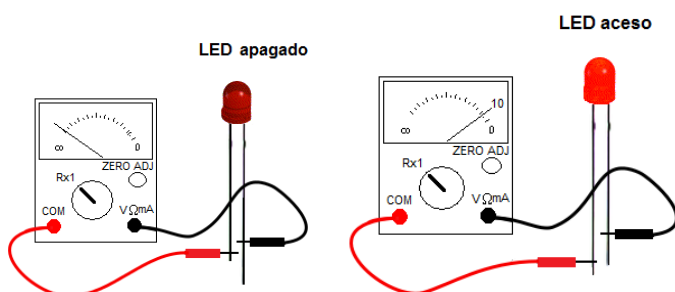
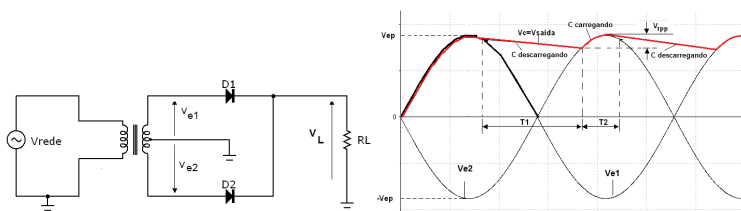
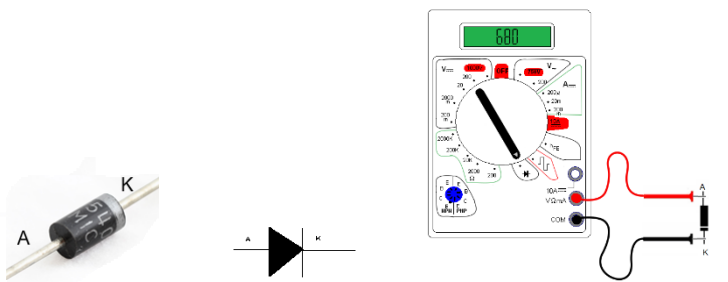


Eletrônica Analógica Básica 1

Teoria e Simulação



Introdução – A Eletrônica

Em cursos anteriores, Circuitos Elétricos em CC e CA foram estudados os circuitos elétricos. Circuitos elétricos são constituídos de componentes passivos conectados entre si por fios. Em um circuito eletrônico de alguma forma o fluxo de corrente pode ser controlado por outro dispositivo, chamado de ativo. Em circuitos elétricos os dispositivos que controlam o fluxo da corrente são chaves, potenciômetros e outros. Em eletrônica a diferença é que ao invés de usar força mecânica para efetuar isso, são usados dispositivos eletrônicos para esse controle. Isto é, é a eletricidade controlando a eletricidade, essa é a principal diferença entre esses dois mundo.

Esse livro tem um conteúdo semelhante ao de qualquer livro de eletrônica, mas o diferencial é que existe uma parte pratica que é feita em um simulador. Os simuladores usados estão disponíveis de forma gratuita na Internet, o [Simulador 1](#), da National Instruments e permite simular circuitos e salvar na nuvem. O outro simulador, [Simulador 2](#), da Auto Desk, também pode ajudar você. As diferenças principais é que no Simulador 1 é baseado no SPICE e os circuitos são apresentados através dos símbolos, enquanto o Simulador 2 não é baseado no SPICE, e os componentes são mostrados como são na vida real. Faça a inscrição nos dois basta um e-mail e senha.

Cada arquivo de simulação do livro pode ser acessado, e se você vez a inscrição, pode executá-lo. A seguir alguns links sobre os dois simuladores.

Multisim On Line – [Curso Básico](#) (HTML)

[Análise Interactive](#) (Vídeo)

[Analise Transiente](#) (Vídeo)

[Analise AC – Curva de Resposta em Frequência](#) (Vídeo)

Tinkercad – Curso Básico – [Aula01](#) (HTML)

Índice

Capítulo 1 Semicondutores - Diodo de junção

1.1.	Semicondutores.....
1.1.1.	Semicondutor Intrínseco.....
1.1.2.	Semicondutores Extrínsecos.....
1.2.	Junção PN.....
1.2.1.	Junção PN com polarização reversa.....
1.2.2.	Junção PN com polarização direta.....
1.3.	Diodo de junção.....
1.3.1.	Curva característica do diodo.....
1.3.2.	Diodo polarizado diretamente
1.3.3.	Diodo polarizado reversamente
1.3.4.	Modelos do diodo
1.3.5.	Testando o diodo

Capítulo 2 – Aplicações de Diodos Semicondutores

2.1.	Retificadores.....
2.1.1.	Retificador de meia onda
2.1.2.	Retificador de onda completa
2.1.2.1.	Retificador Onda Completa C.T
2.1.2.2.	Retificador Onda Completa em Ponte
2.2.	Retificadores com Filtro capacitivo
2.2.1.	Retificador M.O com Filtro
2.2.2.	Retificador de onda completa CT com filtro capacitivo
2.2.3.	Retificador em Ponte com Filtro
2.2.3.1.	Problema em aumentar C – Corrente de Surto
2.2.4.	Grampeadores
2.2.4.1.	Grampeador positivo
2.2.4.2.	Grampeador negativo
2.2.5.	Multiplicador de tensão
2.2.6.	Limitadores
2.2.6.1.	Limitador Positivo_
2.2.6.2.	Limitador Negativo
2.2.6.3.	Limitador Positivo e Negativo

Capítulo 3 – Outros tipos de diodo

3.1.	Diodo Emissor de Luz.....
3.2.	Fotodiodo.....
3.3.	Varicap.....
3.4.	Diodo Zener.....

Capítulo 4 – Reguladores de Tensão

4.1	Regulador Zener.....
4.2	Reguladores integrados de três terminais.....
4.3	Reguladores 78XX e 79XX
4.4	Regulador LM 317.....

Capítulo 1 - Semicondutores - Diodo de junção

Neste capítulo serão apresentados os materiais semicondutores e sua principal aplicação, a junção PN, o diodo de junção, aplicações do diodo, Diodo Zener e reguladores de 3 terminais.

1.1 Semicondutores

Os materiais usados em eletrônica se classificam em condutores (Ex: cobre, alumínio, ferro, ouro, prata, etc.) e isolantes (Ex: madeira, borracha, ar, vidro etc.), mas existe um outro tipo de material chamado de semicondutor (pois tem resistividade intermediária entre condutor e isolante) que também é largamente usado em eletrônica principalmente depois dos anos 50 após a descoberta do transistor. Estes materiais ao contrário dos condutores têm a sua resistividade alterada quando é fornecida algum tipo de radiação (térmica e luminosa principalmente). Devido às suas características esses materiais são usados construção de diodos, transistores, sensores, circuitos integrados e numa vasta gama de componentes eletrônicos. Os principais semicondutores são o Silício (Si) e o Germânio (Ge), que possuem propriedades semelhantes. A Figura 1.1 mostra uma escala de resistividade de alguns materiais. As principais diferenças entre um semicondutor e um metal são:

- Um metal tem um único tipo de portador de carga, elétrons livres; a resistividade **aumenta** com a temperatura;
- Um semicondutor tem dois tipos de portador de carga, elétrons livres e lacunas; a resistividade **diminui** com o aumento de temperatura ou outro tipo de energia como radiação luminosa.

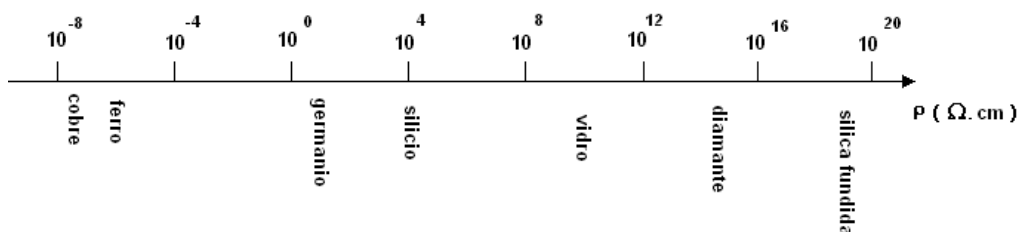


Figura 1.1 – Classificação dos materiais quanto ao seu valor da resistividade

1.1.1 Semicondutor intrínseco

Que materiais são esses? Quais as suas principais características? Os primeiros semicondutores usados foram o Germânio (Ge) e o Silício (Si), mas outros semicondutores já estão sendo utilizados atualmente, como Arsenieto de Gálio (AsGa) e outros. São enfatizados os dois primeiros devido à maior quantidade de informações sobre os mesmos.

Para entender melhor o comportamento de um semicondutor a análise deve ser feita do ponto de vista atômico (existe outra análise que se costuma fazer através do conceito de banda de energia). A Figura 1.2a mostra a estrutura de um átomo de Si, no qual verifica-se que o mesmo tem 4 elétrons na camada de valência (última camada). Como é essa última camada que determinará as propriedades do Si, a partir de agora só é considerado o núcleo, positivo e os quatro elétrons da camada de valência, Figura 1.2b.

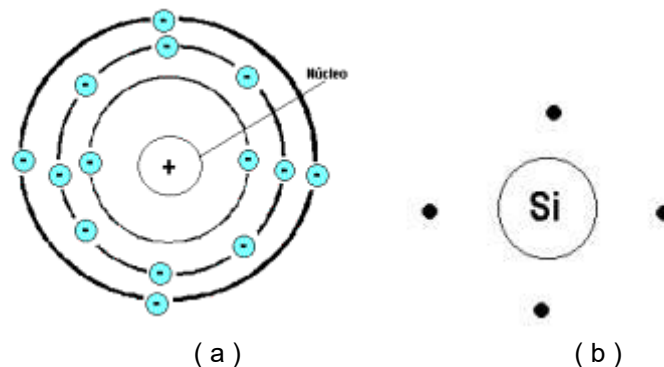


Figura 1.2 – Estrutura simplificada do átomo de Si

É importante observar que o átomo é neutro, pois o número de elétrons é igual ao número de prótons. O Si é um cristal, isto é, o arranjo geométrico dos átomos é feito de forma regular e ordenada em todas as direções. No caso esse arranjo é chamado de cúbico, no qual cada átomo se liga com quatro átomos vizinhos através de ligações chamadas de **covalentes**. A Figura 1.3 mostra esse arranjo no plano (2D). Não esquecer que na realidade os átomos estão dispostos no espaço em 3 dimensões.

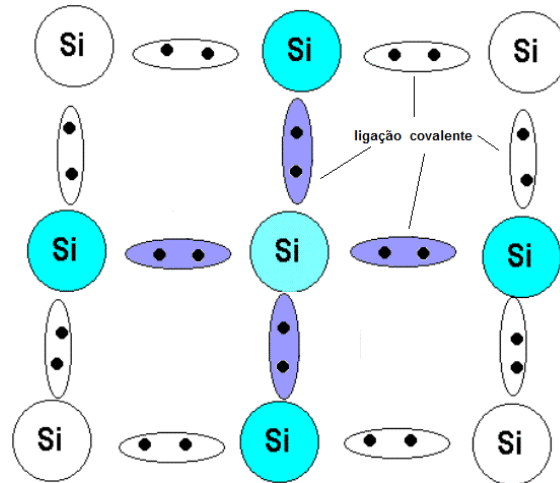


Figura 1.3 – Estrutura cristalina do Si a 0°K (-273°C) - O material se comporta como isolante

1.1.1.1 Geração de portadores de carga

A temperaturas próximas do zero absoluto (-273 °C) o Si se comporta como um isolante porque não existem elétrons livres disponíveis para a condução. À medida que a temperatura aumenta a energia que é fornecida aos elétrons da última camada (camada de valência) é suficiente para "quebrar" a ligação covalente fazendo com que eles se tornem livres. O extraordinário desse fenômeno é que, além do elétron que foi liberado, a ausência desse elétron na ligação covalente pode se comportar como carga elétrica, e chamada de **lacuna** ou **buraco**. A Figura 1.4 mostra a mesma estrutura da Figura 1.3 considerando que algumas ligações covalentes foram rompidas. A quantidade de energia necessária para quebrar uma ligação depende do semiconductor, no caso do Ge é 0,72 eV e para o Si 1,1 eV, à temperatura ambiente.

Obs: 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J

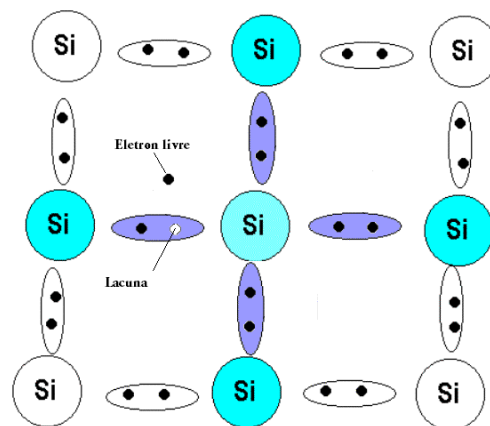


Figura 1.4 – Estrutura do Si a uma temperatura acima de 0°K (acima de - 273°C) - Geração de pares elétron-lacuna

1.1.1.2 Concentração intrínseca

Se n é o número de elétrons por unidade de volume (por cm^3) e p o número de lacunas por unidade de volume então:

$n=p=n_i$ = concentração intrínseca do semiconductor que no caso vale:

$$n_i = 2,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \text{ para o Ge}$$

$$n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ para o Si}$$

à temperatura ambiente de 27°C pois n_i depende da temperatura

Significa que em 1 cm^3 do material tem esse número de elétrons livres/lacunas

Esse número mostra que o Ge é mais dependente da temperatura, por isso não é mais usado para fazer componentes (diodo, transistor etc.).

1.1.1.3 Mecanismo de condução das Lacunas

Se for aplicado um campo elétrico (tensão elétrica) ao cristal de Si, uma corrente elétrica aparecerá. O mecanismo de condução devido aos elétrons livres já é conhecido. expliquemos como é o mecanismo de condução devido a uma lacuna. A Figura 1.5 mostra o cristal de Si sendo submetido a um campo elétrico. Os elétrons livres se deslocarão contra o campo elétrico, enquanto as lacunas se deslocarão no mesmo sentido do campo. Mas como isso acontece? A sequência de Figuras mostra como isso acontece. Na Figura 1.5, num instante t_1 temos um elétron livre (círculo preto) e a ausência desse elétron na ligação covalente (círculo branco) que é a lacuna.

Instante t_1

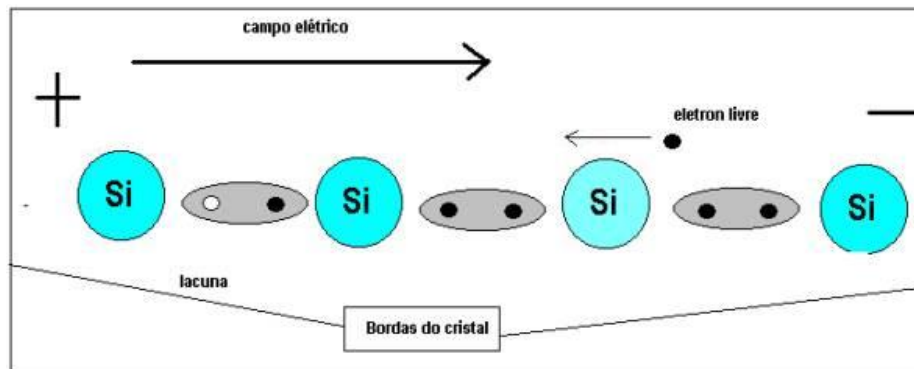


Figura 1.5 – Cristal de Si submetido a um campo elétrico (tensão elétrica) num instante t_1

Num instante t_2 um elétron de valência, caso tenha energia suficiente (quem está fornecendo essa energia é a fonte externa) poderá ocupar a lacuna, mas ao fazer isso deixa uma lacuna, e assim sucessivamente. A Figura 1.6 e Figura 1.7 mostram essa sequência. Então tudo se passa com se uma carga positiva estivesse se deslocando para a direita do cristal, na realidade são **elétrons de valência** que se deslocam no sentido contrário. Observar que esses elétrons de valência se transformam em elétrons livres quando entram no metal (não esqueça o semicondutor está ligado à bateria através de fios de cobre!!!).

Instante t2

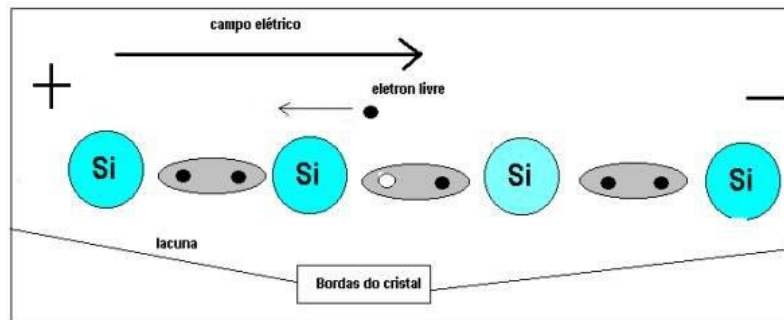


Figura 1.6 – Cristal de Si submetido a um campo elétrico (tensão elétrica) num instante t2

Deslocamento da lacuna para posição direita, Figura 1.7.

Instante t3

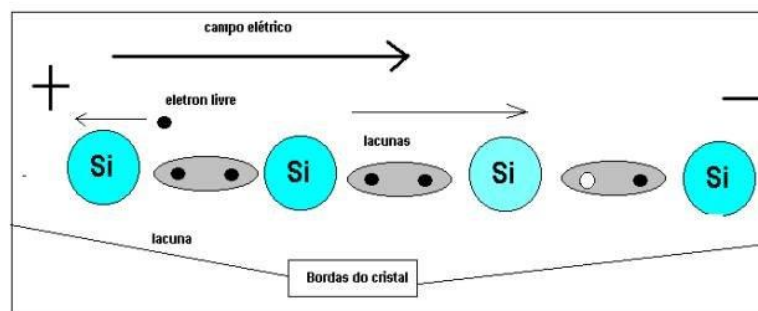


Figura 1.7 – Cristal de Si submetido a um campo elétrico (tensão elétrica) num instante t3

A corrente total no cristal será a soma do fluxo de elétrons com o fluxo de lacunas:

$$I_T = I_e + I_l$$

No caso de um semiconductor intrínseco (puro) o número de elétrons por unidade de volume (n) é igual ao número de lacunas por unidade de volume (p):

$$n=p=n_i, \text{ } n_i \text{ é a concentração intrínseca do semiconductor}$$

Elétrons livres e lacunas contribuem igualmente para a corrente elétrica. Observe que essa corrente é altamente dependente da temperatura, pois o número de elétrons livre e lacunas aumenta quando a temperatura aumenta.

1.1.2 Semicondutores Extrínsecos

Os semicondutores intrínsecos têm como principal característica o fato da concentração (número de portadores por cm^3) de elétrons livres ser igual à de lacunas e o seu número ser altamente depende da temperatura. Um semiconductor extrínseco

terá algumas de suas características elétricas (como por exemplo, a condutividade) alterada se forem adicionadas impurezas com níveis de concentração adequados.

1.1.2.1 Semicondutor Tipo N

O semicondutor tipo N é obtido adicionando-se quantidades controladas de **impurezas pentavalente** ao material puro (semicondutor intrínseco). Por exemplo, adicionando-se o fósforo (P) o qual é pentavalente (5 elétrons na camada de valência), o mesmo substituirá um átomo de semicondutor (Ge ou Si) na estrutura cristalina. Quatro dos seus elétrons serão compartilhados com quatro átomos vizinhos de Si enquanto o quinto elétron poderá se tornar livre em temperaturas muito baixas sem que seja gerada lacuna. A energia de ligação do quinto elétron é muito menor do que a energia de ligação de um elétron de valência.

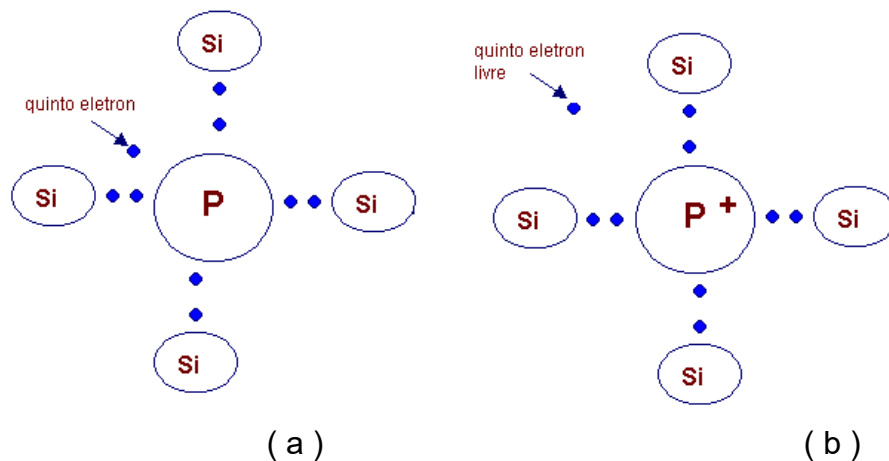


Figura 1.8 – (a) Átomo de fósforo ligado a quatro átomos de Si (b) quinto elétron livre, gera um íon positivo preso à estrutura cristalina

Desta forma inicialmente só teremos elétrons livres como portadores de carga, por isso o material é chamado de N e a impureza de doadora. Aumentando-se mais ainda a temperatura será atingida uma temperatura para a qual serão gerados os pares elétron-lacuna. Os elétrons livres são chamados de **portadores majoritários** enquanto as lacunas são chamadas de **portadores minoritários**.

Se N_D é a concentração (número de átomos por cm^3) de átomos da impureza, a concentração de elétrons livres no equilíbrio térmico (taxa de geração de pares elétron-lacuna = taxa de recombinação de pares), n_{n0} , será dada por:

$n_{n0} \cong N_D$ e a concentração de lacunas será calculada aproximadamente por:

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

onde n_i é a concentração intrínseca de pares elétron - lacuna, valendo $2,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ para o Ge e $1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ para o Si a temperatura ambiente de 27°C .

Como n_i depende da temperatura, significará que a concentração de lacunas será dependente da temperatura, porém como a concentração de elétrons livres será praticamente igual N_D então não dependerá da temperatura.

A origem dos elétrons são os átomos de fósforo, e a origem das lacunas a quebra de ligações covalente, portanto a temperatura, isto é, os portadores minoritários são **gerados termicamente**. A corrente em um material N é devida praticamente aos portadores majoritários, isto é, elétrons livres. Essa corrente não depende da temperatura.

$$I = I_{\text{elétrons}} + I_{\text{lacunas}} \cong I_{\text{elétrons}}$$

1.1.2.2 Semicondutor Tipo P

O semicondutor tipo P é obtido adicionando-se quantidades controladas de **impurezas trivalentes** ao material puro (semicondutor intrínseco). Um exemplo deste tipo de impureza é o boro (B). Como o boro é trivalente os seus três elétrons de valência serão compartilhados com quatro átomos de Si, porém uma das ligações não será completada. Observar que essa ligação não completada não é uma lacuna, o átomo está neutro.

Quando um elétron de valência de um átomo vizinho se deslocar para ocupar aquela vaga, e a energia necessária novamente é menor que a energia para quebrar uma ligação covalente, o átomo de boro ficará ionizado negativamente e ausência do elétron de valência na ligação será uma lacuna. Claramente, foi gerado uma lacuna sem gerar elétron livre.

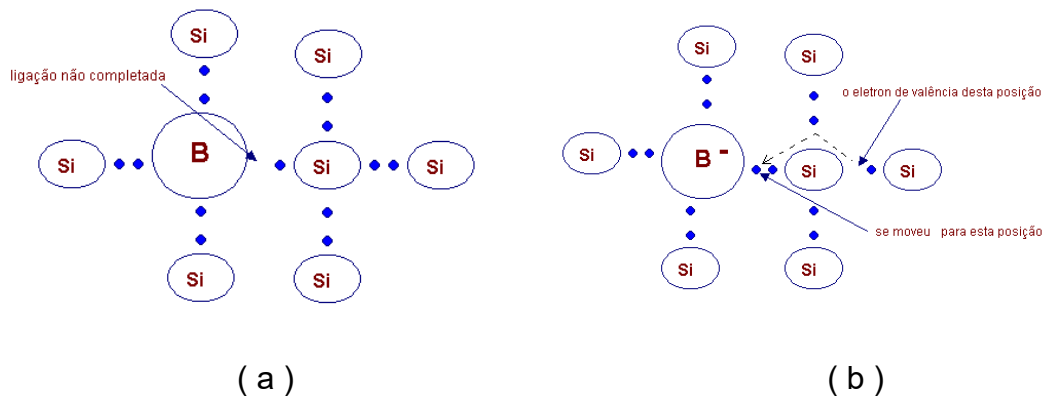


Figura 1.9 – (a) Átomo de boro ligado a quatro átomos de Si (b) a vaga (lacuna) é preenchida por um elétron de valência de um átomo próximo, gera um íon negativo preso à estrutura cristalina

Desta forma, inicialmente só existem lacunas livres como portadores de carga, por isso o material é chamado de P e a impureza de aceitadora. Aumentando-se mais ainda a temperatura será atingida uma temperatura para a qual serão gerados os pares elétron-lacuna. As lacunas livres são chamadas de **portadores majoritários** enquanto os elétrons livres são chamados de **portadores minoritários**.

Se N_A é a concentração de átomos da impureza aceitadora por cm^3 , a concentração de lacunas livres no equilíbrio térmico (taxa de geração de pares elétron-lacuna = taxa de recombinação de pares), p_{n0} , será dada por:

$p_{n0} \cong N_A$ e a concentração de elétrons livres será calculada aproximadamente por:

$$n_{n0} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Importante lembrar!! os materiais N e P são eletricamente neutros, as cargas livres são neutralizadas pelos íons presos à estrutura cristalina. A corrente em um material P é praticamente devida às lacunas.

A origem das lacunas são os átomos de boro, e a origem dos elétrons livres a quebra de ligações covalente, portanto a temperatura, isto é, os portadores minoritários são gerados termicamente. A corrente em um material P é devida praticamente aos portadores majoritários, isto é, lacunas. Essa corrente não depende da temperatura.

$$I = I_{\text{eletrons}} + I_{\text{lacunas}} \cong I_{\text{lacunas}}$$

1.2 A Junção PN

É obtida conectando-se, de forma adequada, uma barra de material P a uma de material N. Como existe uma diferença de concentração de portadores de ambos os lados da junção, inicialmente haverá uma difusão de elétrons livres do lado N indo para o lado P e ao mesmo tempo lacunas se difundirão do lado P para o lado N. A consequência disso é que do lado N aparecerão íons positivos não neutralizados e do lado P íons negativos não neutralizados fazendo aparecer uma região que não tem cargas livres, por isso é chamada de **região de depleção** ou **região de carga espacial** (r.c.e).

Essa distribuição de cargas cria uma barreira a qual se oporá à difusão de mais portadores majoritários, lacunas no lado P e elétrons livres no lado N. Essa corrente é representada por $I_{\text{Difusão}}$ na Figura 1.10.

Caso algum portador minoritário (aqueles gerados pela temperatura), elétron livre do lado P ou lacuna do lado N, se aproxime desta região, será acelerado pelo campo aí existente e passará para a outra região. Esse fluxo é representado na Figura 1.10 por I_{Deriva} ou corrente reversa de saturação (I_s). No equilíbrio, a soma das correntes através da junção é zero, isto é, $I_{\text{Deriva}} = -I_{\text{Difusão}}$. A Figura 1.10 mostra a junção PN no equilíbrio quando não tem tensão externa.

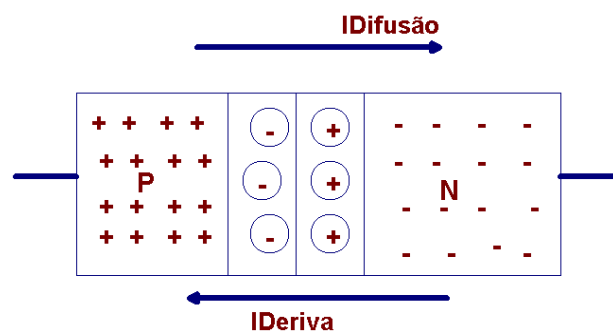


Figura 1.10 – Junção PN em aberto mostrando as duas correntes (difusão e de deriva)

1.2.1 Junção PN com polarização reversa

Quando for aplicada uma tensão com a polaridade indicada na Figura 1.11, a largura da região de depleção aumentará, pois os elétrons livres do lado N são atraídos pelo polo positivo da bateria e as lacunas do lado P são atraídas pelo polo negativo. A consequência é o aumento da largura da r.c.e e o consequente aumento na altura da barreira de potencial dificultando mais ainda a passagem dos portadores majoritários de um lado da junção para o outro. A única corrente existente é a corrente devido aos portadores minoritários cujo número depende unicamente da temperatura, desta forma esta corrente também chamada de corrente reversa de saturação (I_s) só dependerá da temperatura sendo da ordem de nA (Si) ou μ A (Ge), observando que essa corrente (I_s) é ajudada pelo campo elétrico que se estabelece na região de carga espacial.

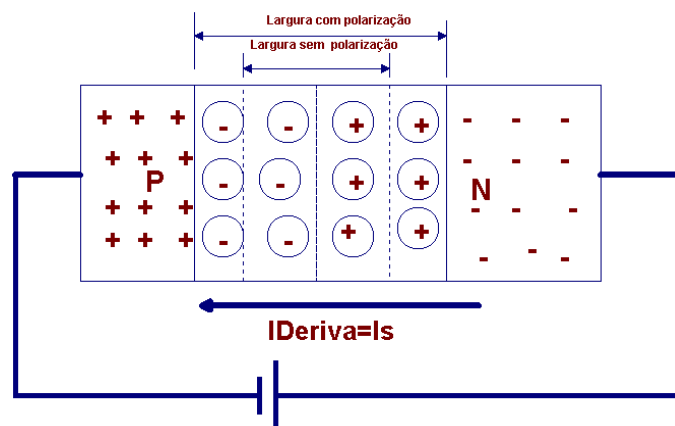


Figura 1.11 – Junção PN com polarização reversa

1.2.2 Junção PN com polarização direta

Quando for aplicada uma tensão com a polaridade indicada na Figura 1.12, a largura da região de depleção diminuirá, diminuindo a altura da barreira de potencial e facilitando o deslocamento dos portadores majoritários de um lado da junção para o outro. Inicialmente toda a tensão estará aplicada diretamente na região da junção, baixando a barreira de potencial, e a queda de tensão no material N e P é desprezível. A corrente é controlada pela variação da altura da barreira.

A medida que a corrente aumenta, a tensão externa se distribui entre o material e a barreira. A partir desse ponto a corrente passa a ser controlada pela resistência direta do material (a corrente no material passa a ter um comportamento aproximadamente linear com a tensão). Colocando adequadamente terminais de contato em ambas as extremidades teremos um componente chamado de **diodo de junção**.

Atenção!! Para limitar a corrente no circuito é necessário colocar em serie com o diodo uma resistência (R), caso contrário a corrente pode aumentar muito destruindo o componente por efeito Joule.

A corrente só aumentará efetivamente quando a tensão aplicada entre os terminais exceder aproximadamente 0,5 V que é chamada de tensão de corte.

Após a condução plena a tensão será de aproximadamente 0,7 V (para diodo de Si) que é o valor adotado para considerar a junção polarizada diretamente (existem autores que adotam 0,6 V).

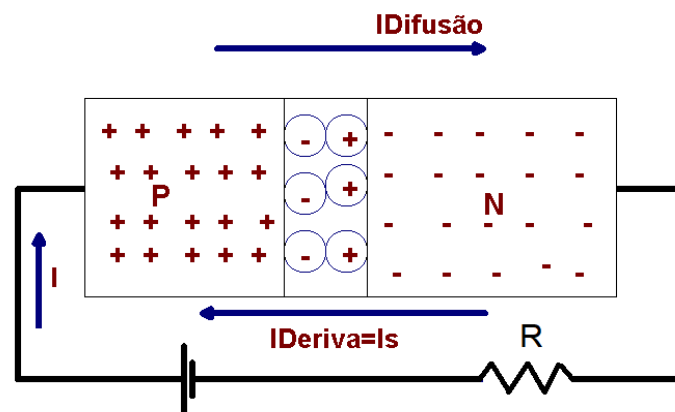


Figura 1.12 – Junção PN com polarização direta

Observe que a corrente total através da junção (I) será constituída de duas componentes, a corrente de saturação mais a corrente de difusão, sendo que a de difusão é muito maior que a de saturação. Desta forma:

$$I = I_D - I_S \approx I_D$$

A equação da corrente através da junção é dada por:

$$I = I_S \cdot (e^{\frac{V_D}{\eta \cdot V_T}} - 1)$$

equação 1

Na equação 1

I_S é a corrente reversa de saturação,

V_D é a tensão aplicada na junção,

η depende de aspectos construtivos, normalmente vale 1

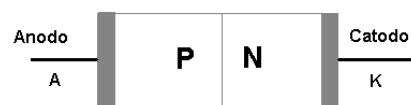
V_T é uma constante que depende da temperatura valendo 26 mV na temperatura ambiente ($T=300$ Kelvin).

I será positiva caso o diodo esteja polarizado diretamente ($V_D > 0$) e negativo com o diodo polarizado reversamente ($V_D < 0$).

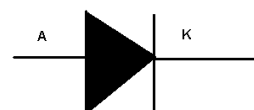
1.3 Diodo de Junção

Um diodo é um componente que é essencialmente uma junção PN onde foram colocados terminais, tendo todas as suas características, portanto deixará que a corrente passe somente em um único sentido quando adequadamente polarizado (**polarização direta**), bloqueando a corrente quando a polaridade da tensão inverter (**polarização reversa**), funciona como uma válvula.

A Figura 1.13 mostra o diodo com a indicação dos dois terminais, anodo (A) e catodo (K), o símbolo, e o diodo em polarização direta e polarização reversa bem como aspecto físico de diodos comerciais. Observar que o símbolo mostra o sentido de condução através de uma seta.



(a)



(b)



(c)

Figura 1.13 – (a) Junção com terminais ôhmicos (b) símbolo do diodo de junção (c) imagens de diodos

Existem diferentes tipos de diodos para diversas aplicações:

- Diodo para retificação (de potência ou não);
- Diodo rápido - Schottky (para uso em circuitos de chaveamento);
- Diodo de proteção – TVS (*Transiente Voltage Supression* – Diodo de Supressão de Tensão Transiente);
- Diodo para regulação ou limitação de tensão (Zener);
- Diodo emissor de luz - LED (*Light Emitting Diode* – Diodo de Emissão de Luz);
- Diodo sensor de luz (fotodiodo) e outros de aplicações mais específicas, mas todos tem uma característica em comum que é a junção PN.

1.3.1 Curva característica do diodo

É o gráfico da corrente no diodo, I_D , em função da tensão no diodo, V_D , a Figura 1.14. mostra a curva de um diodo de junção para o caso de diodo de silício (Si). Observar que é essencialmente a curva da junção PN.

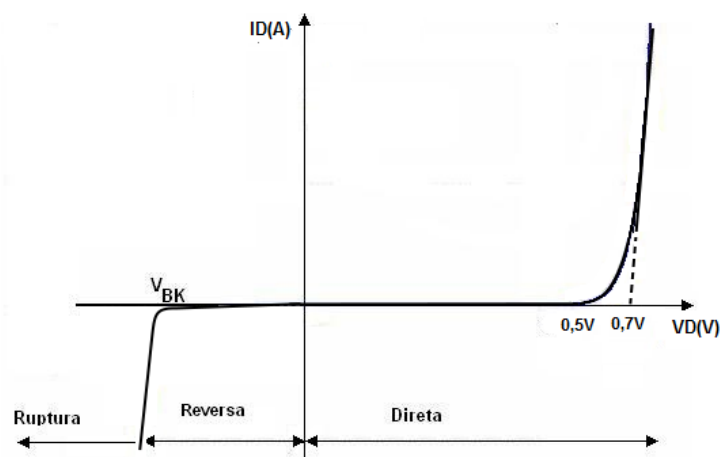


Figura 1.14: Curva característica de um diodo de Si
Diodo - Curva característica (Simulador 1)

No gráfico da Figura 1.14 aparecem 3 regiões bem definidas

1. Região de polarização direta: $V_D > 0$:
2. Região de polarização reversa: $V_D < 0$
3. Região de ruptura: $V_D < -V_{BK}$

Em polarização direta a relação entre tensão no diodo (V_D) e corrente no diodo (I) é:

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

Onde I_S é a corrente reversa de saturação, η é uma constante que depende da forma como a junção foi construída, V_T é uma constante que depende da temperatura valendo aproximadamente 26 mV a 20° C e V_D é a tensão aplicada na junção.

Portanto na equação 1 para $V_D > 0$ e $V_D \gg 26$ mV e considerando $\eta = 1$ o termo negativo dentro do parêntese é desprezado e a expressão resulta

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} \right)$$

Para $V_D < 0$ e algumas vezes maior do que 26 mV a expressão de I será aproximadamente igual a $-I_S$.

$V_D < V_{BK}$ = tensão de ruptura (*Breakdown*) ocorre a ruptura da junção e o diodo será destruído por efeito joule.

Em alguns casos o diodo é construído especialmente para operar nessa região, é o caso do Diodo Zener.

Obs: em um **Datasheet** (folha de dados) V_{BK} é denominado de V_{RRM} (*Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage* - Máxima tensão reversa de pico repetitiva)

1.3.2 Diodo polarizado diretamente

Para o diodo conduzir, mesmo em polarização direta, é necessário que a tensão da bateria seja de pelo menos 0,7 V (para vencer a barreira de potencial). Em condução um diodo apresenta uma queda de tensão de aproximadamente 0,7 V (diodo de Si). No circuito da Figura 1.15 a corrente no circuito é de aproximadamente 11,3 mA, isto é, por análise de circuito pode-se estimar a corrente no circuito, basta escrever a equação da malha:



Figura 1.15 – Circuito com o diodo polarizado diretamente
Diodo Polarizado Diretamente (Simulador 1)
Diodo polarizado reversamente (Simulador 2)

Solução:

Equação da malha: $20 = R_L \cdot I + 0,7$ daí obtém-se que

$$I = \frac{20 - 0,7}{1k} = 19,3 \text{ mA}$$

1.3.3 Diodo polarizado reversamente

Com polarização reversa a corrente no diodo será muito baixa (da ordem de nA para diodos de Si), de forma que do ponto de vista prático será zero. Esta corrente reversa também chamada de corrente de fuga só depende de aspectos construtivos (dopagem), da temperatura (dobro de valor para cada 10 graus de aumento na temperatura) e dimensões do diodo. Observe que quando polarizado reversamente toda a tensão da fonte cairá entre os terminais do diodo, Figura 1.16a, que deverá ter capacidade para suportar essa tensão reversa, caso contrário pode ocorrer um fenômeno chamado de avalanche o que pode levar à destruição do diodo.

A corrente de fuga é a soma da corrente reversa de saturação (I_s) com a corrente superficial.

A corrente de saturação só depende da dopagem do semicondutor e da temperatura e a corrente superficial depende das dimensões físicas do diodo, variando com a

tensão aplicada. Como a corrente é muito baixa, o diodo pode ser considerado uma chave aberta, Figura 1.16b.

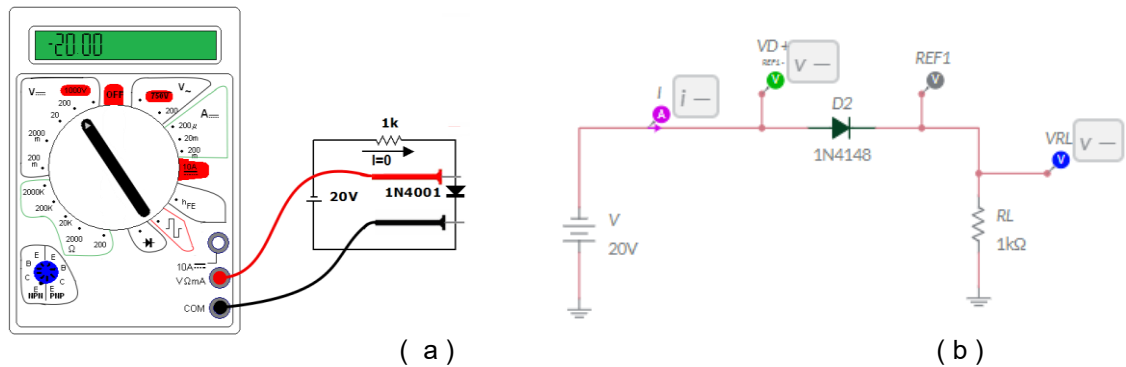


Figura 1.16 – Circuito com o diodo polarizado reversamente
Diodo Polarizado Reversamente (Simulador 1)
Diodo Polarizado Reversamente (Simulador 2)

O diodo é o equivalente de uma válvula de retenção, Figura 1.7, que é um dispositivo mecânico que permite o fluxo de um gás ou líquido em um sentido somente quando a pressão é maior que um mínimo, bloqueando o fluxo no sentido contrário.

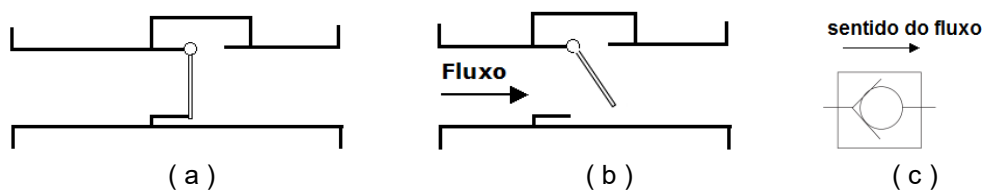


Figura 1.17 – Válvula de retenção (a) aspecto físico – fechada (b) aspecto físico – aberta (c) simbologia

1.3.4 Modelos para o diodo

Modelar um dispositivo eletrônico é usar componentes básicos tais como resistências, fontes de tensão, fontes de corrente e capacitâncias para representá-lo, permitindo desta forma que possamos usar as leis de circuito para estudá-lo. O construtor de um simulador modela um componente eletrônico a partir das informações fornecidas pelo fabricante do componente, desta forma ao simular um circuito os resultados serão semelhantes aos obtidos em um circuito real.

Se você estudou o curso de Eletricidade Básica compreenderá melhor esse conceito. A Figura 1.18a mostra uma bateria ligada a uma lâmpada. Não é possível calcular a corrente no circuito assim representado, é necessário substituir pelo circuito

equivalente ou modelo, Figura 1.18b. Agora sim é possível usar leis de circuito para o cálculo da corrente.

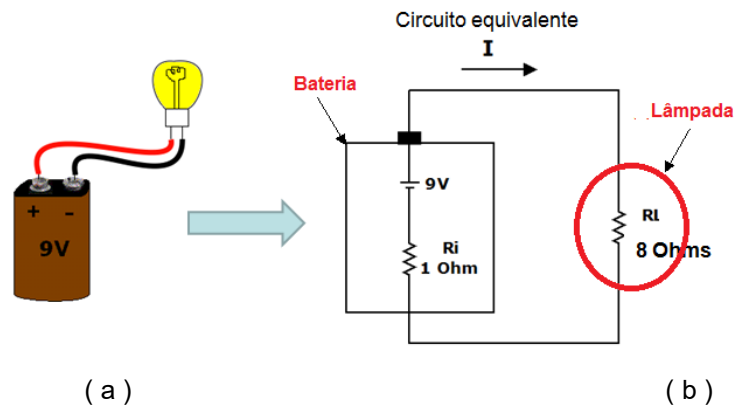


Figura 1.18 – (a) Circuito a ser modelado (b) circuito equivalente da bateria e lâmpada

De acordo com o circuito da Figura 1.18b a corrente no circuito valerá:

$$I = 9V / (1 + 8) \text{ Ohms} = 1 \text{ A}$$

1.3.4.1 Modelo 1 - Diodo Ideal

O modelo mais simples do diodo considera-o como sendo uma chave que é controlada pela tensão aplicada no diodo. Se a tensão é positiva a chave fecha, se é negativa a chave abre. O diodo se comporta de forma ideal.

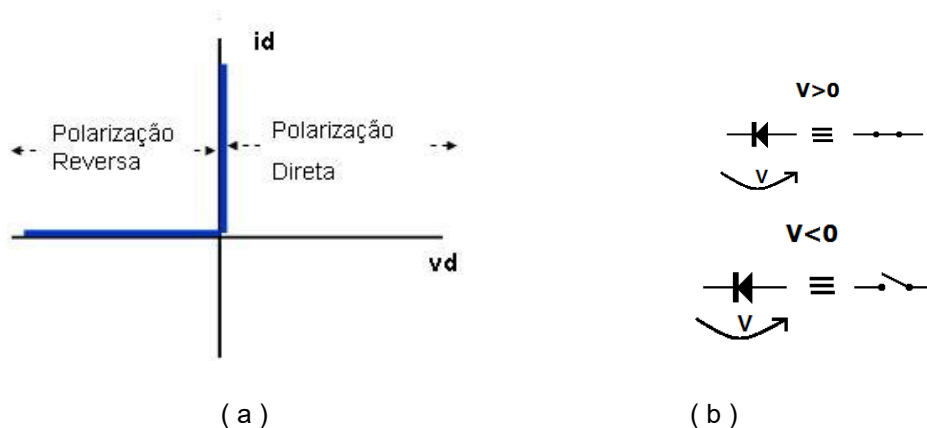


Figura 1.19 – (a) Curva característica do diodo ideal (b) equivalência com chave

A Figura 1.20 mostra dois circuitos, com diodo e com a chave fechada representando o diodo. Como pode ser notado, existe uma diferença entre as duas medidas, mas o erro pode ser desprezado ($< 4\%$). O modelo é adequado.

Valor correto: 19,268 mA Valor usando o modelo: 20mA

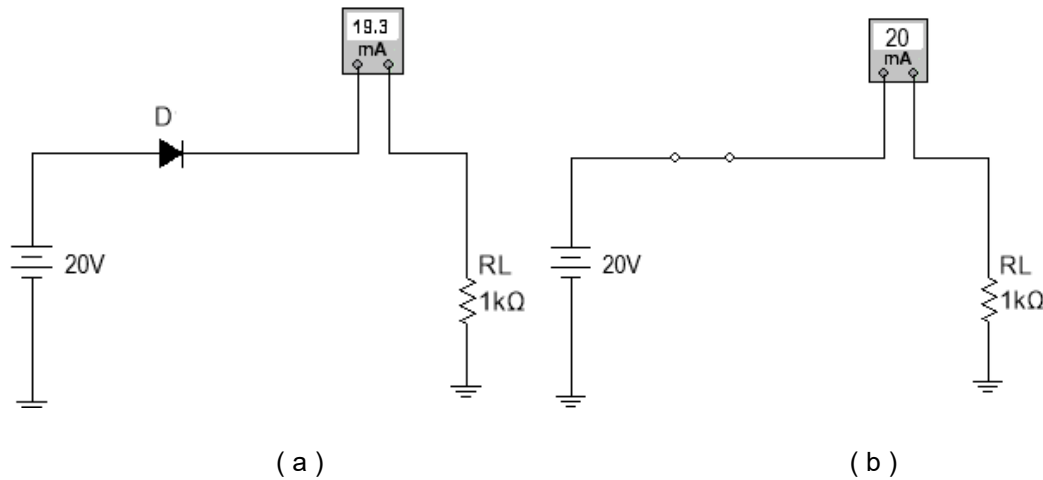


Figura 1.20 – (a) Circuito com diodo (b) circuito com o modelo simplificado (chave fechada)

Modelo Ideal - Polarização direta (Simulador 1)

A pergunta que fica é: Podemos usar esse modelo sempre? Vamos respondê-la considerando outro exemplo. Considere que a bateria do circuito da Figura 1.20 muda de valor, passando a valer 1,5 V. Resulta o circuito da Figura 1.21 com as indicações das medidas.

Valor correto: 849 μ A Valor medido usando modelo ideal: 1,5 mA

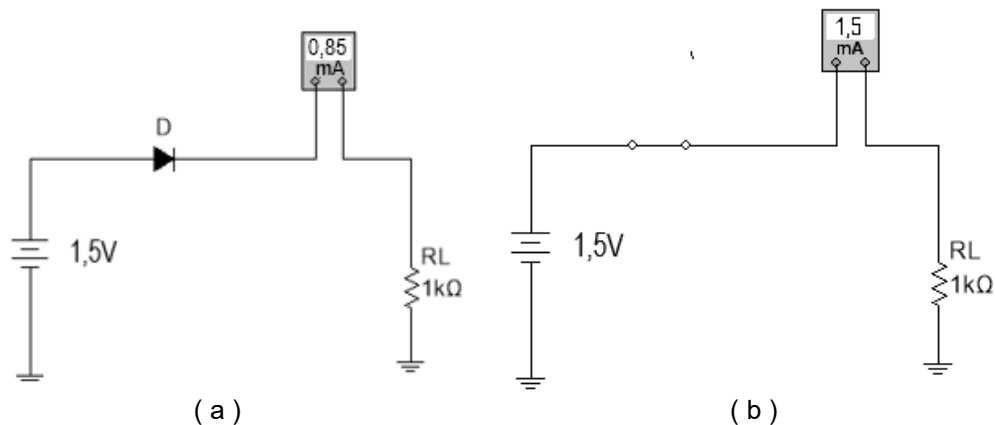


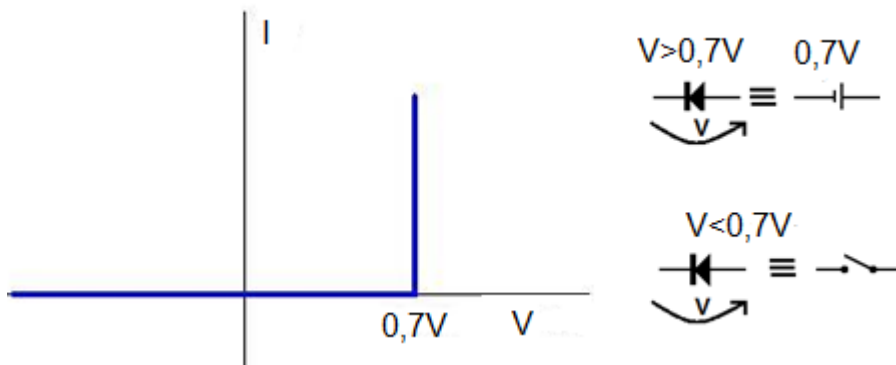
Figura 1.21– (a) Circuito com diodo (b) circuito com o modelo simplificado é inadequado

Modelo Ideal inadequado - Polarização direta (Simulador 1)

Observe que neste caso o erro entre as duas correntes é mais de 50%, neste caso não se deve usar o modelo ideal com polarização direta.

1.3.4.2 Modelo 2 - Bateria

O modelo ideal pode ser melhorado considerando-se que ao conduzir o diodo pode ser substituído por uma bateria de 0,6 V ou 0,7 V (alguns autores adotam 0,6 V e outros 0,7 V).



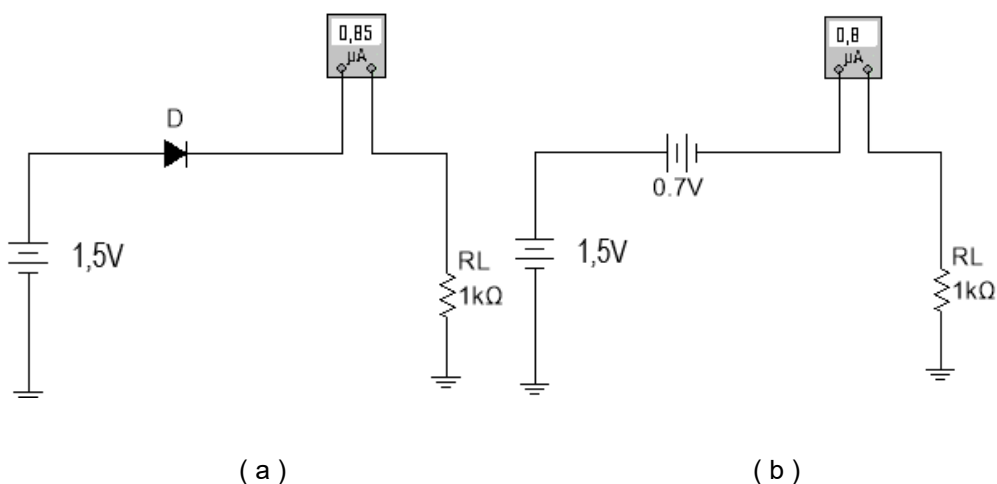
(a)

(b)

Figura 1.22 – Curva para modelo com bateria (b) circuito com o modelo com bateria

Se a tensão aplicada no diodo for maior que 0,7 V o diodo será substituído por uma bateria de 0,7 V. Para uma tensão menor que 0,7 V o diodo será um circuito aberto. Observar, na Figura 1.23, que é o mesmo circuito da Figura 1.21 e mesmos valores, mas o erro é menos de 6%.

Valor correto: 849 μ A Valor medido usando modelo ideal: 0.8 mA



(a)

(b)

Figura 1.23 – (a) Circuito com diodo (b) circuito com o modelo com bateria
Modelo bateria - Polarização direta (Simulador 1)

Os valores medidos no circuito com o diodo e no circuito equivalente diferem em menos de 10%.

1.3.5 Testando o diodo

O teste de semicondutores é baseado no fato de que sob polarização direta uma junção PN (lado P positivo em relação ao lado N) apresenta baixa resistência (por exemplo, 10 Ohms) e sob polarização reversa terá resistência alta (Maior que 1 Megaohm). O teste pode ser feito com o diodo no circuito ou não, preferivelmente fora do circuito. Quando no circuito, desligar a alimentação e um dos terminais do diodo.

1.3.5.1 Testando o diodo com multímetro digital

Na chave seletora de funções selecione onde aparece o símbolo do diodo, em seguida ligue o diodo conforme a Figura 1.24a. Se o diodo estiver em bom estado, e o terminal positivo (vermelho) do multímetro estiver do lado do anodo o *display* dará uma indicação de uma tensão de 600 mV a 700 mV. Com a inversão das pontas a indicação será de circuito aberto, a indicação é um símbolo como o indicado no *display* na Figura 1.24b.

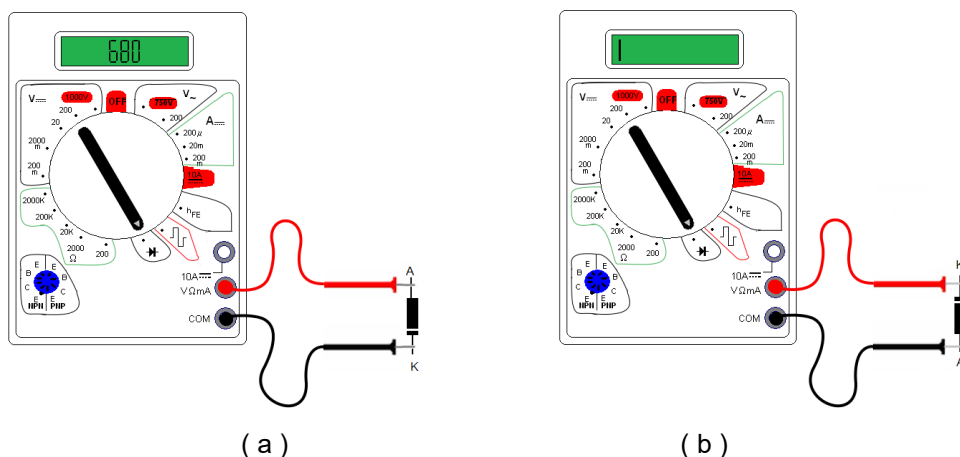


Figura 1.24 – Teste com multímetro digital: (a) diodo polarizado diretamente (b) diodo polarizado reversamente

O que acontece se o diodo estiver em curto? A Figura 1.25 mostra o diodo indicando a mesma condição quando em curto-circuito.

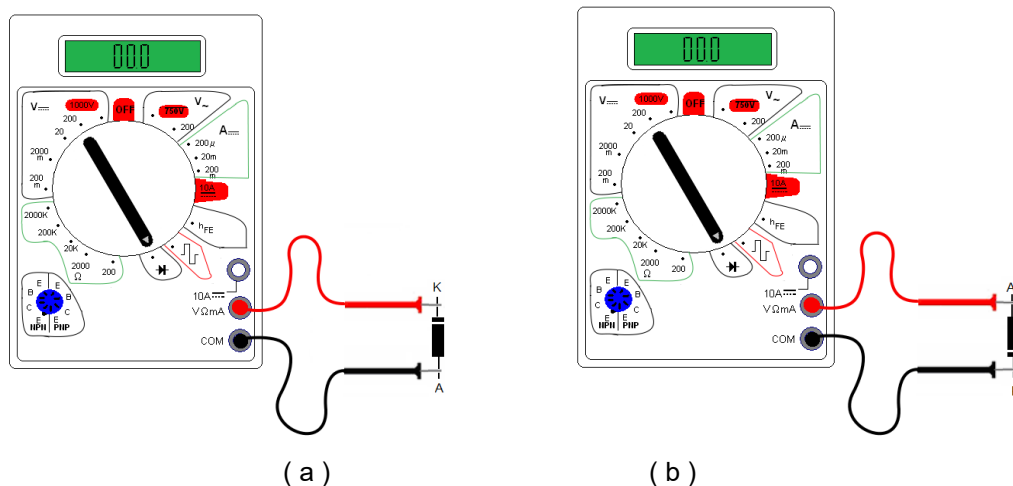


Figura 1.25 – Teste com multímetro digital – diodo em curto-circuito

Observação: Existem multímetros que dão uma indicação sonora quanto os terminais das pontas de prova estão em curto-circuito.

O que acontece se o diodo estiver em aberto? A Figura 1.26 mostra o diodo aberto sendo testado pelo multímetro digital.

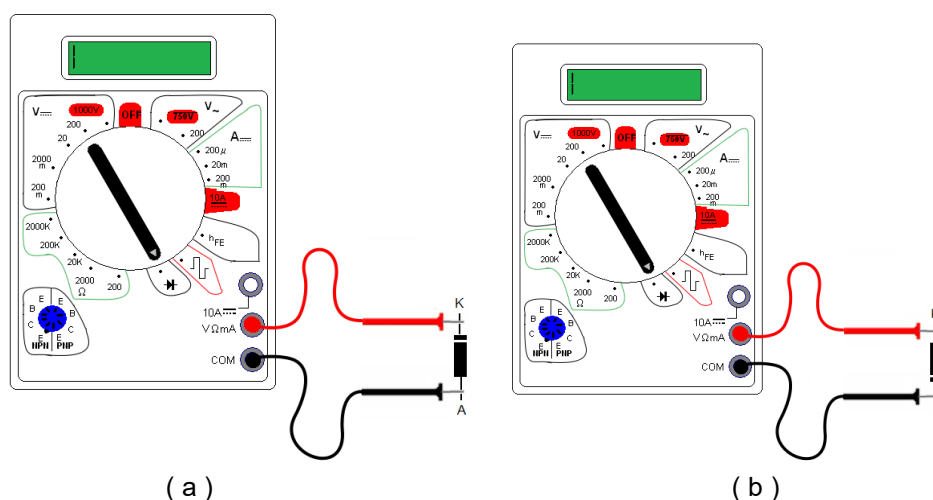


Figura 1.26 – Teste com multímetro digital – diodo em aberto

1.3.5.2 Testando o diodo com um multímetro analógico

Os mesmos testes feitos com multímetro digital podem ser feitos com o multímetro analógico. Lembrando que é usado o ohmímetro para efetuar esses testes e que a polaridade da bateria interna é contrária a polaridade nos bornes de saída, Figura 1.27.

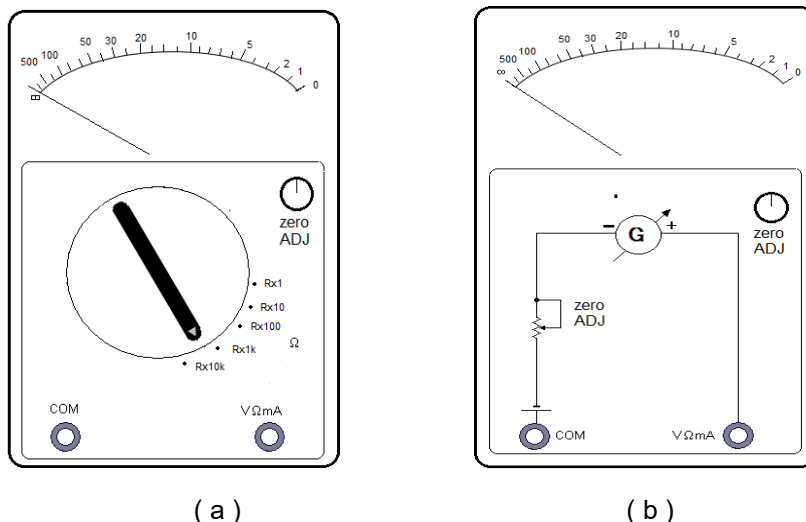


Figura 1.27 – (a) Multímetro analógico (b) circuito equivalente interno do ohmímetro

Para medir a resistência direta (polarização direta) ligue o diodo ao multímetro como na Figura 1.28a, na escala de Rx1. Para medir a polarização reversa, coloque o multímetro em Rx10k conforme Figura 1.28b. Não esqueça de fazer o ajuste do zero antes de fazer qualquer medida com o ohmímetro analógico.

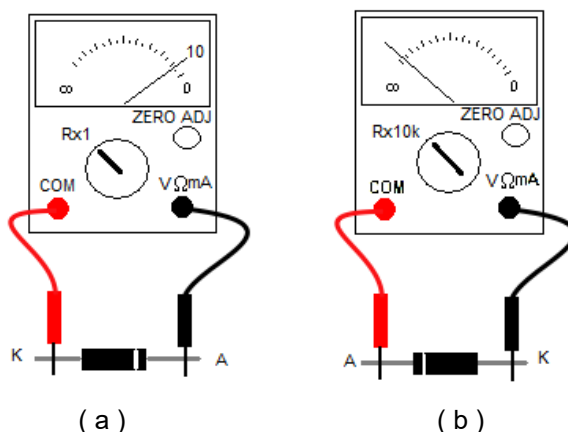


Figura 1.28 – Teste com multímetro analógico (a) diodo polarizado diretamente (b) diodo polarizado reversamente

Se o diodo estiver em curto-circuito com Rx1 selecionado, as indicações serão iguais a zero em um sentido ou no outro, Figura 1.29.

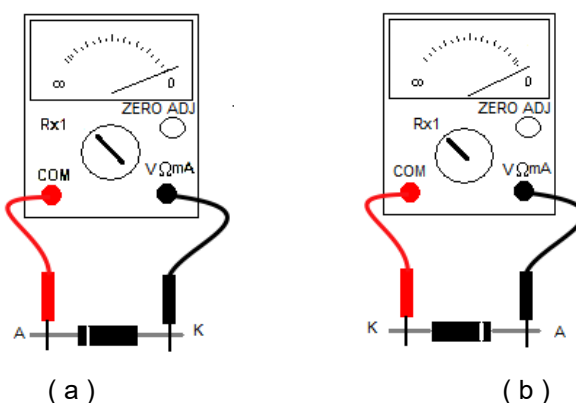


Figura 1.29 - Testando diodo em curto-circuito com multímetro analógico

Se o diodo estiver em aberto com Rx10k selecionado, as indicações serão iguais a infinito em um sentido ou no outro, Figura 1.30.

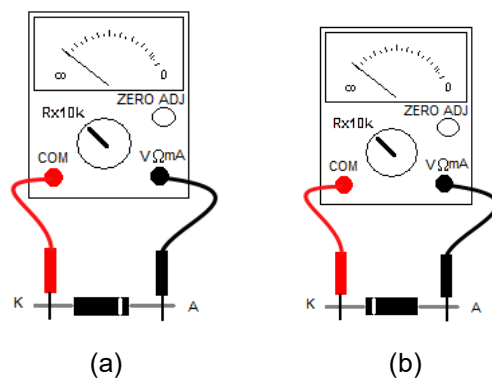


Figura 1.30 – Testando diodo em aberto com multímetro analógico

Exercício Resolvido 1

Qual a indicação dos instrumentos (digitais) com a chave em A e em B. Considerar modelo bateria de 0,7 V. Considerar $R1=1k$ e $R2=500$ Ohms

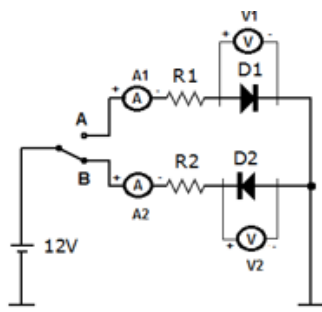


Figura 1.31 – Circuito para Exercício Resolvido 1

[Exercício Resolvido 1](#) (Simulador1)

[Exercício Resolvido 1](#) (Simulador2)

Solução:

Chave na posição A, resulta o circuito da Figura 1.32a e por observação, o diodo D1 está polarizado diretamente resultando o circuito equivalente da figura 1.32b.

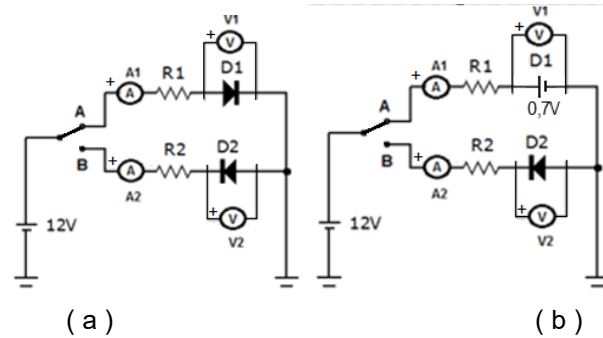


Figura 1.32 – Circuito para ExercícioResolvido 1 (a) Chave em A (b) Circuito equivalente

Com a chave em A, D1 conduz e a corrente no circuito valerá:

$$A_1 = \frac{12-0,7}{1k} = 11,3mA$$

O voltímetro V_1 indica 0,7V.

Com a chave em B, D2 estará polarizado reversamente.

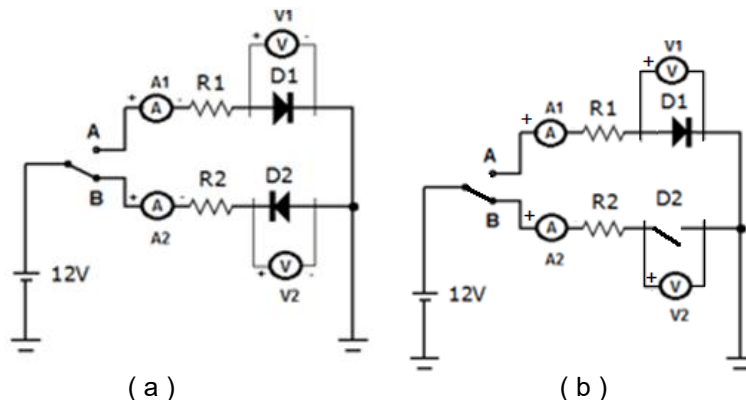


Figura 1.33 – Circuito para ExercícioResolvido 1 (a) Chave em B (b) Circuito equivalente
[ExercícioResolvido 1](#) (Simulador2)

Como o diodo D2 está polarizado reversamente, é representado por uma chave aberta, logo a corrente em A2 vale zero. E a tensão que V2 indicará é 12V pois não tem queda de tensão em R_2 .

Exercício Resolvido 2

Qual a indicação dos voltmíetros (digitais) V_1 e de V_2 ? Considerar modelo de bateria 0,7V.

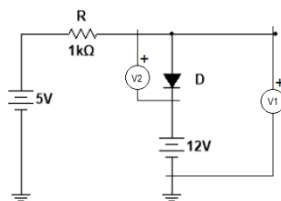


Figura 1.34 – Circuito para Exercício Resolvido 2

[Exercício Resolvido 2](#) (Simulador 1)

[Exercício Resolvido 2](#) (Simulador 2)

Solução:

A primeira ação é determinar a condição do diodo (Cortado ou conduzindo). O diodo está cortado pois do lado do anodo tem a bateria de 5V e do lado do catodo 12V, portanto o diodo é substituído por uma chave aberta, Figura 1.35. Observe que, como a corrente é zero no circuito a tensão do ponto A até o terra é 5V, Figura 1.35. As três tensões V_A , V_B e V_D de acordo com Kirchhoff estão relacionadas por:

$$V_A + V_D = V_B \quad \text{ou} \quad V_D = V_B - V_A = 12 - 5 = 7V \quad V_A = 5V$$

Olhando na Figura 1.34, o catodo é positivo em relação ao anodo e como o positivo do voltímetro está no anodo a indicação no display será -7V.

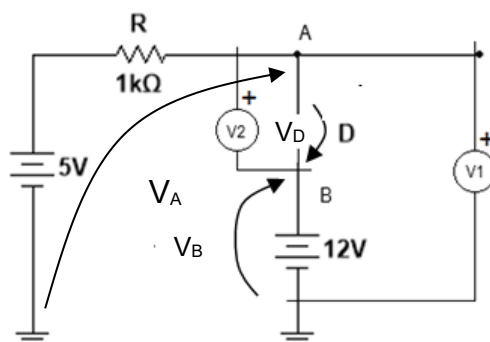


Figura 1.35 – Circuito para Exercício Resolvido 2 com a indicação de 3 tensões

[Exercício Resolvido 2](#) (Simulador1)

[Exercício Resolvido 2](#) (Simulador 2)

Exercício Proposto 1

Qual a indicação dos instrumentos (ideais e digitais) I, V1 e V2, com a chave na posição A e na posição B? Considerar diodos modelo de bateria 0,7 V.

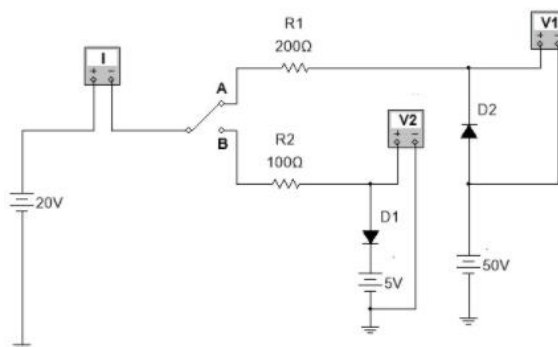


Figura 1.36 – Circuito para Exercício Proposto 1

[Exercício Proposto 1](#) (Simulador 1)

Exercício Proposto 2

Qual a indicação dos instrumentos (ideais e digitais) I e V, com a chave na posição A e na posição B? Considerar diodos modelo de bateria 0,7 V.

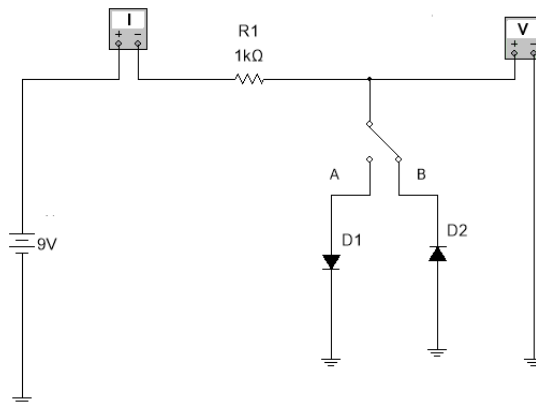
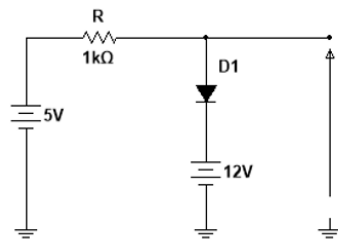


Figura 1.37 – Circuito para Exercício Proposto 2
Exercício Proposto 2 (Simulador 1)

Exercício Proposto 3

Considerando diodo ideal, qual o valor de V_s em cada caso? Considerando modelo bateria de 0,7V

Exercício Proposto 3a



Exercício Proposto 3b

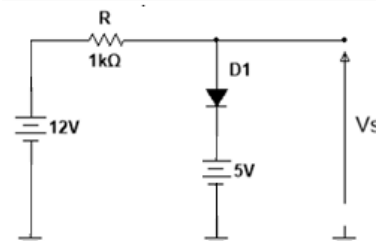


Figura 1.38 – Circuito para Exercício Proposto 3

Exercício Proposto 3a (Simulador 1)

Exercício Proposto 3b (Simulador 1)

Exercício Proposto 3a (Simulador 2)

Exercício Proposto 3b (Simulador 2)

Exercício Proposto 4

Determinar as tensões nos pontos A, B, C e D em relação ao terra. Considerar modelo bateria de 0,7V quando polarizado diretamente e chave aberta quando polarizado reversamente.

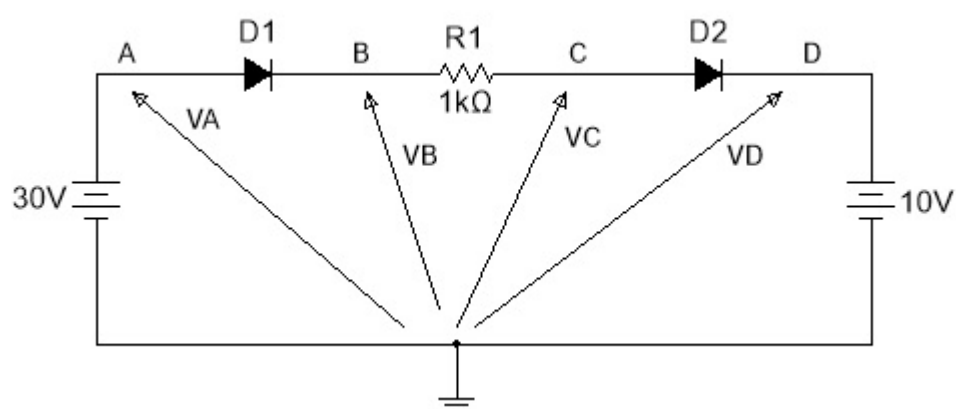


Figura 1.39 – Circuito para Exercício Proposto 4
Exercício Proposto 4 (Simulador 1)

Capítulo 2 – Aplicações de Diodos Semicondutores

Nesse capítulo serão apresentadas algumas aplicações com diodo dentre elas a fonte de alimentação.

Os circuitos eletrônicos necessitam para o seu perfeito funcionamento que sejam alimentados com tensão contínua. A tensão que temos disponibilizada pela concessionária de força e luz é alternada, desta forma será necessário converter a tensão AC em tensão DC. Os circuitos que fazem isso são chamados de retificadores que juntamente com os filtros e reguladores de tensão permitem que uma tensão alternada seja convertida em uma tensão contínua.

2.1 Retificadores

A Figura 2.1 mostra o diagrama de blocos simplificado em uma fonte de alimentação CC.

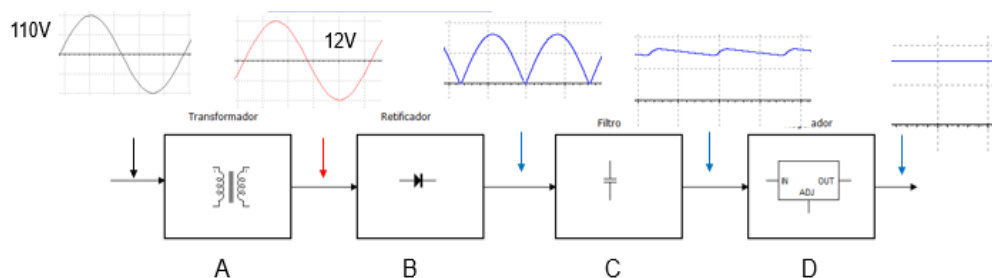


Figura 2.1 – Diagrama de blocos de um fonte de alimentação CC

Na Figura 2.1 os blocos são:

A: Transformador, em geral abaixador, por exemplo de 110V CA para 12V CA.

B: Retificador, circuito com diodos que transforma a tensão alternada em pulsante.

C: Filtro, em geral capacitivo melhora o fator de ripple.

D: Regulador, fornece uma tensão praticamente contínua.

Fator de Ripple

Teoricamente a tensão na saída deve ser perfeitamente contínua, mas na prática existe uma ondulação ou *ripple*. Uma medida da eficiência desses circuitos é dada pelo fator de *ripple* (γ) definido como sendo:

$$\gamma\% = \frac{\text{Valor Eficaz da ondulação}}{\text{Valor medio}} \cdot 100$$

Exemplo: Seja a tensão $v(t)=8 + 1.\text{sen}(\omega.t)$ (V) cuja representação é dada na Figura 2.2

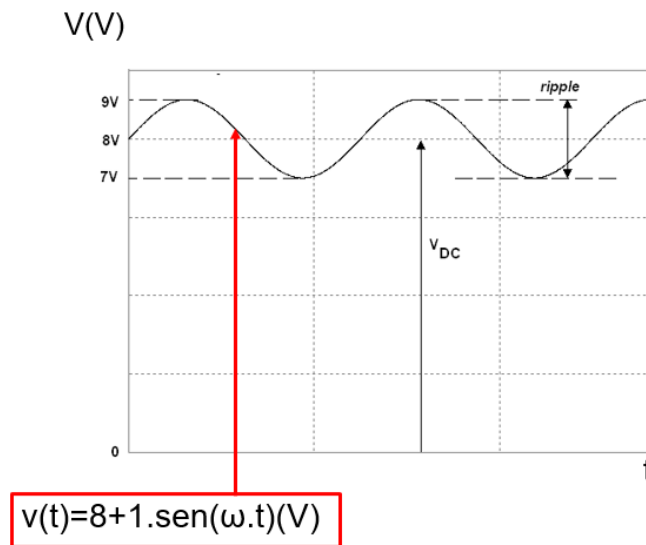


Figura 2.2 – Forma de onda da tensão $v(t)=8 + 1.\text{sen}(\omega.t)$ (V).
Fator de Ripple (Simulador1)

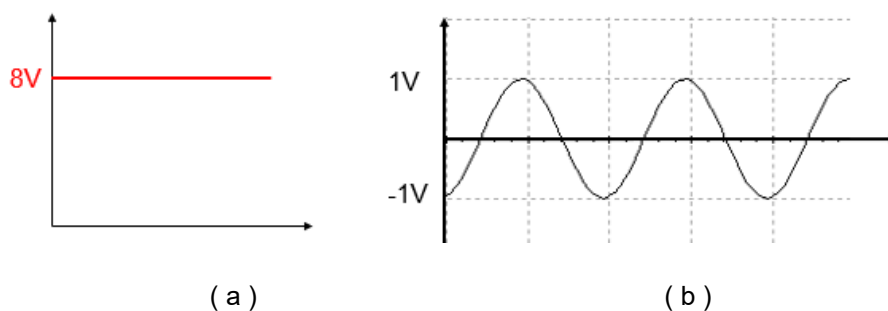
Usando a definição de fator de ripple, o valor desse parametro para a tensão da Figura 2.2 é:

$$\gamma\% = \frac{0,707}{8} \cdot 100 = 8,8\%$$

Valor eficaz da ondulação = 0,707V

Valor médio da tensão = 8V

Existem dois limites extremos para o valor do fator de ondulação, cujas tensões estão representadas na Figura 2.3.



(a) (b)
 Figura 2.3 – (a) tensão contínua (b) tensão alternada senoidal

No caso da Figura 2.3a, não tem ripple (ondulação) logo:

$$\gamma\% = \frac{0}{8} \cdot 100 = 0\%$$

No caso da Figura 2.3b, o valor médio é zero, logo:

$$\gamma\% = \frac{0,707}{0} \cdot 100 = \text{infinito}$$

Observação: Matematicamente não podemos igualar ao infinito, mas é uma forma de dizer que nesse caso o valor do fator de ripple é o maior possível.

2.1.1 Retificador de meia onda

A Figura 2.4a mostra o circuito. O secundário de um transformador fornece uma tensão senoidal de valor de pico igual V_{ep} . Considerando o modelo de bateria de 0,7 V, no semiciclo positivo, o diodo conduz quando $V_e > 0,7V$ e a tensão na carga será igual a $V_e - 0,7 V$. O circuito equivalente é mostrado na Figura 2.4b.

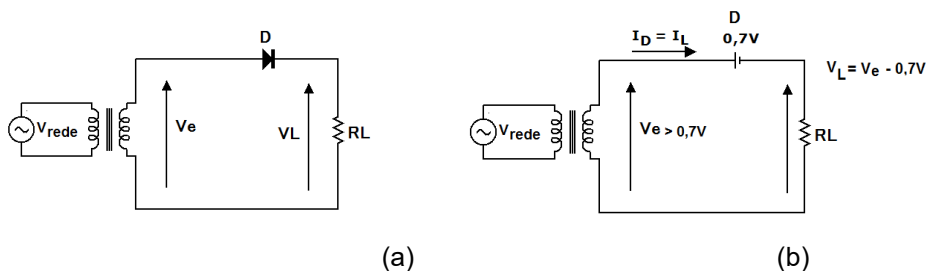


Figura 2.4 – retificador de meia onda (a) circuito (b) Circuito equivalente

No semiciclo negativo o diodo fica polarizado reversamente, Figura 2.5, portanto $I_D = I_L = 0$ e $V_L = 0$. A tensão no diodo $V_D = V_e$. A máxima tensão reversa no diodo é V_{ep} .

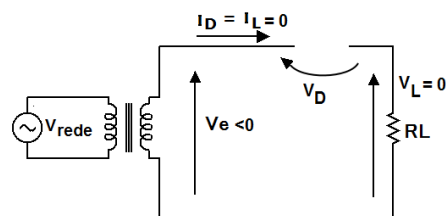


Figura 2.5 – retificador de meia onda - diodo polarizado reversamente, $V_e < 0$.

A Figura 2.6 mostra as formas de onda das tensões de entrada, diodo e carga. A tensão senoidal de entrada, V_e no exemplo, 20 V_{pico} e a tensão na carga, V_L , observando que o valor de pico na carga vale 19,3 V_{pico} .

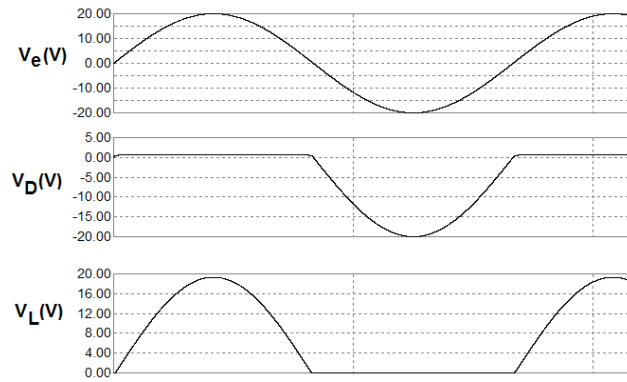


Figura 2.6 – Retificador de meia onda – Formas de onda da tensão de entrada (V_e), diodo (V_D) e carga (V_L)

[Retificador Meia Onda](#) (Simulador1)

[Retificador Meia Onda](#) (Simulador 2)

Tensão contínua na carga (V_{CC} , V_{DC} , ou V_{AV})

Um voltímetro para medir tensão contínua (V_{DC} ou V_{CC}) ligado na carga, Figura 2.7a, mede um valor dado por:

$$V_{DC} = \frac{V_{e_{pico}} - 0,7}{\pi}$$

Se a tensão de entrada vale 20 V de pico, e a carga é de 50 Ohms, o valor da tensão contínua ou tensão média na carga valerá:

$$V_{DC} = \frac{20 - 0,7}{\pi} = 6,14V$$

$$I_L = \frac{6,14V}{50 \text{ Ohms}} \cong 122mA$$

A Figura 2.7 mostra a medida da tensão contínua, V_{CC} , e da corrente contínua, I_{CC} , na carga.

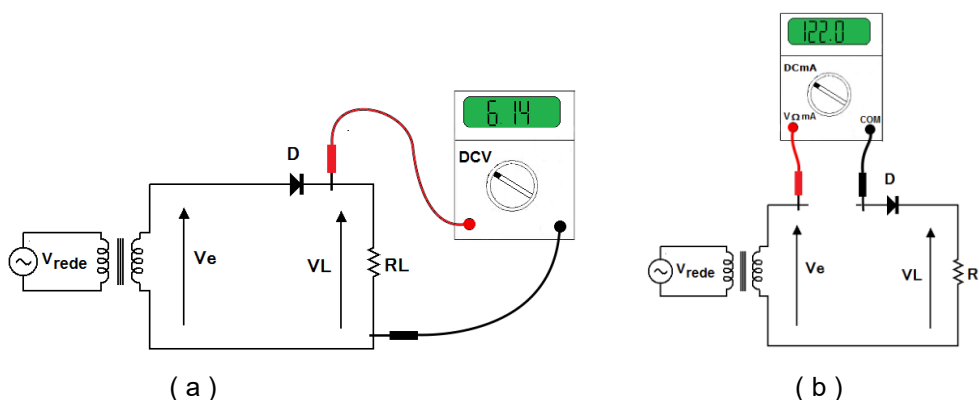


Figura 2.7 – Retificador meia onda (a) medida da tensão CC (b) medida da corrente CC na carga e no diodo

[Medindo tensão e corrente contínua na carga](#) (Simulador1)

2.1.1.1 Análise dos resultados

Se você executou a simulação do circuito, verificou que o valor da tensão média na carga é aproximadamente 6 V, portanto menor que o valor calculado, 6,14V. Qual a justificativa? Para conduzir o diodo, a entrada tem de ser pelo menos 0,7V, então se ampliarmos a tensão na carga no início e fim de cada semiciclo será observado a forma de onda da Figura 2.8. O erro entre o valor calculado e o real é tanto maior quanto menor for o valor de pico da tensão de entrada. A Figura 2.8 mostra o gráfico da tensão de entrada e carga quando o valor de pico de entrada é 5 V.

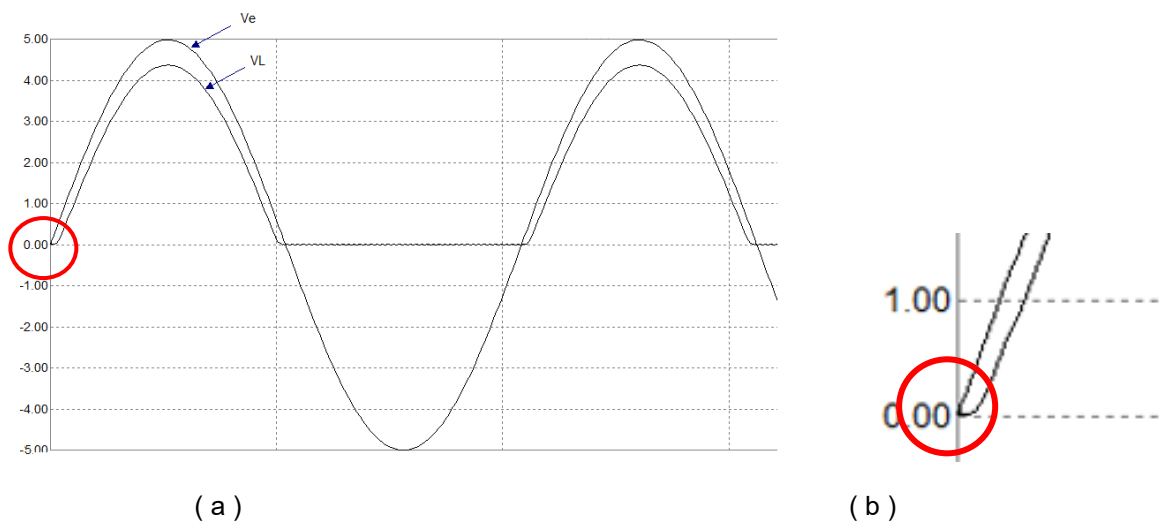


Figura 2.8 – Formas de onda de entrada e carga para $V_e=20V_p$ (b) detalhe na origem

Retificador Meia Onda - Entrada baixa (Simulador1)

2.1.1.2 Corrente contínua na carga e no diodo

A corrente contínua na carga, I_{CC} , que é igual a corrente no diodo, é a corrente medida por um amperímetro para CC sendo calculada por:

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R_L}$$

Se no circuito da Figura 2.7 a carga for 50 Ohms então a corrente média no diodo valerá:

$$I_{DC} = \frac{6,14V}{50\Omega} = 0,122A = 122 \text{ mA}$$

Observação: Para esse circuito a corrente no diodo é igual à corrente na carga.

2.1.1.3 Tensão de pico inversa máxima

É a máxima tensão inversa que o diodo pode ser submetido sem que ocorra destruição do diodo (ruptura da junção). É especificada na folha de dados como V_{RRM} . No retificador de meia onda a máxima tensão reversa que o diodo estará submetido é igual a V_{ep} . Portanto se $V_e=20 \text{ V}$ pico, a máxima tensão a que ele será submetido de forma inversa é 20 V, devendo, portanto, V_{RRM} ser maior do que 20 V.

A tabela 2.1 mostra alguns dos dados obtidos de um manual de diodo que podem ser úteis no projeto de uma fonte de alimentação, lembrando que para maiores informações procurar o manual completo.

Tabela 2.1 – Alguns valores limites para um diodo comercial

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Características Elétricas e máximos limites)					
	SYMBOLS	1N4001	1N4002	1N4003	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage (Máxima tensão de pico repetitiva)	V_{RRM}	50	100	200	V
Maximum Average Forward Rectified Current (Máxima corrente média direta)	I_{AV}	1,0			A

Exercício Resolvido 3

Qual a indicação dos instrumentos (CC) na Figura 2.9? Dimensionar o diodo.

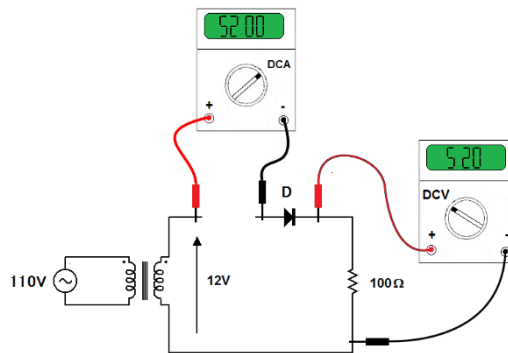


Figura 2.9 – Medindo a tensão média (contínua) na carga e a corrente contínua na carga e no diodo
Exercício Resolvido 3 (Simulador 1)

Solução:

O valor de pico da tensão na entrada é: $V_{ep} = \sqrt{2} \cdot 12V \cong 17V$

Logo o valor médio da tensão indicada pelo voltímetro vale:

$$V_{DC} = \frac{17 - 0,7}{\pi} \cong 5,2V$$

A corrente contínua indicada pelo amperímetro, que é a corrente no diodo e na carga vale:

$$I_{DC} = \frac{5,2V}{100\Omega} \cong 52mA$$

A máxima tensão reversa a que o diodo será submetido será igual a 17 V.

Conclusão: No circuito você deve inserir um diodo que tenha capacidade de corrente contínua maior que 52 mA e tensão reversa maior que 17 V. Qualquer diodo da tabela 2.1 pode ser usado.

2.1.2 Retificador de onda completa

Nos circuitos retificadores de onda completa o semiciclo negativo da tensão de entrada será aproveitado, fazendo o fator de ripple diminuir. Existem basicamente dois circuitos de onda completa, o circuito com *Center Tap* e o circuito em ponte.

2.1.2.1 Retificador de onda completa com tomada central

No circuito com *Center Tap* (tomada central) há necessidade de transformador com tomada central no secundário para providenciar duas tensões, V_{e1} e V_{e2} , defasadas entre si de 180° , Figura 2.10.

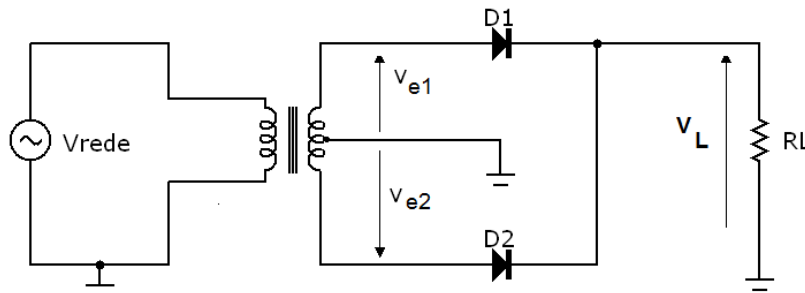


Figura 2.10 – Retificador de onda completa com *center tap*

As tensões V_{e1} e V_{e2} têm mesma amplitude, mas defasadas de 180° . No semi ciclo positivo, Figura 2.11a, V_{e1} alimenta o circuito e o diodo D_1 conduz e D_2 corta. No semi ciclo negativo da tensão de entrada V_{e2} alimenta o circuito fazendo D_2 conduzir e D_1 cortar.

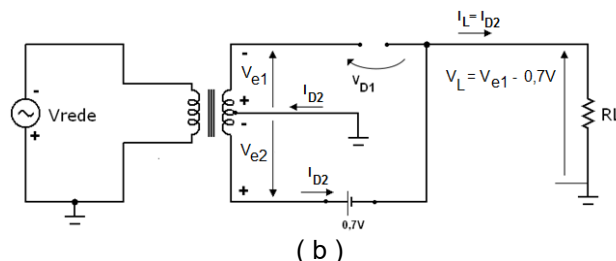
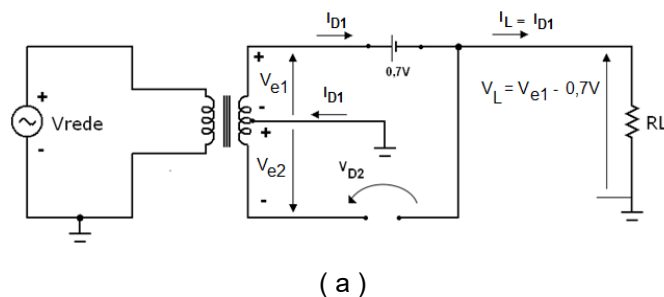


Figura 2.11 – Retificador de onda completa com *center tap* (a) semiciclo positivo (b) semiciclo negativo

[Retificador Onda Completa com C.T](#) (Simulador 1)

[Retificador Onda Completa com C.T](#) (Simulador 2)

Observar que a corrente na carga é igual a corrente no diodo D_1 no semiciclo positivo e no semiciclo negativo a corrente na carga é mesma que no diodo D_2 . A Figura 2.12 mostras as formas de onda das correntes nos diodos e na carga.

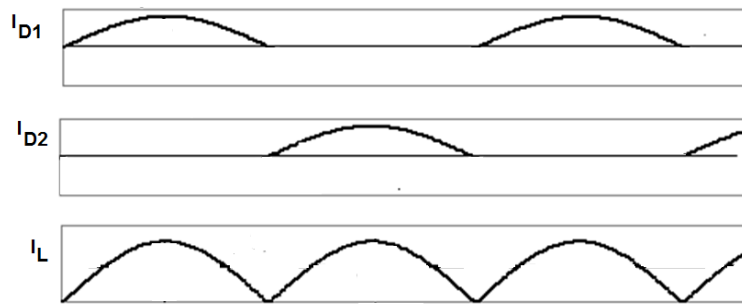


Figura 2.12 – Formas de onda das correntes no circuito da Figura 2.10

A Figura 2.13 mostra as formas de onda das tensões nos secundários (V_{e1} e V_{e2}), tensão nos diodos (V_{D1} e V_{D2}) e tensão na carga (V_L).

Tensão média na carga (V_{CC} , V_{DC} , ou V_{AV})

$$V_{CC} = \frac{2 \cdot (V_{epico} - 0,7)}{\pi} = V_{DC} = V_{AV}$$

OBS: No Multisim On Line o valor médio é denotado por V_{AV}

Corrente média na carga (I_{CC} , I_{DC} ou I_{AV})

$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R_L}$$

Onde R_L é a carga.

[Data Sheet](#)

Corrente média por diodo (I_{diodo})

É uma informação importante para dimensionar o diodo. No data sheet é dado aparece como I_{AV} (Máxima corrente média direta).

$$I_{diodo} = \frac{I_{CC}}{2}$$

Máxima tensão de Pico Inversa (V_{INpico})

$$V_{INpico} = 2 \cdot V_{pico}$$

Esse valor, V_{INpico} , deve ser menor que o máximo valor permitido no Data Sheet e que é chamado de V_{RRM} . Na tabela 2.1 aparecem os valores para alguns diodos.

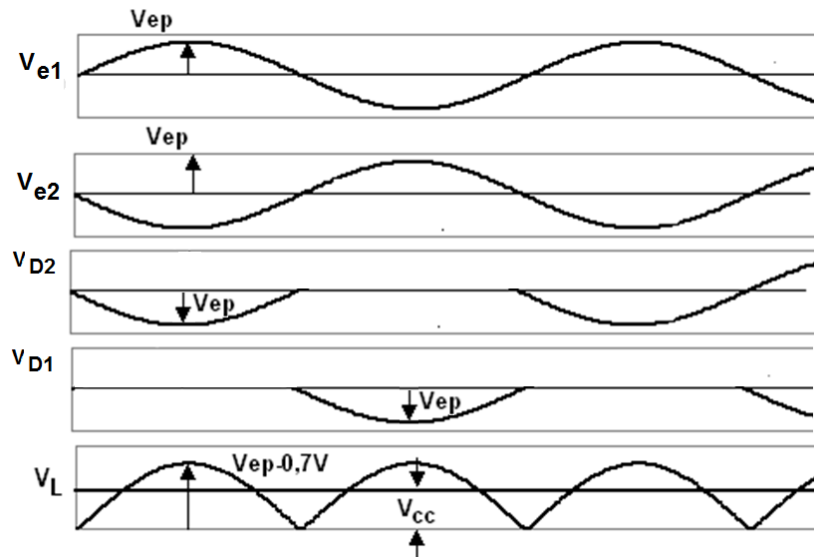


Figura 2.13 – Formas de onda das tensões no circuito da Figura 2.10

Para medir os valores CC de correntes, na carga e diodo D₁, e tensão CC na carga os instrumentos devem ser para CC, e ligados conforme circuito da Figura 2.14. M1 mede a corrente CC (corrente média) por diodo, M2 mede a corrente CC na carga e M3 a tensão CC na carga.

Exercício Resolvido 4

Calcular a indicação dos medidores no circuito da Figura 14.

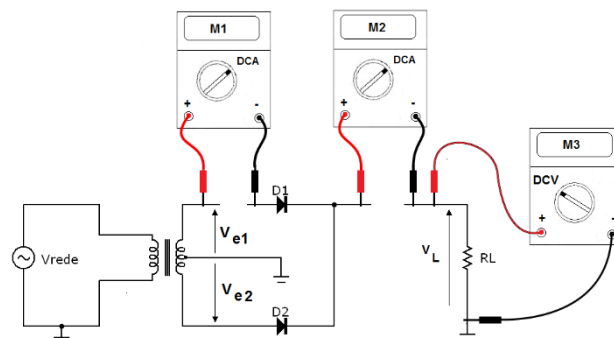


Figura 2.14 – Retificador de onda completa com *center tap* – medindo corrente na carga, diodo e tensão na carga

Exercício Resolvido 4 (Simulador1)

Solução:

Se V_{ep} é o valor de pico da entrada então a tensão contínua V_{CC} na carga é dada por:

$$V_{DC} = \frac{2.(V_{e \text{ pico}} - 0,7)}{\pi}$$

A corrente contínua na carga vale:

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R_L}$$

A corrente contínua por diodo é a metade da corrente na carga:

$$I_{DC} (\text{diodo}) = \frac{V_{DC}}{2.R_L}$$

A máxima tensão de pico inverso que cada diodo é submetido vale:

$$V_{INVP} = 2.V_{ep}$$

Exercício Resolvido 5

No circuito da Figura 2.14 a tensão secundária é 12V+12V. Se a carga for 50 Ohms qual a indicação dos instrumentos M1, M2 e M3? Dimensionar os diodos.

Solução: $V_{ep} = 1,41.12 = 17$ V, portanto a máxima tensão inversa a que o diodo será submetido é 34 V. A tensão média (CC) na carga vale:

$$V_{CC} = \frac{2.(17 - 0,7V)}{\pi} = 10,4V$$

A corrente média (CC) na carga vale:

$$I_{CC} = \frac{10,4V}{50\Omega} = 208mA$$

A corrente por diodo vale a metade da corrente na carga, portanto 104 mA.

M1 indica 104 mA, M2 indica 208 mA e M3 indica 10,4 V.

Qualquer diodo da tabela 2.1 pode ser usado.

Exercício Resolvido 5

2.1.2.2 Retificador de onda completa em ponte

Em um retificador em ponte não é obrigatório o uso de transformador somente se houver necessidade de diminuir a tensão. Na Figura 2.15, V_e pode ser obtida de um secundário de um transformador. O nome ponte é derivado da ponte de Wheatstone que é um circuito que tem a mesma forma (quatro braços)

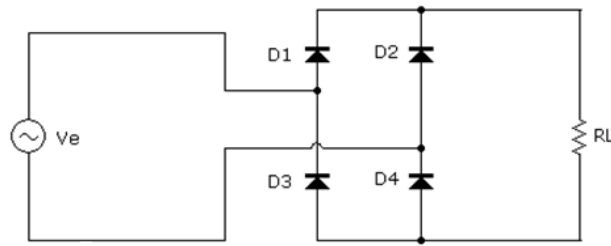


Figura 2.15 – Retificador de onda completa em ponte

No semiciclo positivo da tensão de entrada, Figura 2.16a, conduzem D_1 e D_4 , D_2 e D_3 cortam. No semiciclo negativo, Figura 2.16b, conduzem D_2 e D_3 e D_1 e D_4 cortam.

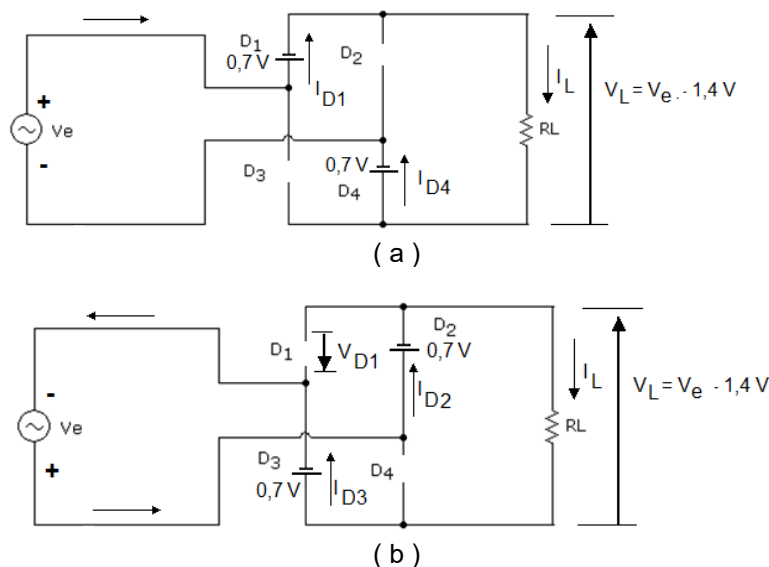


Figura 2.16 – Retificador de onda completa em ponte (a) semi ciclo positivo (b) semi ciclo negativo

[Retificador O.C em Ponte](#) (Simulador 1)

[Retificador O.C em Ponte](#) (Simulador 2)

Considerações:

- São dois diodos no caminho da corrente, portanto a queda de tensão agora é de 1,4 V então a tensão na carga será a de entrada, V_e , menos 1,4 V;
- Assim como no retificador com CT, a corrente por diodo é a metade da corrente na carga;
- A tensão reversa máxima submetida a cada diodo quando está polarizado reversamente é aproximadamente V_{ep} .

Exercício Resolvido 6

No circuito da Figura 2.15, $V_e=50$ VRMS. Se a carga for 50 Ohms qual a indicação dos instrumentos M1(corrente média por diodo), M2 (corrente média na carga) e M3 (tensão média na carga)? Dimensionar os diodos.

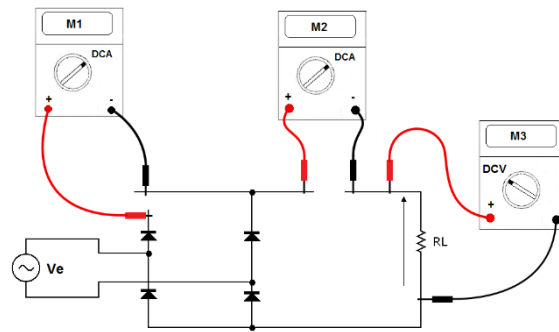


Figura 2.17 – Retificador de onda completa em ponte – medindo corrente na carga, diodo e tensão na carga

Exercício Resolvido 6 (Simulador1)

Solução:

$V_{ep} = 50 \cdot \sqrt{2} = 70,5V$ e a tensão média na carga vale:

$$V_{cc} = \frac{2 \cdot (70,5 - 1,4V)}{\pi} = 44V = M3$$

E a corrente média na carga:

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_L} = \frac{44V}{50\Omega} = 880mA = M2$$

A corrente média por diodo será igual a:

$$I_{cc}(\text{diodo}) = \frac{V_{cc}}{2 \cdot R_L} = \frac{44V}{2 \cdot 50\Omega} = 440mA = M1$$

A máxima tensão reversa por diodo é 70,5V, portanto da tabela ser usados os só podem usados os diodos 1N4002 e 1N4

2.2 Retificadores com filtro capacitivo

Os circuitos retificadores estudados fornecem uma tensão com um ripple muito alto. Para diminuir a ondulação (ripple) são usados filtros que são constituídos basicamente de elementos reativos como capacitores e indutores. No caso mais comum basta colocar em paralelo com a carga (o circuito eletrônico) um capacitor de valor adequado.

2.2.1 Retificador de meia onda com filtro capacitivo

A Figura 2.18a mostra o circuito, lembrando que na prática R_L representa o circuito a ser alimentado.

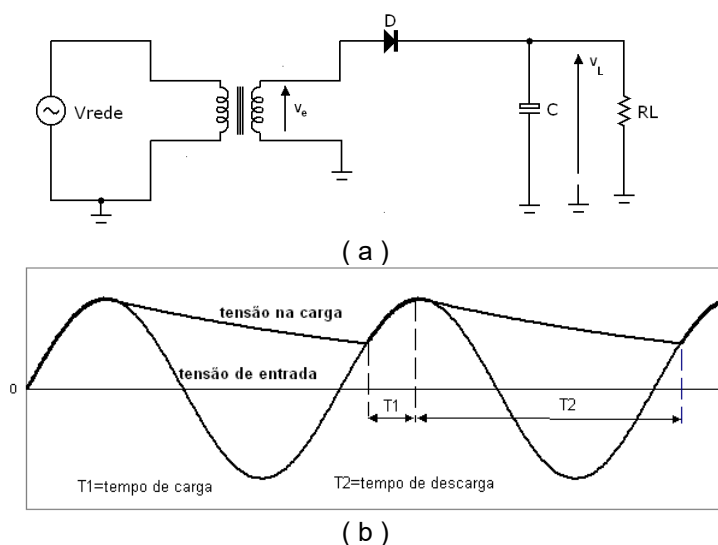


Figura 2.18 – (a) Retificadora meia onda com filtro capacitivo (b) formas de onda da tensão de entrada e tensão no capacitor

Retificador meia Onda com Filtro (Simulador 1)

Retificador meia Onda com Filtro (Simulador 2)

No início do semiciclo positivo o diodo conduz e o capacitor se carregará até aproximadamente o valor de pico da tensão de entrada descontado 0,7V. Um instante após a tensão de entrada V_e atingir o pico o diodo corta e o capacitor começa a descarregar através da resistência R_L . Ao mesmo tempo a tensão de entrada está variando. Quando V_e for 0,7V maior que V_C , novamente o diodo volta a conduzir carregando o capacitor novamente. O ciclo se repete.

A Figura 2.19 mostra a tensão no capacitor com a indicação do valor médio, V_{CC} . A tensão na carga oscila entre um valor máximo, que é aproximadamente igual ao valor de pico e um valor mínimo depende da corrente consumida, da frequência da ondulação e do valor de C . A Figura 2.19 mostra a tensão na saída e principais valores.

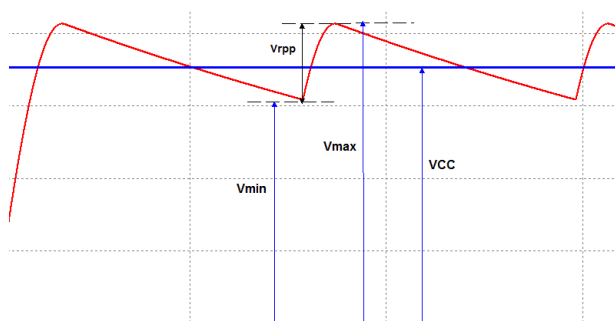


Figura 2.19 – Valores da saída do filtro

Na Figura 2.19:

$V_{\max}$ é a máxima tensão na saída, é aproximadamente V_{ep} ($V_{ep} - 0,7V$).

$V_{\min}$ é a mínima tensão na saída.

V_{rpp} é o valor de ripple de pico a pico $= V_{\max} - V_{\min}$

V_{CC} é a tensão média (continua) na carga $= (V_{\max} + V_{\min}) / 2$

O valor do *ripple* (V_{rpp}) de pico a pico pode ser estimado, pela expressão, se o gráfico for aproximadamente linear, e para isso considera-se que o *ripple* não pode exceder 10% do valor de pico. Nessas condições:

$$V_{rpp} = \frac{I_{CC}}{C \cdot f}$$

Onde

V_{rpp} é a tensão de ripple de pico a pico em V.

I_{CC} é o valor da corrente contínua consumida pelo circuito, em A.

f a frequência da ondulação (60 Hz para meia onda e 120 Hz para onda completa) e

C o valor da capacitância, em Farads.

Observar a consistência da expressão, isto é, se C aumentar o ripple diminui. Se I_{CC} aumentar o ripple aumenta.

Se a constante de tempo de descarga ($R_L \cdot C$) for muito maior que o período da ondulação (16,66ms se $f = 60$ Hz), pode-se considerar que o valor médio é aproximadamente igual a:

$$V_{CC} = V_{ep} - 0,7V.$$

Exercício Resolvido 7

Estimar o valor do ripple de pico a pico (V_{rpp}) no circuito e a tensão média (V_{CC}).

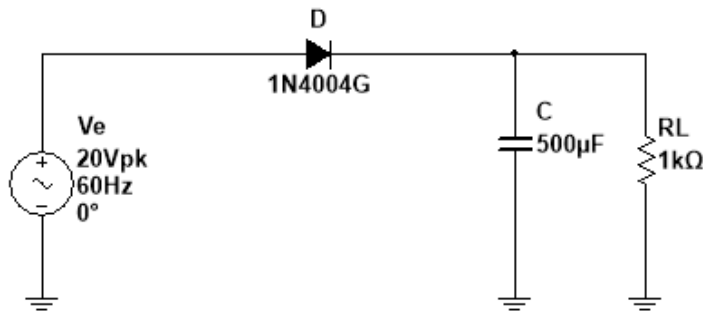


Figura 2.20 – Retificador meia onda com filtro capacitivo para exercício
Exercício Resolvido 7 (Simulador1)

Solução: Como não foi especificado o valor da tensão média na carga, vamos, em uma primeira aproximação, considerar que $V_{CC} = V_{ep} - 0,7V = 20 - 0,7 = 19,3V$

Constante de tempo de descarga = $1k \cdot 500 \mu F = 0,5 s = 500 ms$

Período da ondulação = $16,66 ms$

Constante de tempo é muito maior que período da ondulação, logo o valor do ripple de pico a pico pode ser estimado por:

$V_{CC} = V_{ep} - 0,7V = 19,3V$ e $I_{CC} = 19,3V / 1k = 19,3mA$ com $f = 60Hz$ $C = 500 \cdot 10^{-6}F$

$$V_{rpp} = \frac{19,3mA}{500\mu F \cdot 60Hz} = 0,64V_{pp}$$

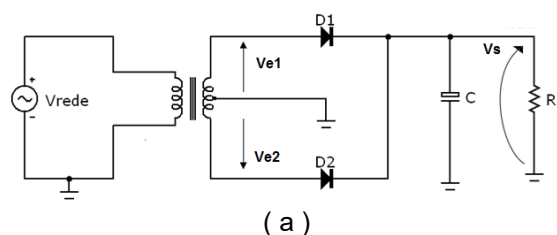
Você pode melhorar o cálculo do valor médio por:

$$V_{CC} = 19,3 - V_{rpp}/2 = 19,3 - 0,64/2 = 18,97V$$

Repita o exercício para $C = 1000\mu F$.

2.2.2 Retificador de onda completa CT com filtro capacitivo

O retificador de onda completa permite obter, para os mesmos valores de capacitor e carga do circuito meia onda, um ripple menor (metade). A Figura 2.21a mostra o circuito com C.T e a Figura 2.21b as formas de onda.



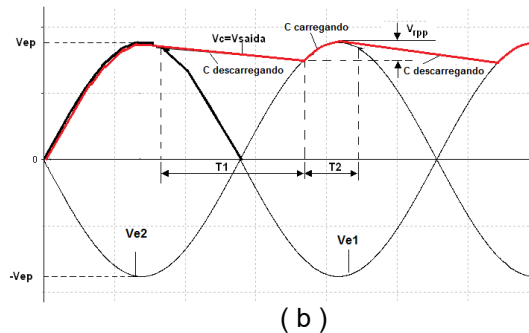


Figura 2.21 – Retificador de onda completa com filtro (a) Circuito C.T (b) formas de onda
Retificador O.C com Filtro (Simulador 2)

Observe que, assim como no meia onda com filtro, o capacitor carrega até $V_{ep} - 0,7V$, em seguida um dos diodos, na Figura 2.20b, D1, corta. O outro, D2, está cortado porque a tensão de entrada, V_{e2} é negativa. Quando V_{e2} for $0,7V$ maior que $V_C = V_{saida}$, o diodo D2 conduz e a carga do capacitor é reposta. Observe que o tempo de descarga é a metade do tempo de descarga da meia onda, isso resulta um ripple que é a metade (considerando mesmo capacitor e mesma corrente na carga).

Exercício Resolvido 8

Estimar o valor do ripple de pico a pico no circuito e a tensão média (tensão contínua) medida pelo voltímetro.

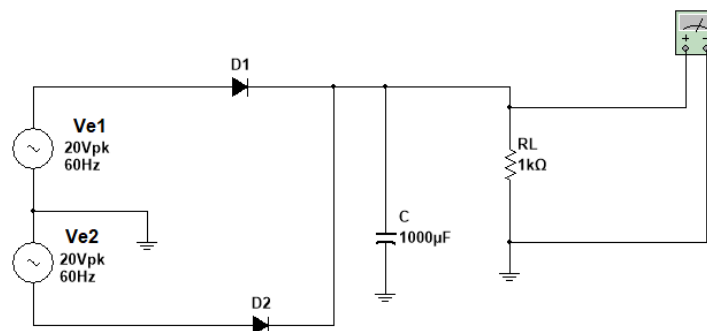


Figura 2.22 – Retificador onda completa com CP com filtro capacitivo para exercício
Exercício Resolvido 8 (Simulador1)

Solução: Constante de tempo de descarga = $1\text{ k} \cdot 1000\text{ }\mu\text{F} = 1\text{ s} = 1000\text{ ms}$

Período da ondulação = $8,33\text{ ms}$

Então como a constante de tempo de descarga é muito maior que o período da ondulação, o valor médio pode estimado por:

$$V_{CC} = V_{ep} - 0,7V = 19,3\text{ V} \quad I_{CC} = 19,3V/1k = 19,3\text{ mA} \quad \text{com } f = 120\text{ Hz} \quad C = 1000 \cdot 10^{-6}\text{ F}$$

$$V_{rpp} = \frac{19,3\text{ mA}}{1000\text{ }\mu\text{F} \cdot 120\text{ Hz}} = 0,160V_{pp} = 160\text{ mV}_{pp}$$

Os valores simuladores são: $V_{rpp} = 155\text{ mV}_{pp}$

$V_{CC} = V_{AV} = 19,147\text{ V}$

Você pode melhorar o cálculo do ripple considerando o valor inicial calculado, 0,16V.

Recalculando o V_{CC} : $V_{CC} = V_{epcarga} - V_{rpp}/2 = 19,3 - 0,16/2 = 19,3 - 0,08 = 19,22V$ que é mais próximo do valor medido, o qual pode ser considerado o valor correto.

Repita o mesmo exercício considerando $C=1000 \mu F$ e $R_L=500 \Omega$

2.2.3 Retificador de onda completa em ponte com filtro capacitivo

O circuito é mostrado na Figura 2.23. Observe que não foi mostrado o transformador, somente se for necessário abaixar ou elevar a tensão da rede (normalmente é abaixar).

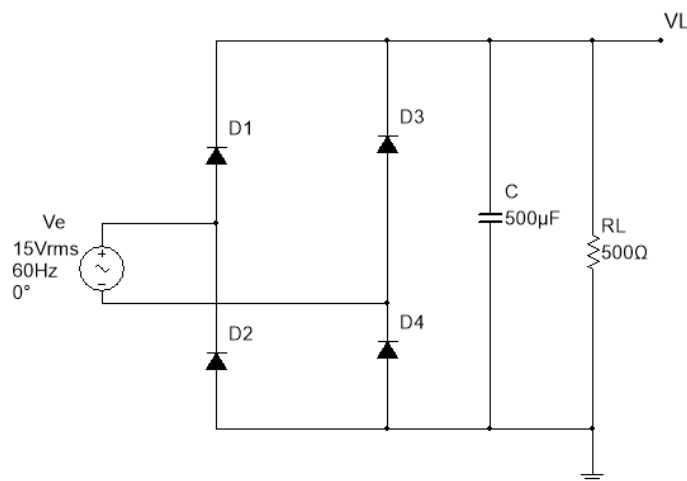


Figura 2.23 – Retificador de OC em Ponte com Filtro

Com os valores do circuito da Figura 2.23 façamos uma estimativa do ripple de pico a pico e do valor médio na carga (V_L).

O valor de pico da entrada é:

$$V_{epico} = 15 \cdot \sqrt{2} = 21,21V$$

O valor de pico na carga é: $V_{Lpico} = 21,21 - 1,4V = 19,8 V$ (Não esqueça que dois diodos conduzem)

Em uma primeira aproximação podemos considerar o valor médio como sendo:

$V_{CC} = V_{DC} = V_{AV} = 19,8 V$ nesse caso a corrente na carga vale:

$$I_{CC} = 19,8V / 0,5k = 39,6 \text{ mA}$$

E o ripple pode ser estimado por:

$$V_{rpp} = \frac{39,6mA}{500 \cdot 10^{-6} \cdot 120} = 0,66 V_{pp}$$

O Valor mínimo da tensão na carga:

$$V_{Lmin} = V_{Lmax} - 0,66 = 19,8 - 0,66 = 19,14V$$

O Valor médio da tensão na carga pode ser recalculado:

$$V_{CC} = \frac{19,8 + 19,14}{2} = 19,47V$$

Recalculando mais uma vez considerando esse novo valor CC, mais próximo do verdadeiro.

$$I_{CC} = \frac{19,47V}{0,5k} = 38,94mA$$

O novo ripple será:

$$V_{rpp} = \frac{38,94mA}{500 \cdot 10^{-6} \cdot 120} = 0,649 V_{pp}$$

Verifique abrindo o arquivo: [Retificador OC em ponte com filtro](#)

2.2.3.1.1 Problema em aumentar C – Corrente de Surto

Em princípio, de acordo com a expressão do *ripple*, basta aumentar muito o valor de C para diminuir o *ripple*, mas aumentar C diminui o tempo de condução do diodo (e isso implica em aumentar a corrente de pico repetitiva no diodo, para repor a carga do capacitor).

Quando o circuito é ligado a primeira vez o capacitor se comporta como um curto-circuito, a corrente nesse instante aumenta muito e novamente o capacitor deve suportar essa corrente de pico não repetitiva. Quanto maior o valor de C maior o valor dessas correntes, atenção portanto.

No circuito da [Figura 2.21](#) considere, inicialmente, que $C=1000\ \mu\text{F}$ e $R_L=1\text{k}$. A Figura 2.24 mostra a tensão na carga, V_L , e as correntes nos diodos D_1 , D_2 (corrente de pico repetitiva) e a corrente no capacitor, I_C , no início, correntes de pico não repetitiva (corrente de surto) e corrente de pico repetitiva.

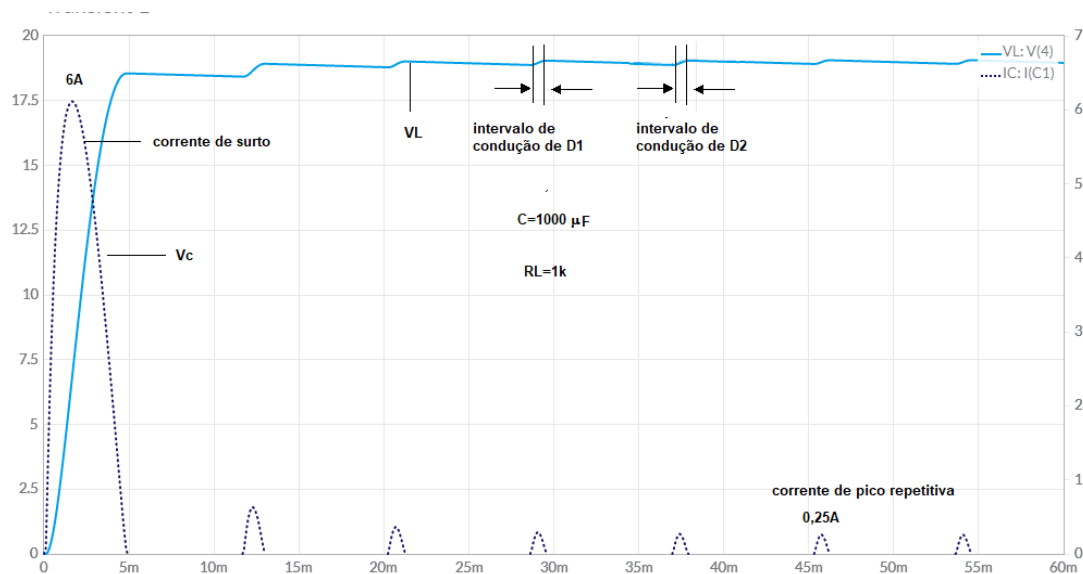


Figura 2.24 – Tensão na carga e corrente em um dos diodos no retificador com C.T, $C=1000\ \mu\text{F}$
Problema em aumentar C (Simulador1)

Se o valor de C aumentar, por exemplo, para $2000\ \mu\text{F}$, o *ripple* diminui, diminuindo o tempo de carga e aumentando a corrente de pico não repetitiva (surto), Figura 2.23. Como o intervalo de condução dos diodos diminui, aumentam a corrente de pico repetitiva e a corrente de pico não repetitiva, Figura 2.25.

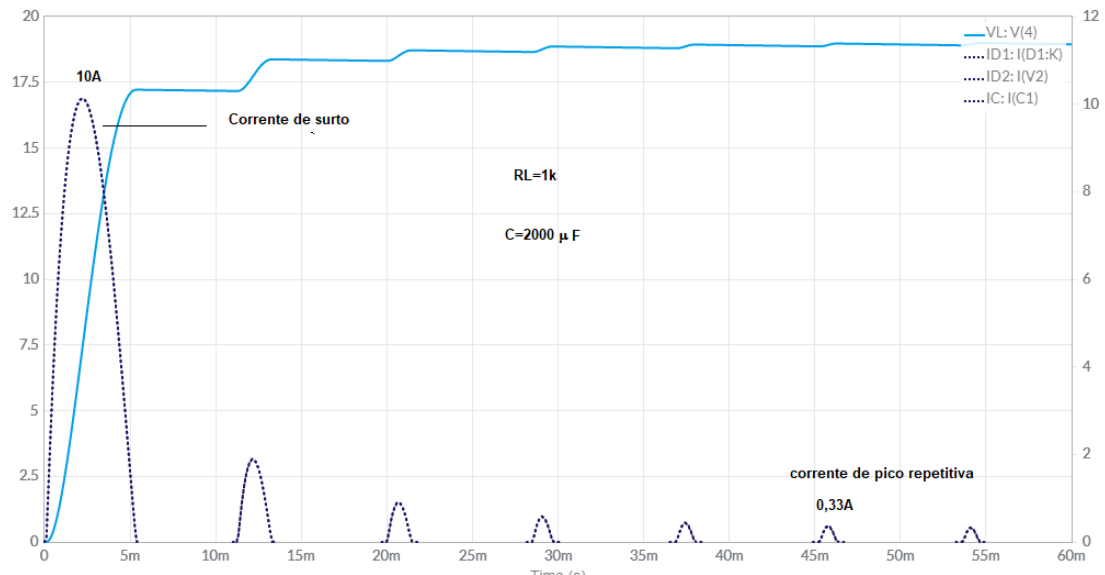


Figura 2.25 – Tensão na carga e corrente em um dos diodos no retificador com C.T, C=2000 μ F

Os diodos devem ter capacidade de suportar a corrente de pico repetitiva e a corrente de surto, ambas estão em **manual**.

Exercício Resolvido 9

Para o circuito da Figura 2.26 determinar o valor médio da tensão e o *ripple* de pico a pico.

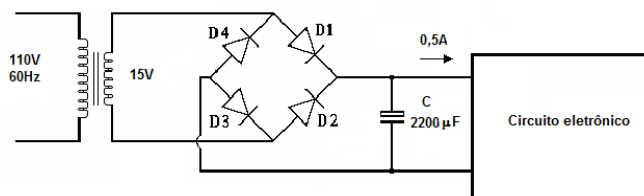


Figura 2.26 – Determinando o valor médio e o *ripple*

Exercício Resolvido 9 (Simulador 1)

Solução: São dados os valores de C, f e da corrente consumida, logo o *ripple* pode ser estimado por:

$$V_{pp} = \frac{I_{cc}}{C \cdot f} = \frac{0,5}{2200 \cdot 10^{-6} \cdot 120} = 1,89V$$

Lembrando que f (120 Hz) é a frequência da ondulação

O valor de pico da tensão de entrada é: $V_{pico} = 15 \cdot \sqrt{2} = 21,15V$

O valor de pico no capacitor: $V_{\text{picocarga}} = 21,15 - 1,4 = 19,75\text{V}$

O valor médio, V_{CC} vale: $V_{\text{CC}} = V_{\text{picocarga}} - \frac{V_{\text{rpp}}}{2} = 19,75 - \frac{1,89}{2} = 18,8\text{V}$

A Figura 2.27 resume o calculado:

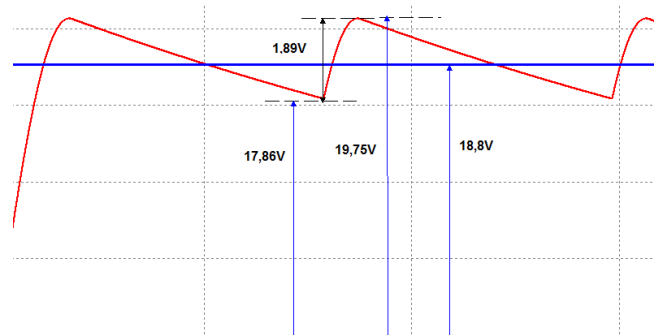


Figura 2.27 – Valores do exercício resolvido
Exercício Resolvido 9 (Simulador1)

2.2.4 Grampeadores

São circuitos que adicionam um nível CC (offset) a uma tensão alternada, são também chamados de restauradores de nível CC.

2.2.4.1 Grampeador positivo sem polarização

No circuito da Figura 2.28 é adicionado um valor médio, positivo, de aproximadamente V_p à senoide.

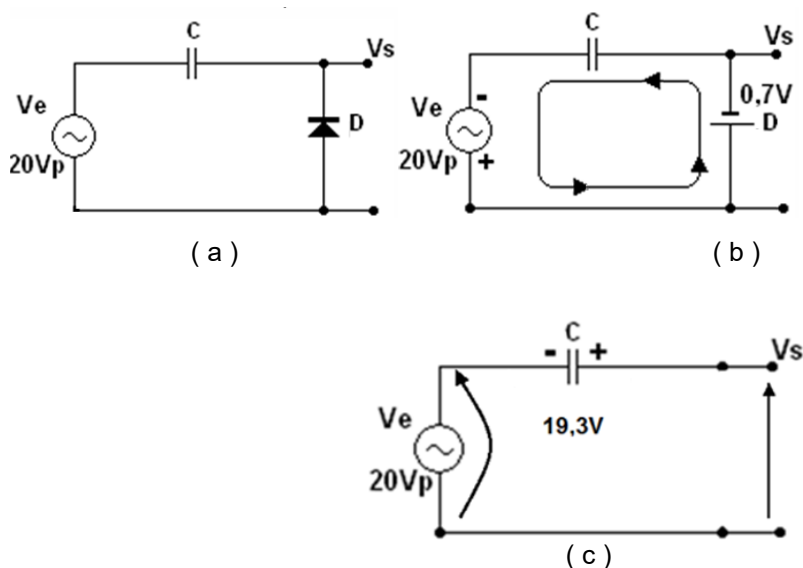


Figura 2.28 – Grampeador positivo (a) Circuito (b) Circuito equivalente (c) Circuito com capacitor carregado e diodo aberto

O diodo conduz no semiciclo negativo de V_e fazendo o capacitor se carrega até $V_p - 0,7V$ ou V_p se $V_p \gg 0,7V$. Em seguida o diodo corta abrindo. A Figura 2.38c mostra o capacitor carregado com 19,3 V. Como não tem por onde descarregar, a carga de C permanece constante com tensão de 19,3V.

Na Figura 2.28c a relação entre as três tensões (V_e , V_C e V_S) é dada por:

$$V_e + V_C = V_S \quad \text{ou} \quad V_S = V_e + V_C = 20 \cdot \sin(\omega \cdot t) + 19,3 \text{ (V)}$$

$$\text{Para } V_e = 20V \quad V_S = 20 + 19,3 = 39,3V$$

$$\text{Para } V_e = -20 \quad V_S = -20 + 19,3 = -0,7V$$

O gráfico de $V_S(t)$ é mostrado na Figura 2.29.

Observe que foi deslocado para cima, isto é, foi adicionado um offset de 19,3V

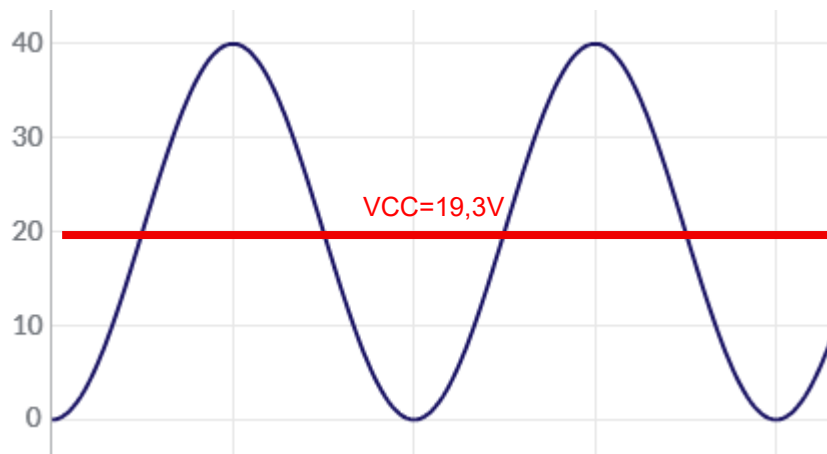
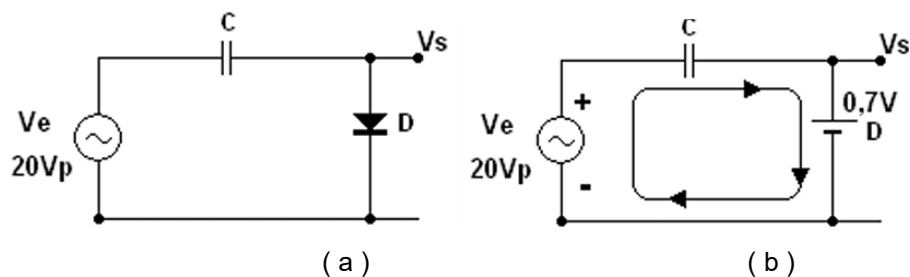


Figura 2.29 – Gráfico de $V_S(t)$ do circuito da Figura 2.39
Grampeador Positivo (Simulador1)

2.2.4.2 Grampeador negativo sem polarização

Se o diodo for invertido na Figura 2.28, resultará o circuito da Figura 2.30



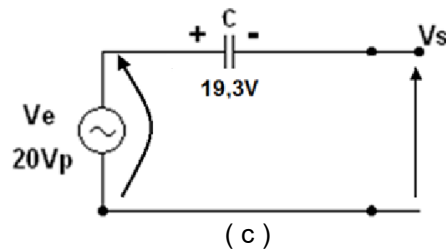


Figura 2.30 – Grampeador negativo (a) Circuito (b) Circuito equivalente (c) Circuito com capacitor carregado e diodo aberto

Na Figura 2.30a o capacitor se carrega até $V_p - 0,7V$ com a polaridade indicada. A tensão de saída, V_s , é dada por:

$$V_s + 19,3 = 20 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{ou} \quad V_s = 20 \cdot \sin(\omega \cdot t) - 19,3$$

$$\text{Para } V_e = 20V \quad V_s = 20 - 19,3 = 0,7V$$

$$\text{Para } V_e = -20 \quad V_s = -20 - 19,3 = -39,3V$$

O gráfico de $V_s(t)$ é mostrado na Figura 2.31.

Observe que foi deslocado para baixo, isto é, foi adicionado um offset de $-19,3V$

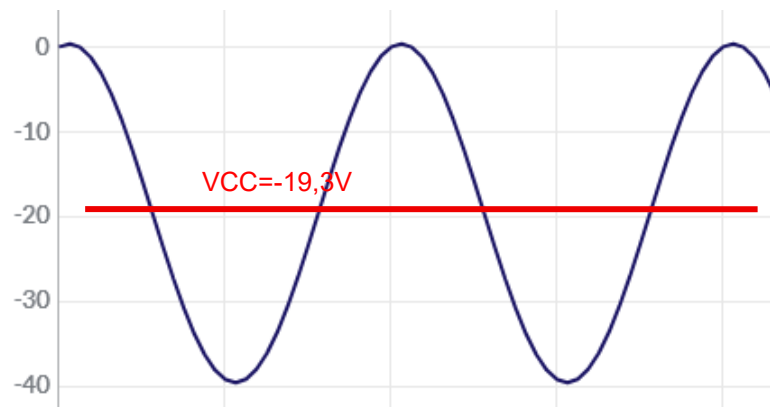


Figura 2.31 – Gráfico de $V_s(t)$ do circuito da Figura 2.40
Grampeador Negativo (Simulador1)

2.2.5 Multiplicador de tensão

São circuitos que permitem que sejam obtidas tensões CC múltiplos da tensão de pico de entrada (V_e). Por exemplo aumentar uma tensão sem uso do transformador.

A Figura 2.32 mostra o circuito dobrador de tensão.

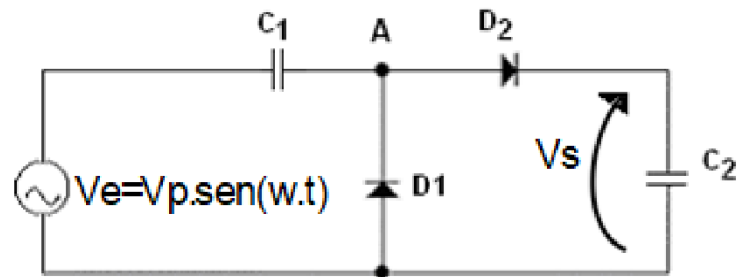


Figura 2.32 – Dobrador de tensão
Dobrador de tensão (Simulador1)
Dobrador de tensão (Simulador 2)

Durante o semiciclo negativo: Conduz D_1 e capacitor C_1 se carrega até $V_p - 0,7V$, Figura 2.33.

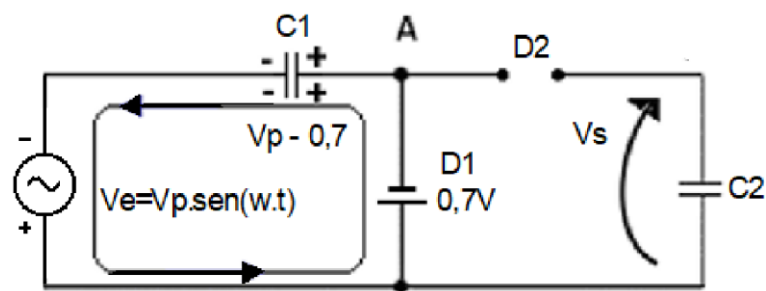


Figura 2.33 – Dobrador de tensão C_1 carregado

No semiciclo positivo: D_1 corta e D_2 conduz, Figura 2.34, e C_2 se carrega com aproximadamente com $(2 \cdot V_p - 1,4)V$.

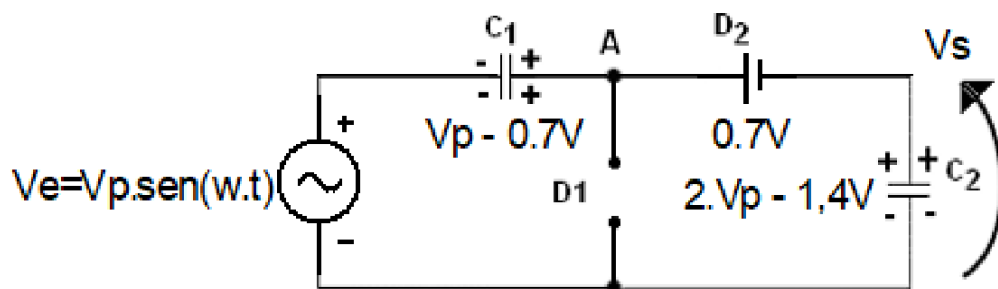


Figura 2.34 – Dobrador de tensão C_2 carregado
Dobrador de tensão (Simulador1)

A Figura 2.35 mostra as formas de onda.

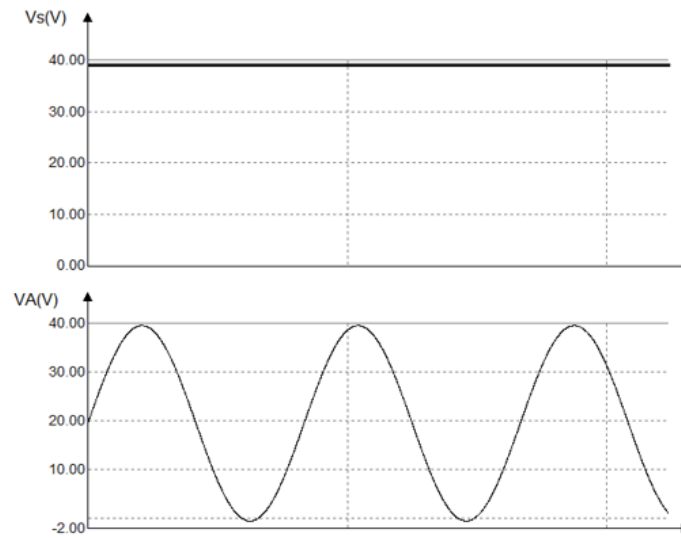


Figura 2.35 – Formas de onda do dobrador

2.2.6 Circuitos Limitadores

São circuitos usados para limitar a tensão entre dois limites protegendo o circuito de excessos de tensão.

2.2.6.1 Limitador positivo

O circuito é usado para limitar tensão alta na entrada de um circuito. O circuito é mostrado na Figura 2.36a, o da Figura 2.36b mostra o circuito equivalente.

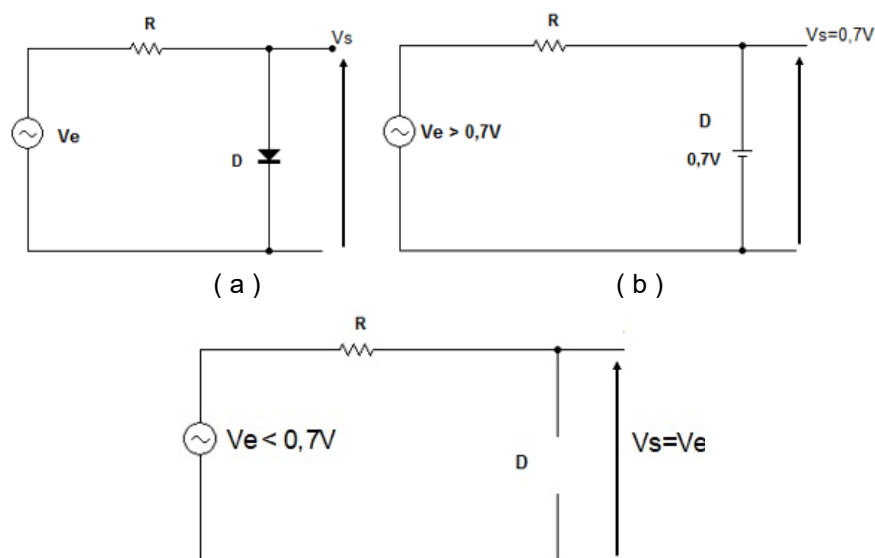


Figura 2.36 – Limitador positivo (a) circuito (b) circuito equivalente D conduz (c) D não conduz

[Limitador Positivo](#) (Simulador1)

[Limitador Positivo](#) (Simulador2)

No circuito da Figura 2.36b se $V_e > 0,7V$ o diodo conduz e a tensão de saída, V_s , será igual a $0,7V$. Se $V_e < 0,7V$ D não conduz e $V_s = V_e$.

Curva de Transferência

É um gráfico que relaciona a variável de entrada de um circuito com a variável de saída. No caso do limitador positivo a variável de entrada é V_e e a variável de saída é V_s . Basicamente é traduzir para a forma gráfica a frase:

No circuito da Figura 2.36a se $V_e > 0,7V$ o diodo conduz e a tensão de saída, V_s , será igual a $0,7V$. Se $V_e < 0,7V$ D não conduz e $V_s = V_e$, isso tudo é traduzido graficamente conforme Figura 2.37.

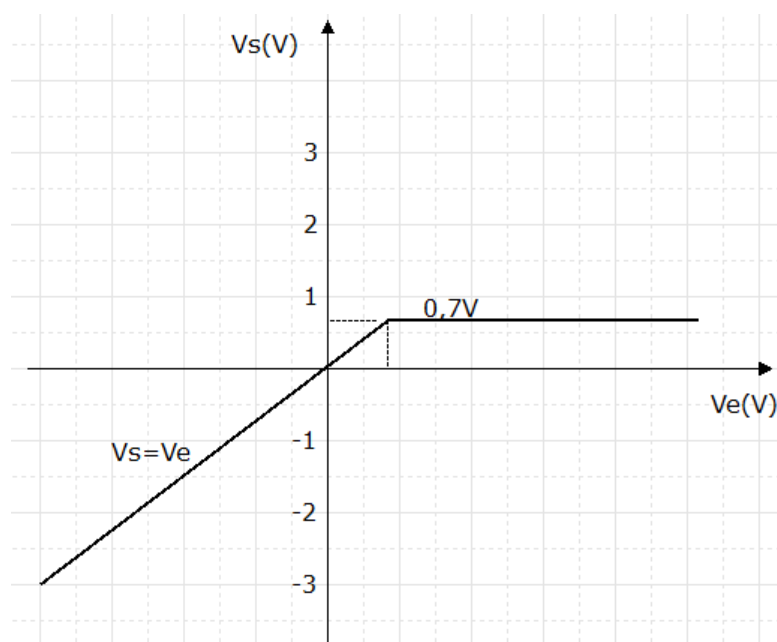


Figura 2.37 – Curva de transferencia - Limitador positivo
Limitador Positivo Gráfico Transferência (Simulador1)

2.2.6.2 Limitador negativo

É obtido invertendo o diodo na Figura 2.36, resulta o circuito da Figura 2.38. Nesse caso valores altos de tensão negativa serão limitados. Nesse caso se $V_e < -0,7V$ ($-0,8V$, $-1V$ etc.) D conduz e a saída ficará limitada a $-0,7V$. Caso contrário, se $V_e > -0,7V$ ($-0,1, 0$, $1V$ etc.) D não conduz, Figura 2.38c.

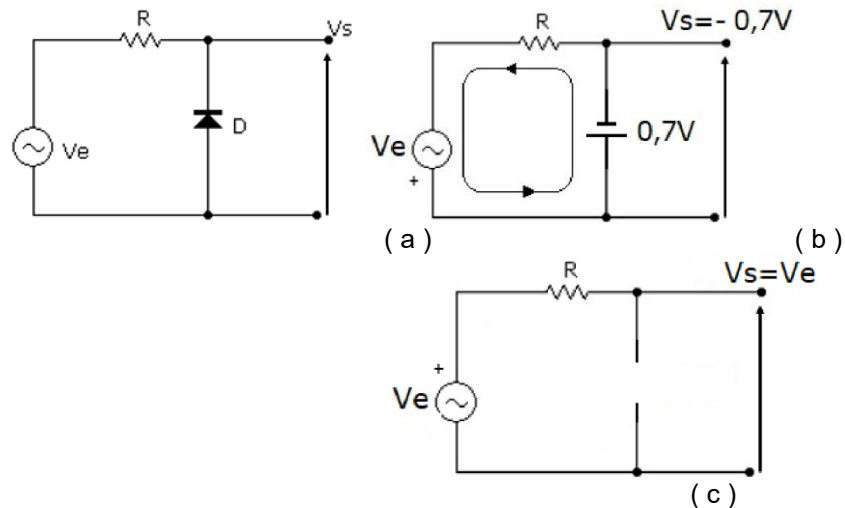


Figura 2.38 – Limitador negativo (a) circuito (b) circuito equivalente D conduz (c) D não conduz

[Limitador Negativo \(Simulador1\)](#)

[Limitador Negativo \(Simulador2\)](#)

A Figura 2.39 mostra a curva de transferencia, resumindo o funcionamento do circuito.

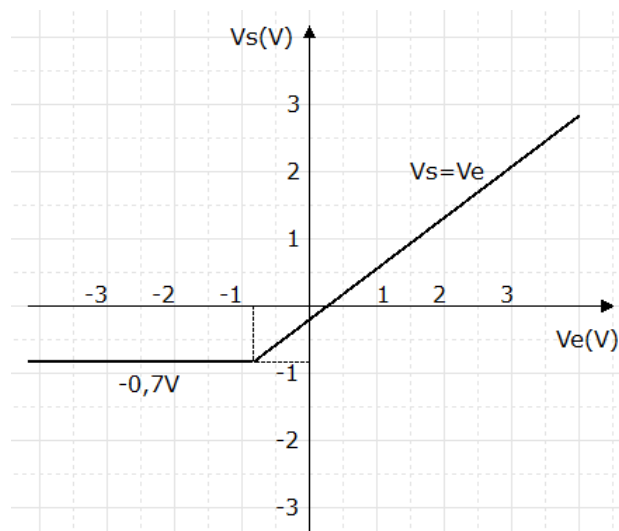


Figura 2.39 – Curva de transferencia – Limitador negativo

[Limitador Negativo Curva de Transferência \(Simulador1\)](#)

2.2.6.3 Limitador positivo negativo

O circuito é uma combinação do limitador positivo e do negativo, protegendo de tensão positiva e negativa, Figura 2.40.

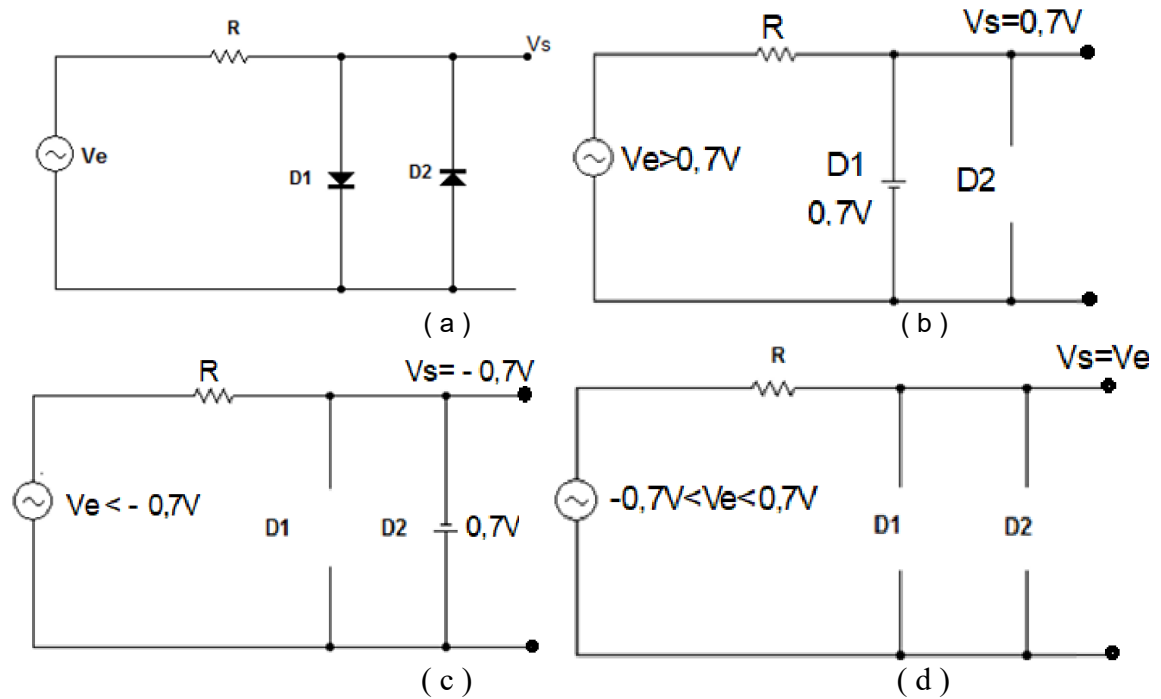


Figura 2.40 – (a) Limitador positivo/negativo (b) Limitação positiva (c) Limitação negativa (d) $V_e = V_s$

[Limitador Positivo e Negativo](#) (Simulador1)

[Limitador Positivo e Negativo](#) (Simulador2)

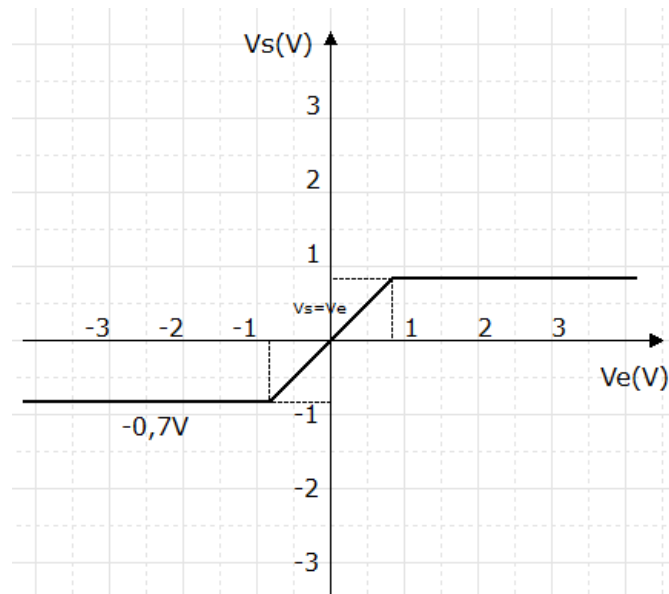


Figura 2.41 – Curva de transferência – Limitador positivo/negativo

[Limitador Positivo e Negativo Curva Transferência](#) (Simulador1)

Capítulo 3 – Outros Tipos de Diodos

Existem outros tipos de diodos com aplicações bem específicas. Nesse capítulo serão mostrados três: o LED (Light Emitting Diode – Diodo Emissor de Luz), Fotodiodo e o Diodo Zener.

3.1 Diodo Emissor de Luz (LED)

O diodo emissor de luz ou LED (*Light-Emitting Diode* – Diodo Emissor de Luz) é essencialmente uma junção PN na qual existe uma abertura pela qual é emitida radiação luminosa quando a junção é polarizada diretamente. A radiação pode ser visível (vermelho, amarelo, verde, azul) ou invisível (Infravermelho).

Existem LEDs de diversos tamanhos e LEDs usados para iluminação substituindo lâmpadas incandescentes. Originalmente eram usados em *displays* e como indicadores de ligado/desligado. Hoje não mais usados em displays devido ao alto consumo de corrente, mas continuam a ser usados para sinalização e até para substituir lâmpadas incandescentes. A Figura 2.26 mostra o símbolo (parecido com o do diodo) e aspecto físico.

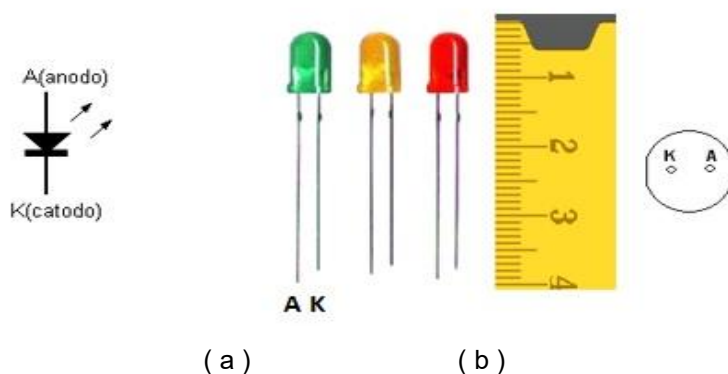


Figura 3.1 – LED (a) n Símbolo (b) Tipos de diodos (c) visão inferior

LEDs são usados para sinalizar (ligado/desligado) e para iluminar, recentemente. A intensidade da luz depende essencialmente da intensidade da corrente elétrica, quanto maior a corrente, mais forte é a luz.

Quando em condução a tensão nos terminais do LED pode variar de 1,5 V a 2 V dependendo da cor, e isso é um problema, pois se o LED precisar ser substituído, provavelmente a corrente não será mais a mesma logo a luminosidade também se

alterara. Por isso mesmo o ideal seria alimentar o LED com uma corrente constante, nesse caso o LED seja trocado a luminosidade não muda.

Polarizando o LED

Para operar o LED precisa de uma corrente de valor adequado. Precisar ser polarizado. O circuito de polarização mais simples consiste em ligar uma resistência em serie com o LED, como na Figura 3.2. Normalmente considera-se 1,5 V como a queda de tensão no LED.

Por exemplo, considere o circuito da Figura 3.2. Calcular R para o LED acender sabendo-se que o LED consome 20mA a 1,8V.

Solução:

Pela lei de Kirchhoff se a tensão no LED é 1,8 V a tensão na resistência será de $12\text{ V} - 1,8\text{ V} = 10,2\text{ V}$

Como a corrente no LED é a mesma que na resistência, o valor de R será:

$$R = 10,2\text{V} / 0,02\text{A} = 510\text{ Ohms}$$

Você pode usar qualquer valor comercial ao redor de 510 ohms. Isso é o bacana da eletrônica, funcionará. Cuidado com valores muito baixo pois queimará o LED e valores muito altos o LED não acende. A Figura 3.2 mostra a solução com dois valores diferentes de R.

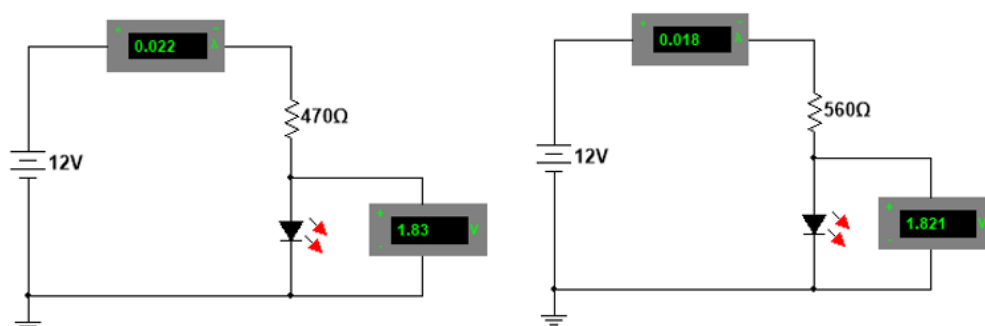


Figura 3.2 – Polarizando o LED
 Diodo Emissor de Luz (Simulador1)
 Diodo Emissor de Luz (Simulador2)

Testando o LED

O LED deve ser testado exatamente como um diodo comum, pois é essencialmente uma junção PN também, a diferença é que, quando polarizado diretamente acende. Use a escala de maior corrente (Rx1 ou Rx10) para polarizar diretamente o LED. Se o LED estiver normal o LED acende quando polarizado diretamente e apaga quando polarizado reversamente, Figura 3.3.

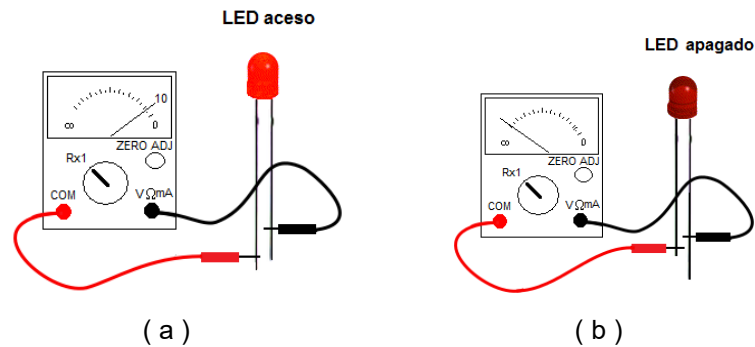


Figura 3.3 - Testando o LED com multímetro analógico (a) polarizado diretamente (b) polarizado reversamente

Exercício Resolvido 10

Calcule a corrente no circuito da Figura 3.4 supondo que a tensão no LED é 2 V.

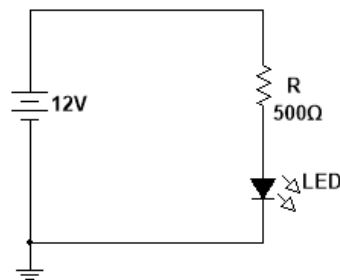


Figura 3.4 – Circuito para Exercício Resolvido 11

Solução: De acordo com a segunda lei de Kirchhoff vale:

$$V_R = 12 - 2 = 10 \text{ V}$$

Portanto a corrente na resistência que é a mesma no LED vale:

$$I = \frac{10\text{V}}{500\Omega} = 0,02\text{A} = 20 \text{ mA}$$

Exercício Resolvido 11

Calcular a resistência R no circuito da Figura 3.5 para polarizar um LED com 15 mA sabendo-se que a tensão no LED é 1,5 V e a alimentação é de 24 V. Desenhe o circuito indicando os valores dados.

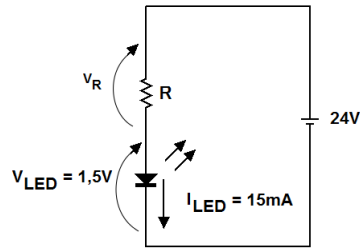


Figura 3.5 – Circuito para Exercício Resolvido 11

Solução:

Por observação é efetuada uma análise do circuito. Por exemplo, a tensão na resistência R vale $V_R = 24 - 1,5 = 22,5 \text{ V}$ e como a corrente na resistência vale 15 mA, pois está em série com o LED, então o valor de R pode ser calculado por:

$$R = \frac{22,5 \text{ V}}{15 \text{ mA}} = 1,5 \text{ k}$$

Devendo poder dissipar

$$P_D = \frac{(22,5)^2}{1,5 \text{ k}} = 337,5 \text{ mW}$$

Devendo-se usar um resistor de 0,5 W

3.2 Fotodiodo

Um fotodiodo funciona ao contrário do LED, isto é, ao receber uma radiação luminosa na junção (polarizada reversamente), produzirá uma corrente que será proporcional à intensidade luminosa, podendo ser usado com sensor de luz.

São usados basicamente para detectar a intensidade luminosa (por exemplo em sistemas digitais a presença de luz é "1" e a ausência "0"). Observar que o Fotodiodo funciona com polarização reversa. A Figura 3.3 mostra o símbolo, polarização e curvas características.

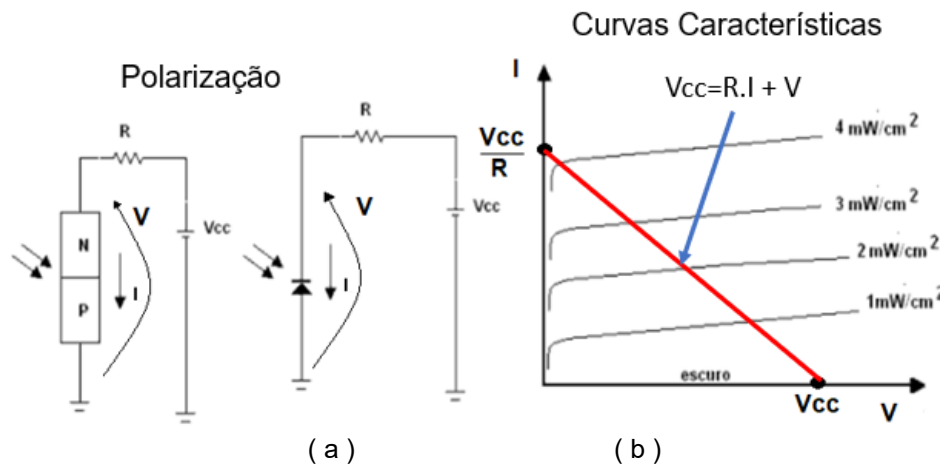


Figura 3.6 – Fotodiodo (a) Polarização (b) Curvas características
Fotodiodo (Simulador2)

Com a incidência de luz na junção a corrente aumentará, pois novos portadores de carga serão gerados. A corrente total (I) através da junção é dada por:

$$I = I_s + I_{IL}$$

onde

I_s é a corrente reversa de saturação também chamada de corrente no escuro (I_{dark}).

I_{IL} é a corrente devido a incidência de luz.

Obs: $I_{IL} \gg I_s$

Fotodiodos podem operar em frequências ultra altas (GHz), por isso mesmo são usados em sistemas de transmissão de dados via fibra ótica. A Figura 3.7 mostra o aspecto físico de um Fotodiodo.



Figura 3.7 – Imagem de fotodiodo

3.3 Varicap

Varicap ou varactor, é um tipo de diodo que possui uma capacitância variável em função da tensão à qual ele é submetido. A nomenclatura varicap vem do inglês *variable capacitance* e varactor vem também do inglês *variable reactance* e são duas nomenclaturas utilizadas para denominar o mesmo tipo de dispositivo

Funcionam com polarização reversa, alterando a largura da região espacial e a capacitância associada. Os diodos varactores são encontrados em rádios, receptores de FM, televisões e microondas. A Figura 3.8 mostra o símbolo, aspecto físico e circuito de aplicação.

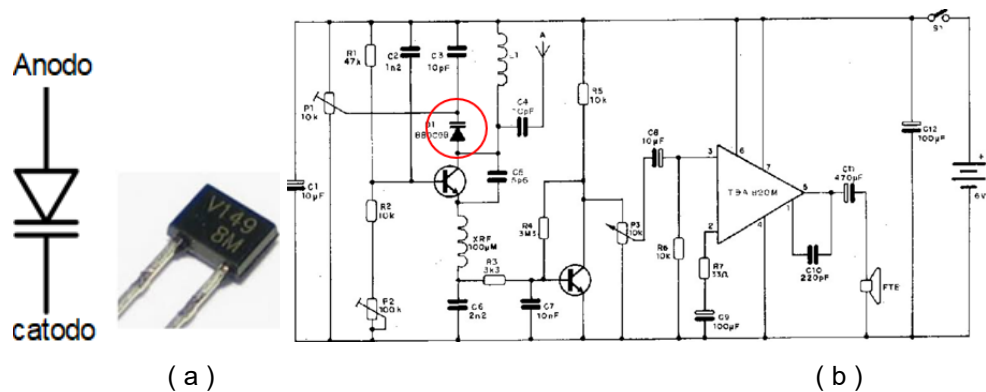


Figura 3.8 – Varicap (a) símbolo (b) aplicação (radio)

3.4 Diodo Zener

Diodos Zener ou diodos de referência são diodos projetados para operar na região de ruptura, onde grandes variações de corrente produzem pequenas variações de tensões desta forma permitindo que se construa um regulador de tensão. Quando polarizado diretamente se comporta como um diodo comum. A Figura 3.9 mostra o símbolo, aspecto físico e a curva característica.

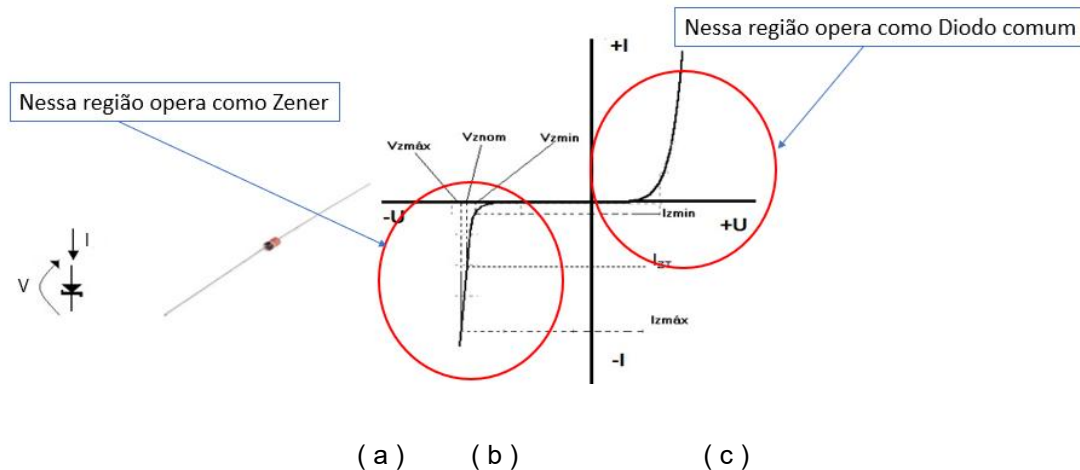


Figura 3.9 – Diodo Zener (a) Símbolo (b) Aspecto físico (c) Curva característica

[O Zener](#) (Simulador1)

[O Zener](#) (Simulador2)

Na curva característica, com polarização reversa identificamos:

I_{Zmin} é a menor corrente que mantém o Zener com regulação em V_{Zmin}

$I_{Zmáx}$ é a máxima corrente permitida sem destruição em $V_{Zmáx}$

I_{ZT} é a corrente associada a tensão nominal, V_{Nom}

Obs: Nos manuais I_{Zmin} é chamada de corrente de joelho, I_{ZK} , K de knee (joelho em inglês)

O Zener tem uma outra especificação que é a máxima potência que pode dissipar P_{Zmax}

Então se você for comprar um Zener você deve especificar para o vendedor a **tensão nominal** e a máxima **potência**.

Para o Zener vale: $P_Z = V_{Znom} \cdot I_Z$

Considerando limite máximo:

$$P_{ZMax} = V_{Znom} \cdot I_{Zmax}$$

Em geral adotamos para corrente mínima, $I_{Zmin} = I_{Zmax}/10$

Exemplo: Um Zener tem $V_{Znom} = 6,2V$, se você comprar esse Zener para 1 W, a corrente máxima que suportará será:

$$I_{Zmax} = 1W/6,2V = 1000mW/6,2V = 161 \text{ mA} \quad I_{Zmin} = 161mA/10 = 16,1mA$$

3.4.1 Modelos do Zener

Para analisar um circuito com Zener usamos modelos ou circuito equivalente.

3.4.1.1 Modelo Completo

A Figura 3.10 mostra o circuito equivalente mais completo que substitui o Zener por uma bateria de valor V_{Z0} que é a tensão em vazio, que corresponde ao ponto onde a tangente ao ponto (V_{Nom}, I_{ZT}) toca o eixo horizontal. A inclinação dessa reta determina a resistência, R_z , do Zener. Com a resistência significa que se a corrente variar, a tensão nos terminais do Zener também varia.

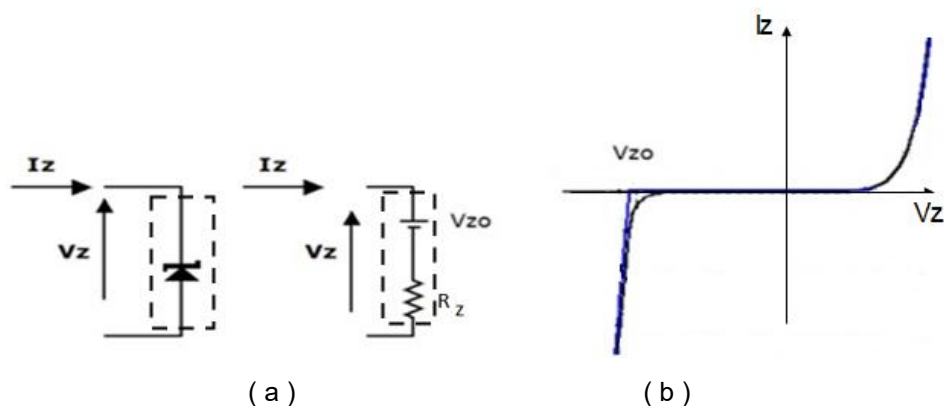


Figura 3.10 – Modelando o Zener (a) Modelo com resistencia (b) Curva

Problema do modelo: Exige análise complexa e em geral o valor de R_z não é conhecido.

3.4.1.2 Modelo Ideal

No modelo ideal a resistência é nula, isto é, se a corrente variar a tensão nos terminais do Zener não varia.

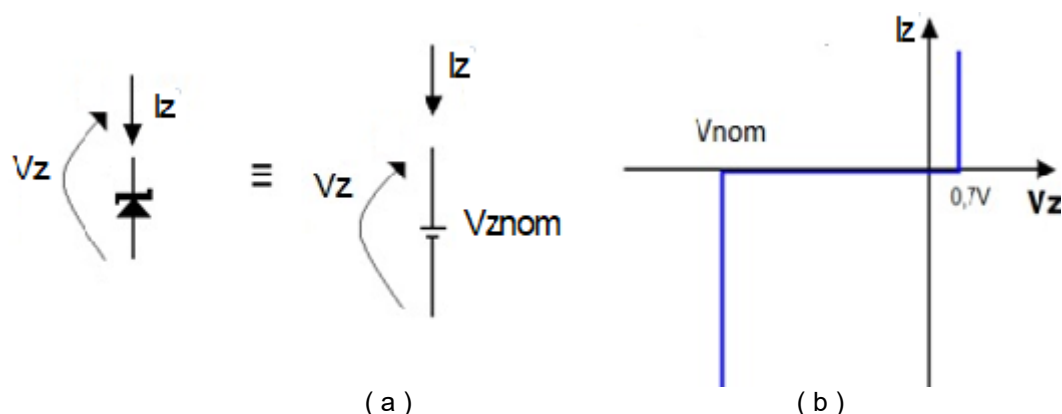


Figura 3.11 – Modelando Zener (a) Ideal (b) Curva característica

Polarizando o Zener

Para o Zener regular ($V_{Zmin} < V_{Znom} < V_{Zmax}$) a tensão externa deve ser maior que V_{Znom} e a resistência em série deve ter valor de forma que $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$.

A Figura 3.12 mostra um Zener polarizado com duas tensões externas diferentes (12V e 15V). Observar que a tensão no Zener será praticamente a mesma em torno de 5,6V.

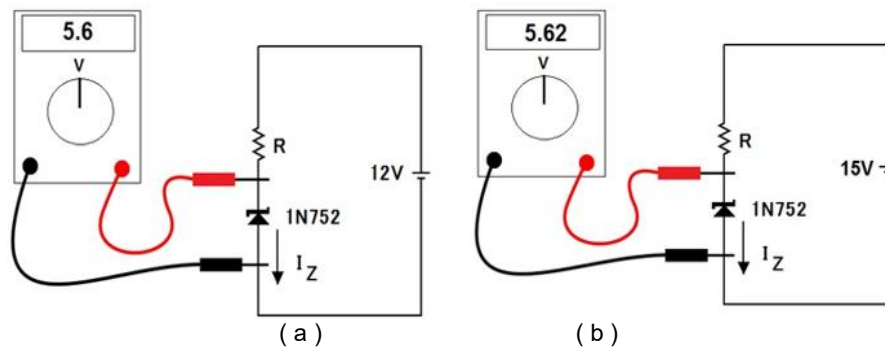


Figura 3.12 – Polarizando o Zener
Circuitos com Zener sem carga (Simulador1)

Exercício Resolvido 12

Dimensionar os limites para R, na Figura 3.12a se o Zener tem as especificações 5,6V/0,5W. Considerar que a fonte de alimentação é 12 V. Considerar modelo ideal.

Solução:

De acordo com $P_{m\acute{a}x} = V_{nom} \times I_{Zm\acute{a}x}$ logo

$$I_{max} = \frac{500mW}{5,6V} = 89,3mA$$

O valor mínimo é um décimo do valor máximo, portanto $I_{Zmin} = 8,9\text{ mA}$

Circuito com Zener no limite superior de corrente (I_{Zmax})

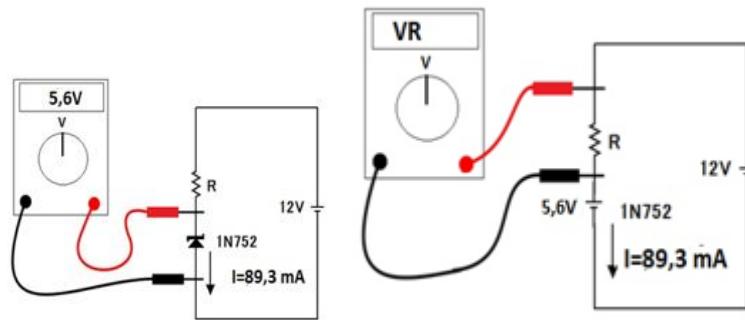


Figura 3.13 – Circuitos para Exercício Resolvido 12

Circuito com corrente máxima

Considerando que o Zener está regulando, então $V_Z=5,6V$, logo a tensão em R será igual $V_R=12 - 5,6 = 6,4 V$ e, portanto o valor de R será:

$$R = \frac{6,4V}{89,3mA} = 71,6 \text{ ohms} = R_{min}$$

Circuito com corrente mínima

Considerando Zener no limite inferior de corrente, $I=8,93 \text{ mA}$, começando a perder a regulação, Figura 3.14.

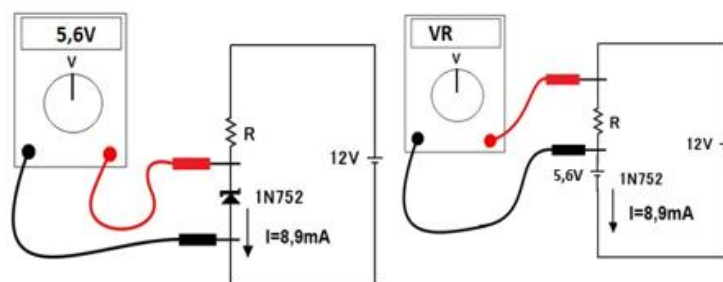


Figura 3.14 – Circuitos para Exercício Resolvido 12

Considerando que o Zener está regulando $V_Z=5,6V$, então a tensão em R será igual $V_R=12 - 5,6 = 6,4 V$ e, portanto,

$$R = \frac{6,4V}{8,93mA} = 716 \text{ } \Omega = R_{max}$$

Exercício Proposto 5

Qual a máxima e a mínima tensão que pode ter a bateria E? Considerar Zener ideal e com $P_{zmax} = 250 \text{ mW}$ e $V_z = 6,7\text{V}$

Obs: Desenhe dois circuitos em duas condições, corrente mínima e corrente máxima.

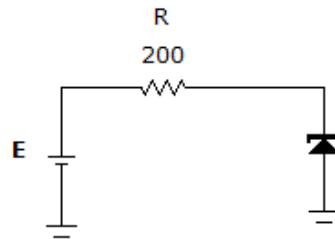


Figura 3.15 – Circuito para Exercício Proposto 5

Exercício Proposto 6

O circuito é um comparador de nível usando Amplificador Operacional. A entrada - (entrada inversora) necessita de uma tensão de $6,2 \text{ V}$. É usado um Zener de $6,2\text{V}/500\text{mW}$. Dimensione o valor de R. Obs: Não entra/sai corrente na entrada -

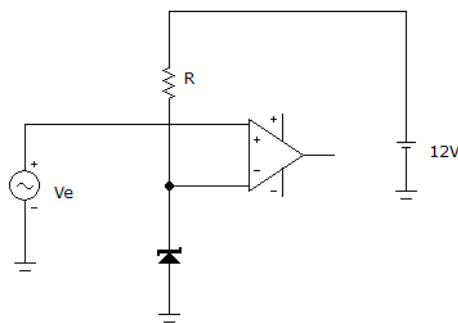


Figura 3.16 – Circuito para Exercício Proposto 6

Exercício Proposto 7

Quais os valores das tensões nos pontos A, B e C em relação ao terra no circuito da Figura 3.17? Considerar Zener ideal e diodos modelo de bateria $0,7\text{V}$.

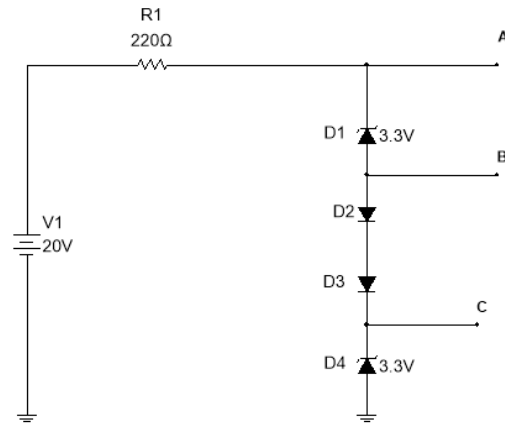


Figura 3.17 – Circuito para exercício proposto 9
Exercício Proposto 9

Exercício Proposto 8

Desenhe a forma de onda de V_s para a chave em A e em B. Considerar modelo de diodo bateria de 0,7V e Zener de 5V modelo ideal.

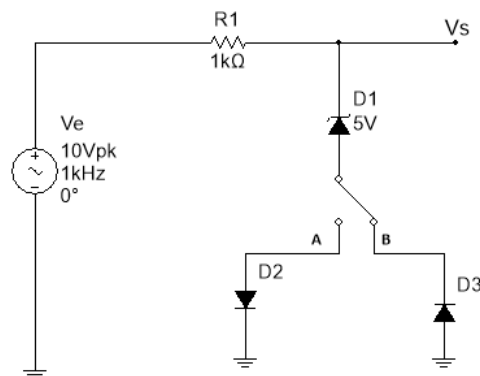


Figura 3.18 – Circuito para exercício proposto 8
Exercício Proposto 8

Exercício Proposto 9

Desenhar a forma de onda da tensão de saída V_s para $V_e=10Vp$ e $V_e=10mVp$. Considerar modelo de bateria para os diodos.

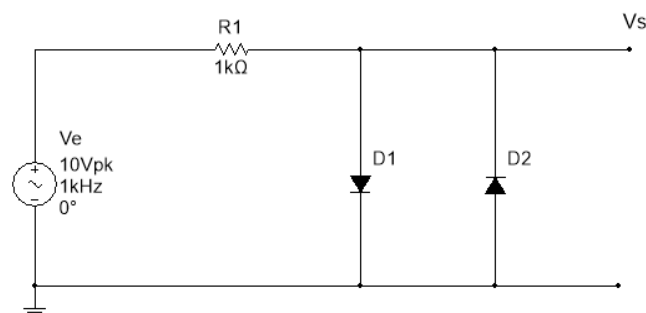


Figura 3.19 – Circuito para exercício proposto 9
Exercício Proposto 9

Capítulo 4 – Reguladores de Tensão

Os reguladores são o último bloco de uma fonte de alimentação. Existem vários tipos de reguladores, neste capítulo serão mostrados os regulador com Zener e o regulador integrado de três terminais.

4.1 Regulador Zener

No item 3 o Zener é ligado em serie com a fonte não regulada, mas sem carga. Na prática, uma carga é ligada em paralelo com o Zener alimentada por uma corrente I_L .

A Figura 3.1 mostra o circuito do regulador Zener. A tensão de entrada V_E não regulada é proveniente do filtro capacitivo. No circuito, R_s tem a finalidade de manter a corrente dentro dos limites na carga e Zener. A tensão na carga V_s é constante e igual a V_z dentro de certos limites.

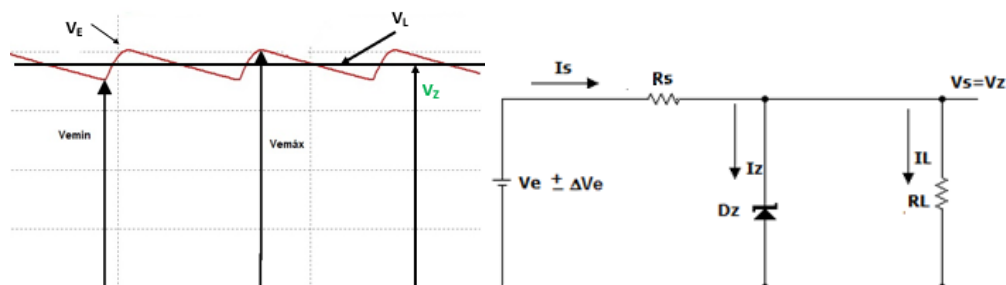


Figura 4.1 – Regulador Zener
[Regulador Zener com Carga](#) (Simulador1)
[Regulador Zener com Carga](#) (Simulador2)

A resistência R_L representa um circuito que consome uma corrente I_L , a resistência R_s deve ter valor de forma que a corrente no Zener esteja dentro dos limites máximo e mínimo quando a carga continua a ser alimentada, portanto não pode ser nem muito baixa (queimaria o Zener) nem muito alta (O Zener perderia a regulação).

Exercício Resolvido 13: Considerar que no circuito da Figura 4.1 $V_E = 12\text{ V} \pm 10\%$ e a carga consome 100 mA com 5,6 V. Dimensionar R_s considerando o Zener de 5,6V/1W.

Solução:

No pior caso a entrada é máxima $V_e = 12 + 1,2 = 13,2 \text{ V}$ e impondo corrente máxima no Zener.

$$I_{Z\text{máx}} = \frac{1000\text{W}}{5,6\text{V}} = 196\text{mA} \quad I_{Z\text{min}} = \frac{I_{Z\text{max}}}{10} = \frac{196\text{mA}}{10} = 19,6\text{mA}$$

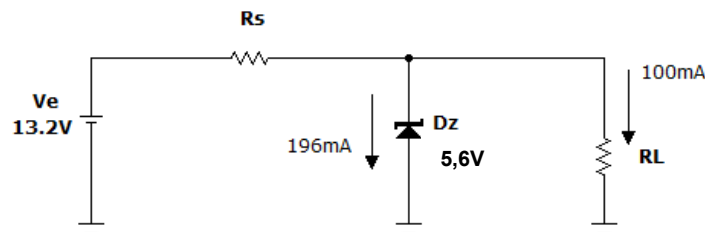


Figura 4.2 – Regulador com condições limites superiores
Exercício Resolvido 13 (Simulador1)

Considerando que o Zener está regulando a tensão na resistência R_S será igual a 8,1 V e como a corrente em R_S vale 296 mA então o valor de R_S nessas condições é:

$$R_S = R_{S\text{min}} = \frac{(13,2 - 5,6)\text{V}}{296\text{mA}} = 25,7\Omega$$

Se o valor dessa resistência for menor que esse a corrente no Zener será maior que 196 mA destruindo-o.

As condições limites inferiores são quando a entrada for igual a $12\text{V} - 1,2\text{V} = 10,8 \text{ V}$ e o Zener estiver perdendo a regulação, Figura 4.3.

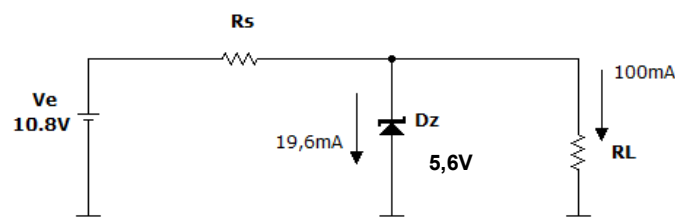


Figura 4.3 – Regulador com condições limites inferiores
Exercício Resolvido 13 (Simulador1)

Considerando que o Zener está ainda regulando, a tensão na resistência R_S será igual a 5,2 V e como a corrente em R_S vale 119,6 mA então o valor de R_S nessas condições é:

$$R_S = R_{S\text{máx}} = \frac{(10,8 - 5,6)\text{V}}{119,6\text{mA}} = 43,5\Omega$$

Se R_s for maior que esse valor a corrente no Zener diminui abaixo do mínimo e o mesmo perde a regulação (a tensão cai muito abaixo de 5,1 V).

Valor adotado $R_s=33$ Ohms

Exercício Proposto 7

Considerando o Zener 1N4735 de 6,2V/0,5W. No circuito da Figura 4.4 calcule os limites que pode ter R_L para que o Zener possa operar dentro da região de regulação.

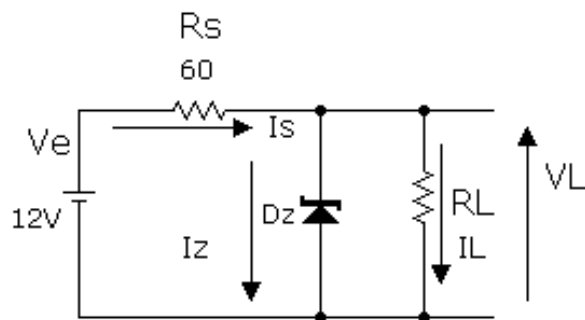


Figura 4.4 – Circuito para exercício proposto 7

Exercício Proposto 8

Para o circuito da Figura 4.5 determine a faixa de V_e ($V_{e\max}$ e $V_{e\min}$) que mantem V_L em 8 V e não exceda potência máxima nominal do diodo Zener, sem perder a regulação.

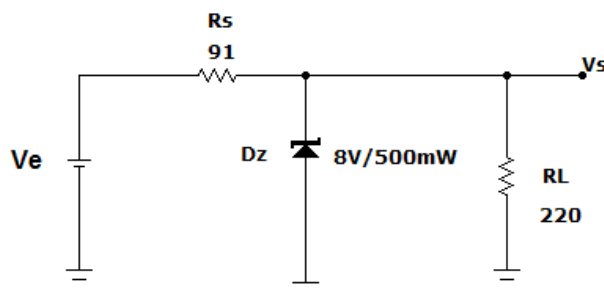


Figura 4.5 – Circuito para exercício proposto 8

4.2 Reguladores integrados de três terminais

Os reguladores integrados de três terminais são CI's que geram uma tensão de referência fixa entre dois terminais, saída (*output*) e GND ou entre saída e ADJ.

Existem vários CI's de três terminais usados como reguladores sendo os mais conhecidos os da família 78XX (reguladores de tensão positiva) e família 79XX (reguladores de tensão negativa) e o regulador LM 317 para fonte ajustável.

4.2.1 Reguladores de tensão fixa

São os CI's da família 78XX e o seu dual da família 79XX. As letras XX representam o valor da tensão regulada, assim é que 7805 é um regulador que fornece 5 V de tensão regulada, 7812 o regulador fornece 12 V. Da mesma forma 7905 na saída a tensão será -5 V.

A Figura 3.6 mostra o circuito típico de um regulador de tensão 7805, Figura 3.6a, a entrada não regulada, Figura 3.6b, e a saída regulada, Figura 3.6c. Observar a simplicidade do circuito.

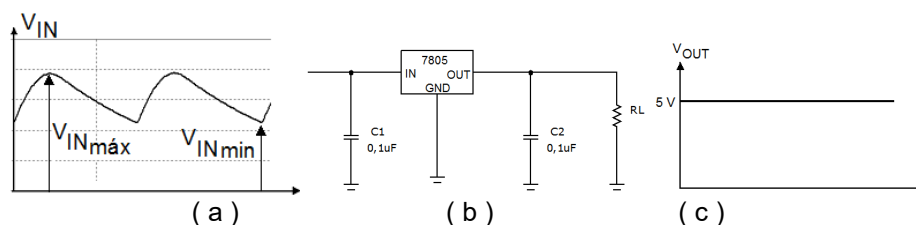


Figura 4.6 – Regulador integrado de 3 terminais (a) tensão de entrada não regulada (b) circuito (c) tensão de saída regulada

Para que um regulador opere de forma adequada a tensão de entrada (V_{IN}) deve ser pelo menos igual a $XX+2,5$ V, no caso do 7805 pelo menos 7,5 V. A potência dissipada no CI é calculada por:

$$P_D = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I$$

Recomenda-se que o valor mínimo não seja muito maior que o necessário. Se a diferença ($V_{IN} - V_{OUT}$) for muito grande a dissipação de potência pode exceder a máxima permitida, que depende do tipo de encapsulamento. A máxima tensão de entrada é 35 V, mas o fabricante recomenda 25 V para 7805, 30 V para 7812 e 30 V para 7815. Esses circuitos integrados estão disponíveis em diversos encapsulamentos sendo o mais comum o TO-220 para 1 A. Outros encapsulamentos possibilitam correntes maiores ou menores. A Figura 3.7 mostra os tipos de encapsulamento para o CI 78XX. A entrada (IN) é o pino 1, o pino 2 é terra (GND) e a saída é no pino 3 (OUT). Para a família 7900 (saída negativa) o pino 1 é terra, o pino 2 é entrada e o pino 3 saída, cuidado portanto ao usar os dois integrados. No caso do encapsulamento

metálico TO-3 e TO-220 o dissipador é ligado à carcaça (case) sendo a saída (OUT) na família 78XX. Para a família 79XX o dissipador é conectado à entrada (IN).



Figura 4.7 – Pinagem dos CI's da família 78XX
Fonte: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7815.pdf>

Observação: Atenção na identificação, pois existem outros componentes que usam o mesmo tipo de encapsulamento TO-220, tais como transistores, SCR e TRIAC.

O 78XX e 79XX são usados quando se deseja construir uma fonte simétrica para alimentar circuitos com amplificadores operacionais ou circuitos que tem transistores NPN e PNP.

4.2.2 Cuidado com calor desnecessário

O C.I de três terminais não é muito eficiente. Considere que é usado um 7805. A potência dissipada no C.I é calculada por:

$$P = (V_{IN} - 5V) \times I_L$$

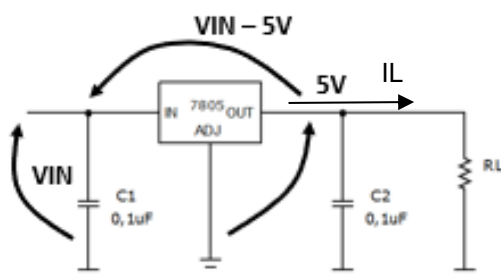


Figura 4.8 – C.I 7805 - Tensões

Suponha que a entrada (V_{in}) é 15V e a corrente na carga 0,5A. A potência dissipada no C.I será aproximadamente igual:

$$P = (15V - 5V) \times 0,5A = 5 \text{ W} \quad \text{sendo necessario um dissipador.}$$

$$\text{A potência util efetiva é: } 5V \times 0,5A = 2,5 \text{ W (Potência da carga)}$$

$$\text{A Potência total: } 15V \times 0,5A = 7,5 \text{ W}$$

$$\text{Rendimento} = 2,5W / 7,5W = 0,33 \text{ ou } 33\%$$

Se a entrada fosse 9V, a potência dissipada seria:

$$P = (9V - 5V) \times 0,5A = 2 \text{ W}$$

$$\text{A potência util} = 2,5 \text{ W e a potência total: } 9V \times 0,5A = 4,5 \text{ W}$$

$$\text{Rendimento} = 2,5W / 4,5W = 55\%$$

Por isso é importante no projeto otimizar os valores maximo e minimo de tensão de entrada.

Observação: C1 e C2 não são obrigatórios, mas o fabricante recomenda usar $C1=0,33 \mu F$ e $C2=0,1 \mu F$

4.2.3 Aplicações

A Figura 4.9 mostra a aplicação mais simples do 7805, eventualmente adicionando os capacitores da Figura 4.8.

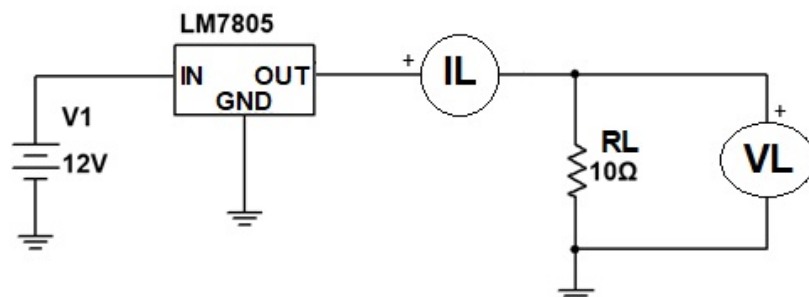


Figura 4.9 – Aplicação básica principal

[Aplicação básica](#) (Simulador1)

[Aplicação básica](#) (Simulador2)

4.2.4 Entrada com Ripple

O circuito da Figura 4.10 simula uma aplicação pratica que é o C.I recebendo a tensão não regulada do filtro de um retificador.

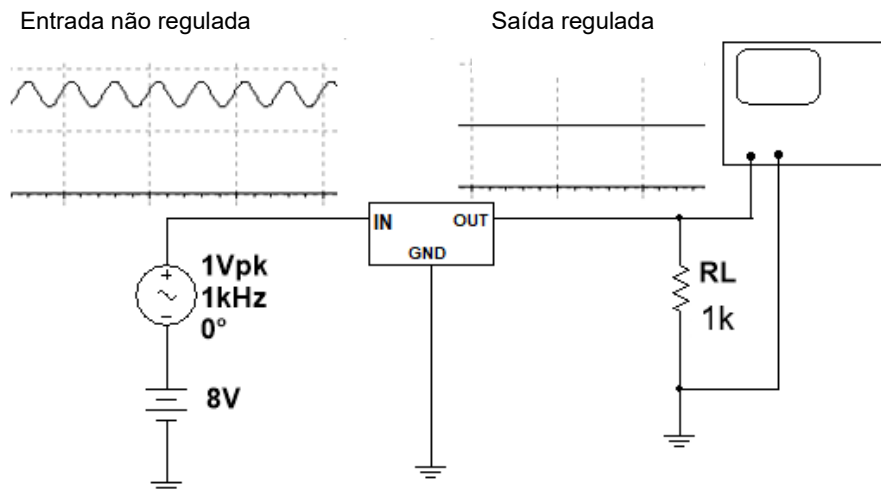


Figura 4.10 – 7805 entrada com valor medio e ripple
Tensão não regulada (Simulador1)

4.2.5 Aumentando a tensão de saída com Zener

O circuito da Figura 11 permite obter um valor de saída regulada maior do que 5V usando um Zener. A resistencia de 330 é para polarizar o Zener e a tensão na saída:

$$V_{saída} = 5V + V_Z$$

Lembre-se que para o C.I regular, 5V entre OUT e GND, a tensão entre V_{IN} e V_{OUT} deve ser maior ou igual a 2,5V.

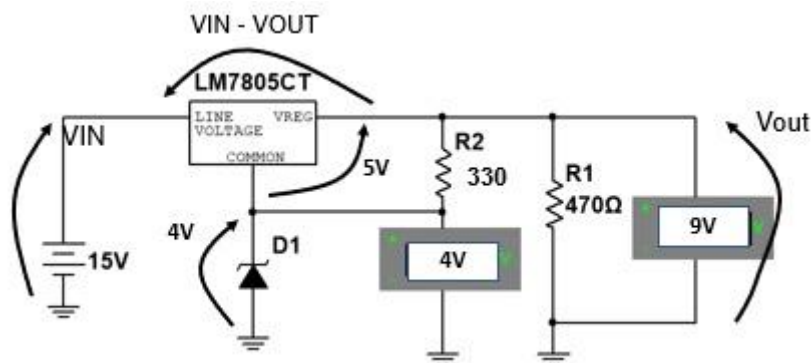


Figura 4.11 – 7805 – Aumentando a tensão de saída com Zener
Aumentando a tensão de saída (Simulador1)

Atenção para a potencia dissipada: $P_D = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I_L$

4.2.6 Aumentando a tensão de saída com divisor de tensão

Outra alternativa para aumentar a tensão na saída (V_{out}) é o circuito da Figura 4.12 usando o divisor de tensão com R_1 e R_2 :

$$V_{\text{saida}} = V_{\text{out}} = 5V \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + R_2 I_{\text{pol}}$$

Considerar: $I_{\text{pol}} = 4,5\text{mA}$

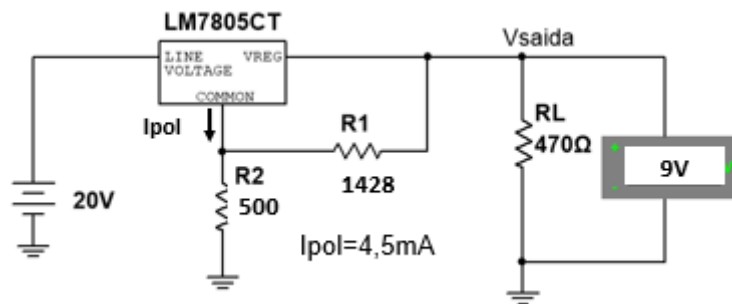


Figura 4.12 – 7805 – Aumentando a tensão de saída com divisor de tensão
Aumentando a tensão de saída (Simulador1)

No exemplo da Figura 4.12:

$$V_{\text{saida}} = 5 \cdot \left(1 + \frac{500}{1428}\right) + 0,5k \cdot 4,5\text{mA} = 6,75 + 2,25 = 9\text{V}$$

4.2.7 Fonte de Corrente constante

Uma fonte de corrente é um circuito que fornece uma corrente constante a uma carga de valor constante mesmo que a carga (tensão) varie.

Existem varias formas de se construir uma fonte de corrente constante. A Figura 4.13 é uma dessas formas.

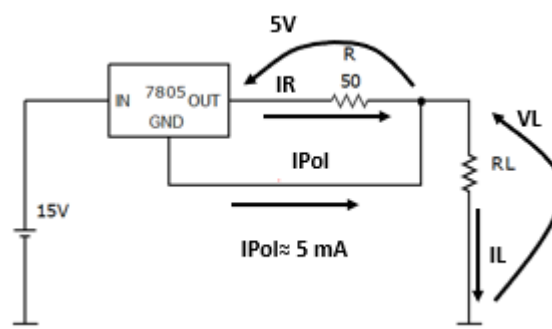


Figura 4.13 – Fonte de corrente constante
Fonte de corrente constante_ (Simulador1)

No circuito: $I_L = I_R + I_{\text{pol}}$

$$I_R = V_R / 50 \text{ onde } V_R = 5\text{V}$$

No exemplo, $I_R = 5\text{V} / 50 \Omega = 0,1\text{A} = 100 \text{ mA}$

Logo $I_L = 5\text{mA} + 100 \text{ mA} = 105 \text{ mA}$

Caso seja necessário na carga 100 mA, o valor de R deve ser ajustado para que $I_R=95$ mA.

ExercícioResolvido 12

No circuito da Figura 4.14 determinar:

- a) R para que $I_L=150$ mA
- b) Limites de R_L

Considerar que para regular: $V_{IN} \geq V_{OUT} + 2,5$ V e $I_{pol}=5$ mA

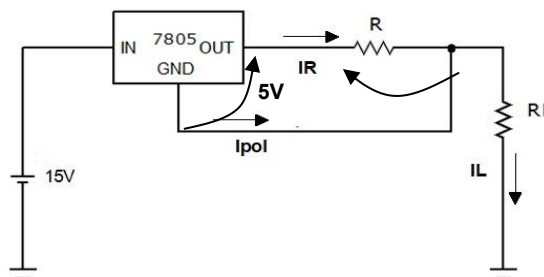


Figura 4.14 – Circuito para ExercícioResolvido 14
ExercícioResolvido 12 (Simulador1)

Solução:

a) Supondo que a entrada é adequada (regulador fornecendo 5V entre a saída e o terminal GND).

$$I_L=150\text{mA}=I_R+5\text{mA logo}$$

$$I_R=145\text{mA e portanto}$$

$$R=5\text{V}/145\text{mA}=5\text{V}/0,145\text{A}=34,48 \text{ Ohms}$$

b) Para regular $V_{IN} - V_{out} \geq 2,5\text{V}$ logo

$$15 - (5+V_L) \geq 2,5 \text{ resolvendo para } V_L \text{ resulta:}$$

$$V_L \leq 7,5\text{V e como } I_L=150\text{mA}$$

$$R_L=7,5\text{V}/0,15\text{A}=50 \text{ Ohms}$$

4.2.8 Fonte Simétrica

Uma fonte simétrica é construída usando dois reguladores um 78XX (saída positiva) e um 79XX (saída negativa). São usados para alimentar amplificadores operacionais (AmpOP). A Figura 4.15 mostra o primeiro passo que é obter a tensão retificada

positiva e negativa. Observar os diodos D1 e D2 para obter a tensão positiva e os diodos D3 e D4 para tensão negativa.

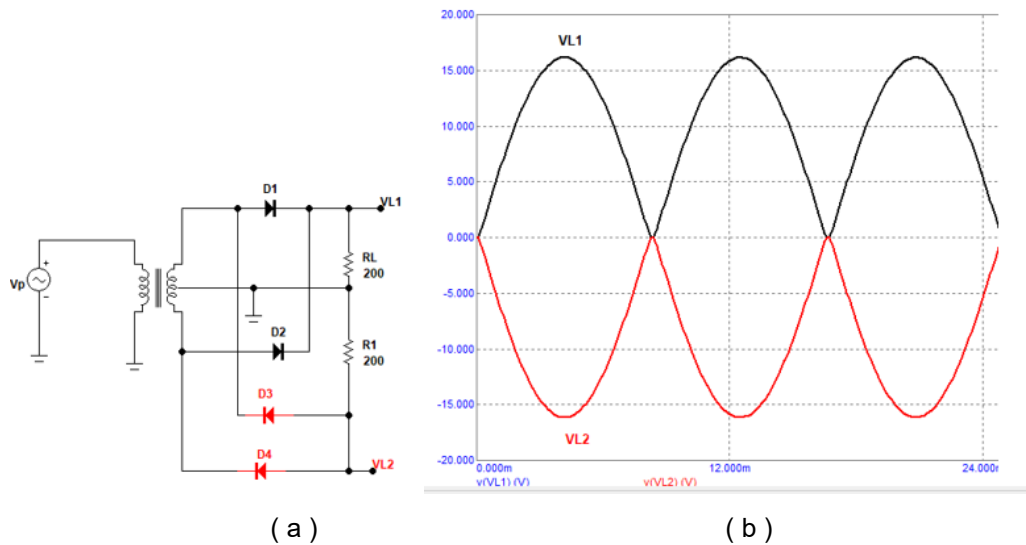


Figura 4.15 – Obtendo a tensão retificada (a) Circuito (b) Formas de onda
Obtendo Fonte simetrica parte1 (Simulador1)

A Figura 4.16 mostra o circuito e as formas de onda após adicionar os capacitores de filtro.

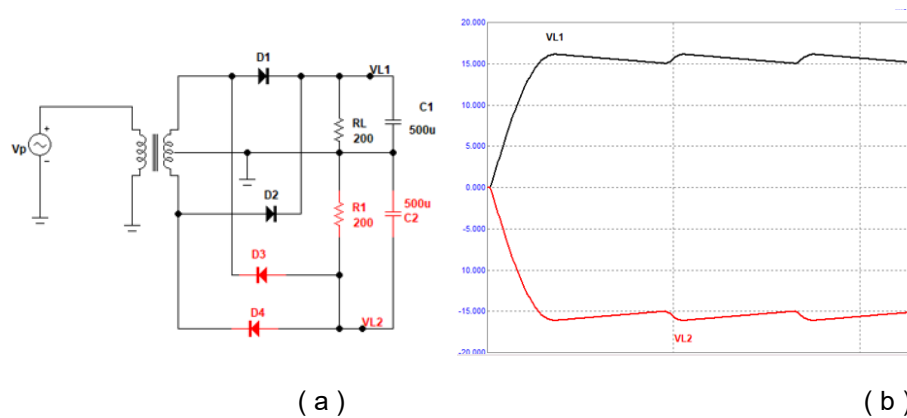


Figura 4.16 – Filtrando a tensão retificada (a) Circuito (b) Formas de onda
Obtendo Fonte simetrica parte2 (Simulador1)

A Figura 4.17 mostra uma fonte simétrica de +12V/-12V (7812/7912)

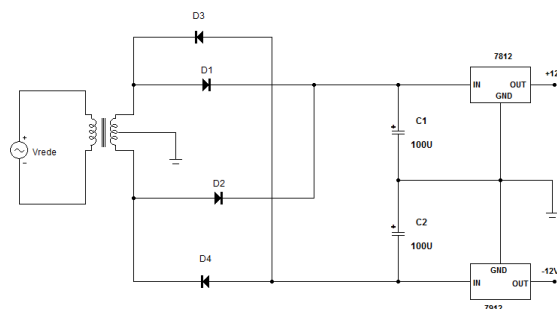


Figura 4.17 – Fonte simétrica fixa de 12V

Exercício Resolvido 14

Calcular V_{min} e V_{max} na entrada do regulador. Adotar diodos: Modelo bateria 0,7V

Considerar: $V_{rpp} = \frac{I}{C.f}$

Onde $I=0,5\text{ A}$ $C=2200\text{ mF}$ e $f=120\text{ Hz}$

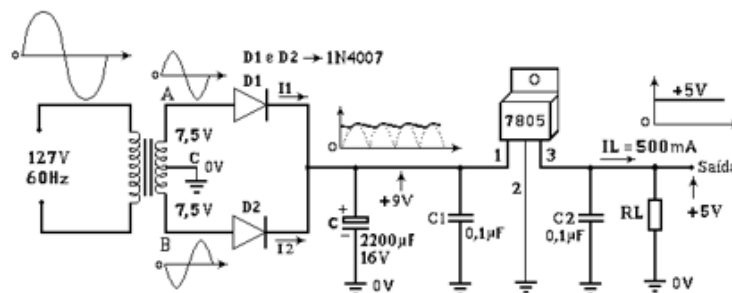


Figura 4.18 – Circuito para Exercício Resolvido 13
Exercício Resolvido 14 (Simulador1)

Solução:

$$V_{pico}(entrada) = 7,5V \cdot 1,41 = 10,57V$$

$$V_{pico}(capacitor) = 10,57V - 0,7V = 9,87V$$

$$V_{rpp} = \frac{0,5A}{2200 \cdot 10^{-6} \cdot 120} = 1,89V_{pp}$$

$$V_{min} = 9,87 - 1,89 = 7,98V$$

A Figura 4.19 mostra a forma de onda na entrada do regulador indicando os principais valores de tensão.

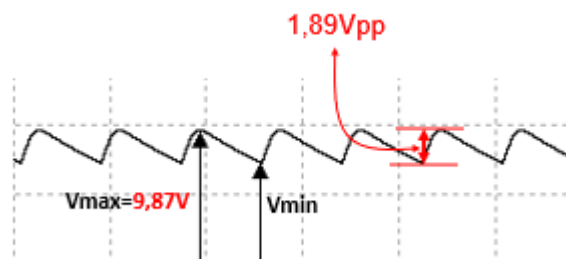


Figura 4.19 – Forma de onda no capacitor

Esses valores limites são importantes para o bom funcionamento do regulador. Tensão de entrada muito alta pode destruir o regulador, tensão abaixo de um mínimo o regulador não regula.

Exercício Resolvido 15

O circuito, Figura 4.20, é uma Fonte Simétrica de +12V/-12V. Calcular V_{emin} e $V_{emáx}$ na entrada do regulador.

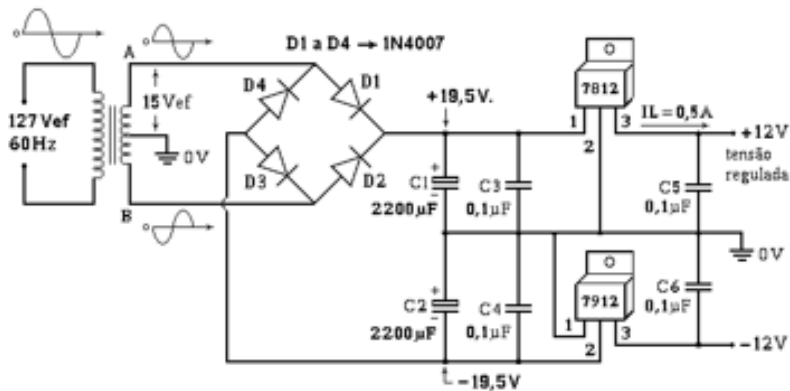


Figura 4.20 – Circuito para Exercício Resolvido 15

Solução:

O retificador é onda completa com Center Tap de 15V+15V.

D_1 e D_2 fornecem a tensão retificada positiva, e D_3 e D_4 a negativa.

A tensão de pico na entrada é: $V_{ep} = 15 \cdot \sqrt{2} = 21,21V$ e a tensão de pico nos capacitores

$V_{emáx} = 21,21 - 0,7V = 20,51V$ como a corrente na carga é 0,5A o valor de pico a pico do ripple é:

$$V_{rpp} = \frac{0,5A}{2200 \cdot 10^{-6} \cdot 120} = 1,89V$$

$$V_{emin} = 20,51 - 1,89 = 18,62V$$

O valor medio (valor medido por um voltmetro CC) vale: $(20,51 + 18,62)/2 = 19,56V$

Exercício Resolvido 16

Qual o valor aproximado da tensão na saída, V_s ? Considerar que a corrente de polarização vale 4,5 mA e que $R = 560 \text{ Ohms}$.

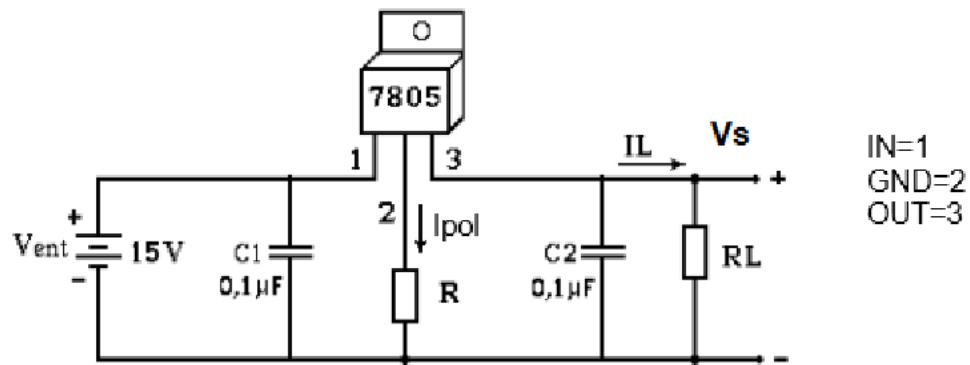


Figura 4.21 – Circuito para Exercício Resolvido 15
Exercício Resolvido 16 (Simulador1)

Solução:

Considerando que o C.I. está regulando e que a corrente saindo pelo terminal GND (2) é 4,5mA, a tensão em R vale $V_R = 1k \cdot 4,5mA = 4,5V$ e como o C.I. está regulando a tensão entre os terminais 3 e 2 vale 5V. logo V_s vale:

$$V_s = 4,5V + 5V = \mathbf{9,5V}$$

Exercício Proposto 9

No Exercício Resolvido 15 qual deve ser o valor de R para que a tensão na saída, V_s , seja igual a 11V?

4.2.9 Regulador de tensão ajustável CI LM 317

São reguladores semelhantes aos das famílias 78XX e 79XX. Estes reguladores fornecem uma tensão de referência de 1,25 V entre os dois terminais OUT e ADJ. Os principais CIs são LM117 e LM317. A Figura 4.22 mostra o circuito básico. Se as condições forem satisfeitas ($V_e > 2,5V + V_s$) entre o terminal OUT e GND aparece uma tensão de 1,25 V.

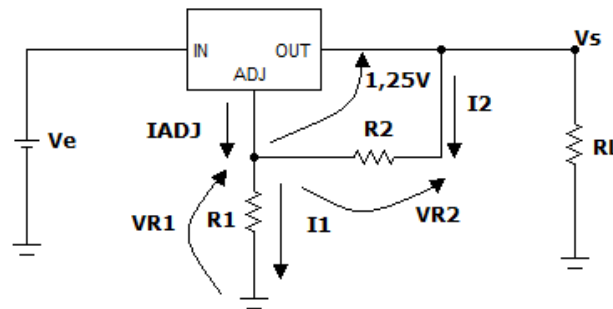


Figura 4.22 – Regulador com CI da família 317

A corrente de polarização I_{ADJ} é da ordem de 50 μA (uma vantagem em relação às famílias anteriores), se I_2 for muito maior que esse valor então $I_1 = I_2$.

$$I_2 = \frac{1,25V}{R_2} \quad \text{e} \quad V_{R1} = R_1 \cdot I_1 = R_1 \cdot I_2 = R_1 \cdot \frac{1,25V}{R_2} \quad \text{e como } V_s = 1,25V + V_{R1} \text{ resulta:}$$

$$V_s = 1,25 \cdot (1 + R_1/R_2)$$

Se R_1 for ajustável, a tensão na saída variará entre o mínimo de 1,25 V e o máximo determinado pela relação entre R_1 e R_2 .

Encapsulamentos

Encapsulamento ou invólucro

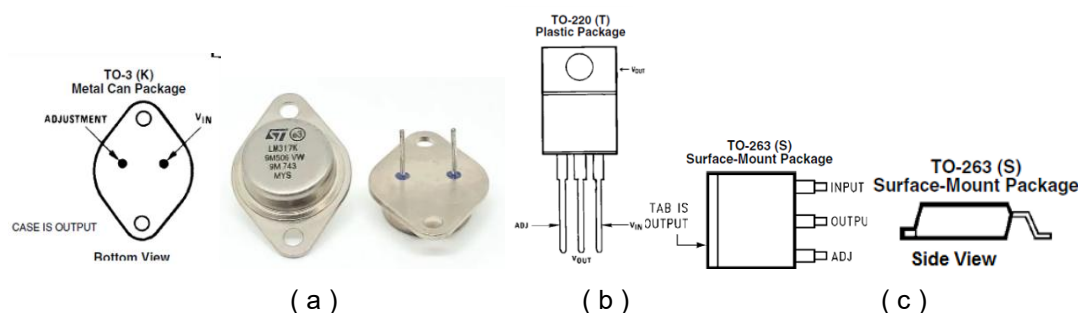


Figura 4.23 – LM317 encapsullamentos (a) TO-3 (b) TO-220 (c) TO- 263

Exercício Resolvido 17

No circuito da Figura 4.24 considerando que R_1 é uma resistência variável de 1 k e $R_2=180$ Ohms pedem-se:

- Limites para a tensão de saída, V_s .
- Valor mínimo que deve ter a tensão de entrada para o circuito funcionar com os limites do item a) Considerar $V_e > 2,5V + V_s$.

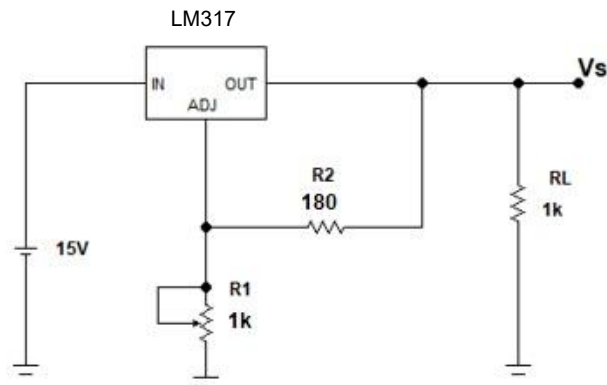


Figura 4.24 – Circuito para exercício resolvido
Exercício Resolvido 17 (Simulador1)

Solução:

- A saída mínima é 1,25 V quando $R_1=0$ e será máxima quando $R_1=1$ k valendo:

$$V_s = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{1000}{180}\right) = 8,2V$$

Se for considerada a corrente de polarização:

$$V_s = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{1000}{180}\right) + 1k \cdot 0,05mA = 8,24V$$

Exercício Resolvido 18

Verificar se os limites da tensão de entrada, V_{IN} , do regulador são adequados para o seu funcionamento.

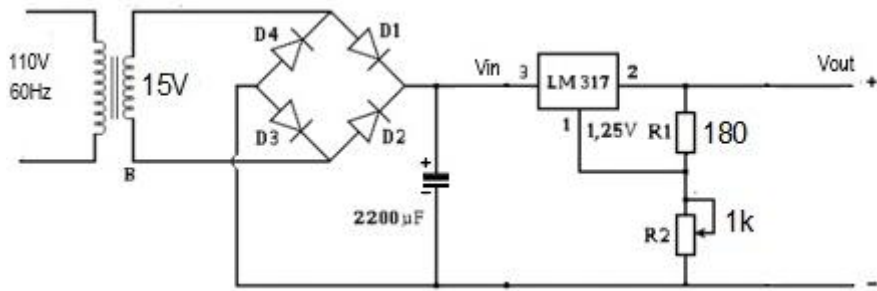


Figura 4.25 – Circuito para Exercício Resolvido 16
Exercício Resolvido 18 (simulador 1)

Solução:

A mínima tensão de saída é 1,25V quando $R_2=0$.

Quando $R_2=1k$ a tensão de saída será máxima e igual a:

$$V_{saída\ maxima} = V_{OUT} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{1000}{180}\right) + 1k \cdot 0,05mA = 8,2 + 0,05 = 8,25V$$

O valor de pico na entrada (secundário do transformador) vale:

$$V_{picoentrada} = 15 \cdot \sqrt{2} = 21,15V$$

O valor de pico no capacitor:

$$V_{picocapacitor} = 21,15 - 1,4 = 19,75V \text{ (Ponte)}$$

Como a corrente na carga é 0,5A, o valor do ripple de pico a pico pode ser estimado:

$$V_{rpp} = \frac{0,5A}{2200 \cdot 10^{-6} \cdot 120} = 1,89V_{pp}$$

Portanto o valor mínimo de entrada do regulador é:

$$V_{emin} = 19,75 - 1,89 = 17,86V$$

Como a máxima saída é 8,25 V o pior caso para regular é $V_{emin}=17,86V$

A diferença $17,86V - 8,25V = 9,61V > 2,5V$ logo o regulador vai produzir a tensão de referência 1,25V entre o terminal OUT e o terminal ADJ.

Fonte Regulada com saída mínima 0V

Para obter uma saída começando em zero você deve adicionar uma bateria de 1,25V ligada como na Figura 4.26.

Neste caso a tensão de saída é dada pela expressão:

$$V_{saida} = V_{OUT} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - 1,25V$$

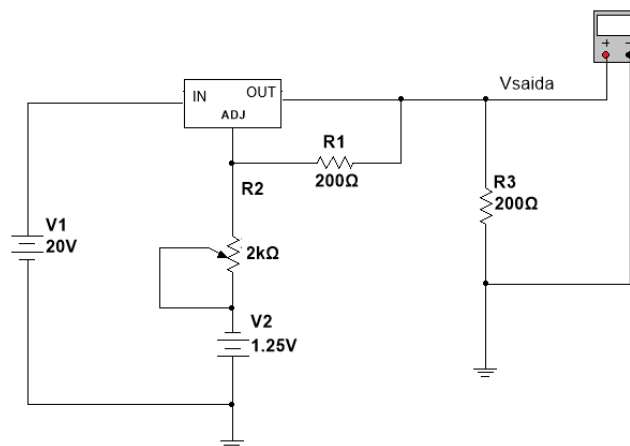


Figura 4.26 – Fonte regulada com 0V de saída
[Fonte Regulada com Zero de Saída](#)

Referencias Bibliográficas

ALBUQUERQUE, R.O.; PINTO, L.F.T. **ELETRONICA** – Eletrônica Analógica. 2001. Fundação Padre Anchieta

MALVINO, A.; BATES, D. Eletrônica: Volume 1. 8. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016

SEDRA, A.; SMITH, R. Microeletrônica. 5. Ed. Prentice-Hall, 2007.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L.; Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 11. Ed. Pearson: São Paulo, 2008