



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Instituto de Física Gleb Wataghin



Física dos dispositivos semicondutores

F809 – INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO

Aluno: Leandro Pereira Lopes RA 016545

Orientador: Prof. Dr. Mauro Monteiro Garcia de Carvalho

1. Introdução

Este trabalho destina-se a explicar de maneira simples a física envolvida em dispositivos semicondutores, mostrando, a partir do estudo da dinâmica eletrônica dentro dos materiais semicondutores, como funcionam os componentes eletrônicos constituídos por eles.

Abordaremos a estrutura de um semicondutor, explicando a diferença entre semicondutores puros e dopados, efeitos ópto-eletrônicos como a criação de pares elétron-buraco, diferença entre banda de condução e banda de valência (sem abordar a teoria de bandas), junção p-n, e, a partir do conhecimento teórico adquirido, será mostrado o funcionamento de componentes que utilizam semicondutores em sua construção. Os pontos que deverão ser abordados em relação aos componentes serão os seguintes: mostrar o que é um diodo (retificador, zener, germânio e *LED*) e por que ele permite a passagem de corrente para um lado e restringe a passagem para o outro; explicar o que é um transistor, compará-lo ao diodo e mostrar a grande utilização deste componente na tecnologia atual; comparar superficialmente o *LED* (light-emitting diode) com o diodo laser, apresentar componentes que utilizam outras propriedades dos semicondutores, como é o caso do *LDR*, que varia a resistência de acordo com a luz incidente e, no mesmo caminho, mostrar que a incidência de luz também pode gerar uma diferença de potencial, efeito que é utilizado na construção de células fotovoltaicas e outro efeito importante, inverso ao anterior, o efeito Peltier, que é utilizado na fabricação de componentes de controle térmico.

O importante na abordagem de um assunto tão vasto e novo para alunos de ensino médio é, além do conhecimento técnico científico geral, tentar despertar neles o interesse no estudo de coisas com que convivem diariamente e cujo entendimento não é muito acessível. Poderão, com os conceitos adquiridos em sala de aula verificar, por exemplo, como são baratos e de fácil acesso os componentes mostrados acima, e com pouco investimento podem até construir alguns circuitos bem interessantes na própria casa deles. Como a primeira dificuldade em qualquer trabalho é sempre o primeiro passo, se o aluno conseguir acender um *LED* utilizando duas pilhas pequenas polarizadas em um sentido e não no outro, normalmente sua curiosidade será instigada para saber se há algum “filamento” diferente que produza essa luz lá dentro daquele pequeno componente, já que filamento é o que mais as pessoas conhecem devido à difusão nos lares da lâmpada incandescente. Assim acreditamos que vai se processando acréscimos no conhecimento deste aluno, que entra em contato com um componente que utiliza uma ciência tão vasta como é a Física do Estado Sólido.

Normalmente no ensino médio atual é mostrado que existem três tipos de materiais: os isolantes, os condutores e os semicondutores. Explicações simplificadas são dadas sobre metal e isolante, mas sobre semicondutor o ensino costuma limitar-se à sua resistividade, que fica entre a do metal e a do isolante.

Um pouco de física dos semicondutores é ensinada apenas em cursos técnicos de eletrônica, elétrica e outros cursos que necessitam da utilização de alguns dos componentes anteriormente citados. Definindo dois tipos diferentes de materiais em um diodo, um com elétrons fracamente ligados e outro com ligações vacantes – chamadas buracos – em sua estrutura eletrônica, pode-se explicar porque a corrente no diodo passa em um sentido e no outro não. Nos cursos técnicos mencionados, os alunos aprendem na teoria a dinâmica eletrônica que ocorre em um diodo, e na prática a aplicam através de um experimento que utiliza osciloscópios, geradores de onda e outros equipamentos caros, além dos componentes eletrônicos a serem estudados. As figuras de 1 a 4 a seguir mostram quatro montagens de circuitos que utilizam o diodo em sua construção, e ao lado as formas de onda que são claramente observadas (em um osciloscópio) quando a onda de entrada (fornecida geralmente por um gerador de onda) é senoidal. Esses experimentos não podem ser realizados nas escolas públicas (nem nas particulares) por falta de verba para a compra e a manutenção desses equipamentos. Entretanto, nossa opinião é que qualquer aluno de ensino médio tem a possibilidade de entender facilmente como funciona o diodo, e outros componentes eletrônicos desde que possam ter acesso a experimentos que mostrem o funcionamento dos mesmos, mesmo que mais simples e baratos do que um osciloscópio, por exemplo.

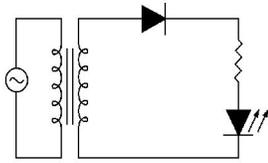


Figura 1-a: retificador de meia onda.

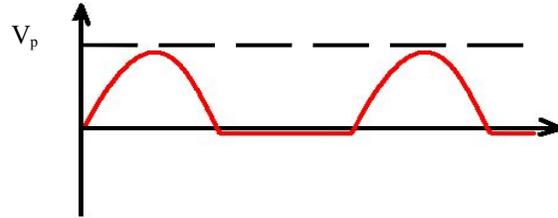


Figura 1-b: forma de onda do retificador de meia onda.

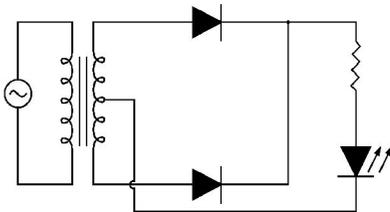


Figura 2-a: retificador de onda completa abaixador de tensão.

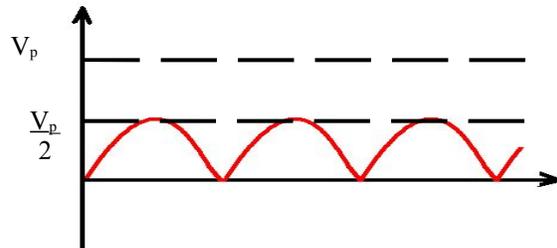


Figura 2-b: forma de onda do retificador de onda completa abaixador de tensão.

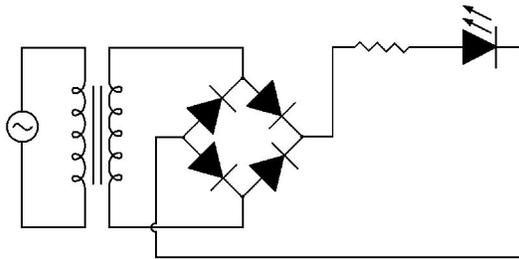


Figura 3-a: retificador onda completa.

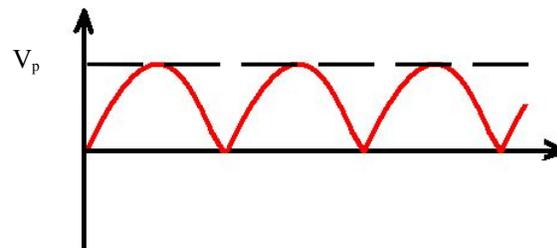


Figura 3-b: forma de onda do retificador de onda completa.

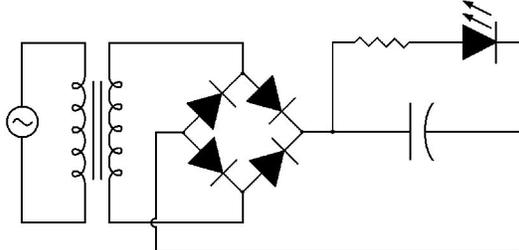


Figura 4-a: retificador de onda completa com capacitor.

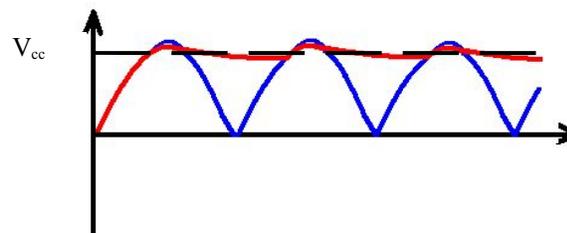


Figura 4-b: forma de onda do retificador de onda completa com capacitor.

2. Tipos de materiais

Os materiais semicondutores são sólidos cristalinos formados por átomos de um ou mais elementos químicos. Os compostos simples são geralmente da família IV da tabela periódica (Si, Ge); compostos binários são cristais formados por dois elementos diferentes, geralmente ligações entre elementos da família III com a V (GaAs, InP, AlSb, etc.), II e VI (CdTe, ZnTe, etc.) e IV-IV (SiGe). Quando três ou quatro elementos distintos formam um semicondutor são chamados, respectivamente, compostos ternários ou quaternários (concentrações distintas de In, Ga, Al, As, Sb e P). A composição interfere nas propriedades e funções do semicondutor.

A introdução de impurezas na estrutura dos semicondutores gera compostos que chamamos de *dopados*, e serve para alterar as propriedades elétricas, ópticas e estruturais do material. De maneira simplificada, podemos dizer que um diodo retificador de Si, é formado por uma região que contém excesso de elétrons e outra que tem falta de elétrons. A presença controlada de átomos da família V (As, Sb, P), cuja

camada externa tem cinco elétrons de valência, misturada ao Si (com quatro elétrons de valência) que dá a este último um elétron fracamente ligado /impurezas. Neste caso, dizemos que o silício é *tipo n* (é o *anodo do diodo*). A adição de átomos da família III (In, Ga, Al, B), cuja camada externa tem três elétrons de valência, misturada ao Si (com quatro elétrons de valência) que dá a este último uma nível vazia (vacância) /impurezas. Neste caso, dizemos que o silício é *tipo p* (é o *catodo do diodo*). Os semicondutores não dopados são chamados *semicondutores intrínsecos*, e os semicondutores que possuem impurezas em sua estrutura são chamados *semicondutores extrínsecos*.

3. Junção p-n

Para que possamos formalizar os termos empregados nos textos sobre a física dos semicondutores para alunos do ensino médio, que estarão entrando em contato com esse conceito pela primeira vez, podemos especificar o que são portadores.

Os materiais semicondutores são particularmente estudados devido à dualidade de comportamentos, podendo apresentar características tanto de isolantes quanto de condutores. Entretanto, os fenômenos característicos desses dois extremos não aparecem ao mesmo tempo, eles dependem da temperatura e dos níveis de impurezas adicionadas aos materiais. Segundo a teoria, no zero absoluto ($\approx -273^{\circ}\text{C}$) não existem elétrons livres nos materiais semicondutores, portanto, eles possuem características de isolantes e não conduzem corrente elétrica. Com o aumento da temperatura ocorre um fenômeno quântico, no qual elétrons ganham energia suficiente para pular uma barreira de energia, e ficam fracamente ligados ao semicondutor; esta barreira é uma faixa de energia onde não pode existir nenhum elétron, ou ele está ligado à estrutura ou ele é considerado quase livre. Esta é uma maneira mais direta para definir banda de condução, onde estão os elétrons fracamente ligados, e banda de valência, onde ficam os buracos. Quando o elétron ganha energia suficiente para pular essa barreira energética, deixa um buraco em seu lugar na estrutura do semicondutor. Quanto maior for a temperatura do semicondutor, maior será a quantidade de elétrons na banda de condução. Como os elétrons vão preenchendo a banda de condução, sob uma diferença de potencial os semicondutores começam a conduzir corrente elétrica. À temperatura ambiente, os semicondutores podem conduzir, mas com uma resistência muito mais alta se compararmos à dos condutores, pois a quantidade de elétrons livres do condutor é bem maior que a de elétrons na banda de condução do semicondutor.

A definição de portadores parte da conclusão acima. Considerando que os elétrons fracamente ligados sejam os portadores de carga negativa e que os buracos sejam portadores de carga positiva, e sabendo que um elemento doador é o que guarda consigo um elétron fracamente ligado e um elemento aceitador é o que possui uma vacância de um elétron agregada a ele, sob a ação do campo elétrico de uma bateria, duas correntes elétricas são estabelecidas, uma de elétrons que segue do pólo negativo para o positivo, e uma de buracos do pólo positivo para o negativo. Na verdade, a corrente de buracos ocorre da seguinte maneira: o elemento receptor tenta trazer para si um elétron para que possa se estabilizar na estrutura do material; quando este elétron sai de outro átomo, deixa em seu lugar um buraco; sob ação do campo elétrico, os elétrons tendem a seguir para preencher os buracos apenas em um sentido, deixando outros buracos em seus lugares; portanto, enquanto os elétrons se movem em um sentido, os buracos se movem no sentido oposto. A figura 5 representa essa dinâmica para um material com elementos receptores.

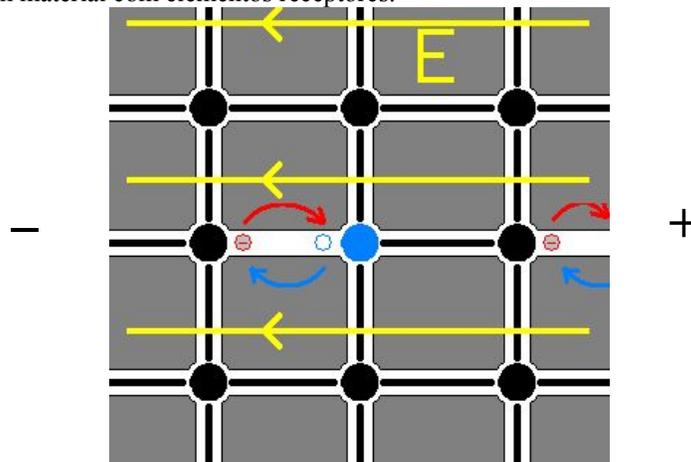


Figura 5: dinâmica de elétrons e buracos sob a ação do campo elétrico de uma bateria.

Quando introduzimos impureza, estamos na verdade adicionando portadores à estrutura. Entretanto, este procedimento é feito quando queremos adicionar um número de portadores muito maior que os gerados espontaneamente pelo aumento da temperatura. Cada átomo da família III introduzido na estrutura do Si, por exemplo, gera um elemento aceitador, agregando, portanto, um buraco. Se o átomo introduzido for do grupo V da tabela periódica, um doador será gerado, acrescentando um elétron fracamente ligado à estrutura. Portanto, chegamos à conclusão de que os materiais do *tipo p* são os aqueles em que a densidade de aceitadores é maior que a de doadores, e os materiais do *tipo n* possuem a densidade de aceitadores menor que a de doadores.

A teoria explicada acima pode parecer simples para um estudante de graduação em física, contudo não é muito trivial para um aluno secundarista que não aprende apenas física, mas estuda história, inglês, biologia, literatura, etc. Por mais que seja interessante este conceito, isso é algo que exige um tempo de raciocínio que não se pode exigir dos alunos que têm tantas outras disciplinas para estudar. Utilizaremos, pois, a simples definição de que “um material do *tipo p* é o que contém excesso de buracos em sua estrutura devido à introdução de elementos da família III, chamados aceitadores”, e “um material do *tipo n* é o que possui excesso de elétrons devido à introdução de elementos da família V, chamados doadores”. Com essa definição, não é necessário aprofundar o estudo sobre criação ou recombinação de pares elétron-buraco.

Se não falarmos sobre criação de pares elétron-buraco e recombinação, como explicaremos a geração de luz de um *LED*? Primeiramente, deve-se explicar a junção p-n apenas como o ponto de união entre um material do *tipo p*, contendo excesso de buracos, e um material do *tipo n*, com excesso de elétrons. Depois, dizer como funciona um diodo, o que será feito no capítulo 4, e em seguida simplesmente falar que ao utilizarmos um material semiconductor apropriado, no lugar do Si, o GaAs por exemplo, podemos ter emissão de luz com a passagem da corrente. No caso de ser levantada a questão “– Como este material produz luz e o outro não?”, deve-se explicar ao aluno que como os átomos nos diferentes materiais são também diferentes, as estruturas de cada material têm características que dependem dessas propriedades, por exemplo, o GaAs tem facilidade para emitir luz, e o Si puro tem facilidade para absorvê-la. Um bom exemplo da implicação da diferença entre as estruturas é o do carbono, a estrutura do grafite é escura, e absorve a maior parte da luz que incide, e a estrutura do diamante é transparente, transmitindo e refletindo a maior parte da luz incidente.

Após a definição das duas maneiras de doparmos os materiais, dopamos um dos lados de uma barra de semiconductor com material do *tipo p* e o outro com um do *tipo n*, criando assim a junção p-n mais simples, chamada *junção abrupta*. A dinâmica que ocorre nesse momento com os elétrons é o ponto chave da explicação para os alunos. Quando criamos a junção, os elétrons livres no lado *n* tendem a preencher os buracos no lado *p*, como se fossem bolinhas de gude caindo em buracos num jogo de bôlica.

Quando um elétron preenche um buraco, o átomo doador se ioniza positivamente, enquanto em contrapartida o átomo receptor se ioniza negativamente. Conforme os átomos vão se ionizando, surge um campo elétrico do lado *n* para o lado *p*, que gera uma força sobre as cargas no sentido oposto ao deslocamento estabelecido. Chega um ponto onde a força é tão grande que o fluxo de elétrons pára e uma zona neutra (*zona de depleção*) é estabelecida em torno da junção. Quando colocamos uma bateria com o pólo positivo ligado ao lado *p* e o pólo negativo ligado ao lado *n*, esta se opõe ao campo elétrico gerado, permitindo que os elétrons vindos do lado *n* voltem a se deslocar para o lado *p*, ou seja, ocorre uma condução, já que a bateria fornece elétrons ao lado *n*. Ao invertermos a polarização da bateria, aumentamos a ação do campo elétrico estabelecido entre o lado *n* e o lado *p*. Com isso, os elétrons não conseguem superar a barreira energética e atravessar a junção, portanto a corrente elétrica é bloqueada.

Acima está a explicação da dinâmica eletrônica que acontece em uma junção p-n, onde não foram utilizados conceitos de energia (níveis de Fermi), correntes de difusão e deriva, etc. Entretanto, a análise estritamente eletrônica fornece ao aluno uma explicação satisfatória do porquê da diferença de comportamento de um diodo, por exemplo, quando invertemos a polaridade da bateria, conduzindo corrente para um lado e não para o outro. Para um estudante de graduação, os conceitos têm que ser mais gerais. Ao doparmos um material semiconductor, estamos deslocando o nível de Fermi, aproximando-o da banda com maior número de portadores. Quando juntamos um material do *tipo p* com outro do *tipo n*, formando assim uma junção abrupta, os níveis de Fermi dos dois materiais se alinham; isto causa um desnível energético entre o material dopado com átomos da família V em relação ao lado dopado com átomos da família III. Por causa dessa diferença de potencial, os elétrons que estão no lado *n* fluem para o lado *p*; este fluxo é chamado *corrente de difusão*. Na zona de depleção, que é a região que compreende parte do lado *n*, parte do lado *p* e engloba a junção p-n, surge um campo elétrico que se opõe ao fluxo de elétrons (do lado *n* para o lado *p*), cessando a corrente de difusão. O objetivo da bateria é, logo, diminuir a ação desse campo elétrico, para que a corrente de difusão seja maior que a causada pela ação do campo elétrico, chamada corrente de deriva, ou até inverter o sentido da resultante do campo, dependendo da intensidade do campo gerado pela bateria.

4. Dispositivos eletrônicos

Comercialmente encontramos vários tipos de componentes eletrônicos construídos com materiais semicondutores. O componente mais conhecido é o diodo retificador de silício, utilizado em diversas aplicações, como em circuitos que transformam a corrente alternada que recebemos em casa em corrente contínua, usada como base na maioria dos circuitos eletrônicos, por exemplo rádios, televisões, relógios, controladores, computadores, etc.; outros locais aonde vão diodos retificadores são motores, aplicações diversas em circuitos eletrônicos, e ainda circuitos elétricos.

O diodo retificador tem a função de permitir a passagem de corrente apenas em um sentido e bloquear no outro. A construção deste componente é feita juntando um material do *tipo n* com outro do *tipo p* através de processos como a oxidação, difusão, implementação iônica, litografia, deposição de filme-fino e deposição epitaxial. Os detalhes sobre cada um dos processos de deposição não são relevantes para este trabalho, mas podem ser encontrados nas referências [1] e [3] deste texto. Para o diodo retificador, o lado *n* é chamado *catodo* e o lado *p* é chamado *anodo*. Quando formos fazer um lembrete para os alunos qual deve ser o lado do catodo e o lado do anodo, devemos lembrar da simbologia do diodo, a letra **K** aparece no lado do catodo (“K-todo”), e a letra **A** aparece no lado do anodo (“A-nodo”), assim como na figura 6 a seguir.

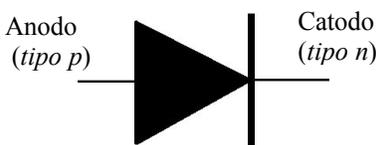


Figura 6: símbolo do diodo retificador em um circuito.

É importante que haja essas brincadeiras para que a nomenclatura empregada na física ou na eletrônica fique bem fácil de ser lembrada. O emprego do lembrete anterior já induz o aluno a colocar o componente na polarização correta, se ele acompanhou o raciocínio do capítulo anterior, e se foi difícil a definição de lado *n* ser catodo ligado ao pólo negativo e lado *p* ser anodo ligado ao pólo positivo (isso pode causar uma séria confusão), pelo menos ele verifica a simbologia do diodo como sendo uma seta que indica apenas para um lado, o qual é o sentido que a corrente pode fluir, com uma faixa que bloqueia o outro sentido, define o lado que parece um K como catodo, e associa este nome a cátion, doador de elétrons, portanto lado *n*, ligado ao lado negativo; em analogia, se um lado é o lado *n*, de negativo, o outro é *p* de positivo, e os materiais que possuem menos de quatro elétrons na camada de valência são os da família V, VI ou VII da tabela periódica, geralmente considerados como ânions, e se um lado é **catodo**, ânion implica em **anodo**, receptor de elétrons, e com esses conceitos, acreditamos que o aluno reconstrói um diodo retificador e verifica a dinâmica eletrônica que ocorre dentro dele. O diodo retificador, por gerar um campo elétrico na junção p-n e armazenar uma pequena quantidade de cargas, apresenta uma pequena capacitância.

O diodo zener é uma variação do diodo retificador. Ele pode funcionar polarizado diretamente (pólo positivo da bateria no anodo) ou indiretamente. Quando está polarizado diretamente, funciona como um diodo retificador de silício. Não conduz enquanto a tensão aos seus terminais for inferior a 0,5 V (diodo de silício) e a partir desta tensão começa a conduzir, primeiro pouco e depois cada vez mais depressa, sendo não linear a curva de crescimento da corrente com a tensão. Por esse fato, a sua tensão de condução não é única, sendo considerada de 0,6 ou 0,7 V. A diferença entre os dois tipos de diodos é que, no diodo convencional, ao atingir uma determinada tensão inversa, cujo valor depende do diodo, este aumenta bruscamente a condução (avalanche) e a corrente elevada acaba por destruir o diodo, não sendo possível inverter o processo, enquanto no diodo zener, ao atingir uma tensão chamada de *zener*, o diodo aumenta a condução sem se destruir e mantém constante a tensão aos seus terminais. Existem várias tensões de zener (uma para cada diodo) como, por exemplo, 5,1 V e 6,3 V. Quanto ao valor da corrente máxima admissível, existem vários tipos de diodo. O valor indicado é o da potência. Por exemplo, existem diodos zener de 400 mW, além de outros valores. O valor da corrente máxima admissível depende desta potência e da tensão de zener. É por isso que o diodo zener se encontra normalmente associado com uma resistência em série, destinada precisamente a limitar a corrente a um valor admissível.

O diodo de germânio tem a mesma função do diodo retificador de silício, mas se diferencia pela tensão em que deixa de conduzir, enquanto no diodo de Si é de aproximadamente 0,5 V, no diodo de Ge é menor que 0,2 V, o que torna este componente mais sensível a pequenas variações de tensão. Este diodo é

empregado em retificadores de baixa potência e que necessitam de maior precisão, como no impedimento do retorno de sinais de campo elétrico em antenas de televisão externas.

Quando utilizamos um composto binário para construir um diodo, geralmente o Arseneto de Gálio, podemos obter, com as mesmas características de um diodo retificador comum, a emissão de luz na polarização direta. A estrutura deste composto permite o maior aproveitamento energia que flui pela junção p-n para a produção de luz, diferentemente do diodo de Si que dispersa muita energia por vibração da rede, gerando muito calor e pouquíssima luz. O comprimento de onda da luz emitida depende da proporção de cada substância dentro do material. O GaAs é geralmente utilizado na construção de diodos emissores de luz (*LED*) e de diodos laseres. A diferença entre esses dois componentes é que a emissão de luz ocorrida no *LED* é isotrópica, ou seja, ocorre para todas as direções do espaço, enquanto no diodo laser a emissão é anisotrópica (possui apenas uma direção e sentido) e amplificada, devido às inúmeras reflexões dos fótons nas paredes clivadas deste componente. O *LED* é utilizado principalmente na sinalização, empregado em equipamentos de controle, televisores, telefones, interruptores, painéis informativos, etc.; atualmente, o *LED* está sendo empregado em larga escala na sinalização pública de trânsito e na indústria automobilística, por substituir com maior economia a lâmpada incandescente que era utilizada para tais finalidades. O diodo laser é muito utilizado para aplicações em sensoriamento óptico, em aparelhos como DVDs, projetores e impressoras, e na medicina para diversos tipos de tratamentos.



Figura 7: diodo emissor de luz (*LED*)

A partir deste ponto, serão abordados pontos básicos de outros componentes semicondutores e suas aplicações, sem aprofundamento na explicação de seus comportamentos. Já foi dito que a quantidade de elétrons na banda de condução depende da temperatura do semicondutor. A temperatura, na verdade, é uma quantidade proporcional à energia cinética média da estrutura do material, traduzida, para o semicondutor, como sendo a velocidade de vibração da rede. Parte da energia cinética que a rede possui é transferida para os elétrons, e é isso que causa a promoção energética deles, fazendo com que passem da banda de valência para a banda de condução. Dependendo da composição do semicondutor, ele absorve a luz incidente e a transforma em calor, gerando, pois, um aumento na temperatura do material, e com isso promovendo mais elétrons para a banda de condução. Esse efeito é utilizado nos componentes chamados *LDR* (light dependent resistor), também chamado de célula foto-condutiva, ou ainda de foto-resistência. O *LDR* é um dispositivo semicondutor de dois terminais, cuja resistência varia linearmente com a intensidade de luz incidente para uma certa faixa de comprimentos de onda, obedecendo à equação:

$$R = C \cdot L \cdot a \quad (1)$$

onde L é a luminosidade em Lux e C e a são constantes dependentes do processo de fabricação e material utilizado. A figura 8 mostra um *LDR* e o seu símbolo de identificação mais comumente encontrado em esquemas e diagramas.

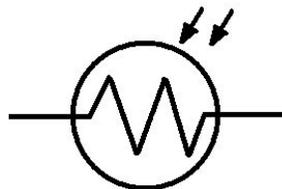


Figura 8: símbolo de um *LDR*.

Os materiais foto-condutivos mais freqüentemente utilizados na sua construção são o sulfeto de cádmio (CdS) e o seleneto de cádmio (CdSe). Conforme mencionado, o *LDR* sofre influência da luz incidente, aumentando sua condutividade quando exposto a essa radiação eletromagnética. O comprimento de onda da luz incidente sobre o *LDR* tem influência sobre sua resistência - é a chamada Resposta Espectral. O *LDR* é como o olho humano, não apresenta a mesma sensibilidade para as mesmas cores de luz. O pico de

sensibilidade do *LDR* ocorre aproximadamente em $\lambda = 5100 \text{ \AA}$. Nessa faixa de comprimento de onda, a luz é vermelho-alaranjada. A variação da resistência de um *LDR* em função de uma variação de iluminação não ocorre instantaneamente. Se o componente for deslocado de uma região de iluminação para uma região de escuro total, sua resistência não aumentará instantaneamente, apresentando uma resposta, na prática, em torno de 200K. Isso significa que, estando iluminado de modo a apresentar uma resistência de 1K, cortando-se essa luz o *LDR* demora cerca de 5 segundos para atingir a resistência de 1M. O *LDR* raramente é encontrado em circuitos com configurações que não formem um divisor de tensão. Na maioria deles, o *LDR* é participante de um dos ramos do divisor de tensão, seja no ramo positivo ou no negativo.

Utilizando o efeito de absorção da luz pela estrutura do semiconductor, transformando-a em outro tipo de energia, poder-se-ia pensar em, ao invés de se transformar a energia fornecida em energia cinética, transformar-se-ia em energia potencial. Qual seria esse potencial? Ao absorver a energia das ondas eletromagnéticas incidentes, os elétrons são promovidos da banda de valência para a banda de condução, ficando praticamente estáveis nesse estado. Portanto, se esses elétrons armazenam uma determinada energia, podemos dizer que a estrutura ganha uma certa energia potencial elétrica. Com isso, quando analisamos dois lados opostos de um semiconductor, um com incidência constante de luz e o outro colocado num lado escuro, podemos verificar o aparecimento de uma diferença de potencial elétrico finita entre as duas superfícies. Esse efeito é usado na construção de mais um componente que utiliza semicondutores, a *célula fotovoltaica* ou *célula fotoelétrica*. O material mais usado na construção dessas células é o silício, pelo motivo já citado de ter uma boa capacidade de absorção da luz incidente devido à estrutura. A célula fotovoltaica pode promover mais elétrons quando dopamos o lado onde haverá incidência de luz com átomos da família V, geralmente o fósforo, e fazer com que diferença de potencial seja ainda maior se doparmos o lado escuro com átomos da família III, como o boro, assim como é feito na construção do diodo. Portanto, a célula fotovoltaica é um diodo com a seção transversal muito estendida. A corrente elétrica ocorre quando elétrons da banda de condução do lado *n*, onde a luz incide, sofrem a ação da diferença de potencial e seguem para o lado *p*, o lado escuro, através de um circuito que liga as duas superfícies opostas, geralmente um circuito de armazenamento. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos ou armazena-se na forma de energia gravitacional quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento. A figura 9 mostra como é uma célula fotovoltaica utilizada em locais onde não é viável a instalação de rede elétrica convencional.



Figura 9: célula fotovoltaica.

Verificando o *LED*, sabe-se que ele produz luz quando uma corrente passa por ele na polarização direta, efeito contrário do que ocorre na célula fotovoltaica. Essa produção ocorre apenas para alguns tipos de materiais, exemplificando o GaAs intrínseco. Existe um outro efeito que surge quando passamos uma corrente por um semiconductor, no caso extrínseco: o *efeito Peltier*. Consiste em produzir uma diferença de temperatura entre dois metais a partir da passagem de corrente por materiais semicondutores muito dopados, tanto do *tipo n* quanto do *tipo p*. Para promover um elétron da banda de valência para a banda de condução, é necessário o fornecimento de energia, assim como a recombinação dispensa idêntica quantidade de energia; se essa energia estiver na forma de calor em uma placa metálica, quando um elétron passa do material do *tipo p* para um do *tipo n*, o que requer energia, essa é capturada de uma das placas, causando seu resfriamento; o contrário ocorre quando um elétron de um material do *tipo n* passa para o material do *tipo p*, neste momento há perda de energia, que é transferida para a outra placa metálica, fazendo com que ela se aqueça. A figura 10

representa a construção de um dispositivo que utiliza o efeito Peltier para causar a diferença de temperatura entre duas placas metálicas.



Figura 10: estrutura de um dispositivo de efeito Peltier.

Para gerar uma diferença de temperatura maior, pode-se empilhar um dispositivo sobre o outro para que as diferenças de temperatura sejam somadas, assim como são somadas as diferenças de potencial de pilhas elétricas ligadas em série.

Junções p-n em série também foram usadas na criação do componente semiconductor que gerou uma das maiores revoluções de nossa sociedade, o *transistor*. Este componente está presente em quase todos os equipamentos eletrônicos existentes na atualidade, desde um simples botão de liga-desliga até um computador de última geração. O transistor é como uma “torneira”, que pode controlar o fluxo de elétrons que são enviados a um circuito eletrônico a partir de uma baixa corrente. A figura 11 é a foto da representação do experimento considerado como o primeiro transistor da história, feito em dezembro de 1947 nos laboratórios da Bell Telephone. O nome *transistor* vem da abreviatura de *transfer resistor*, ou em português, resistor de transferência.



Figura 11: foto da representação do primeiro transistor.

Através da corrente que passa por um dos terminais chamado *base* (ver figura 11-a) pode-se controlar a resistência entre outros dois terminais, que são o *coletor* e o *emissor*; entretanto, esses dois terminais precisam de uma polarização única, não funcionando na polarização reversa. Com uma pequena corrente na base, pode-se obter um fluxo de corrente entre o coletor e o emissor aumentado em centenas de vezes. O transistor *nnp* é um sanduíche de um material do *tipo p* entre dois pedaços de semiconductor do *tipo n*, sendo que o material do *tipo p* é apenas uma fina camada, da ordem de 1 microm – por esse motivo é que não conseguimos construir um transistor utilizando dois diodos polarizados um de frente para o outro. Nesse transistor, ao injetarmos corrente na base, ele permite a passagem de corrente do coletor para o emissor, de acordo com a seguinte equação:

$$i_{coletor} = \beta i_{base} \quad (2)$$

Existe também o transistor do tipo *pnp*, onde os materiais são opostos aos do tipo anterior; essa configuração faz com que possamos controlar o fluxo de corrente entre o emissor e o coletor (inverso do tipo anterior) puxando corrente da base. A figura 12 mostra a simbologia dos dois tipos de transistores, o que auxilia no entendimento de seu funcionamento.

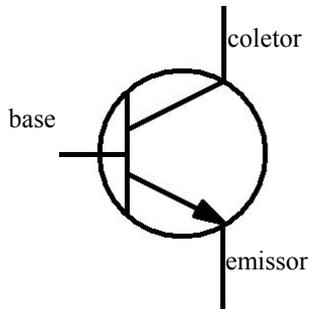


Figura 12-a: símbolo do transistor npn.

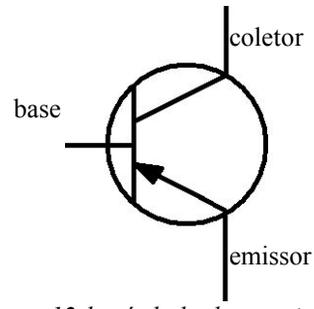


Figura 12-b: símbolo do transistor pnp.

Uma variação do transistor é um componente chamado *FET* (field-effect transistor), o transistor de efeito de campo. Este componente controla o fluxo de elétrons dentro de si aumentando ou diminuindo a sua resistência apenas controlando um campo elétrico, sem gasto de energia. A variação da tensão entre dois terminais desse componente (*gate* e *source*) faz com que uma zona neutra dentro do componente também varie, diminuindo ou aumentando a área por onde os elétrons podem passar, portanto, isso tem consequência direta na resistência do componente quando passamos corrente entre o terminal *drain* e o *source*. Esse tipo de transistor pode ser construído em tamanho muito reduzido, e isso permite a integração com outros transistores do mesmo tipo, fato que permitiu a grande evolução tecnológica do final do século passado.

5. Experimentos

O primeiro experimento proposto partiu do objetivo de mostrar o funcionamento do diodo a partir de um experimento que utilizasse o mínimo de equipamentos possíveis. Como idéia inicial, pensei em um modo de passar corrente contínua em sentidos opostos pelo mesmo ponto de um circuito, e colocando duas montagens em paralelo de um diodo em série com uma lâmpada, sendo que cada diodo em polarização reversa em relação ao outro. A figura 13 mostra o esquema funcional deste circuito.

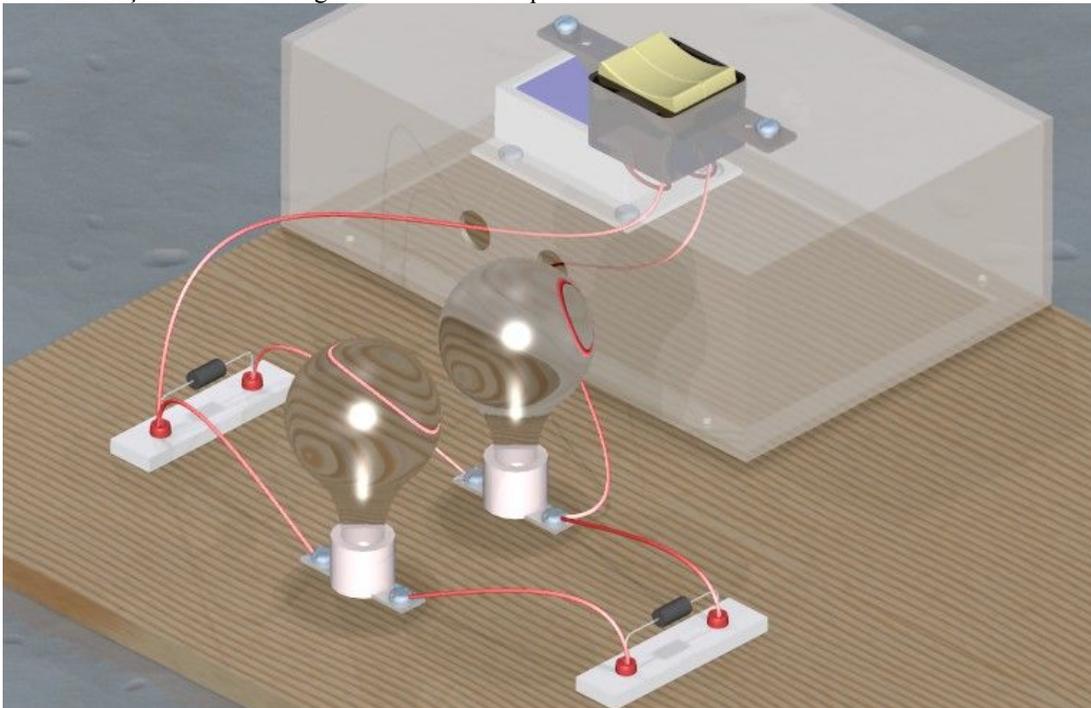


Figura 13: montagem do experimento mais simples para mostrar o funcionamento de diodos retificadores.

Para fornecer energia ao circuito, utiliza-se uma bateria de 9 ou 12V. O sentido da corrente é controlado por um interruptor intermediário, que possui as entradas nos pólos da bateria e as saídas ligadas aos extremos das duas montagens em série. A lâmpada utilizada (no desenho exagerada) pode ser uma

lâmpada de painel ou lanterna de automóvel, que geralmente utiliza 12V. Para o caso de uma bateria de 9V, pode-se utilizar a mesma montagem feita para a bateria de 12V, entretanto a intensidade da luz emitida pode não ser muito satisfatória, ou um resistor de 1,8K em série com um *LED* substituindo a lâmpada; neste caso, não serão necessários os diodos retificadores, pois os *LEDs* para tal tensão funcionam identicamente a eles.

Em reunião com o professor orientador, ele achou interessante criar um oscilador de baixa frequência para que, além de mostrar o funcionamento do diodo, o mesmo experimento pudesse mostrar o que é corrente alternada e como o diodo se comporta sob este tipo de corrente. Utilizei este trabalho para dizer que o *LED* possui o mesmo efeito de um diodo retificador de silício em um circuito, deixando passar a corrente apenas em um sentido e não no outro. Com esse conceito, pude substituir a montagem dos três componentes (diodo retificador, resistor e lâmpada em série) por apenas dois componentes em série, o resistor e o *LED*. O valor do resistor utilizado em série com o *LED* não podia ser determinado enquanto o oscilador não estivesse pronto. Construí um circuito, mostrado no apêndice A, com uma entrada de corrente alternada de 9V, produzida por um transformador, e uma resistência interna de 330 Ω ; as perdas de potência no oscilador fizeram com que a tensão e corrente máximas fossem de 3,2V e a corrente de 82mA, respectivamente. Como um *LED* funciona sob uma tensão de 2V a 20mA ($P = 40 \text{ mW}$), e a fonte produzia uma potência de aproximadamente 260 mW, poderiam ser utilizados até 6 *LEDs* para a mesma fonte.

Utilizarei o oscilador construído para alimentar o circuito da figura 1-a em meu protoboard, que foi modificado para aproveitar os dois sentidos de corrente, colocando na mesma montagem outro *LED* em paralelo com o mostrado, só que na polarização reversa. Esta montagem mostra que cada hora a corrente passa em um sentido, e com isso apenas um *LED* ascenderá por vez, o qual indica o sentido da corrente em um determinado instante. O resistor utilizado é de 100 Ω , e o diodo retificador foi retirado.

Aliado a este circuito, o professor emprestou-me um pequeno galvanômetro, para enfatizar o sentido da corrente, mostrando de outra maneira o que é corrente alternada, passando em sentidos opostos em uma frequência determinada. Em cada entrada do galvanômetro foi colocada uma resistência de 10K, cada uma ligada a uma fase do oscilador.

O circuito da figura 4-a também foi construído, identicamente à figura. Há a possibilidade de remover o capacitor em paralelo com o circuito a qualquer momento, mostrando o que é uma corrente alternada retificada, como podemos transformá-la em corrente contínua, que é a utilizada nos circuitos eletrônicos.

Avançando no objetivo de mostrar outros componentes semicondutores, utilizei a corrente contínua retificada no circuito da figura 4-a como fonte para mostrar a base do funcionamento do transistor e do *LDR*, novamente utilizando um *LED* para indicar os comportamentos. Polarizei o transistor colocando o *LED* no coletor e o *LDR* na base, os dois alimentados pelo retificador; o emissor foi conectado ao outro extremo do retificador. O objetivo desse experimento foi o de mostrar, ao mesmo tempo, como o *LDR* varia sua resistência dependendo da luz incidente e como o transistor controla o fluxo de elétrons que passam entre o coletor e o emissor a partir de um controle da corrente na base. Isso foi possível mostrando que ao proteger o *LDR* da luz ambiente, esse reduz a corrente que vai para a base do transistor, que por sua vez diminui drasticamente a corrente no coletor, portanto, a luz do *LED* diminui sua intensidade, chegando a apagar em alguns casos. Este circuito está descrito na figura 14 a seguir.

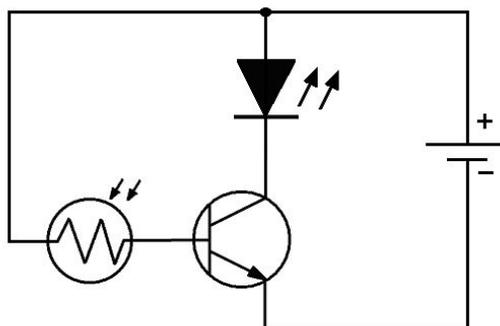


Figura 14: controle de corrente no LED a partir de um transistor e um LDR.

No decorrer das pesquisas, descobri um circuito mais simples para gerar o oscilador de corrente alternada, chamado Schmitt Trigger. Adaptei seu funcionamento para gerar uma corrente alternada de baixa frequência com onda quadrada, que poderia ser utilizada na entrada dos circuitos. Segundo a teoria, não há limites para correntes de saída, e a tensão pode ser qualquer, dependendo da tensão fornecida para o circuito.

O circuito está explicado no apêndice B deste texto.

6. Conclusões do relatório final

As aplicações dos dispositivos semicondutores são as mais diversificadas na sociedade atual, o que permite que sejam propostos diversos tipos de experimentos utilizando os componentes mencionados neste trabalho. Utilizei um experimento para apresentar aos alunos de ensino médio o componente mais simples, o diodo, mostrando seu comportamento quando o colocamos em diferentes montagens sob corrente alternada.

Foi criado um circuito que gera uma onda quadrada suave, que oscila em baixa frequência, onde o período pode ser controlado. Com este circuito, montei no protoboard os circuitos das figura 1-a, 3-a e 4-a, para que os alunos possam entender o comportamento de diodos retificadores e emissores de luz sem a necessidade imediata de um osciloscópio, já que os efeitos visuais produzidos pelos circuitos são equivalentes com a teoria exposta neste trabalho.

O experimento mais simples pode ser o mostrado na figura 13, onde se utiliza um interruptor intermediário ligado de um lado aos pólos de uma bateria de 9V ou 12V e do outro lado a um diodo retificador em série com uma lâmpada de lanterna ou painel de automóvel em paralelo à mesma configuração, entretanto com o diodo polarizado inversamente para mostrar que, mudando o sentido da corrente pelo interruptor uma lâmpada funcionará de cada vez.

O circuito da figura 14 foi adicionado ao trabalho por ser a maneira mais simples de mostrar dois componentes de semicondutor funcionando ao mesmo tempo. Este circuito é interessante quando o aluno verifica claramente a dependência da intensidade de luz no *LED* em relação à luz ambiente.

Inicialmente foi feito um circuito oscilador de baixa frequência que utilizava lógica digital e vários transistores e resistores, cujo preço foi aproximadamente trinta vezes menor que o de um gerador de onda. Depois de uma pesquisa, utilizando o circuito de Schimidt Trigger, pude reduzir o preço do oscilador a um terço do preço do que eu havia construído.

A partir desses resultados, o circuito mais barato e eficiente para aplicar ao ensino médio é o de um oscilador Schimidt Trigger que fornece tensão alternada para os circuitos das figuras 1-a, 4-a e 14. A tensão pode ser fornecida por uma bateria de 9 ou 12V, montando um divisor de tensão com dois resistores de 1,8K em série, onde um extremo será considerada a tensão V_0 , a união entre os dois resistores será o terra, e a outra extremidade será $-V_0$. Portanto, o objetivo do trabalho foi alcançado.

6. Bibliografia

[1] *Solid State Eletronic Devices*, Ben G. Streetman, Prentice Hall, 1995.

[2] *Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*, Robert Eisberg, Robert Resnick ; coordenação Carlos Mauricio Chaves ; tradução Paulo Costa Ribeiro, Enio Frota da Silveira, Marta Feijó Barroso, 4ª edição.

[3] *Semiconductor devices*, Strutt, Max J. O. (Maximilian Julius Otto), 1903- New York : Academic Press, 1966.

[4] *Semiconductor devices : physics and technology*, S.M. Sze. New York : Wiley, c2002.

8. Apêndice A

Circuito gerador de corrente alternada por lógica digital

O circuito da figura abaixo foi o primeiro oscilador construído por mim para este trabalho. Ele gera uma onda quadrada com tensão alternada que tem mudança de tensão suavizada pela presença do capacitor na saída da onda. A frequência pode ser regulada através do potenciômetro colocado na entrada do circuito.

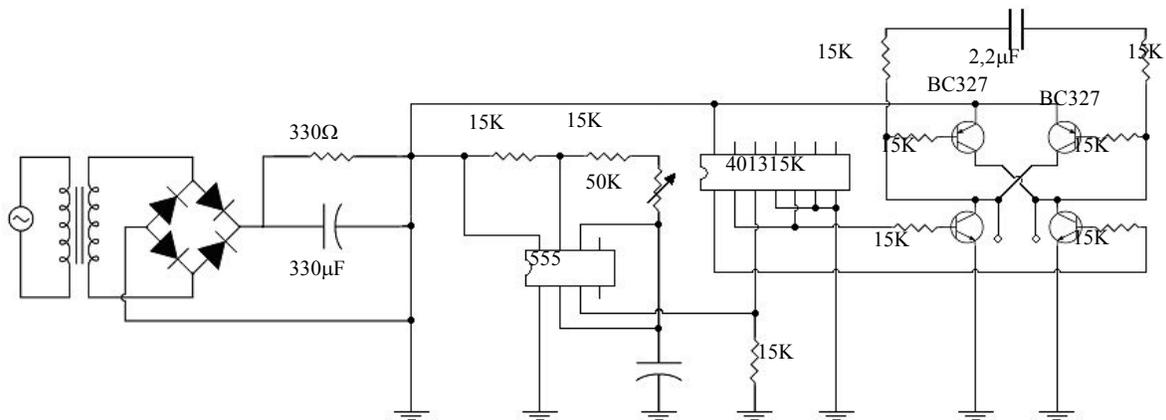


Figura 15: oscilador de baixas frequências regulável.

A forma de onda na saída deste circuito pode ser observada na figura 16 a seguir:

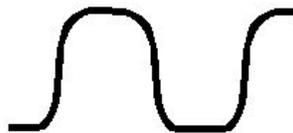


Figura 16: forma de onda na saída do circuito oscilador.

9. Apêndice B

Circuito oscilador de Schimidt Trigger

O oscilador de Schimidt Trigger é um circuito muito mais simples que o do apêndice A. Ao igualar as tensões, o amplificador muda a tensão de saída para $\pm V_0$, sendo o novo valor o oposto do primeiro. Entretanto, esta montagem gera uma onda quadrada sem ser suavizada, o que impede a utilização desta montagem para demonstrar a retificação da corrente no circuito da figura 4-a, já que não há variação na tensão de saída para esse circuito. V_0 é a tensão colocada na entrada 7 do componente; uma tensão $-V_0$ deve ser colocada na entrada 4; a entrada inversora é a de número 2 e a não inversora, a de número 3.

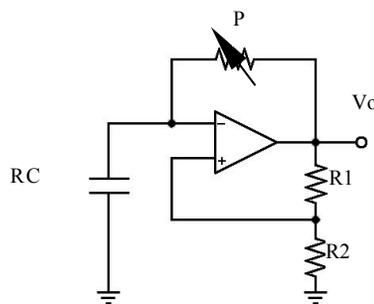


Figura 17: desenho do circuito oscilador Schimidt Trigger.