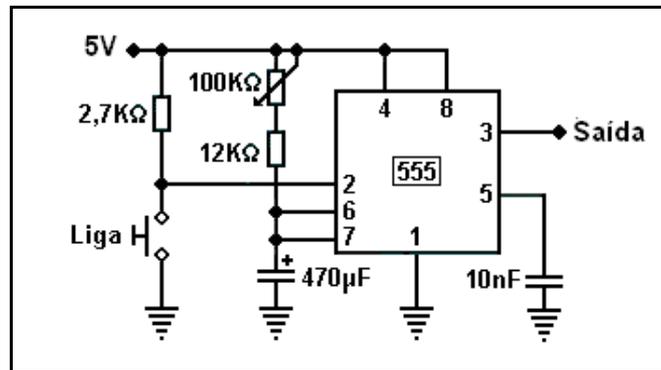


Figura 8 – Circuito do Timer com o CI 555.

Tabela 4 – Temporização do Circuito

Calculado (Seg.)		Medido (Seg.)	
T_{MIN}	$T_{MÁX}$	T_{MIN}	$T_{MÁX}$

6 Relatório e Conclusões

Deverá ser apresentado um relatório, de acordo com o que foi estabelecido, onde devem constar:

- 1) Os resultados obtidos durante a elaboração do trabalho preparatório;
- 2) Os resultados obtidos durante a realização prática do trabalho;
- 3) A relação existente entre os tempos T_{ON} e T_{OFF} , quando se utiliza o diodo em paralelo com R2 no multivibrador astável simétrico; explicar as razões para a diferença entre o resultado teórico e o resultado experimental.
- 4) Resultados de simulação. Simular um exemplo para cada uma das três configurações estudadas (Figuras 6, 7 e 8).

7 Bibliografia

MALVINO, Albert Paul. **Eletrônica**. Volume 2, São Paulo, MacGraw-Hill.

CHIRLIAN, P. M. **Analysis and Design of Integrated Circuits**. Harper Row Inc., 2nd Edition.

1 Título

Prática 4 – Aplicações Lineares dos Amplificadores Operacionais

2 Objetivos

Execução e análise de circuitos amplificadores lineares nas suas configurações como inversor, não-inversor, somador inversor e buffer.

3 Fundamentos Teóricos

Circuitos amplificadores lineares preservam a forma de onda do sinal de entrada. Se uma entrada é senoidal, a saída também será senoidal. Existem dois tipos básicos de amplificadores de tensão: amplificador não inversor e amplificador inversor.

3.1 Amplificador Linear Não-Inversor

O amplificador de tensão não-inversor é aproximadamente um amplificador de tensão ideal, devido à sua alta impedância de entrada, baixa impedância de saída, e ganho de tensão estável, produzindo uma tensão de saída em fase com a tensão de entrada. Seu circuito é mostrado na Figura 1. O ganho de tensão em malha fechada será dado pelas resistências de realimentação e a resistência de entrada utilizadas, sendo independente do ganho do operacional adotado.

3.2 Amplificador Linear Inversor

O amplificador de tensão inversor consiste em um conversor de corrente-tensão alimentado por uma fonte de tensão, conforme mostrado na Figura 2. Este amplificador produz um sinal de saída com inversão de fase em relação ao sinal de entrada. Seu ganho de tensão em malha fechada também será dado pelas resistências de realimentação e a resistência de entrada utilizadas.

3.3 Amplificador Somador Inversor

Algumas vezes é necessário misturar ou combinar alguns sinais, como por exemplo, em sistemas de gravação, onde é necessário misturar os sons do microfone e dos diversos instrumentos. O ampop, pode ser utilizado para esta finalidade, utilizando a configuração de somador inversor mostrada na Figura 3. Para cada sinal de entrada o circuito possui um ganho determinado pelo resistor de entrada do sinal e pelo resistor de realimentação do circuito, desta forma, pode-se elaborar circuitos que possuem ganhos distintos para cada sinal aplicado.

3.4 Buffer

Também denominado seguidor de tensão, este circuito é uma adaptação do amplificador linear não-inversor, de forma que o sinal aplicado em sua entrada seja disponibilizado em sua saída sem sofrer nenhuma alteração de suas características. Este tipo de circuito é muito utilizado quando se deseja acionar uma carga de baixa impedância a partir de uma fonte de sinal com alta impedância, que geralmente não é capaz de fornecer a potência necessária à carga, fazendo com que a amplitude do sinal de interesse se reduza. Torna-se necessário então inserir entre a fonte de sinal e a carga o circuito de um buffer, que é capaz de fornecer a potência necessária à carga, sem no entanto modificar as características do sinal da fonte.

4 Trabalho Preparatório

Calcule os ganhos teóricos para cada um dos circuitos propostos na etapa de execução prática, demonstrando as fórmulas aplicadas. Simule ainda os circuitos para que se possa comparar as respostas simuladas com as obtidas na prática.

5 Execução

5.1 Amplificador Não-Inversor

Procedimentos:

1. Monte o circuito do Amplificador Não-Inversor, mostrado na Figura 1, com os valores de R_F conforme a Tabela 1;
2. Ajuste o gerador de sinais (V_i) para onda senoidal de 1 Vpp e frequência de aproximadamente 100Hz;
3. Conecte o canal 1 do osciloscópio na saída da fonte de sinais e o canal 2 na saída do ampop e utilizando o primeiro valor da tabela para o resistor R_F , observe que a tensão de saída V_o está em fase com a tensão de entrada V_i ;
4. Preencha a Tabela 1, usando os valores de R_F indicados na primeira coluna. Os valores de V_i e V_o indicados na tabela são valores de tensão pico a pico;
5. Após efetuar todas as medidas, faça o cálculo teórico do ganho do amplificador, preenchendo a quinta coluna da Tabela 1;
6. Para confirmar a teoria do curto-circuito virtual, conecte o canal 2 do osciloscópio na entrada inversora e verifique se as ondas dos dois canais são idênticas.

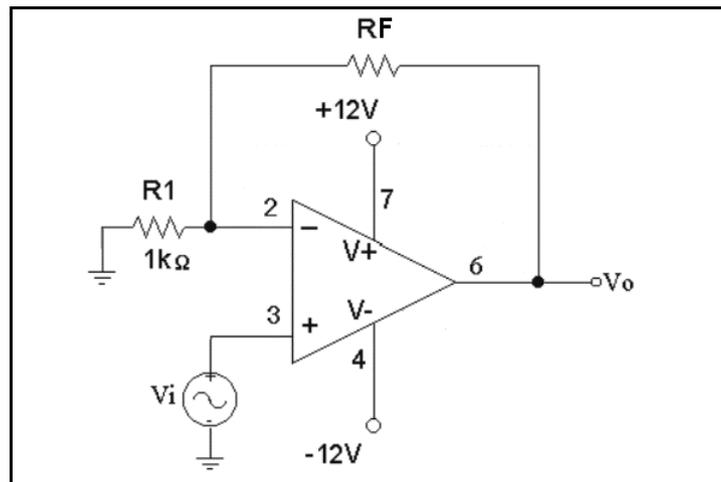


Figura 1 - Amplificador Não-Inversor.

Tabela 1 – Ganhos do Amplificador Não-Inversor.

Valor de R_F	V_i (pp)	V_o (pp)	Ganho (V_o/V_i)	Ganho Teórico
4,7 kΩ				
6,8 kΩ				
10 kΩ				

5.2 Amplificador Inversor

Procedimentos:

1. Monte o circuito do Amplificador Inversor, mostrado na Figura 2, com os valores de R_F conforme a Tabela 2;
2. Ajuste o gerador de sinais (V_i) para onda senoidal de 1 Vpp e frequência de aproximadamente 100Hz;

3. Conecte o canal 1 do osciloscópio na saída da fonte de sinais e o canal 2 na saída do ampop e utilizando o primeiro valor da tabela para o resistor R_F , observe que a tensão de saída V_o está defasada da tensão de entrada V_i ;
4. Preencha a Tabela 2, usando os valores de R_F indicados na primeira coluna. Os valores de V_i e V_o indicados na tabela são valores de tensão pico a pico;
5. Após efetuar todas as medidas, faça o cálculo teórico do ganho do amplificador, preenchendo a quinta coluna da Tabela 2;
6. Para confirmar a teoria do curto-circuito virtual, conecte o canal 2 do osciloscópio na entrada não-inversora e verifique se as ondas dos dois canais são idênticas.

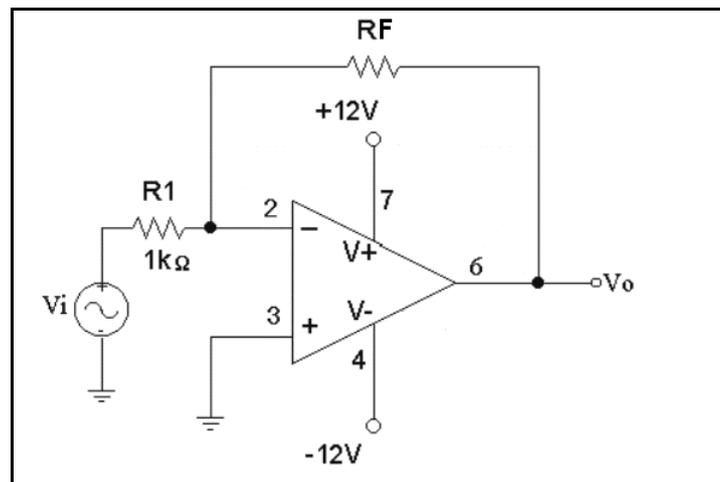


Figura 2 – Amplificador Inversor.

Tabela 2 - Ganhos do Amplificador Inversor.

Valor de R_F	V_i (pp)	V_o (pp)	Ganho (V_o/V_i)	Ganho Teórico
4,7 k Ω				
6,8 k Ω				
10 k Ω				

5.3 Circuito Somador Inversor

Procedimentos

1. Monte o circuito da Figura 3;
2. Ajuste o gerador de sinais para produzir uma onda senoidal com frequência de 100 Hz e amplitude de 1 Vpp;
3. Conecte a saída senoidal do gerador de sinais no resistor R_1 e a saída de onda quadrada TTL no resistor R_2 , conforme indicado na Figura 3;
4. Conecte o canal 1 do osciloscópio na saída do circuito (pino 6) e observe a composição dos dois sinais, ou seja, a mixagem ou mistura dos sinais senoidal e quadrado;
5. Para calcular o ganho do circuito para cada um dos sinais de entrada, iremos aplicar o Teorema da Superposição, para isso, desconecte o sinal de onda quadrada (V_2) do circuito e aterre o resistor R_2 . Realize as medidas pedidas na Tabela 3 para o sinal senoidal e calcule o ganho do circuito;
6. Desfaça a conexão do resistor R_2 com o terra e reconecte o sinal de onda quadrada no circuito. Desconecte agora, o sinal senoidal e aterre o resistor R_1 , para que se possa determinar o ganho para o sinal de onda quadrada. Realize as medidas pedidas na Tabela 3 para o sinal de onda quadrada e calcule o ganho do circuito.

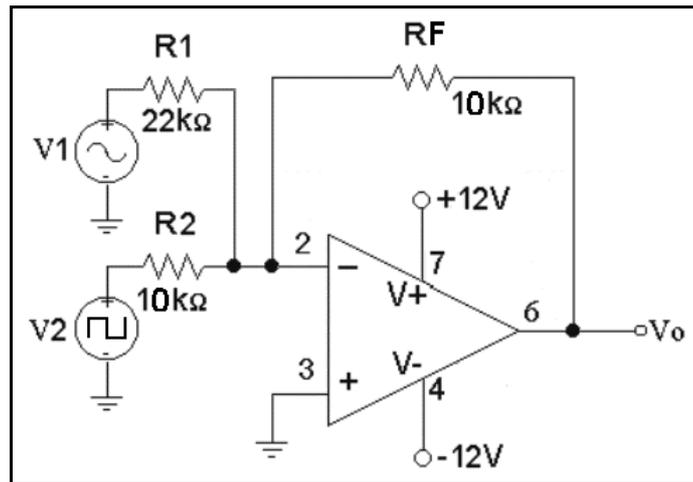


Figura 3 – Circuito do Somador Inversor.

Tabela 3 – Determinação dos Ganhos pelo Teorema da Superposição

Tensão de Entrada (V_i)	V_o	Ganho (V_o/V_i)	Ganho Teórico
Sinal Senoidal			
Sinal Quadrado			

5.4 Buffer

Procedimentos:

1. Para testar a eficiência do buffer, iremos simular uma fonte de alta impedância de saída tentando alimentar uma carga de baixa impedância. Monte o circuito conforme mostrado na Figura 4, sem no entanto ligar a saída da fonte à carga;
2. Conecte o canal 1 do osciloscópio na saída da fonte (resistor de $100\text{ k}\Omega$) e ajuste o gerador de sinais para fornecer um sinal senoidal de 1 kHz e amplitude de 4 Vpp ;
3. Conecte a carga (Resistor de $1\text{ k}\Omega$) na saída da fonte de sinal e observe a tela do osciloscópio. Como pode-se observar, a fonte não é capaz de fornecer a corrente necessária à carga e por isso, a tensão praticamente se anula;
4. Para resolver este problema monte o circuito da Figura 5, que consiste em um buffer, que será inserido entre a fonte de sinal e a carga. Não ligue ainda a fonte ao buffer e nem o buffer à carga;
5. Conecte o canal 1 do osciloscópio na saída da fonte de sinal e o canal 2 na saída do buffer (pino 6) do ampop;
6. Conecte agora a saída da fonte de sinal à entrada do buffer e observe como os dois sinais são idênticos, não existe amplificação e inversão;
7. Conecte a carga na saída do buffer e verifique que não existe alteração no sinal da fonte como ocorreu anteriormente.

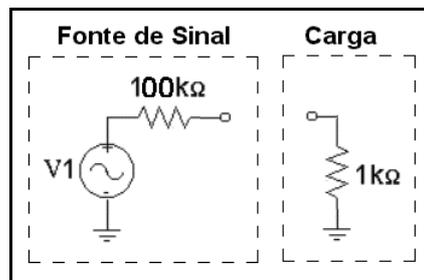


Figura 4 – Fonte de Sinal de Alta Impedância e Carga de Baixa Impedância.

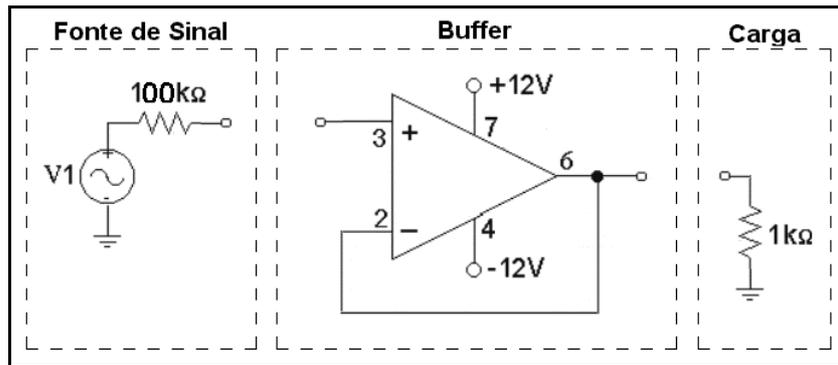


Figura 5 – Inclusão do Buffer entre a Fonte e a Carga.

6 Relatório e Conclusões

Deverá ser apresentado um relatório, de acordo com o que foi estabelecido, onde devem constar, dentre outras informações:

- 1) Os resultados obtidos no trabalho preparatório;
- 2) As curvas obtidas na simulação dos circuitos práticos;
- 3) Os resultados obtidos durante a realização prática do trabalho.

7 Bibliografia

BOGART, Theodore F. **Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**. Makron Books.

SEDRA, Adel S. e SMITH, K. C.. **Microeletrônica**. Makron Books.

LALOND, David E. e ROSS John A.. **Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**. Makron Books.

SEABRA, Antônio Carlos. **Amplificadores Operacionais**. Érica.

Universidade Federal de Juiz de Fora - Laboratório de Eletrônica - CEL037

1 Título

Prática 5 – Aplicações não lineares do amplificador operacional.

2 Objetivos

Estudo e execução de dois circuitos não lineares que empregam o amplificador operacional: comparador sem histerese e comparador com histerese.

3 Fundamentos teóricos

3.1 Comparador sem histerese

Determinados circuitos podem ser utilizados para fazer a comparação entre dois sinais, sendo um deles o sinal de referência. Destes circuitos, os de construção mais simples são os comparadores sem histerese, compostos por amplificadores operacionais tanto na configuração inversora quanto na não inversora.

Na Fig. 1, tem-se o esquema de ligação para a configuração inversora, conforme visto anteriormente.



Fig. 1 – Comparador inversor e sua característica de transferência.

Já na configuração não inversora, apresentada na a Fig. 2, o sinal de referência é aplicado na entrada inversora.

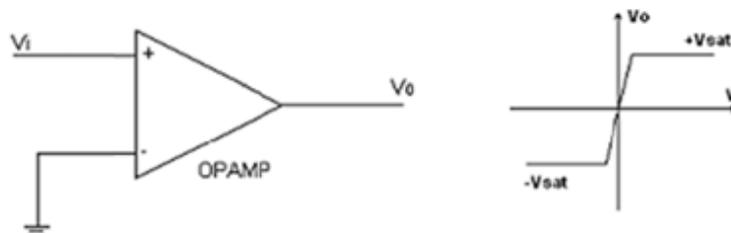


Fig. 2– Comparador não inversor e sua característica de transferência.

Porém, deve-se observar que, pela característica de transferência do circuito, pequenos ruídos no sinal de entrada podem impedir o correto funcionamento do circuito. Para lidar com tal empecilho, aplicam-se filtros no sinal de entrada.

3.2 Comparador com histerese (Schmitt-trigger)

Universidade Federal de Juiz de Fora - Laboratório de Eletrônica - CEL037

Este circuito, quando utilizado como comparador, é capaz de reduzir o número de saída erradas em função dos ruídos de entrada, conforme descrito para o comparador sem histerese. Seu funcionamento se dá pela seguinte maneira: dado um nível de tensão na saída, $+V_{sat}$ ou $-V_{sat}$ (os valores das tensões de saturação máxima positiva e negativa do ampop, respectivamente), este somente se altera quando a entrada assume valores superiores a V_{DS} ou inferiores a V_{DI} , respectivamente, sendo V_{DS} e V_{DI} as tensões de limiar superior e inferior na entrada não inversora do ampop. Por ser uma característica de transferência com análogos no eletromagnetismo, esta característica é chamada *histerese*, e pode ser entendida melhor pela Fig. 3.

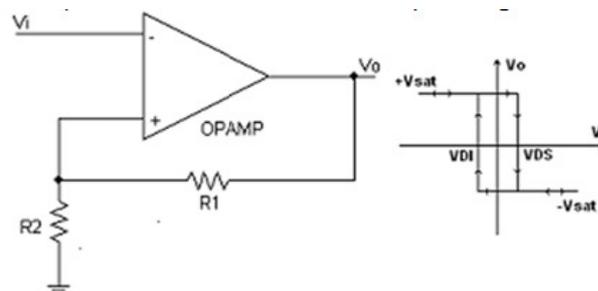


Fig. 3 – Circuito do Schmitt-trigger e sua característica de transferência.

Pelo exposto acima e pela figura, depreende-se que caso a tensão de entrada esteja com um valor entre V_{DS} ou V_{DI} , o circuito manterá a saída anterior.

4 Trabalho preparatório

Neste experimento, será desenvolvido um circuito com objetivo de acionamento de uma iluminação artificial, baseado na luminosidade ambiente. Para tanto, serão montados dois circuitos: um comparador sem histerese e um comparador com histerese.

Para obter o sinal elétrico referente à luminosidade, será utilizado um dispositivo LDR (*light dependent resistor*), o qual tem a característica de aumentar sua resistência característica quando exposto a menor intensidade de luz e reduzi-la quando em condição de maior luminosidade.

Para criar-se a tensão de referência para a comparação no circuito do comparador sem histerese, será utilizada a associação em série de dois resistores, R_1 e R_2 , conforme mostrado na Fig. 4. Para manter a tensão de entrada acima do valor de referência na condição de iluminação normal, é utilizado um potenciômetro, R_{var} , e com isso, o comparador vai apresentar uma tensão de saída igual a $-V_{sat}$. Nessa configuração, o transistor permanece em corte, e conseqüentemente, a lâmpada se mantém apagada.

Caso a iluminação diminua, a resistência do LDR aumenta, levando a tensão na entrada inversora a ser menor que a referência. Deste modo, o comparador terá na sua saída a tensão $+V_{sat}$, polarizando desta forma o transistor e ligando a lâmpada.

Universidade Federal de Juiz de Fora - Laboratório de Eletrônica - CEL037

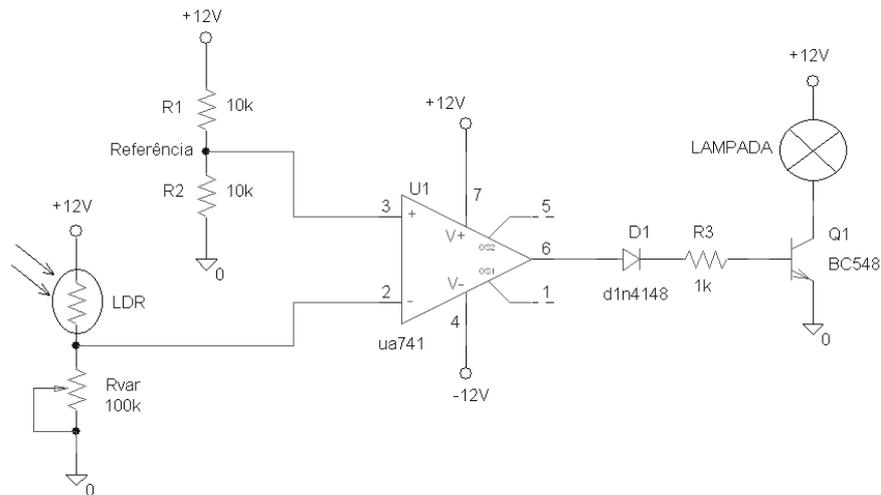


Fig. 4 – Circuito utilizando o comparador sem histerese.

A Fig. 5 mostra um circuito com a mesma finalidade do anterior, porém implementando um comparador com histerese.

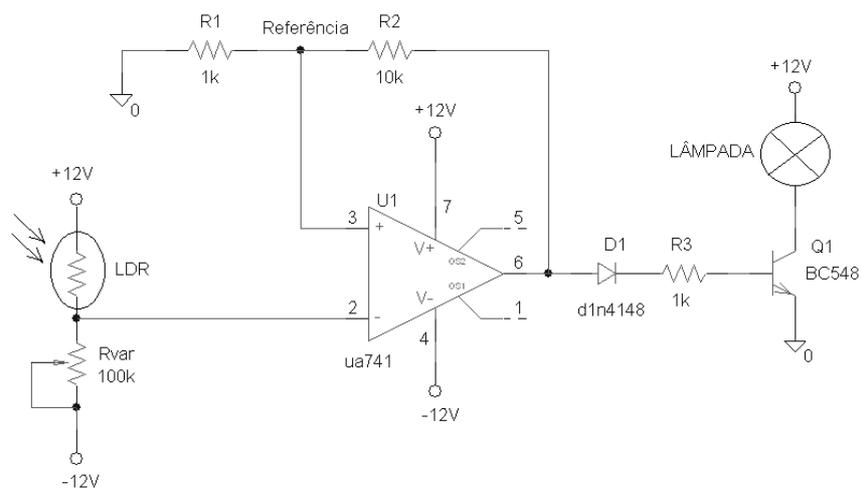


Fig. 5 – Circuito utilizando o comparador com histerese.

Neste caso, como a entrada do ampop assume valores positivos e negativos devido à realimentação positiva, o potenciômetro Rvar deve ter um de seus terminais conectado à alimentação negativa, V_{EE} . Para este circuito, as tensões V_{DS} e V_{DI} podem ser calculadas como

$$V_{DS} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (+V_{sat}) \quad (1)$$

$$V_{DI} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-V_{sat}) \quad (2)$$

Universidade Federal de Juiz de Fora - Laboratório de Eletrônica - CEL037

Como atividade preparatória, você deverá simular os dois circuitos e analisar os resultados. Mas como simular o comportamento do LDR?

O importante nesta prática é verificar o funcionamento do circuito comparador. Deste modo, recomenda-se a substituição do ramo formado pelo LDR e Rvar por uma fonte de tensão tipo rampa, como orienta a Fig. 6. O interessante é que seja simulada uma rampa crescente e uma decrescente, para se verificar a característica de histerese do circuito da Fig. 5. Caso você não encontre uma fonte que execute a simulação da rampa crescente e decrescente, você pode optar por duas simulações distintas, uma para rampa crescente e outra para decrescente.

Enfatiza-se que para simular o circuito comparador sem histerese, a rampa irá variar de 0 a +12 V (as tensões de alimentação do ramo formado por LDR e Rvar), enquanto na simulação do circuito comparador com histerese, é necessário que a rampa varie entre -12 V e +12 V. Como resultado, é suficiente que você analise a saída do ampop (pino 6).

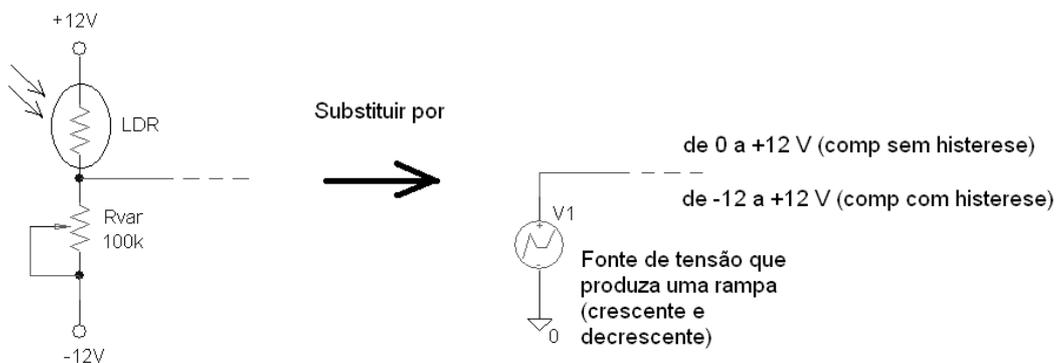


Fig. 6 – Substituição do LDR por uma fonte tipo rampa, para fins de simulação.

5 Execução

5.1 Comparador inversor sem histerese

- Medir a resistência do LDR nas duas condições extremas de funcionamento (iluminação ambiente normal e ausência de iluminação). Anotar esses valores na Tabela 1.
- Montar o circuito da Fig. 4.
- Fazer sombra sobre o LDR e variar o potenciômetro até o exato momento em que a lâmpada acenderá. Retire gradativamente a sombra sobre o LDR e verifique se a lâmpada apaga.
- Com o auxílio de dois canais no osciloscópio, verificar os valores de tensão na entrada inversora e não inversora do amplificador operacional, tanto antes como após o acionamento da lâmpada. Registrar os valores na Tabela 2.

Tabela 1 – Resistências medidas do LDR.

Resistência do LDR (iluminação ambiente normal)	
Resistência do LDR (ausência de iluminação)	

Universidade Federal de Juiz de Fora - Laboratório de Eletrônica - CEL037

Tabela 2 – Tensões nas entradas não-inversora e inversora do ampop, para o comparador sem histerese.

	Lâmpada acesa	Lâmpada apagada
Tensão na entrada não-inversora (pino 3)		
Tensão na entrada inversora (pino 2)		

5.2 Comparador inversor com histerese

- Montar o circuito da Fig. 5.
- Fazer sombra sobre o LDR e variar o potenciômetro até o exato momento em que a lâmpada acenderá. Retire gradativamente a sombra sobre o LDR e verifique se a lâmpada apaga.
- Variando as condições de iluminação, registrar na Tabela 3 os valores das tensões nas entradas não-inversora e inversora do ampop, para a lâmpada apagada e lâmpada acesa.
- Meça também o valor da saída do ampop (pino 6) para lâmpada apagada e lâmpada acesa. As equações (1) e (2) se verificam?

Tabela 3 – Tensões nas entradas não-inversora e inversora do ampop, para o comparador com histerese.

	Lâmpada acesa	Lâmpada apagada
Tensão na entrada não-inversora (pino 3)		
Tensão na entrada inversora (pino 2)		

6 Relatório e conclusões

O relatório referente à prática desenvolvida deve conter, ao menos:

- Os resultados de simulação dos circuitos comparadores, obtidos no trabalho preparatório.
- Os valores de tensão nas entradas inversora e não-inversora do ampop, os valores na saída do ampop (especialmente para o comparador com histerese), além dos valores medidos para a resistência do LDR (com iluminação normal e sem iluminação).
- Sugestão de aplicações onde os comparadores (sem e com histerese) poderiam ser empregados.

7 Bibliografia

- SEDRA, Adel S.; SMITH, K. C, *Microeletrônica*. Pearson Prentice Hall.
 BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*, Person Prentice Hall,
 BOGART, Theodore F, *Dispositivos e Circuitos Eletrônicos*, Makron Books.
 LALOND, David E.; ROSS John A., *Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos*. Makron Books,
 SEABRA, Antônio Carlos. *Amplificadores operacionais*. Érica.

1 Título

Prática 6 – Características dos Amplificadores Operacionais

2 Objetivos

Verificação e análise das diversas características de amplificadores operacionais reais.

3 Fundamentos Teóricos

Amplificadores operacionais (ou simplesmente ampops) são dispositivos analógicos muito utilizados como componentes em diversos tipos de sistemas. Estes circuitos foram utilizados, de início, em computação e instrumentação analógica, mas abrangem, hoje, uma inumerável lista de aplicações. Isto se deve, principalmente, ao baixo custo das unidades (CIs), alta confiabilidade e facilidade de aplicação.

Os amplificadores operacionais são amplificadores de alto ganho e são usados numa faixa típica de 0 Hz a mais de alguns MHz, dependendo do componente. Conectando-se resistores externos ao ampop, podemos ajustar seu ganho de tensão e a largura de banda (faixa de frequência de operação) conforme necessário. O símbolo de um amplificador operacional é mostrado na Figura 1. Nesta figura, A_{vo} é o ganho do circuito em malha aberta, V_{cc} e V_{ee} são fontes externas de alimentação, V_1 e V_2 são os sinais de entrada (em relação à referência das fontes) e V_o é o sinal de saída.

Unidades que usam fontes simétricas para polarização ($+V_{cc}$, $-V_{ee}$) aceitam tensões positivas ou negativas entre os terminais de entrada e de saída (+ e -). Mas, existem dispositivos que aceitam uma fonte simples para alimentação e, neste caso as entradas e saída são unipolares.

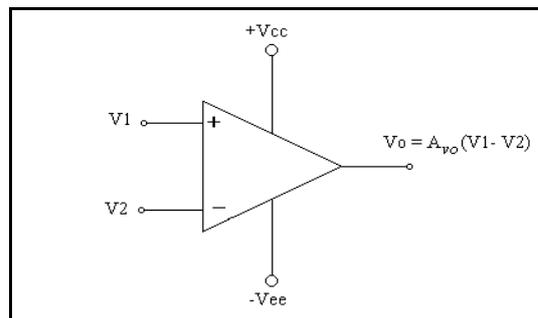


Figura 1 – Símbolo do Amplificador Operacional.

Características reais de um ampop:

- Impedância de entrada: Finita, embora muito grande (de alguns $M\Omega$ até $G\Omega$)
- Impedância de saída: pequena (da ordem de algumas dezenas de Ohms)
- Ganho de tensão em malha aberta: Finito, porém muito grande (alguns milhares)
- Largura de faixa: Finita
- Faixa de temperatura restrita

Em nossas experiências iremos comparar as características de dois amplificadores operacionais: o uA741 (também encontrado com outros prefixos, como LM741 ou CA741), e o CA3140. As pinagens destes dois ampops são idênticas, o que permite a rápida substituição de um pelo outro, nos arranjos de medidas que serão montados nesta prática. Cabe ressaltar que o 741 é um projeto relativamente antigo, com suas primeiras versões datando de 1968. Assim, ele é superado em muitas de suas características por ampops mais recentes, como é o caso do CA3140, que pode substituí-lo em uma grande quantidade de aplicações. No entanto, devido ao seu baixo custo e facilidade de obtenção, o 741 ainda é muito empregado em projetos que não exijam parâmetros muito restritos.

4 Trabalho Preparatório

Como este trabalho é para determinar praticamente as características dos amplificadores operacionais, utilize a folha de dados dos operacionais 741 e 3140, para encontrar os valores típicos dos parâmetros que serão abordados nesta tarefa prática.

5 Execução

5.1 Corrente de Entrada

Conforme mencionado nas aulas teóricas, o operacional real necessita que uma corrente circule em seus terminais de entrada para que possa polarizar os transistores de seu circuito interno. A corrente de entrada é pequena e pode variar de circuito integrado para circuito integrado.

Procedimento:

1. Monte o circuito da Figura 2.
2. Efetue as leituras de tensão indicadas na Tabela 1, utilizando o osciloscópio.
3. Após completar a tabela para o 741, substitua-o pelo 3140 e repita novamente as medidas de tensão.
4. Calcule as correntes de entrada em cada terminal baseado na lei de ohm aplicada aos resistores de entrada de cada ampop.

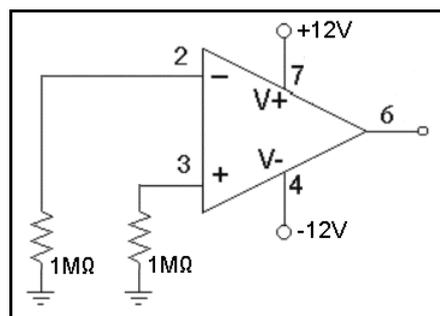


Figura 2 – Estimação da Corrente de Entrada.

Tabela 1 – Estimação da Corrente de Entrada do Operacional.

Ampop	Tensão nos Terminais (medida)		Corrente nos Terminais (calculada)	
	Inversor	Não Inversor	Inversor	Não Inversor
741				
3140				

5.2 Ajuste da tensão de Offset

Um amplificador operacional real possui desequilíbrios internos, cuja conseqüência é uma aparente tensão de entrada diferente de zero mesmo que as duas entradas estejam ligadas em conjunto. Este desequilíbrio produz uma tensão de saída diferente de zero, que é conhecida como tensão de offset., que eventualmente precisa ser compensada através dos terminais 1 e 5. Para realizar a medida desta tensão de desequilíbrio, iremos utilizar o circuito da Figura 3. Nas folhas de dados, é fornecido o valor da tensão de Offset de entrada. Experimentalmente, esta pode ser obtida dividindo-se a tensão da saída pelo ganho em malha fechada do circuito.

Procedimento:

1. Monte o circuito da Figura 3, sem conectar o trimpot de 10 k Ω .
2. Com o auxílio do osciloscópio, realize a leitura da tensão DC (*Offset*) presente na saída (pino 6) do operacional e preencha a Tabela 2.
3. Calcule o *Offset* de entrada, anotando o valor na Tabela 2.
4. Conecte o trimpot de 10 k Ω e com o auxílio do osciloscópio ajuste a tensão na saída do operacional para zero (ou o mais próximo possível deste valor). Uma vez ajustado o trimpot, a tensão de offset passa a ser nula, enquanto, o trimpot permanecer no circuito.

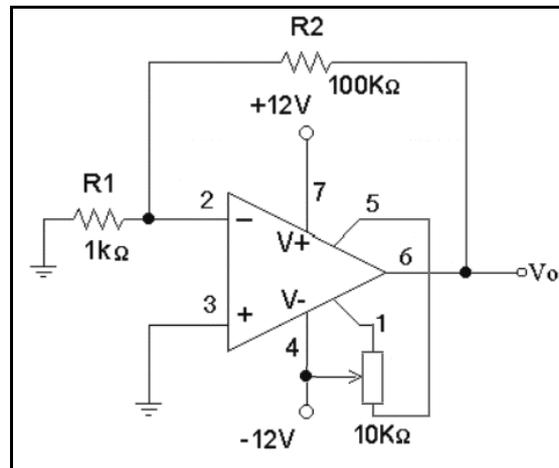


Figura 3 – Circuito para ajuste da tensão de *Offset*.

Tabela 2 – Tensões de *Offset* dos Operacionais.

Tensão de Offset	741	3140
Saída		
Entrada		

5.3 Saturação da Saída

A saída do ampop não poderá exceder os valores de suas tensões de alimentação CC. Na prática, a saída atingirá níveis de tensão de saturação positiva e negativa, V_{sat+} e V_{sat-} , tais que $V_{sat+} \leq +V_{cc}$, e $V_{sat-} \geq -V_{ee}$. Para se verificar os valores de tensão de saturação para os ampops analisados, será adotado o seguinte procedimento:

1. Monte o circuito da Figura 4.
2. Ajuste o gerador de sinal para produzir uma onda senoidal de 1 kHz com uma amplitude de 500 mVpp.
3. Conecte o canal 1 do osciloscópio na saída do operacional e observe a forma de onda.
4. Aumente gradualmente a amplitude do gerador de sinais, até que a onda senoidal apresente distorções nos picos superior e inferior. Estas distorções indicam que o operacional já atingiu o seu limite de tensão da saída, ou seja, está saturado.
5. Com o auxílio do osciloscópio, meça as tensões de saturação positiva e negativa, anotando seus valores na Tabela 3. Os valores medidos para V_{sat+} e V_{sat-} são os valores de pico positivo e negativo, respectivamente, do sinal V_o para esta condição.
6. Repita o mesmo procedimento para o segundo operacional.

Tabela 3 – Tensões de Saturação.

Grandeza	741	3140
Vsat+		
Vsat-		
Diferença entre +Vcc e Vsat+		
Diferença entre -Vee e Vsat-		

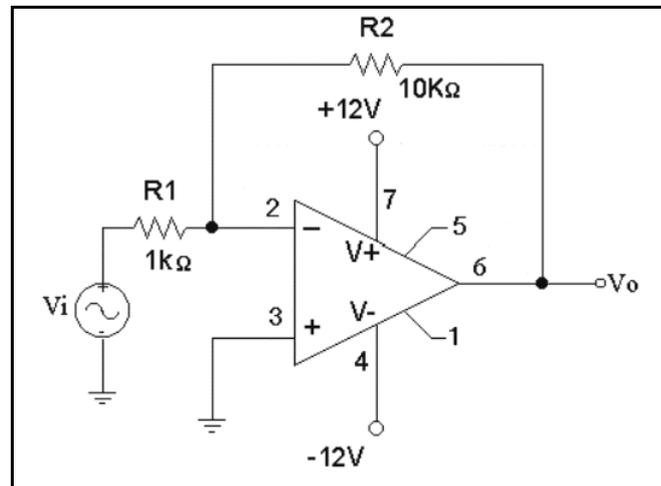


Figura 4 – Circuito para Análise de Parâmetros do Operacional.

5.4 Taxa de Inclinação (Slew Rate)

A Taxa de Inclinação (ou Slew Rate) do ampop é a medida da variação na tensão de saída pelo intervalo de tempo necessário para o circuito responder a uma entrada em degrau. Para realizar a medida da *Slew Rate* (SR) do ampop, iremos utilizar o circuito montado anteriormente (Figura 4).

Procedimento:

1. Conecte o gerador de sinais no canal 1 do osciloscópio e o ajuste para produzir uma onda quadrada com frequência de 5 kHz e uma tensão de 2 Vpp.
2. Conecte o canal 2 do osciloscópio na saída do operacional e compare os dois sinais. Ao se diminuir a escala de tempo, é possível observar que o sinal presente na saída do ampop apresenta uma distorção nas transições (positiva e negativa). Esta alteração é devida à Slew Rate. Dependendo da velocidade de resposta do ampop, esta tarefa pode ser trabalhosa, porém, possível.
3. Normalmente, a SR deve ser medida entre 10% e 90% da excursão total do sinal, como ilustra a Figura 5. Por exemplo, se o sinal de saída tem 20 Vpp, excursionando de -10 V a +10 V, a variação de tempo deve ser medida de -8 a +8 V. Ainda, a figura mostra a SR de subida ($SR_+ = \Delta V_R / \Delta T_R$) e de descida ($SR_- = \Delta V_F / \Delta T_F$). Usualmente, os módulos de SR_+ e SR_- são próximos, mas não iguais.
4. De acordo com a Figura 5, efetue as medidas de ΔV_R , ΔV_F , ΔT_R e ΔT_F . Anote estes valores na Tabela 4, calculando, em seguida, SR_+ e SR_- .
5. Repita o procedimento para o outro ampop.

Tabela 4 – Estimação da Slew Rate.

Grandeza	Valores medidos	
	741	3140
Varição de tensão de subida (ΔV_R)		
Tempo de subida (ΔT_R)		
Varição de tensão de descida (ΔV_F)		
Tempo de descida (ΔT_F)		
Slew Rate de subida, SR+ (= $\Delta V_R/\Delta T_R$)		
Slew Rate de descida, SR- (= $\Delta V_F/\Delta T_F$)		

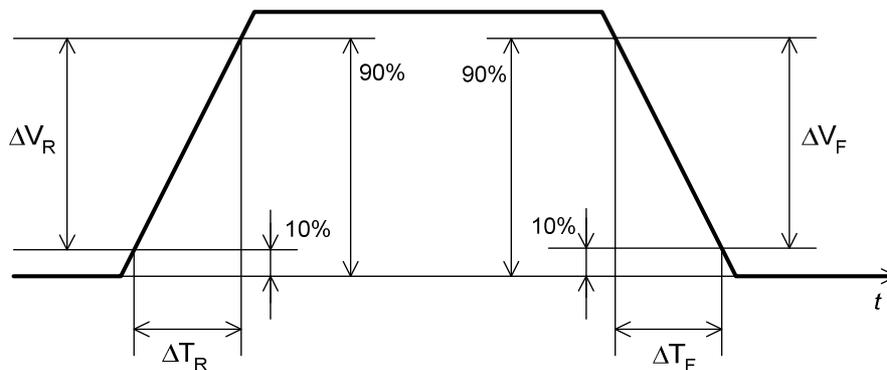


Figura 5 – Medidas para estimativa da Slew Rate de subida e de descida.

5.5 Determinação da Largura de Banda

Procedimentos:

1. Com o canal 1 do osciloscópio conectado ao gerador de sinais e o canal 2 conectado na saída do circuito da Figura 4, ajuste o gerador de sinais para onda senoidal com frequência de 1 kHz e uma amplitude tal que, a tensão na saída do operacional esteja em torno de 20 V_{pp}.
2. Com o auxílio do osciloscópio, observe que a diferença de tensão entre a entrada (canal 1) e a saída (canal 2) é de cerca de 10 vezes, ou seja, o ganho do circuito é 10.
3. Aumente gradualmente a frequência do gerador de sinais e observe que gradualmente o sinal de saída possui sua amplitude reduzida, o que indica variações das características do operacional com a frequência.
4. Determine a frequência para a qual o ganho do circuito passa a ser unitário, preenchendo a Tabela 5.

Tabela 5 – Frequência Unitária do Amplificador Operacional.

Parâmetro	741	3140
Frequência Unitária		

6 Relatório e Conclusões

Deverá ser apresentado um relatório, de acordo com o que foi estabelecido, onde devem constar, dentre outras coisas:

- 1) Os resultados obtidos na pesquisa do trabalho preparatório.
- 2) Os resultados obtidos durante a realização prática do trabalho e comparações com os valores esperados.
- 3) Qual é a razão para a SR ser medida de 10% a 90% da excursão total, e não de 0 a 100% (embora esta segunda metodologia seja também adotada)?
- 4) O 3140 supera o 741 em todas as características aqui estudadas? Explique.

7 Bibliografia

BOGART, Theodore F. **Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**. Makron Books.

SEDRA, Adel S. e SMITH, K. C.. **Microeletrônica**. Makron Books.

LALOND, David E. e ROSS John A.. **Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**. Makron Books.

SEABRA, Antônio Carlos. **Amplificadores Operacionais**. Érica.

1 Título

Prática 7 – Circuitos retificadores

2 Objetivos

Estudo e montagem de diferentes circuitos retificadores.

3 Fundamentos Teóricos

As fontes de alimentação de bancada, reguláveis ou não, produzem uma tensão contínua em sua saída, a partir de uma tensão alternada de entrada, que é fornecida com uma frequência de 60 Hz pela concessionária de energia.

A transformação da tensão CA em tensão CC ocorre através de vários passos executados por componentes específicos. Um diagrama que representa as etapas de uma fonte de alimentação convencional típica é mostrado na Figura 1. Dentro de cada bloco são representados os elementos típicos empregados na etapa correspondente, embora elementos distintos destes possam também ser utilizados.

Cabe lembrar que nem sempre todas estas etapas estarão presentes. A etapa de retificação, no entanto, é a parte obrigatória em qualquer circuito que converta a tensão CA em CC, sendo de particular interesse nesta atividade.

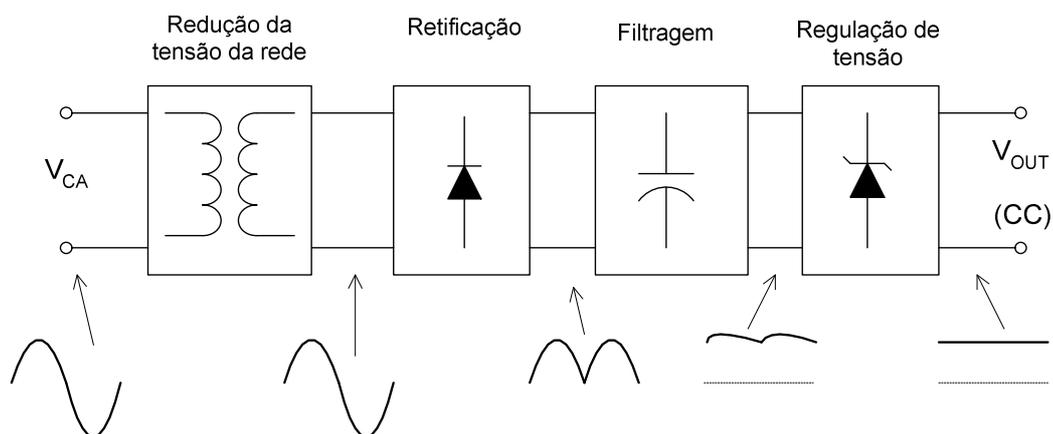


Figura 1 – Etapas de uma fonte de alimentação típica.

3.1 Redução da Tensão da Rede

Em nossa região, a concessionária de energia elétrica fornece uma tensão residencial em corrente alternada de 127 Vrms, o que corresponde à aproximadamente 180 Vp ou, 360 Vpp. É uma tensão inadequada para a alimentação dos circuitos eletrônicos, já que a alimentação destes se dá por fontes de corrente contínua.

Para podermos utilizar esta tensão, será necessário inicialmente reduzir seu valor, através da utilização de um transformador abaixador. Existem no mercado diversos tipos de transformadores, sendo que seus principais parâmetros são:

- Tensão do Primário => Define a tensão de entrada, podendo ser de 127V, 220V ou ambas;
- Tensão do Secundário => Define a tensão de saída, sendo que possui diversos valores comerciais, ou também podem ser enrolados por encomenda;
- Corrente de Secundário => Define a máxima corrente que pode ser drenada no secundário do transformador;
- Número de Enrolamentos Secundários => Define quantos enrolamentos secundários o transformador possui, sendo geralmente igual a 1 ou a 2 secundários (idênticos em suas características). Existem transformadores especiais que possuem diversos secundários com características distintas.

3.2 Retificação

Conforme mencionado, a tensão entregue pela rede elétrica possui uma frequência de 60 Hz e a tensão de saída da fonte é contínua, sendo necessária então uma etapa de retificação.

Esta retificação será realizada através de diodos semicondutores. Existem dos tipos de retificação, que são:

- Retificação de Meia-onda => Aproveita somente um semiciclo do sinal alternado;
- Retificação de Onda Completa => Aproveita os dois semiciclos do sinal alternado.

3.3 Filtragem

A forma de onda da saída dos retificadores não é uma tensão contínua pura, ou seja, ainda possui variações de tensão que devem ser evitadas.

O uso de filtros capacitivos conectados em paralelo com a carga permite filtrar a tensão CC de saída do retificador, que passa a ser praticamente constante. O capacitor se comporta como um circuito aberto para a componente CC da tensão de saída do retificador, que dessa maneira alimenta a carga. Já para as componentes alternadas presentes na tensão retificada, o capacitor se comporta como uma baixa impedância, fornecendo um caminho alternativo, diferente da carga, para as componentes CA das correntes.

3.4 Regulação

Conforme observado no item anterior, apesar da onda sobre a carga ser praticamente contínua, existe ainda uma pequena ondulação de tensão, que é conhecida como *ripple*, que é, por sua vez, dependente da carga. Essa ondulação é responsável por diversas interferências e a única maneira de eliminá-la é através da regulação de tensão, que promoverá uma tensão de saída praticamente constante para a faixa de cargas e/ou oscilação na tensão de entrada prevista no projeto.

A fim de que esta prática não se tornasse por demais extensa, a etapa de regulação de tensão não será abordada, sendo deixada especificamente para a próxima atividade.

4 Trabalho Preparatório

Como trabalho preparatório, simule todos os circuitos contidos nas figuras de 2 a 6, obtendo as formas de ondas sobre a carga em cada um deles e preenchendo os valores simulados pedidos nas respectivas tabelas de cada circuito.

Observação: Caso o software utilizado na simulação não possua um transformador com tomada central, este pode ser construído com duas fontes de tensão senoidais, ligadas em série, de forma a obter a defasagem entre os enrolamentos.

5 Execução

5.1 Características do Transformador

Procedimentos:

1. O transformador utilizado em no módulo Datapool de Eletrônica possui as seguintes características: Secundário 9+9V x 1A. Este tipo de transformador é chamado de transformador com Tomada (ou Tap) Central e possui dois secundários idênticos, conforme mostrado na Figura 2.
2. Para obter as características do secundário, conecte os dois canais do osciloscópio nas saídas do transformador e utilize a tomada central como referência. Preencha a Tabela 1 com os valores obtidos para cada secundário.

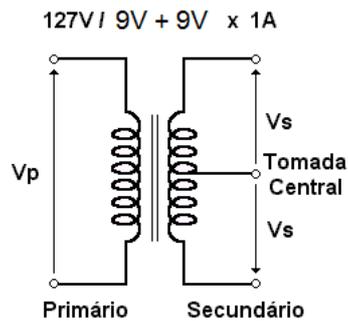


Figura 2 – Transformador do Módulo com Tomada Central.

Tabela 1 – Características do Transformador.

Parâmetros	Secundário 1	Secundário 2
Tensão de Pico		
Tensão pico a pico		
Tensão RMS		
Período da Tensão		

5.2 Retificação

5.2.1 Retificação de Meia-onda

Procedimentos:

1. Monte o circuito da Figura 3 e varie o valor do resistor de carga conforme o indicado na Tabela 2;
2. Com o auxílio do osciloscópio preencha a Tabela 2.

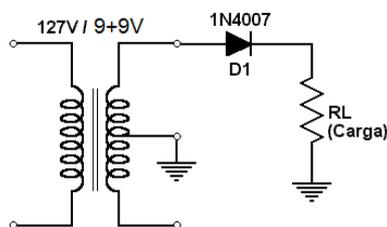


Figura 3 – Retificador de Meia-onda.

Tabela 2 – Parâmetros do Retificador de Meia-onda.

Grandezas Medidas na Carga	Valores Simulação			Valores Medidos		
	10 kΩ	2,2 kΩ	470 Ω	10 kΩ	2,2 kΩ	470 Ω
Tensão pico a pico						
Tensão RMS						
Tensão Média						

5.2.2 Retificação de Onda Completa com Ponte

Quando se deseja melhorar o desempenho da retificação, utiliza-se a retificação de onda completa. Quando o transformador não possuir a tomada central, a única opção é a utilização de uma ponte de diodos para a realização da retificação em onda completa. Esta ponte pode ser construída com quatro diodos ou pode ser utilizada uma ponte comercial.

Procedimentos

1. Monte o circuito da Figura 4 e varie o valor do resistor de carga conforme o indicado na Tabela 3;
2. Com o auxílio do osciloscópio preencha a Tabela 3.

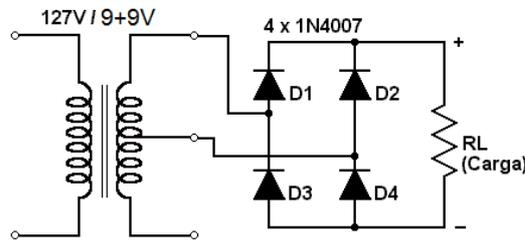


Figura 4 – Retificador de Onda Completa com Ponte.

Tabela 3 – Parâmetros do Retificador em Onda Completa.

Grandezas Medidas na Carga	Valores Simulação			Valores Medidos		
	10 kΩ	2,2 kΩ	470 Ω	10 kΩ	2,2 kΩ	470 Ω
Tensão pico a pico						
Tensão RMS						
Tensão Média						

5.2.3. Retificador de Onda Completa com Transformador de Tomada Central

Quando o transformador possuir a tomada central, pode-se construir um retificador de onda completa com apenas dois diodos, utilizando a tomada central como referência.

Procedimentos:

1. Monte o circuito da Figura 5 e varie o valor do resistor de carga conforme o indicado na Tabela 4;
2. Com o auxílio do osciloscópio preencha a Tabela 4.

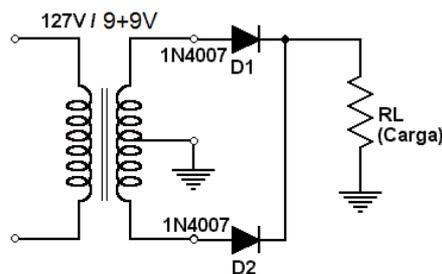


Figura 5 – Retificador de Onda Completa com Tap Central.

Tabela 4 – Parâmetros do Retificador em Onda Completa.

Grandezas Medidas na Carga	Valores Simulação			Valores Medidos		
	10 kΩ	2,2 kΩ	470 Ω	10 kΩ	2,2 kΩ	470 Ω
Tensão pico a pico						
Tensão RMS						
Tensão Média						

5.3 Filtragem

Procedimentos:

1. Monte o circuito da Figura 6 e varie o valor do resistor de carga e do capacitor de filtragem conforme o indicado na Tabela 5;
2. Com o auxílio do osciloscópio preencha a Tabela 5;

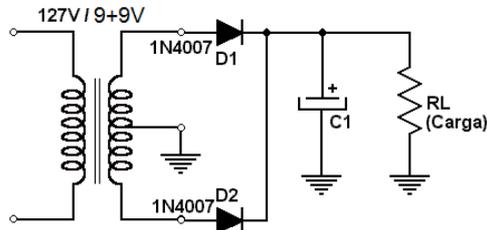


Figura 6 – Retificador de Onda Completa com Filtro Capacitivo.

Tabela 5 – Parâmetros do Retificador de Onda Completa com Filtro Capacitivo.

Grandezas Medidas na Carga	Valores Simulação					
	C1 = 47 μ F			C1 = 220 μ F		
	10 k Ω	2,2 k Ω	470 Ω	10 k Ω	2,2 k Ω	470 Ω
Tensão Máxima (Vsmáx)						
Tensão Mínima (Vsmín)						
Tensão Média						
Grandezas Medidas na Carga	Valores Medidos					
	C1 = 47 μ F			C1 = 220 μ F		
	10 k Ω	2,2 k Ω	470 Ω	10 k Ω	2,2 k Ω	470 Ω
Tensão Máxima (Vsmáx)						
Tensão Mínima (Vsmín)						
Tensão Média						

6 Relatório e Conclusões

Deverá ser apresentado um relatório, de acordo com o que foi estabelecido, onde deve constar:

1. Os valores das simulações efetuadas e as formas de onda de cada circuito.
2. Explique como ocorre a retificação de onda completa com uma ponte e a retificação de onda completa com um transformador com tomada central.
3. Realize uma análise crítica entre os valores e as formas de onda obtidos através da simulação e os obtidos no circuito real.
4. Monte uma tabela comparativa, para cada uma das configurações de fonte adotadas, relacionando o valor da carga e o valor da tensão sobre esta.

7 Bibliografia

BOGART, Theodore F. **Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**. Makron Books.

SEDRA, Adel S. e SMITH, K. C.. **Microeletrônica**. Makron Books.

LALOND, David E. e ROSS John A.. **Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**. Makron Books.

MARQUES, Ângelo Eduardo B., et al. **Dispositivos Semicondutores: Diodos e Transistores**. Érica.

1 Título

Prática 8 – Regulação de tensão

2 Fundamentos teóricos

Como comentado na Prática 7 (circuitos retificadores), a regulação de tensão consiste no uso de componentes eletrônicos que mantenham a tensão na carga praticamente constante, mesmo havendo variações na carga e/ou na tensão de entrada, desde que estas variações estejam dentro do previsto no projeto do regulador.

Foi observado na atividade anterior que, para circuitos retificadores com filtragem, a tensão média de saída do circuito irá variar de acordo com a carga. Uma etapa adicional, portanto, se faz necessária, se for requerida uma fonte de alimentação com tensão constante. Para tanto, será utilizado um circuito regulador de tensão, a ser posicionado no circuito da fonte conforme o diagrama da Figura 1, já mostrado na prática anterior.

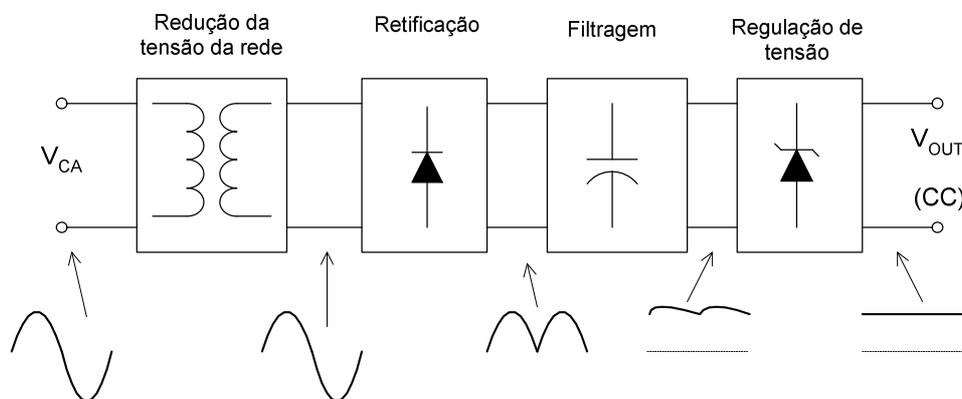


Figura 1 – Etapas de uma fonte de alimentação típica.

O regulador pode ser implementado de formas diferentes, existindo inclusive reguladores integrados específicos para a tensão de saída desejada (p. ex., o CI 7805, que fornece uma tensão regulada de saída de +5 V, para cargas que drenem uma corrente de até 1 A).

Nesta prática, utilizaremos o diodo zener para a montagem do regulador, de acordo com o circuito da Figura 2. O diodo zener é projetado tipicamente para operar reversamente polarizado, conforme mostra a curva da Figura 3b. Ao conduzir em sentido reverso, o diodo zener mantém em seus terminais (e nos terminais da carga R_L) a tensão V_Z , sendo, portanto, o circuito da Figura 2 a forma mais simples de se construir um regulador de tensão.

Note que é necessário o resistor série R_S , para limitar a corrente do zener, I_Z . Esta não poderá ser maior que o valor máximo $I_{Zmáx.}$ (dada na folha de dados do zener), para que não ocorra a queima do componente. Nem deverá ser inferior a $I_{Zmín.}$, para que o zener se mantenha ligado, ou seja, mantenha a tensão V_Z em seus terminais. Embora $I_{Zmín.}$ possa ser encontrada na folha de dados (no gráfico da Figura 3b, é a corrente no “joelho” da curva), na prática é comum adotarmos $I_{Zmín.} = 10\% \cdot I_{Zmáx.}$

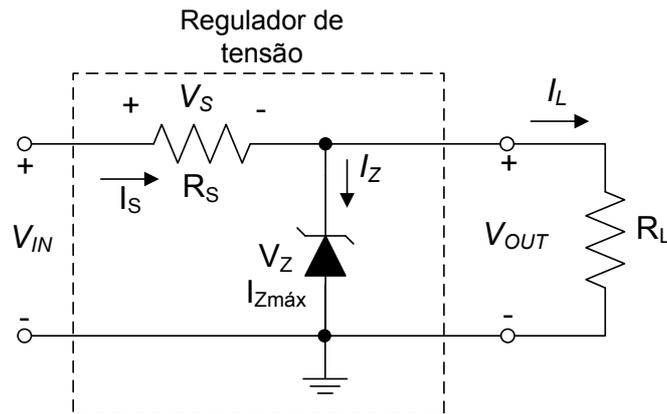


Figura 2 – Esquemático do regulador de tensão com diodo zener.

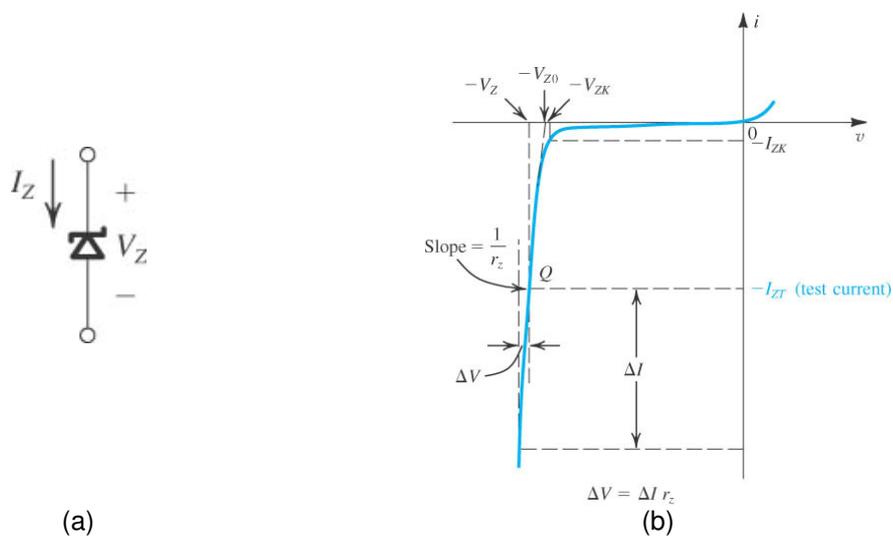


Figura 3 – Diodo zener. (a) Símbolo; (b) curva característica na região de ruptura.

Portanto, o projeto deste regulador consiste em se determinar o valor de R_S , a partir dos seguintes dados:

- A tensão V_Z (que será a tensão na carga) e a corrente $I_{Zmáx}$;
- A variação no valor da tensão de entrada V_{IN} ;
- A variação no valor da carga R_L .

Ainda, no projeto de reguladores de tensão, as seguintes circunstâncias podem ocorrer:

1. Carga fixa e fonte variável;
2. Carga variável e fonte fixa;
3. Carga variável e fonte variável.

As três circunstâncias serão abordadas nesta prática. A estrutura do retificador com filtro não será montada, por simplicidade, sendo a tensão de entrada do regulador obtida da fonte CC ajustável do módulo Elvis. Deve-se ter em mente, no entanto, que iremos variar esta fonte CC dentro de certos limites, simulando, assim, o *ripple* que ocorre na saída do retificador com filtro capacitivo.

3 Trabalho Preparatório

Com base nas três circunstâncias nas quais podem ser empregados reguladores de tensão, calcule o valor do resistor R_S para as configurações a seguir. O diodo zener a ser utilizado será o 1N4733. A partir da folha de dados deste componente, escreva na Tabela 1 os valores de V_Z , $P_{m\acute{a}x.}$ (potência máxima), $I_{Zm\acute{a}x.}$ e $I_{Zm\acute{i}n.}$. No manual, $I_{Zm\acute{a}x.}$ é denominada *maximum regulator current*.

Tabela 1 – Características do Diodo Zener (1N4733).

Parâmetro	Valor
Tensão Zener – V_Z (V)	
Potência Máxima – P_Z (W)	
Corrente Máxima – $I_{Zm\acute{a}x.}$ (A)	
Corrente Mínima – $I_{Zm\acute{i}n.}$ (A) = 10% $I_{Zm\acute{a}x.}$	

3.1 Tensão variável, carga fixa

Dados do projeto:

- $V_{OUT} = V_Z = 5,1$ V
- $V_{IN} = 9,0 - 12,0$ V
- $R_L = 220$ Ω

Determinaremos o valor de R_S encontrando primeiramente os valores de R_S mínimo ($R_{Sm\acute{i}n.}$) e R_S máximo ($R_{Sm\acute{a}x.}$), a partir das seguintes fórmulas:

$$R_{Sm\acute{i}n.} = \frac{V_{INm\acute{a}x.} - V_Z}{I_{Zm\acute{a}x.} + I_L} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$R_{Sm\acute{a}x.} = \frac{V_{INm\acute{i}n.} - V_Z}{I_{Zm\acute{i}n.} + I_L} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde $V_{INm\acute{a}x.}$ e $V_{INm\acute{i}n.}$ são, respectivamente, a tensão de entrada máxima e mínima. O valor de R_S será a média aritmética de $R_{Sm\acute{i}n.}$ e $R_{Sm\acute{a}x.}$, sendo depois aproximado para o valor comercial mais adequado (tabela de valores comerciais ao fim desta prática). Com base nos cálculos, preencha a Tabela 2.

Tabela 2 – Valores para o projeto de R_S (tensão variável, carga fixa).

$R_{Sm\acute{i}n.}$	$R_{Sm\acute{a}x.}$	R_S (média)	R_S (comercial)

Adotado o valor comercial de R_S , calcule os valores efetivos das correntes I_S e I_Z , para as condições-limite. Esta verificação é importante para validar o projeto. Preencha, portanto, a Tabela 3, para o valor R_S comercial. Caso I_Z não esteja entre $I_{Zm\acute{a}x.}$ e $I_{Zm\acute{i}n.}$, pode ser necessário refazer o projeto para outra condição de variação em V_{IN} (partindo do pressuposto que manteremos o zener especificado), ou adotar um valor comercial maior ou menor que o escolhido para R_S .

Tabela 3 – Valores para o R_S comercial (tensão variável, carga fixa).

Parâmetro	I_S	I_Z
$V_{INmín.} = 9,0 \text{ V}$		
$V_{INmáx.} = 12,0 \text{ V}$		

3.2 Tensão fixa, carga variável

Dados do projeto:

- $V_{OUT} = V_Z = 5,1 \text{ V}$
- $V_{IN} = 10,0 \text{ V}$
- $R_L = 330 \Omega - \infty$ (circuito aberto)

Determinaremos o valor de R_S encontrando primeiramente os valores de R_S mínimo ($R_{Smín.}$) e R_S máximo ($R_{Smáx.}$), a partir das seguintes fórmulas:

$$R_{Smín.} = \frac{V_{IN} - V_Z}{I_{Zmáx.} + I_{Lmín.}} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$R_{Smáx.} = \frac{V_{IN} - V_Z}{I_{Zmín.} + I_{Lmáx.}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde $I_{Lmáx.}$ e $I_{Lmín.}$ são, respectivamente, a corrente de carga máxima e mínima. Calcule R_S conforme foi feito no Item 3.1 e preencha a Tabela 4.

Tabela 4 – Valores para o projeto de R_S (tensão fixa, carga variável).

$R_{Smín.}$	$R_{Smáx.}$	R_S (média)	R_S (comercial)

Para o R_S adotado, obtenha I_S e I_Z para as condições-limite, ou seja, $R_{Lmín.}$ e $R_{Lmáx.}$. Preencha a Tabela 5, verificando se I_Z está entre $I_{Zmín.}$ e $I_{Zmáx.}$.

Tabela 5 – Valores para o R_S comercial (tensão fixa, carga variável).

Parâmetro	I_S	I_Z
$R_{Lmín.} = 330 \Omega$		
$R_{Lmáx.} = \infty$ (aberto)		

3.3 Tensão variável, carga variável

Dados do projeto:

- $V_{OUT} = V_Z = 5,1 \text{ V}$
- $V_{IN} = 9,0 \text{ V} - 12,0 \text{ V}$
- $R_L = 220 \Omega - \infty$ (circuito aberto)

Determinaremos o valor de R_S encontrando primeiramente os valores de R_S mínimo ($R_{Smín.}$) e R_S máximo ($R_{Smáx.}$), a partir das seguintes fórmulas:

$$R_{S\text{mín}} = \frac{V_{IN\text{máx}} - V_Z}{I_{Z\text{máx.}} + I_{L\text{mín.}}} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$R_{S\text{máx}} = \frac{V_{IN\text{mín}} - V_Z}{I_{Z\text{mín.}} + I_{L\text{máx.}}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Calcule R_S e preencha a Tabela 6.

Tabela 6 – Valores para o projeto de R_S (tensão variável, carga variável).

$R_{S\text{mín.}}$	$R_{S\text{máx.}}$	R_S (média)	R_S (comercial)

Para o R_S adotado, obtenha I_S e I_Z para as condições-limite, ou seja, $(V_{IN\text{máx}}, R_{L\text{máx}})$ e $(V_{IN\text{mín}}, R_{L\text{mín}})$. Preencha a Tabela 7, verificando se I_Z está entre $I_{Z\text{mín.}}$ e $I_{Z\text{máx.}}$

Tabela 7 – Valores para R_S comercial (tensão variável, carga variável).

Parâmetro	I_S	I_Z
$V_{IN\text{mín}} = 9,0 \text{ V}$ $R_{L\text{mín.}} = 220 \Omega$		
$V_{IN\text{máx}} = 12,0 \text{ V}$ $R_{L\text{máx.}} = \infty$ (aberto)		

4 Execução

No módulo Elvis, monte o circuito da Figura 2 para cada uma das três situações para as quais foram feitos os cálculos na Seção anterior.

Para evitar o inconveniente de se medir correntes através da inserção em série do multímetro (na configuração amperímetro), estas serão medidas indiretamente, através das quedas de tensão nos resistores R_S e R_L (lei de Ohm). Sabe-se que a tolerância dos resistores utilizados é de $\pm 5\%$, o que poderia levar a um erro no valor da corrente calculada indiretamente, ao se usar os valores nominais dos resistores. No entanto, resultados mais exatos são desnecessários em uma aplicação como esta.

Os roteiros para a execução são dados a seguir.

4.1 Tensão variável, carga fixa

Usando o resistor de carga especificado (220Ω) e o R_S calculado no Item 3.1, monte o circuito, ajustando no módulo a fonte CC variável de modo que V_{IN} assuma os valores mínimo e máximo especificados. Com o multímetro, você deverá medir a tensão sobre R_S (V_S) e R_L (V_{OUT}). De posse desses valores, é possível obter os demais dados, que deverão ser preenchidos na Tabela 8.

Como teste, experimente agora utilizar uma tensão de entrada V_{IN} igual a $7,0 \text{ V}$, portanto, menor que a tensão $V_{IN\text{mín}}$ especificada. Anote os resultados na tabela.

Tabela 8 – Valores medidos (tensão variável, carga fixa).

	V_S	V_{OUT}	I_S	I_L	I_Z
$V_{INmin.} = 9,0 \text{ V}$					
$V_{INmax.} = 12,0 \text{ V}$					
$V_{IN} = 7,0 \text{ V (teste)}$					

4.2 Tensão fixa, carga variável

Monte o circuito da Figura 2 para a carga de 330Ω e R_S calculado no Item 3.2. Ajuste no módulo a tensão CC fixa especificada ($10,0 \text{ V}$) e efetue as medidas necessárias. Em seguida, troque para a carga de resistência infinita (circuito aberto). Repita o procedimento.

Experimente agora utilizar a carga teste de 100Ω , que vai levar a uma corrente de carga I_L maior que a máxima prevista. Preencha a Tabela 9.

Tabela 9 – Valores medidos (tensão fixa, carga variável).

	V_S	V_{OUT}	I_S	I_L	I_Z
$R_{Lmin.} = 330 \Omega$					
$R_{Lmax.} = \infty$ (aberto)					
$R_L = 100 \Omega$ (teste)					

4.3 Tensão variável, carga variável

Utilizando agora o valor de R_S obtido no Item 3.3 e a carga de 220Ω , ajuste no módulo inicialmente a tensão CC inferior, efetuando as medidas necessárias. Em seguida, mude a carga para resistência infinita (circuito aberto) e ajuste a tensão superior, efetuando novamente as medidas.

Como testes, experimente utilizar uma tensão de alimentação de $7,0 \text{ V}$ para uma carga de 220Ω . Faça ainda o teste para uma tensão de alimentação de $9,0 \text{ V}$ e uma carga de 100Ω . Preencha a Tabela 10.

Tabela 10 – Valores medidos (tensão variável, carga variável).

	V_S	V_{OUT}	I_S	I_L	I_Z
$V_{INmin} = 9,0 \text{ V}$ $R_{Lmin.} = 220 \Omega$					
$V_{INmax} = 12,0 \text{ V}$ $R_{Lmax.} = \infty$ (aberto)					
$V_{IN} = 7,0 \text{ V (teste)}$ $R_{Lmin.} = 220 \Omega$					
$V_{INmin} = 9,0 \text{ V}$ $R_L = 100 \Omega$ (teste)					

Observe que, em nenhum dos três casos, fizemos testes com tensões de alimentação maiores que as de projeto, para não correr o risco de queima do diodo zener.

5 Relatório e conclusões

No relatório, deverão constar:

- Todos os dados calculados e experimentais.
- Interpretação dos resultados para condições de teste fora das previstas no projeto.
- Para cada uma das situações, elabore uma tabela com os consumos de energia da carga, do regulador, consumo total e rendimento do regulador. Entende-se como rendimento a razão entre a potência entregue à carga e a potência total. Faça uma análise crítica dos resultados.
- É interessante comentar sobre outros tipos de regulador existentes, tanto discretos como integrados. Quais seriam as vantagens dessas estruturas ou dispositivos, se comparados com o circuito estudado?

6 Bibliografia

SEDRA, Adel S. e SMITH, K. C. **Microeletrônica**. Makron Books.

MARQUES, Ângelo Eduardo B., et al. **Dispositivos Semicondutores: Diodos e Transistores**. Érica.

7 Anexo – Valores comerciais de resistores (tolerância $\pm 5\%$)

Os valores comerciais de resistores com tolerância $\pm 5\%$ são sempre potências de 10 multiplicadas por um dos valores abaixo:

1
1,2
1,5
1,8
2,2
2,7
3,3
3,9
4,7
5,6
6,8
8,2
9,1

Os multiplicadores variam desde 10^{-1} a 10^7 . Assim, são exemplos de resistores comerciais de $\pm 5\%$:

- 22Ω ($2,2 * 10^1$)
- $3,9 \text{ k}\Omega$ ($3,9 * 10^3$)
- $1,2 \text{ M}\Omega$ ($1,2 * 10^6$)

1 – Título

Prática 9 – Amplificadores com transistores (emissor comum)

2 – Objetivos

Montagem, medição e cálculos das características terminais básicas de amplificadores com transistores.

3 – Fundamentos Teóricos

O circuito da Figura 1 é um amplificador básico com transistor na configuração emissor comum. Os resistores R_1 e R_2 formam um divisor de tensão para a fonte V_{CC} . A função dessa estrutura é fornecer condições que assegurem que a junção base-emissor fique diretamente polarizada e a junção base-coletor reversamente polarizada, de maneira que o transistor opere na região ativa.

A polarização do transistor NPN com um divisor de tensão permite usar esse componente para amplificar um sinal CA aplicado em sua base. O capacitor C_p impede que algum componente CC presente na fonte de sinal CA altere o ponto de operação previamente calculado para o transistor, sendo denominado *capacitor de desacoplamento*.

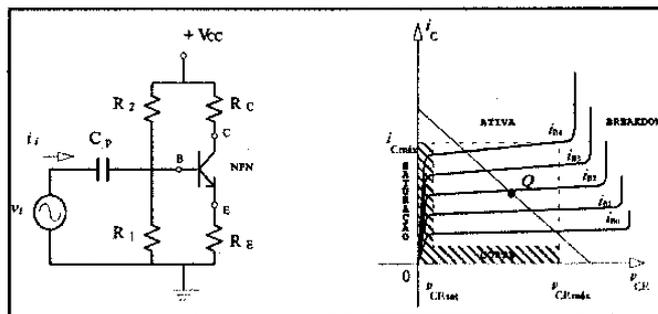


Figura 1 – Amp. Emissor Comum básico e características básicas de um transistor NPN.

As características dos amplificadores com transistores dependem da configuração utilizada, sendo que cada uma possui determinadas aplicações. Independentemente da configuração utilizada, todos podem ser representados através de um dos quatro modelos ideais de amplificadores: Tensão, Corrente, Transcondutância e Transresistência.

3.1 Amplificador de Tensão Ideal

A Figura 2 mostra o amplificador de tensão ideal, representados pelos parâmetros internos ao tracejado, com a fonte de sinal e sua respectiva resistência de saída, assim como a carga, representada através de um resistor. Os principais parâmetros são:

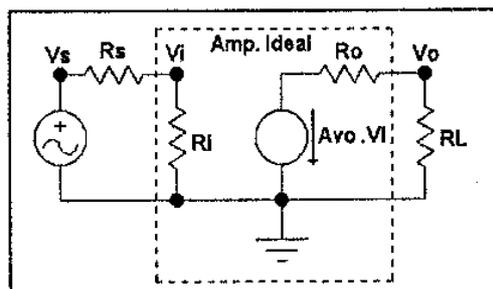


Figura 2 – Amplificador de Tensão Ideal.

Universidade Federal de Juiz de Fora – Laboratório de Eletrônica

R_i => Impedância de Entrada, representa a impedância vista pela fonte de sinal;

A_{vo} => Ganho de Tensão com a Saída em Aberto;

R_o => Impedância de Saída, representa a impedância vista pela carga;

R_s => Impedância de Saída da Fonte de Sinal;

R_L => Carga do Circuito;

V_s => Tensão da Fonte de Sinal;

V_i => Tensão na Entrada do Amplificador;

V_o => Tensão de Saída do Amplificador;

4– Trabalho Preparatório

Simule os circuitos de amplificadores propostos na etapa de execução deste trabalho e preencha as colunas referentes aos valores calculados nas tabelas. Estes serão os valores de referência para as leituras efetuadas durante a prática.

5– Execução

5.1–Amplificador Emissor Comum (EC)

Procedimentos:

- Monte o circuito amplificador da Figura 3;
- Com o gerador de sinais desligado, obtenha as tensões CC pedidas na Tabela 1;
- Ajuste o gerador de sinais para produzir um sinal senoidal com amplitude de 100 mV_{pp} e frequência de 10 kHz . Realize as medidas de tensão CA pedidas na Tabela 2, com a saída do circuito em aberto (sem carga);
- Determinar as tensões de entrada e de saída do amplificador EC para os valores de carga especificados na Tabela 3;
- Com base na Tabela 3, preencha, na Tabela 4, os *ganhos de tensão* $A_v = V_o/V_i$ e os *ganhos globais de tensão* $G_v = V_o/V_s$, obtidos para os valores de carga especificados. Considerar valores pico a pico.
- Com a ajuda dos canais do osciloscópio, determine se existe ou não uma inversão do sinal de saída em relação ao sinal de entrada.

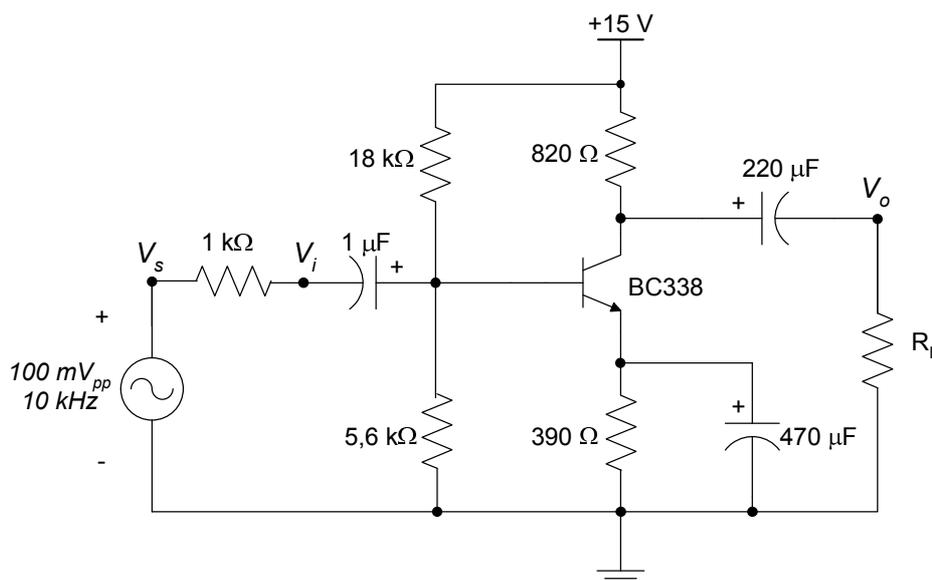


Figura 3 – Amplificador Emissor Comum.

Universidade Federal de Juiz de Fora – Laboratório de Eletrônica

Tabela 1 – Valores CC para o amplificador Emissor Comum.

Tensões CC					
Valores Simulados			Valores Medidos		
V_B	V_C	V_E	V_B	V_C	V_E

Tabela 2 – Valores CA (pico a pico) para o amplificador Emissor Comum.

Tensões CA					
Valores Simulados			Valores Medidos		
V_b	V_c	V_e	V_b	V_c	V_e

Tabela 3 – Valores de Entrada e Saída para Diversas Cargas.

Valores Simulados				
Carga – R_L	Tensões de Entrada		Tensões de Saída	
	$V_i(pp)$	$V_i(rms)$	$V_o(pp)$	$V_o(rms)$
Aberto				
10 k Ω				
3,9 k Ω				
1 k Ω				
Valores Medidos				
Carga – R_L	Tensões de Entrada		Tensões de Saída	
	$V_i(pp)$	$V_i(rms)$	$V_o(pp)$	$V_o(rms)$
Aberto				
10 k Ω				
3,9 k Ω				
1 k Ω				

Tabela 4 – Valores dos ganhos de tensão e ganhos globais de tensão (considerar valores pico a pico).

Valores Simulados		
Carga – R_L	Ganho de tensão $A_v = V_o/V_i$	Ganho global de tensão $G_v = V_o/V_s$
Aberto		
10 k Ω		
3,9 k Ω		
1 k Ω		
Valores Medidos		
Carga – R_L	Ganho de tensão $A_v = V_o/V_i$	Ganho global de tensão $G_v = V_o/V_s$
Aberto		
10 k Ω		
3,9 k Ω		
1 k Ω		

6 – Relatório e Conclusões

Deverá ser apresentado um relatório, de acordo com o que foi estabelecido, onde devem constar, dentre outras coisas:

- 1) Os resultados obtidos durante a elaboração do trabalho preparatório, inclusive as curvas obtidas na simulação;
- 2) Os resultados obtidos durante a realização da prática do trabalho;
- 3) Uma análise crítica dos valores obtidos para os ganhos de tensão e ganhos globais de tensão, para os diferentes valores de carga.
- 4) Possíveis conclusões.

7- Bibliografia

BOGART, Theodore F. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos. Makron Books.

SEDRA, Adel S. e SMITH, K. C . Microeletrônica. Makron Books.

LALOND, David E. e ROSS, John A . Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos. Makron Books.

MARQUES, Angelo Eduardo B. Dispositivos Semicondutores: Diodos e Transistores. Érica.

1 – Título

Prática 10 – Amplificadores com Transistores (coletor comum)

2 – Objetivos

Montagem, medição e cálculos das características terminais básicas de amplificadores com transistores em configuração Coletor Comum.

3 – Fundamentos Teóricos

O circuito da Figura 1 é um amplificador básico com transistor na configuração emissor comum. Os resistores R_1 e R_2 formam um divisor de tensão para a fonte V_{cc} . A função dessa estrutura é fornecer condições que assegurem que a junção base-emissor fique diretamente polarizada e a junção base-coletor reversamente polarizada, de maneira que o transistor opere na região ativa.

A polarização do transistor NPN com um divisor de tensão permite usar esse componente para amplificar um sinal CA aplicado em sua base. O capacitor C_p impede que algum componente CC presente na fonte de sinal CA altere o ponto de operação previamente calculado para o transistor, sendo denominado *capacitor de desacoplamento*.

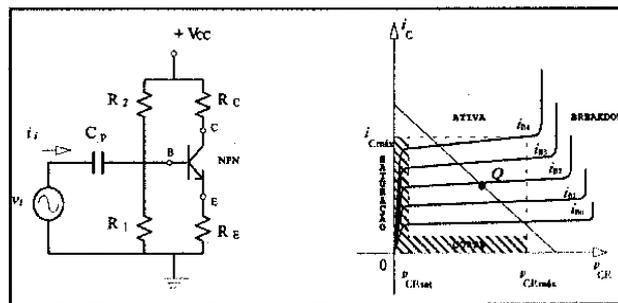


Figura 1 – Amp. Emissor Comum básico e características de um transistor NPN.

As características dos amplificadores com transistores dependem da configuração utilizada, sendo que cada uma possui determinadas aplicações. Independentemente da configuração utilizada, todos podem ser representados através de um dos quatro modelos ideais de amplificadores: Tensão, Corrente, Transcondutância e Transresistância.

Um amplificador na configuração coletor comum tem objetivos distintos dos do amplificador emissor comum, montado na prática anterior. Enquanto o amplificador emissor comum visa prover *ganho de tensão* a cargas de impedância alta ou média, o coletor comum tem por objetivo prover *ganho de corrente* a cargas de impedância relativamente baixa, mantendo a amplitude da tensão de saída próxima da tensão de entrada. Isto será verificado durante a simulação e montagem do circuito descrito nesta prática.

4– Trabalho Preparatório

Simule os circuitos de amplificadores propostos na etapa de execução deste trabalho e preencha as colunas referentes aos valores calculados nas tabelas. Estes serão os valores de referência para as leituras efetuadas durante a prática.

5 – Execução

5.1 Amplificador Coletor Comum (também denominado Seguidor de Emissor – SE)

Procedimentos:

- Monte o circuito amplificador da Figura 2;
- Com o gerador de sinais desligado, obtenha as tensões CC pedidas na Tabela 1;
- Ajuste o gerador de sinais para produzir um sinal senoidal com amplitude de $2,0 V_{pp}$ e frequência de 10 kHz. Realize as medidas de tensão CA pedidas na Tabela 2, com a saída do circuito em aberto (sem carga);
- Determinar as tensões de saída e de entrada do amplificador SE para os valores de carga especificados na Tabela 3;
- Com base na Tabela 3, preencha, na Tabela 4, os *ganhos de tensão* $A_v = V_o/V_i$ e os *ganhos globais de tensão* $G_v = V_o/V_s$, obtidos para os valores de carga especificados. Considerar valores pico a pico.
- Com a ajuda dos canais do osciloscópio, determine se existe ou não uma inversão do sinal de saída em relação ao sinal de entrada.

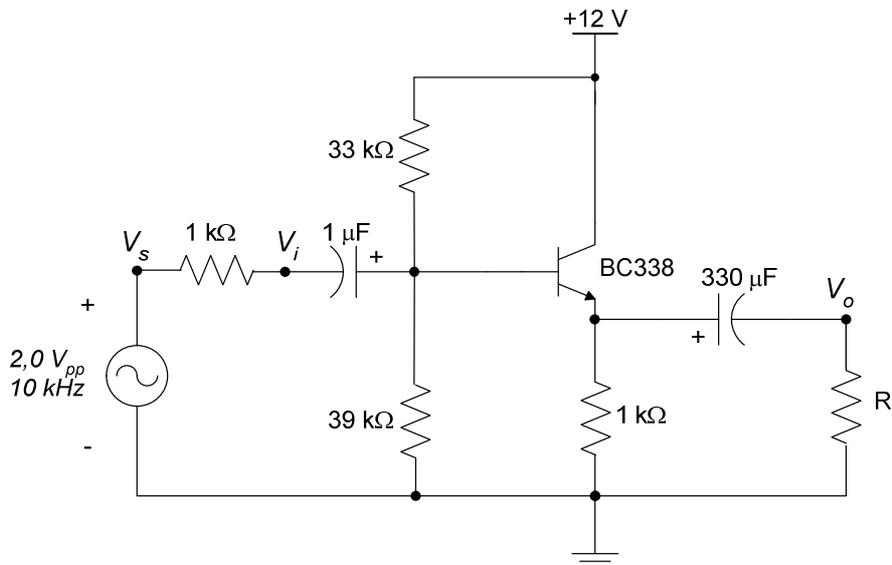


Figura 2 – Amplificador Coletor Comum.

Tabela 1 – Valores CC para Amplificador Coletor Comum.

Tensões CC					
Valores Simulados			Valores Medidos		
V_B	V_C	V_E	V_B	V_C	V_E

Tabela 2 – Valores CA (V_{pp}) para Amplificador Coletor Comum.

Tensões CA					
Valores Simulados			Valores Medidos		
V_b	V_c	V_e	V_b	V_c	V_e

Tabela 3 – Valores de Entrada e Saída para Diversas Cargas.

Valores Simulados				
Carga – R_L	Tensões de Entrada		Tensões de Saída	
	$V_i(pp)$	$V_i(rms)$	$V_o(pp)$	$V_o(rms)$
Aberto				
1,2 k Ω				
820 Ω				
390 Ω				
Valores Medidos				
Carga – R_L	Tensões de Entrada		Tensões de Saída	
	$V_i(pp)$	$V_i(rms)$	$V_o(pp)$	$V_o(rms)$
Aberto				
1,2 k Ω				
820 Ω				
390 Ω				

Tabela 4 – Valores dos ganhos de tensão e ganhos globais de tensão (considerar valores pico a pico).

Valores Simulados		
Carga – R_L	Ganho de tensão, $A_v = V_o/V_i$	Ganho global de tensão, $G_v = V_o/V_s$
Aberto		
1,2k Ω		
820 Ω		
390 Ω		
Valores Medidos		
Carga – R_L	Ganho de tensão, $A_v = V_o/V_i$	Ganho global de tensão, $G_v = V_o/V_s$
Aberto		
1,2k Ω		
820 Ω		
390 Ω		

6 – Relatório e Conclusões

Deverá ser apresentado um relatório, de acordo com o que foi estabelecido, onde devem constar, dentre outras coisas:

- 1) Os resultados obtidos durante a elaboração do trabalho preparatório, inclusive as curvas obtidas na simulação;
- 2) Os resultados obtidos durante a realização da prática do trabalho;
- 3) Uma análise crítica dos valores obtidos para os ganhos de tensão e ganhos globais de tensão, para os diferentes valores de carga.
- 4) Possíveis conclusões.

7- Bibliografia

BOGART, Theodore F. Dispositivos e Circuitos Eletrônicos. Makron Books.
 SEDRA, Adel S. e SMITH, K. C . Microeletrônica. Makron Books.
 LALOND, David E. e ROSS, John A . Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos. Makron Books.
 MARQUES, Angelo Eduardo B. Dispositivos Semicondutores: Diodos e Transistores. Érica.

1 – Título

Prática 11 – MOSFETs (parte 1)

2 – Objetivos

Determinar experimentalmente os parâmetros de um MOSFET. Estudar a operação nas 3 regiões: corte, saturação e triodo. Verificar o comportamento de um amplificador elementar a MOSFET.

3 – Fundamentos teóricos

Transistores de efeito de campo MOS do tipo enriquecimento (ou acumulação), ou simplesmente MOSFETs, têm um papel fundamental na Eletrônica moderna, visto que são os dispositivos predominantes nos circuitos integrados. São utilizados tanto em circuitos integrados digitais como em analógicos e mistos (*mixed-signal*).

Dois símbolos utilizados para este componente são ilustrados na Fig. 1. O da Fig. 1a mostra os quatro terminais do dispositivo: porta (*gate*), dreno, fonte (*source*) e substrato (*bulk*), como no símbolo da Fig. 1a. No entanto, em circuitos integrados, o substrato é conectado ao terminal ligado ao menor potencial (VSS ou GND, conforme o caso). Em dispositivos discretos, o substrato é internamente conectado à fonte. Nesses dois casos, o MOSFET é, na prática, tratado como um dispositivo de três terminais, admitindo um símbolo como o da Fig 1b.

Os MOSFETs discretos possuem aplicação predominante em circuitos de chaveamento, havendo inclusive dispositivos especialmente projetados para operar com níveis elevados de corrente de dreno e/ou tensão dreno-fonte, denominados MOSFETs de potência.



Fig. 1 – Símbolos do MOSFET (canal n): (a) completo (4 terminais); (b) simplificado (3 terminais).

Para o MOSFET, existem três regiões de operação: corte, saturação e triodo. A partir do circuito da Fig. 2a e do conjunto de curvas características do MOSFET (Fig. 2b), observa-se as condições que identificam as três regiões são as mostradas na Tabela 1, com suas respectivas equações (tomando como base um MOSFET de canal n).

Tabela 1 – Regiões de operação do MOSFET.

Região	Condição	Corrente de dreno, I_D
Corte	$V_{GS} < V_t$	$I_D = 0$
Triodo	$V_{GS} > V_t$ $V_{DS} < V_{GS} - V_t$	$I_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_t) \cdot V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$
Saturação	$V_{GS} > V_t$ $V_{DS} > V_{GS} - V_t$	$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$

Onde:

V_t – tensão de limiar

(W/L) : razão de aspecto (largura pelo comprimento do canal)

k'_n : parâmetro de transcondutância do processo (dado em $\mu A/V^2$ ou mA/V^2)

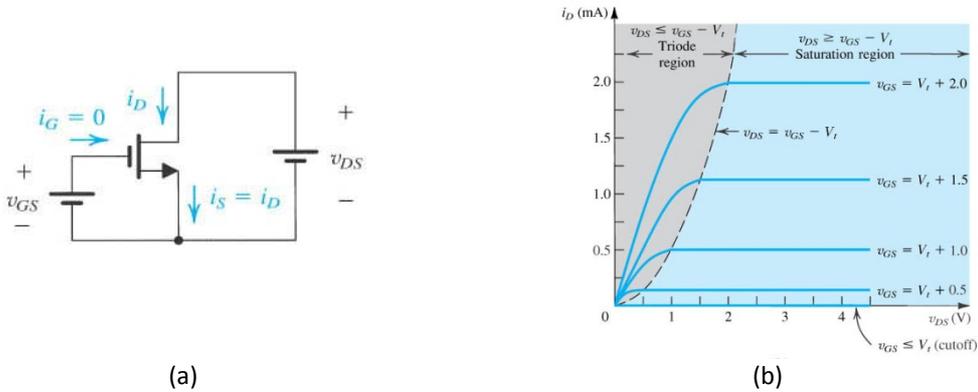


Fig. 1 – MOSFET: (a) Circuito para levantamento das curvas; (b) curvas características, denotando as três regiões de operação.

Nas aplicações em que o MOSFET é utilizado como dispositivo amplificador, ele deve ser convenientemente polarizado na região de *saturação*. O termo saturação pode ser entendido a partir do conteúdo teórico sobre MOSFETs, e não deve ser confundido com a região de saturação do transistor bipolar de junção, TBJ (o TBJ para operar como amplificador NÃO pode estar na saturação).

Para um MOSFET convenientemente polarizado na região de saturação com uma corrente I_D e uma tensão V_{GS} , o seu ganho de transcondutância será dado por

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{I_D} = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = \frac{2I_D}{(V_{GS} - V_t)}$$

É possível desta forma se implementar um amplificador elementar a MOSFET com o circuito da Fig. 2. É importante frisar que a tensão v_{GS} é composta de uma tensão DC de polarização, V_{GS} , sobreposta de um sinal AC, v_i . Para uma corrente I_D e uma tensão V_{GS} , o ganho do circuito A_v será dado por:

$$A_v = g_m \cdot R_D$$

Nesta atividade, determinaremos experimentalmente os parâmetros V_t e $k'_n \cdot (W/L)$ de um MOSFET discreto, o 2N7000. Este dispositivo é destinado principalmente para aplicações de chaveamento. Na verdade, praticamente todos os MOSFETs discretos disponíveis no mercado são especificados para aplicações de chaveamento, sendo as aplicações analógicas implementadas em MOSFETs integrados.

No entanto, uma análise da curva característica $I_D \times V_{DS}$ na folha de dados do 2N7000 mostra que é possível a sua operação na região de saturação. Observe que o documento informa os valores da tensão de limiar V_t , que pode apresentar grande variação de um componente para outro.

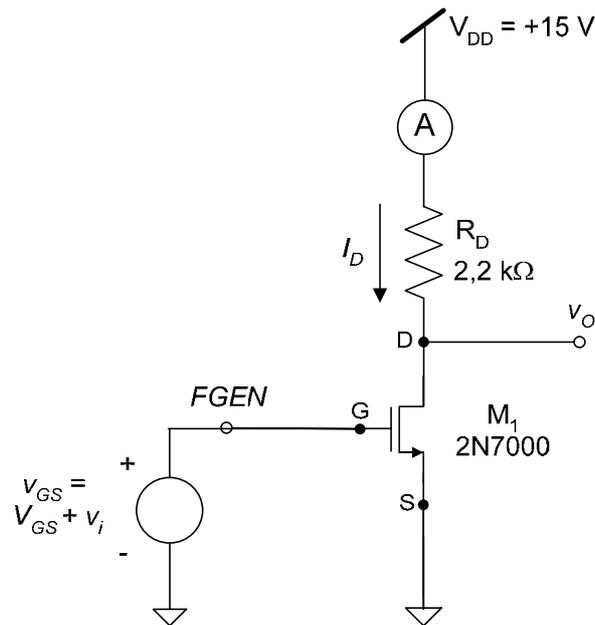


Fig. 2 – Amplificador a MOSFET elementar.

O parâmetro k'_n (W/L), não é informado, visto não ser de grande relevância para um dispositivo de chaveamento. A sua resistência dreno-fonte ON é de muito mais importância neste tipo de aplicação. É possível, no entanto, determinar este valor experimentalmente.

Determinados V_t e k'_n (W/L), calcularemos g_m para diferentes valores de V_{GS} . Em seguida, mediante a aplicação de um sinal v_{gs} sobreposto a V_{GS} , determinaremos A_v e verificaremos a validade dos cálculos para g_m .

OBS: em MOSFETs integrados, é possível ao projetista alterar a razão de aspecto. Esta não é possível determinar separadamente de k'_n em um dispositivo discreto através de experimentos. Razão pela qual determinaremos k'_n (W/L).

4 – Trabalho preparatório

- Revisão na teoria de MOSFETs, focando as regiões de operação do dispositivo, suas regiões de operação com as respectivas equações e considerações sobre não-idealidades.
- Análise da folha de dados do 2N7000, onde você deverá identificar os itens principais:
 - Máxima tensão dreno-fonte
 - Máxima tensão porta-fonte
 - Máxima corrente de dreno
 - Corrente de dreno para $V_{GS} = 0$
 - Tensão de limiar (valores mínimo, típico e máximo)
 - Capacitância de entrada
- Na folha de dados, procurar as curvas $I_D \times V_{GS}$. Comparar com as curvas $I_D \times V_{GS}$ estudadas na teoria.

1- Título

Prática 12 – MOSFETs (parte 2)

2- Objetivo

Montagem de um espelho de corrente utilizando MOSFETs. Entendimento das limitações práticas na montagem de um espelho de corrente com MOSFETs discretos.

3- Fundamentos teóricos

Espelhos de corrente são estruturas extremamente comuns em circuitos integrados, pois permitem que uma corrente de referência seja replicada em vários ramos do circuito. Dependendo das relações entre as razões de aspecto dos transistores, a corrente de referência pode ainda ser copiada multiplicada por um fator.

O espelho de corrente mais simples de todos é mostrado na FIG. É constituído de dois MOSFETs. Um deles (M1) recebe uma corrente de referência (ajustada pelo resistor R_{var} , externo ao circuito integrado). O transistor M2, por sua vez, copia a corrente de referência para o ramo ao qual está conectado o seu dreno.

Estando M1 com terminais de dreno e porta conectados (conexão como “diodo”), a relação entre sua tensão $V_{D1} = V_{GS1}$ e a corrente I_{D1} é

$$V_{D1} = \sqrt{\frac{2I_{D1}}{k'_n (W/L)_1}} + V_t$$

Obtida a partir da equação do MOSFET na região de saturação (nota: M1 está sempre na saturação).

Mas V_{D1} é também a tensão V_{GS2} . Assim, considerando que M2 esteja na região de saturação, temos

$$I_{D2} = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L}\right)_2 (V_{GS2} - V_t)^2 = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L}\right)_2 \left(\frac{2I_{D1}}{(W/L)_1}\right) = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{D1}$$

Observe que a relação entre I_{D2} e I_{D1} depende apenas das relações entre as razões de aspecto de M2 e M1. No entanto, é necessário que ambos os transistores possuam mesma V_t e k'_n . Isto é possível em circuitos integrados, mas de difícil obtenção em transistores discretos, razão pela qual espelhos de corrente não são implementações típicas em circuitos discretos, nem com MOSFETs nem com TBJs.

Ainda que os transistores sejam perfeitamente casados (mesmos W/L , V_t e k'_n), o efeito de modulação do canal (influência de I_D com V_{DS} , mesmo com o MOSFET na saturação) tende a gerar alguma diferença entre a corrente de referência e a corrente copiada. No entanto, o casamento (*matching*) entre I_{D1} e I_{D2} ainda será razoável.

Ainda que a implementação do espelho de corrente seja de difícil implementação com MOSFETs discretos, esta prática propõe a implementação de um espelho de corrente simples discreto, com o objetivo de testar esta topologia e verificar as suas não-idealidades. Nesta atividade, verificaremos:

- O funcionamento do espelho como uma fonte de corrente controlada por corrente;
- As diferenças entre I_{D1} e I_{D2} , devido aos descasamentos entre os transistores;
- A dependência de I_{D2} com a tensão V_{DS2} , que ocorre mesmo em um espelho com transistores perfeitamente casados.

4- Trabalho preparatório

Usando o modelo do MOSFET 2N7000, simular o circuito da Fig. 1, ajustando o resistor R_{var} de modo a obter três correntes de referência (I_{D1}): 200 μ A, 500 μ A e 1 mA. Para cada uma dessas correntes, use os seguintes valores de resistência de carga R_L : 10 k Ω , 4,7k Ω , 2,2 k Ω , 1 k Ω e 0 Ω (curto). Monitore I_{D2} , V_{DS2} e V_{DS1} ($= V_{GS1} = V_{GS2}$) para cada um dos casos, e registre os valores na Tabela 1.

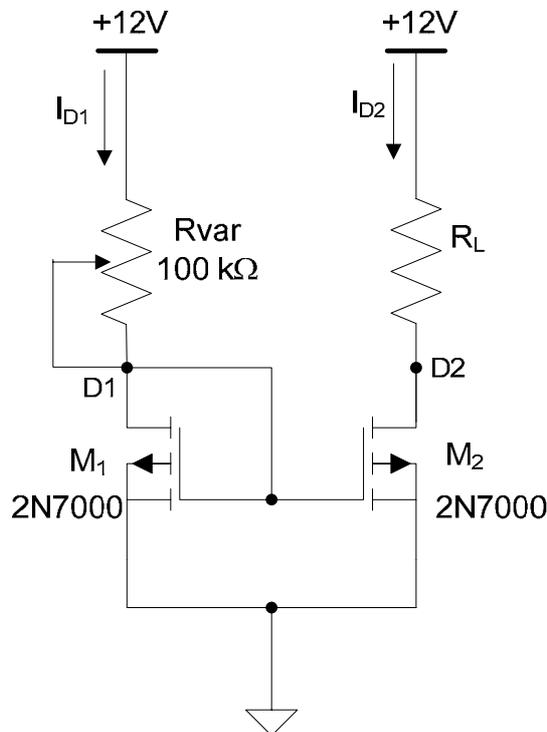


Fig. 1 – Espelho de corrente básico com MOSFETs.

Tabela 1 – Valores *simulados* para o circuito da Fig. 1.

I_{D1} (referência)	R_L	I_{D2}	V_{DS2}	$V_{DS1} = V_{GS1} = V_{GS2}$
200 μ A	10k			
	4,7k			
	2,2k			
	1k			
	0 (curto)			
500 μ A	10k			
	4,7k			
	2,2k			
	1k			
	0 (curto)			
1 mA	10k			
	4,7k			
	2,2k			
	1k			
	0 (curto)			

5- Execução

5.1) Encontrando MOSFETs com valores de V_t próximos.

O êxito do espelho de corrente depende do bom casamento dos transistores, o que já é sabido ser de difícil obtenção utilizando componentes discretos. Mas para tentar minimizar as discrepâncias, a equipe deve escolher dois elementos com valores de V_t próximos, o que será realizado nesta etapa prévia.

- Monte o circuito da Fig. 2, muito semelhante ao montado na prática anterior, com com o terminal de base conectado à saída do gerador de funções, FGEN. Conectar o multímetro do ELVIS como amperímetro, usando as pontas de prova com garras “jacaré”.
- Ajustar no instrumento virtual FGEN uma tensão senoidal de 0 V (porque a componente CA não interessa nesta etapa), com Offset igual a zero. Gradualmente, aumentar a tensão de Offset até que o amperímetro registre um aumento na corrente de dreno do MOSFET. Tente se aproximar ao máximo deste valor limite, que será admitido como a tensão de limiar V_t . Registrar o valor obtido.

- Substituir o transistor por outros e repetir o mesmo procedimento, anotando o valor obtido para V_t .
- Os transistores que tiverem os valores de V_t mais próximos deverão ser escolhidos para a montagem do espelho de corrente, na próxima etapa do experimento.

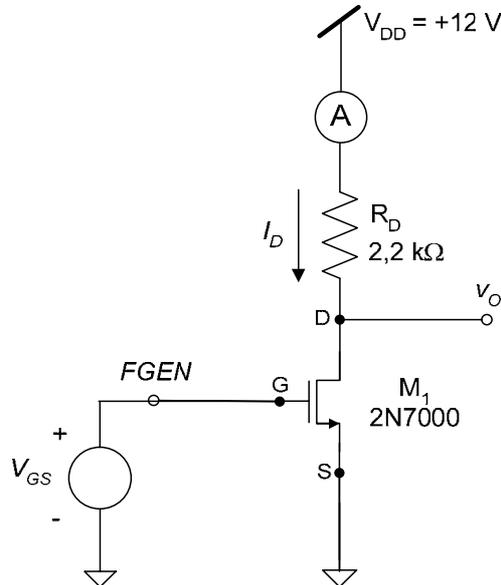


Fig. 2 – Circuito para determinação experimental de V_t .

5.2) Montando e testando o espelho de corrente.

- Monte o circuito da Fig. 1. Usando o multímetro do módulo ELVIS II como amperímetro, ajustar previamente a corrente de referência de $200 \mu\text{A}$, através do ajuste do potenciômetro.
- Conecte agora o amperímetro no outro ramo do circuito (do transistor M2), em série com cada um dos resistores de carga sugeridos. Registre o valor da corrente I_{D2} e, com o multímetro portátil ligado como voltímetro, os valores das tensões V_{DS2} e V_{DS1} , anotando esses valores na Tabela 2.
- Os procedimentos anteriores deverão ser repetidos também para uma corrente de referência de $500 \mu\text{A}$ e 1 mA . Registre os valores na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores *medidos* para o circuito da Fig. 1.

I_{D1} (referência)	R_L	I_{D2}	V_{DS2}	$V_{DS1} = V_{GS1} = V_{GS2}$
200 μ A	10k			
	4,7k			
	2,2k			
	1k			
	0 (curto)			
500 μ A	10k			
	4,7k			
	2,2k			
	1k			
	0 (curto)			
1 mA	10k			
	4,7k			
	2,2k			
	1k			
	0 (curto)			

6- Relatório e conclusões

Faça uma análise crítica detalhada dos resultados, comparando-os com os resultados teóricos (ideais) e os de simulação. Explique detalhadamente as razões para as divergências encontradas entre os resultados experimentais e os de simulação.

Se desejar, faça um gráfico representando os dados obtidos nos experimentos.

7- Bibliografia

- SEDRA, A. S., SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 5a edição, Pearson Prentice Hall, 2009/2010.
 BOYLESTAD, R. L., NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 8ª edição, Pearson Prentice Hall, 2004.
 RAZAVI, B. **Fundamentos de Microeletrônica**, LTC, 1ª ed., 2010.

1- Título

Prática de Reposição – *Dimmer* de Pequena Potência

2- Objetivo

Estudo da montagem de um *dimmer* de pequena potência através de amplificadores operacionais e transistores.

3- Fundamentos teóricos

Dimmers são circuitos eletrônicos capazes de realizar o controle de potência fornecida a uma lâmpada, através do chaveamento de um dispositivo. Normalmente esse dispositivo é uma chave de potência como um Triac, um tiristor ou Mosfet de potência.

Muitos dos procedimentos utilizados em sistemas industriais apresentam circuitos de disparo consideravelmente rebuscados. No caso deste trabalho, será adotada uma solução simples, porém eficiente, baseada no uso de amplificadores operacionais. E a chave de potência será substituída, por conveniência, por um transistor bipolar de sinal, já que a carga a ser acionada drena uma corrente relativamente baixa (aprox. 50 mA).

É importante destacar o intuito da prática, visto que não poderíamos usar um potenciômetro para controlar a carga demandada para circuitos de alto valor de potência, sem haver perdas consideráveis. Já com o uso do *dimmer*, podemos usar um potenciômetro em pequenos sinais, para controlar sinais de grandes potências, com pequenas perdas.

A técnica utilizada será a modulação por largura de pulso (PWM – *pulse width modulation*). Para a geração do sinal PWM, um sinal de referência v_{REF} é aplicado à entrada não-inversora de um comparador (já estudado em práticas anteriores). Na entrada inversora, é aplicada uma onda triangular v_f com uma frequência f . A saída do comparador, v_{OUT} , será $+V_{sat}$ quando $v_{REF} > v_f$, indo para $-V_{sat}$ quando $v_{REF} < v_f$. A frequência de v_{OUT} é f (a mesma da onda triangular), e a razão cíclica D (relação entre tempo em que v_{OUT} fica em nível alto e período total) será proporcional a v_{REF} . A razão cíclica também é denominada ciclo de trabalho (*duty cycle*).

O circuito a ser montado para obtermos o sinal PWM é mostrado na Figura 1. Ao variarmos a tensão de referência, iremos variar a razão cíclica do sinal PWM gerado na saída do amplificador operacional. Cabe ressaltar que o ampop utilizado (CA3140) pode ser alimentado apenas com tensão positiva, o que simplifica consideravelmente o projeto do circuito.

Ainda, é importante considerar que o resistor de base do transistor foi escolhido de modo que este opere como chave eletrônica, ou seja, nos modos corte e saturação, conforme o nível do sinal aplicado em sua base.

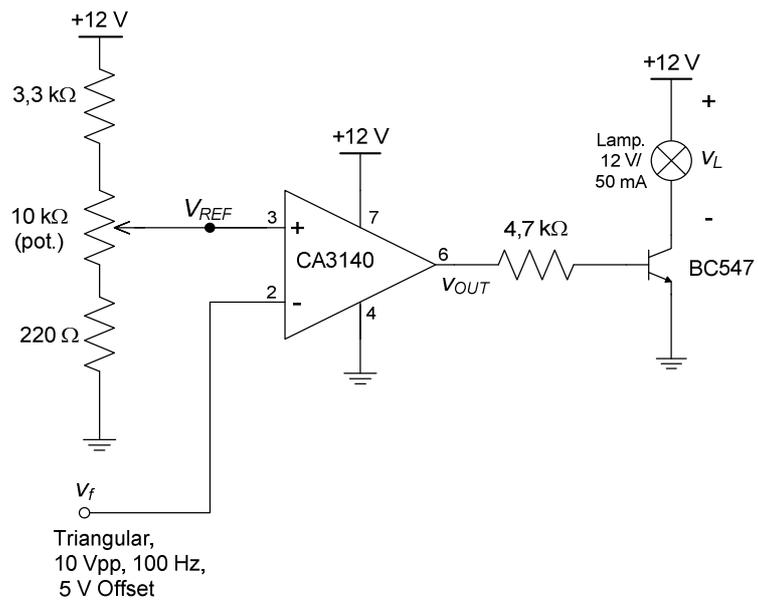


Figura 1 – Circuito do *dimmer* de pequena potência.

Como exemplo, são mostradas, nas Figuras 2, 3 e 4, formas de onda observadas na **entrada não inversora** (tensão de referência), **porta inversora** (onda triangular) e **saída** (PWM).

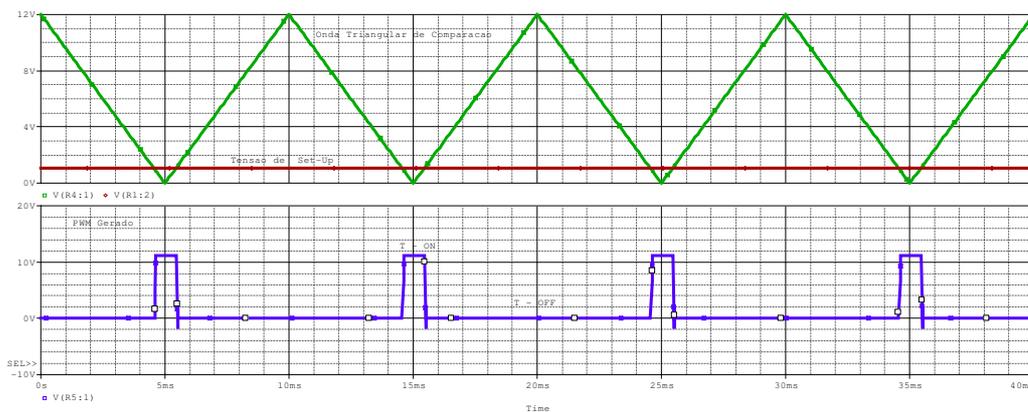


Figura 2 – PWM ciclo de trabalho baixo.

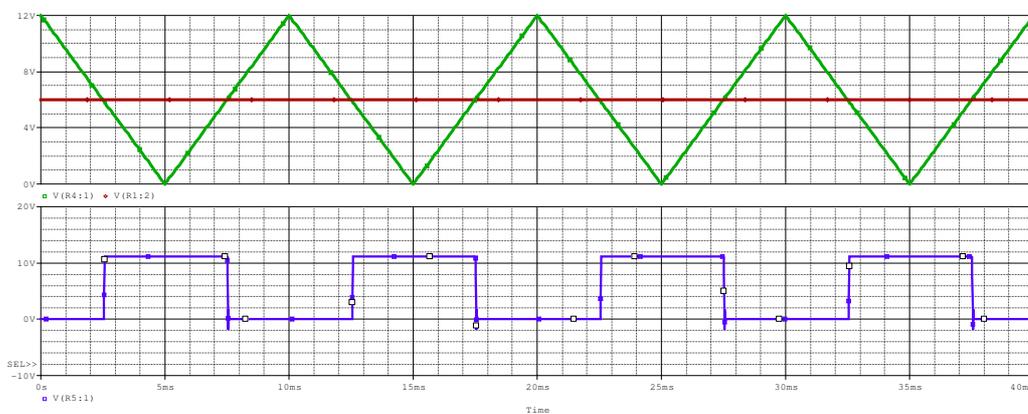


Figura 3 – PWM ciclo de trabalho mediano.

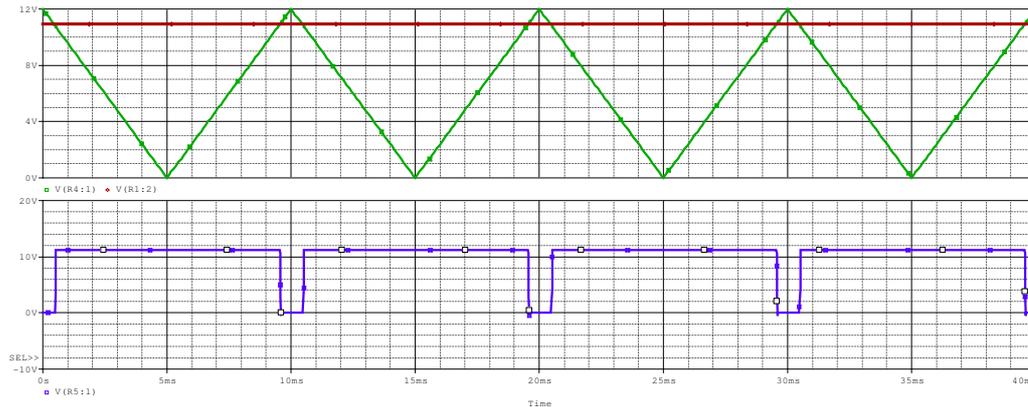


Figura 4 – PWM ciclo de trabalho alto.

4- Trabalho Preparatório

Simular o circuito proposto e verificar a validade das formas de ondas apresentadas.

5- Execução

- ✓ Montar o circuito proposto na Figura 1.
- ✓ Ajustar, no gerador de funções do módulo Elvis, uma onda triangular com $10 V_{pp}$, frequência de 100 Hz e tensão de Offset igual a 5 V. Aplicar este sinal na entrada inversora do ampop.
- ✓ Com o potenciômetro, variar a tensão na porta não inversora (V_{REF}) e analisar, qualitativamente, o comportamento da lâmpada.
- ✓ Com auxílio de um canal do osciloscópio, monitorar a onda triangular de entrada (sinal v_f). Com o outro canal, verificar t_{ON} , t_{OFF} , período (T) e frequência (f) do sinal na saída do amplificador operacional (v_{OUT}).
- ✓ Ajustar o potenciômetro para que o tempo t_{ON} no sinal de saída do ampop seja o mínimo possível. Meça t_{ON} e t_{OFF} , preenchendo a primeira linha da Tabela 1. Considerando que a razão cíclica é definida como $D = t_{ON}/T$, teremos, nesta situação, a menor razão cíclica possível para o circuito, que também deverá ser registrada na tabela. Para esta razão cíclica, meça, com o multímetro, o valor da tensão de referência V_{REF} e o valor médio da tensão na lâmpada, V_L (atenção: a tensão média é medida como uma tensão CC).
- ✓ Ajustar o potenciômetro para que os tempos t_{ON} e t_{OFF} sejam iguais ($D = 50\%$). Isto corresponderá a um brilho intermediário da lâmpada. Medir com o multímetro os valores médios de v_{REF} e v_L . Registrar os valores na Tabela 1.
- ✓ Ajustar o potenciômetro para que o tempo t_{ON} no sinal de saída do ampop seja o máximo possível. Isso equivalerá a um brilho máximo da lâmpada. Medir novamente t_{ON} e t_{OFF} . Medir com o multímetro os valores médios de v_{REF} e v_L . Calcular a nova razão cíclica D .
- ✓ Observando a tensão no coletor, você consegue notar que ele opera como chave eletrônica, ou seja, no corte e saturação? Com o cursor do osciloscópio, meça o valor da tensão de coletor, quando o transistor estiver ligado.

Tabela 1 – Valores obtidos para o *dimmer*.

Posição	t_{ON}	t_{OFF}	T	f	$D(\%)$	V_{REF}	V_L
1 – t_{ON} mínimo (D mínima)							
2 – $t_{ON} = t_{OFF}$ ($D = 50\%$)							
3 – t_{ON} máximo (D máxima)							

6- Relatórios e Conclusões

Deve obter:

- ✓ Resultados do trabalho preparatório (curvas obtidas na simulação).
- ✓ Resultados obtidos na execução do trabalho.
- ✓ Pergunta-se: por que não é possível medir t_{ON} , t_{OFF} , T e f diretamente na lâmpada, monitorando o sinal v_L ?
- ✓ Existe alguma correspondência a razão cíclica D e as razões $V_f(pp)/V_{REF}$ e V_L/V_{CC} ?
- ✓ Análise sobre a potência enviada para a lâmpada.
- ✓ O valor da tensão de coletor do transistor, quando ele estiver ligado. De acordo com a teoria, este valor está adequado?

7- Bibliografia

SEDRA, Adel S.; SMITH, K. C. Microeletrônica. – Pearson Prentice Hall.

SEABRA, Antônio Carlos. Amplificadores Operacionais. – Érica.