

# Unidade II

## 5 COMPONENTES ATIVOS

Até aqui, se considerarmos o conteúdo que estudamos no semestre anterior a este, nos concentramos apenas na tríade dos componentes principais, ou seja: **resistores**, **capacitores** e **indutores**. Esses componentes têm em comum serem **componentes passivos** – isto é, não são capazes de modificar de forma efetiva os sinais que os percorrem, além de serem incapazes de produzir sinais do zero.

Em contrapartida, eles também não precisam de alimentação para funcionar, justamente por se aproveitarem dos próprios sinais que os atravessam para atuar.

Nesta unidade II nos dedicaremos ao estudo de componentes que vão além das características desses três primeiros. Os componentes que veremos apresentam propriedades que os permite criar, amplificar e modificar quaisquer sinais – esses são os **componentes ativos**.

Fazem parte dessa classe de componentes as **válvulas termiônicas**, os **transistores**, os **diodos** e também os **circuitos integrados**, apresentando-nos todo um universo que exploraremos a partir de agora.

O conteúdo desta unidade parte de uma digressão sobre as válvulas termiônicas, sua importância na eletrônica e na história da computação, e então passa a tratar de um importante dispositivo semicondutor largamente empregado em uma infinidade de equipamentos eletrônicos na atualidade: o diodo.

Falaremos a respeito do desenvolvimento desse componente eletrônico e de algumas formas rudimentares utilizadas no passado para construí-lo em casa.

Em seguida, trataremos dos diodos modernos, os materiais mais utilizados em sua fabricação, sua polarização, alguns tipos especiais desses componentes e, para encerrar, um breve apanhado de circuitos simples que o aluno pode implementar com o uso de diodos.

### 5.1 As válvulas termiônicas

Nos primeiros anos do século XX, quando a eletrônica ainda era um campo incipiente, todos os cientistas e experimentadores que se dedicavam a explorar as possibilidades oferecidas por ele sofriam com um mesmo problema: a impossibilidade em amplificar sinais elétricos.

Sinais podiam ser criados por toda uma série de métodos, como a interrupção sucessiva de uma corrente elétrica usando uma chave comutadora que liga e desliga com a própria passagem da corrente elétrica (dispositivo chamado de vibrador), acionando uma bobina de Ruhmkorff (vide a figura 82) – que em sua essência é um transformador de alta tensão. Apesar disso, a intensidade desses sinais produzidos era final e não podia ser aumentada, apenas atenuada em circuitos rudimentares, construídos com componentes passivos.

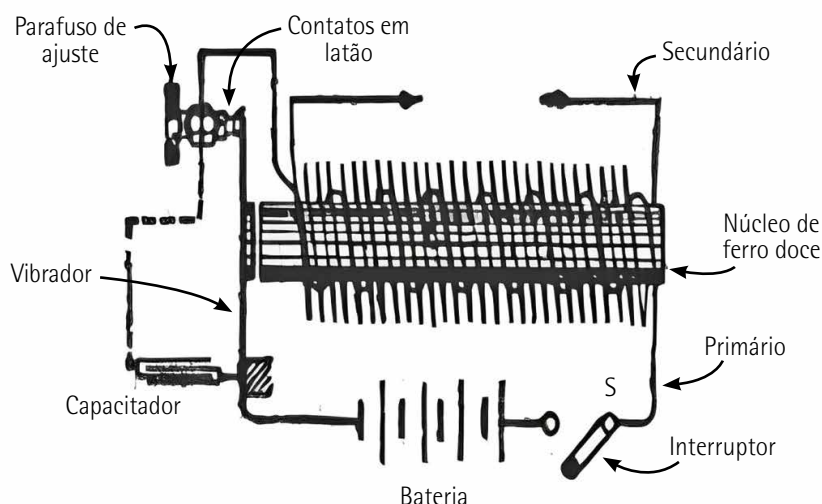


Figura 82 – Bobina de Ruhmkorff. Observe o interruptor vibrador da descrição do circuito

Adaptada de: D'Arísbo (2013).

Desta forma, todas as pesquisas e esforços direcionaram-se, a princípio, a desenvolver um dispositivo que fosse capaz de ampliar sinais elétricos fracos, o que foi plenamente atingido com a invenção das primeiras válvulas eletrônicas em 1904. Neste tópico faremos, portanto, uma breve digressão histórica acerca dos passos que levaram à invenção desse importante componente dos primórdios do campo da eletrônica, e que ainda hoje é utilizado em aplicações muito específicas.



### Saiba mais

Um relato interessante sobre a restauração de uma antiga bobina de Ruhmkorff e seus princípios de funcionamento foi desenvolvido pelo engenheiro e colecionador Daltro D'Arísbo, e pode ser consultado em:

D'ARISBO, D. A bobina de Ruhmkorff (bobina de indução). *Museu do Rádio*, Porto Alegre, 1º abr. 2013. Disponível em: <http://tinyurl.com/25kxcfvs>. Acesso em: 3 jan. 2024.

### 5.1.1 Breve histórico

Foi no ano de 1880 que Thomas Edison, o inventor da lâmpada elétrica, deparou-se, com seus engenheiros e auxiliares, com um fenômeno que julgou bastante interessante, e que envolvia seu principal objeto de pesquisa e aperfeiçoamento à época: as lâmpadas com filamento de carvão.

É importante frisar que as primeiras lâmpadas elétricas, para além de apresentar baixo rendimento luminoso, tinham também uma vida útil muito curta: apenas poucas centenas de horas. Assim, Edison buscou de forma empírica diversos métodos para prolongar essa vida útil. Um deles visava a instalação de uma placa metálica dentro da lâmpada, próxima ao filamento.

No experimento com essa lâmpada modificada, ele percebeu que, quando o filamento estava aceso e a placa energizada com um potencial elétrico positivo, uma forte corrente elétrica desenvolvia-se entre ela e o filamento – como se os elétrons estivessem simplesmente saltando no vácuo. Contudo, quando a placa era alimentada com um potencial elétrico negativo, ou o filamento estava apagado, nada ocorria.

O fenômeno foi devidamente registrado por Edison à época, mas ele não julgou importante, naquele momento, pesquisá-lo a fundo, dado que não se relacionava com seu objetivo principal. Contudo, sua descoberta foi de grande importância para que as primeiras válvulas termiônicas surgissem pouco mais de vinte anos depois.

### 5.1.2 Diodo de Fleming

No ano de 1902, o efeito observado por Edison anos antes foi finalmente explicado pelo físico inglês Owen W. Richardson, que propôs que a condução dos elétrons no vácuo dava-se por uma relação com a temperatura do filamento, o que explicava o motivo de os elétrons apenas serem conduzidos pelo vácuo quando este encontrava-se aquecido (ou aceso), cunhando aí o termo efeito termiônico.

Em 1904, o engenheiro John Ambrose Fleming, também inglês, lançou o projeto patentado do diodo termiônico, cujos aperfeiçoamentos em relação aos experimentos de Edison permitiam-lhe diversas aplicações práticas – especialmente no campo do rádio, como detector de sinais e também como retificador. A composição interna de uma válvula diodo pode ser vista a seguir (figura 83).

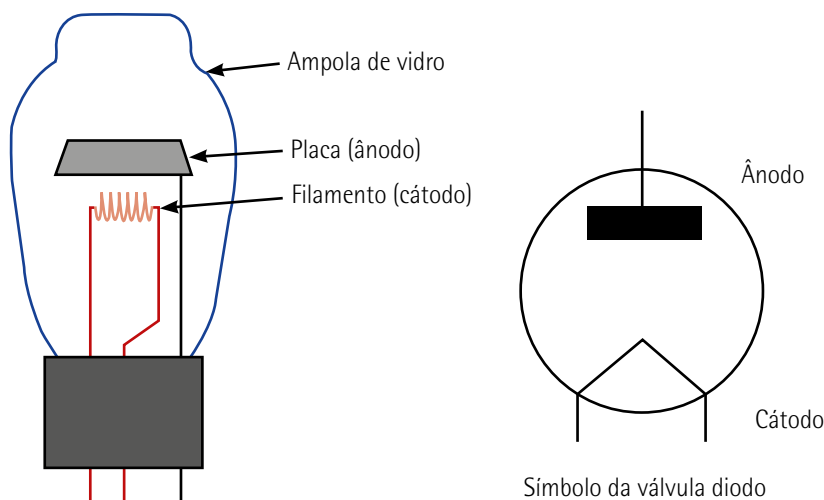


Figura 83 – Estrutura interna de uma válvula diodo

Adaptada de: <http://tinyurl.com/5dy3a9wf>; <http://tinyurl.com/3yr9pk2k>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Observe que toda válvula diodo terá, em essência, dois elementos (justificando assim o prefixo "di"), a saber: o **cátodo** (negativo), que no caso da válvula de Fleming é o próprio filamento, e o ânodo (positivo), que por vezes também é denominado simplesmente placa.

Para compreender em detalhes o funcionamento da válvula diodo, vamos observar a figura 84, que apresenta o componente ligado em um circuito, com uma bateria para o filamento e um miliamperímetro ligado ao ânodo.

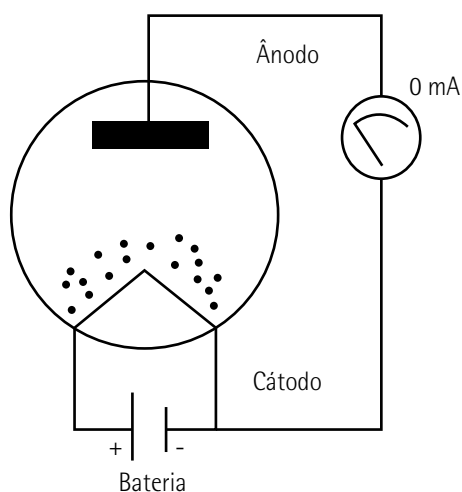


Figura 84 – Ligação do diodo de Fleming

Observe que, como o fio que vai para o miliamperímetro está conectado ao negativo da bateria do filamento, não há como ter um potencial positivo no ânodo, não havendo, portanto, corrente nenhuma circulando pela válvula. Contudo, um campo elétrico formado pelos elétrons está concentrado no entorno do filamento, em um fenômeno comumente chamado de **carga espacial**.

Quando aplicamos um potencial elétrico positivo ao ânodo, temos uma situação diferente (vide a figura 85), em que o lado positivo de uma bateria é conectado ao miliamperímetro (e consequentemente ao ânodo da válvula), e seu lado negativo ao potencial da bateria de filamento.

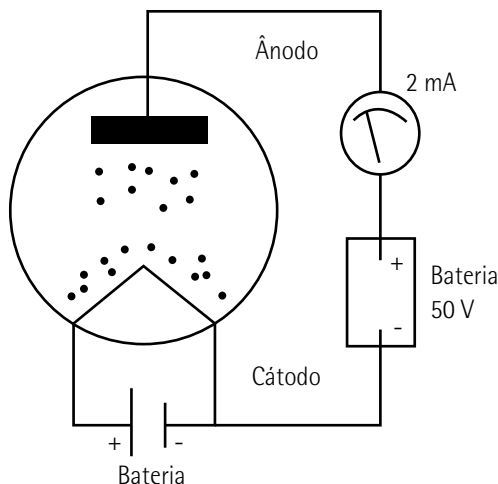


Figura 85 – Com uma bateria ligada ao circuito do ânodo, há condução no diodo de Fleming

Esse arranjo dará um potencial elétrico com carga positiva ao ânodo, e assim permitirá que os elétrons presentes no entorno do filamento (cátodo) pelo fenômeno da carga espacial comecem a se deslocar rumo ao ânodo, produzindo, então, uma corrente elétrica mensurável pelo miliamperímetro. Como a tensão da bateria empregada é pequena (50 V), a corrente também não será muito expressiva, atingindo um valor que, no exemplo, é de apenas 2 mA (miliampères).

Essa corrente é dependente da tensão da bateria, e também diretamente proporcional a ela. Dessa forma, se utilizarmos uma bateria com tensão maior, a corrente também será maior – vide a figura 86, em que a tensão da bateria foi aumentada para 100 V, produzindo então uma corrente mais expressiva, de 20 mA.

Observe que, à medida que a corrente aumenta, diminuem também os elétrons disponíveis em torno do filamento, uma vez que mais e mais elétrons se deslocarão rumo ao ânodo da válvula.

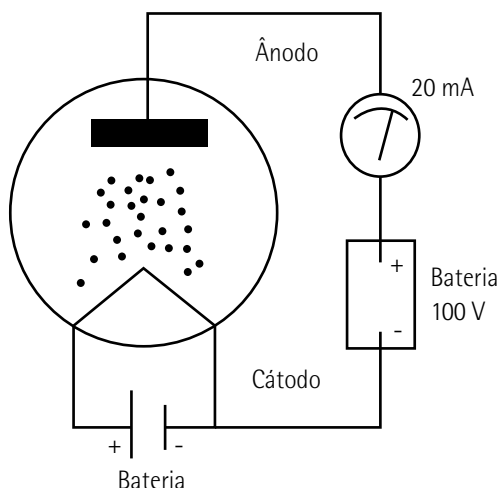


Figura 86 – Com maiores tensões na bateria, correntes maiores circularão pelo diodo de Fleming

Em um caso extremo, com uma bateria de 150 V ligada ao circuito do ânodo, a corrente medida será ainda maior – no caso, de 100 mA – o que demonstra que a relação entre estas grandezas (tensão aplicada ao ânodo da válvula e corrente circulante por ele) não crescem de forma linear (figura 87).

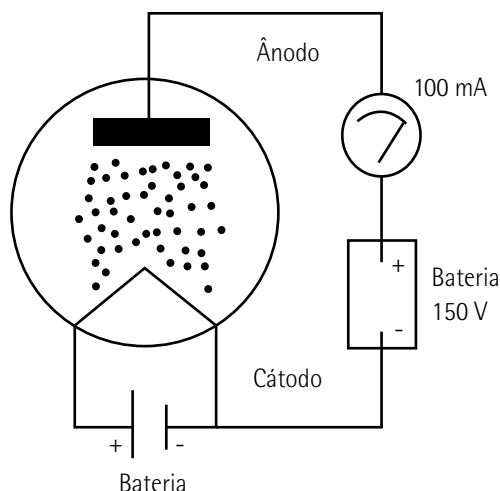


Figura 87 – Condução máxima no diodo de Fleming

Da mesma forma, se a bateria for desconectada do filamento, o aquecimento deste será cortado, freando o fenômeno de carga espacial e, conseqüentemente, cessando a emissão de elétrons para o ânodo (figura 88).

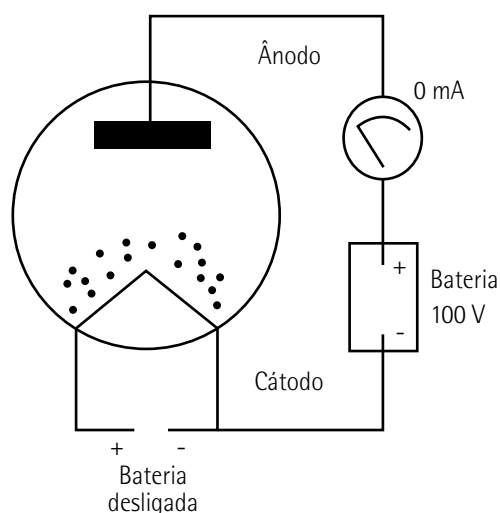


Figura 88 – Ausência de corrente no circuito de placa, com a bateria de filamento desligada

Também é pertinente observar que, apesar de ser possível controlar o fluxo de elétrons que atravessa a válvula pela variação da tensão da bateria, esse expediente não é simples, de forma que não é possível controlar externamente e de forma prática o quanto a válvula diodo está conduzindo.

Da mesma forma, se a bateria ligada ao circuito de placa da válvula for invertida – com o seu negativo ligado ao ânodo e positivo ao filamento –, também não haverá corrente elétrica (figura 89). Assim, a

válvula diodo comporta-se de forma que a passagem da corrente elétrica é permitida apenas em um sentido – o que garantiu, durante muitos anos, aplicações específicas em circuitos retificadores e em detectores de rádio.

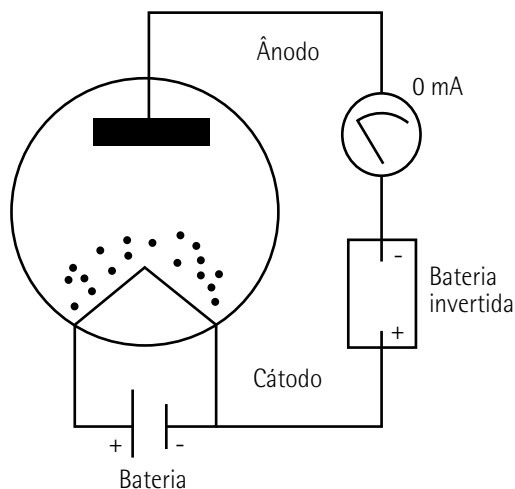


Figura 89 – Quando a bateria do circuito do ânodo é invertida, não há passagem de corrente elétrica pela válvula

## 5.1.3 O tríodo de Lee De Forest

Nos anos posteriores à patente de Fleming, foram muitas as pesquisas e invenções direcionadas para esse campo recém-descoberto, e alguns trabalhos desse período merecem especial atenção.

Em 1906, o físico americano Lee De Forest adicionou à válvula de Fleming um terceiro elemento. Posicionado entre o filamento e o ânodo, a adição foi denominada grade, e, quando energizada com um potencial elétrico negativo, mostrou a interessante capacidade de conseguir desviar os elétrons de seu caminho para o ânodo, possibilitando a regulação do fluxo de elétrons que efetivamente chegava ao ânodo, delimitando-o (figura 90).

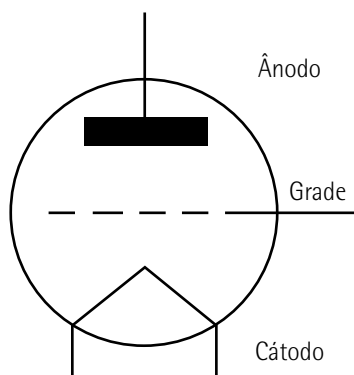


Figura 90 – Estrutura de uma válvula tríodo

Dessa forma, quaisquer pequenas variações no potencial elétrico aplicado à grade conseguiam produzir variações muito maiores no fluxo de elétrons entre o cátodo e o ânodo, o que estabelecia a tão desejada amplificação de sinais, que fora impossível de obter por tantos anos.

A invenção da válvula tríodo constituiu peça fundamental para o desenvolvimento da área da eletrônica e da computação – esta que nasceria nos próximos cinquenta anos. Este modelo aqui abordado seria superado apenas com o surgimento dos primeiros transistores sujeitos a aplicações práticas e confiáveis, já no fim dos anos 1950.

### 5.1.4 Amplificação de sinais na válvula tríodo

Para compreendermos como a válvula tríodo amplifica sinais, consideremos de início o circuito da figura 91, em que a respectiva válvula encontra-se devidamente ligada a um conjunto de baterias para o filamento e para o ânodo – tal como nos exemplos apresentados anteriormente com as válvulas diodo. Nesse caso, como a grade não receberá polarização alguma, esta estará ligada ao negativo comum do circuito, que é onde os circuitos de filamento e ânodo se encontram.

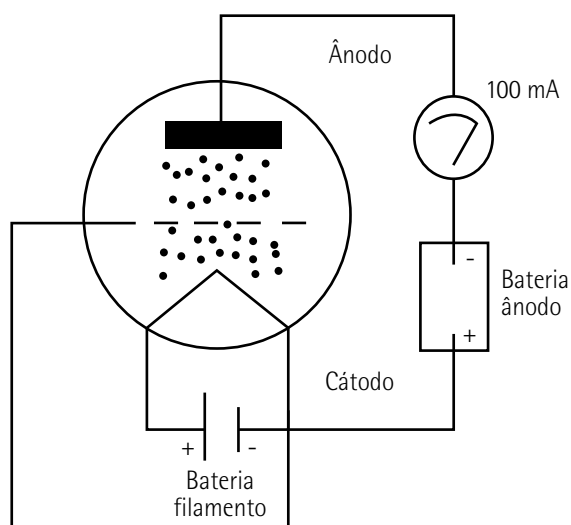


Figura 91 – Ligação da válvula tríodo com a grade ao negativo

Note que, como a grade está no mesmo potencial do negativo do circuito, ela permitirá a passagem livre dos elétrons rumo ao ânodo, produzindo uma corrente elétrica de grande intensidade – no caso do exemplo, de 100 miliampères.



#### Observação

O exemplo dado não é a forma correta de se operar uma válvula tríodo. Como ela é dotada de uma grade, esta precisa ser adequadamente polarizada para que assim a corrente que circula por ela possa ser controlada.

Para polarizar corretamente o tríodo, é utilizada uma terceira bateria ligada ao circuito. Esse método pode parecer pouco usual a princípio – com o seu positivo ligado ao negativo das baterias de filamento e ânodo – mas é, ao mesmo tempo, a única forma de se obter um potencial ainda mais baixo que o do cátodo na grade da válvula. Isto é importante porque, carregando negativamente a grade da válvula, é possível reduzir significativamente o fluxo de elétrons entre filamento e ânodo.



Nesse caso, a corrente mensurada no circuito do ânodo será bem baixa – conforme apresentado no exemplo, apenas 2 miliampères –, mesmo que a tensão da bateria de ânodo continue a mesma do caso anterior (figura 92). Isso acontece porque os elétrons têm carga elétrica negativa, e são, portanto, atraídos pelo ânodo. Contudo, como a grade encontra-se no caminho com um potencial elétrico ainda mais negativo, os elétrons acabam sendo repelidos para fora de seu caminho pela válvula, chegando, afinal, muito poucos ao ânodo.

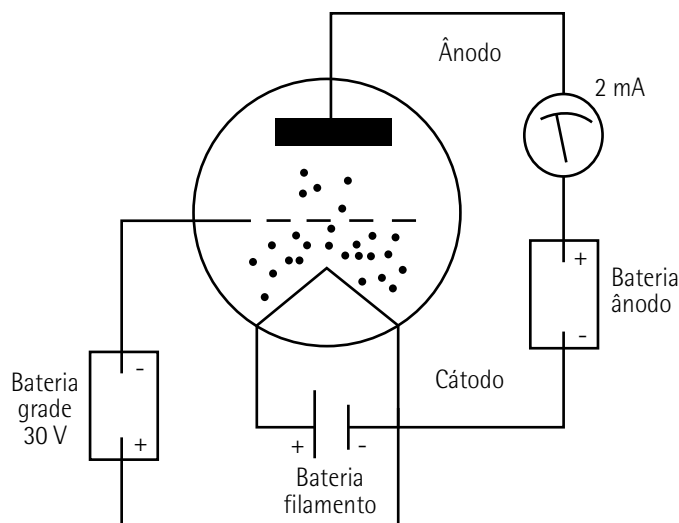


Figura 92 – Com a grade em um potencial elétrico negativo em relação ao cátodo, a corrente circulante pela válvula é grandemente reduzida

Se diminuirmos a tensão da bateria do circuito de grade, esta ficará menos negativa, situação em que mais elétrons conseguirão atravessar sua barreira e atingir o ânodo, resultando em uma maior corrente circulante no circuito (vide a figura 93).

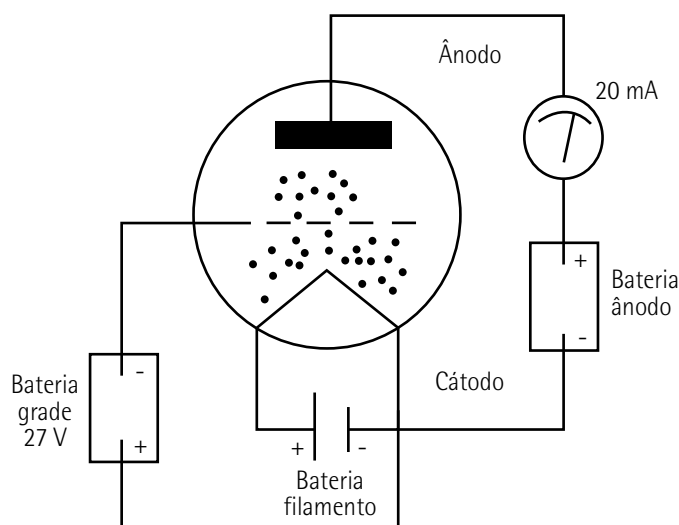


Figura 93 – Com uma tensão mais baixa na bateria de filamento, a corrente circulante pela válvula será ainda maior

Para que haja aumento relativamente considerável de corrente no ânodo, não é necessária grande variação no potencial aplicado à grade. Isso ocorre porque a válvula já oferece intrinsecamente um certo fator de amplificação, de forma que qualquer sinal aplicado a sua grade se manifestará ampliado em várias vezes no ânodo, conforme a figura 94.

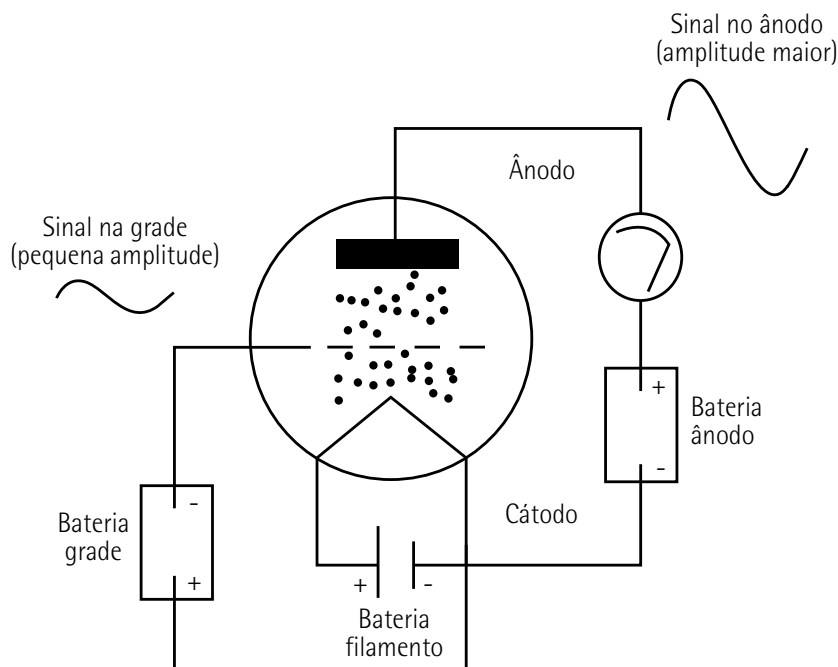


Figura 94 – Mesmo um sinal débil, quando aplicado à grade da válvula, produzirá um sinal maior no ânodo



### Lembrete

As válvulas triodo são capazes de amplificar sinais efetivamente, permitindo a construção de um sem-número de equipamentos importantíssimos para o desenvolvimento da eletrônica, como rádios, televisores, transmissores, equipamentos de radar e até mesmo alguns dos primeiros computadores.

### 5.1.5 Evolução das válvulas

Nos anos seguintes à invenção da válvula triodo por Lee De Forest, foram enormes os avanços nessa ainda recente tecnologia. Sucederam-se contínuos melhoramentos nos processos de fabricação e de controle de qualidade, sempre em busca de novidades que pudessem ser implementadas para aumentar a eficácia desses componentes eletrônicos.

As primeiras válvulas apresentavam muitas desvantagens em sua operação: o consumo de filamento era muito alto, sua vida útil era limitada, os dispositivos não conseguiam amplificar bem todos os sinais (especialmente os de alta frequência) e exigiam altas tensões em seus ânodos para funcionar

bem (acima dos 100 volts), além de apenas poderem ser alimentadas por baterias – o que tornava sua operação complexa, pouco prática e também custosa.

Dessa forma, os primeiros avanços produziram válvulas mais eficazes na ampliação de sinais, além de serem mais econômicas. Eliminar as baterias pesadas e caras parecia ser um excelente começo, e foi por esse caminho que os engenheiros seguiram no final da década de 1920.

### 5.1.6 Aquecimento direto ou indireto?

Uma das formas de conseguir eliminar as baterias de alimentação dos aparelhos a válvulas era fazer uso da eletricidade obtida a partir da rede elétrica, que já estava largamente difundida nos maiores centros urbanos nos princípios do século XX.

Contudo, como sabemos, a corrente fornecida pela rede elétrica é alternada (CA), enquanto os circuitos com válvulas dependem de corrente contínua (CC) para funcionar. Apesar da retificação da CA pelo uso das válvulas diodo já ser possível na época (além de outros tipos de dispositivos retificadores eletroquímicos rudimentares, com a filtragem da ondulação remanescente feita por capacitores), havia ainda uma séria limitação quanto aos filamentos das válvulas, que produziam ruídos nos circuitos.

Desta forma, a solução encontrada foi separar as funções do cátodo e do filamento em dois elementos diferentes, deixando o potencial do negativo do circuito (ou terra) totalmente isolado do filamento, permitindo alimentá-lo com a corrente alternada proveniente da rede elétrica, bastando para isso diminuí-la para a tensão requerida pelo filamento da válvula – muitas vezes não acima de 6 ou 12 volts (figura 95).

Por essa razão, alguns autores referem-se ao filamento das válvulas de aquecimento indireto como aquecedores ou calefadores, dado que sua função é simplesmente aquecer o cátodo.

Ao tornar-se possível a alimentação das válvulas pela rede elétrica de forma plena, os então avanços subsequentes permitiram a fabricação de equipamentos cada vez mais baratos e em quantidades progressivamente mais expressivas.

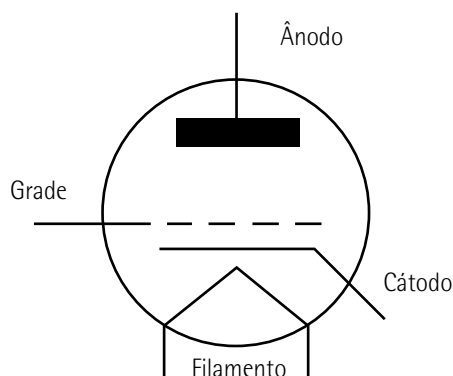


Figura 95 – Uma válvula triodo de aquecimento indireto. Note que nesta válvula, o cátodo e o filamento são elementos distintos, perfazendo este último apenas mero papel de aquecedor

### Exemplo de aplicação

#### Os circuitos hot-chassis

Uma forma de construir equipamentos baratos que dispensam o uso de um transformador de alimentação para os filamentos das válvulas e que foi muito utilizado na metade do século XX foi o chamado hot-chassi. Nele, os filamentos das válvulas eram ligados em série, perfazendo uma tensão próxima da oferecida pela rede elétrica, e com um resistor em série para compensar a diferença (vide a figura 96).

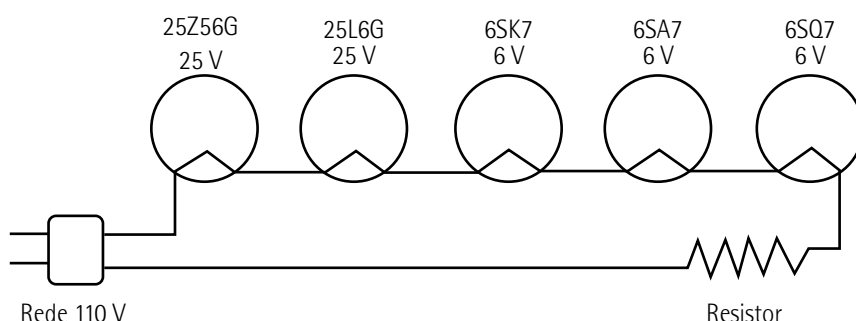


Figura 96 – Ligação dos filamentos das válvulas em série, com resistor de queda

No geral, esse resistor não passava de um mero fio de níquel-cromo enrolado e embrulhado em uma capa de amianto junto aos fios de alimentação do cabo de força do rádio, constituindo um conjunto que aquecia terrivelmente durante a operação do aparelho, oferecendo alto risco de incêndio. Essa característica rendeu a esses aparelhos a alcunha de *curtain burners* (queimadores de cortinas) – além do próprio amianto que, embora isolante e não inflamável, é um perigoso carcinógeno.



Figura 97 – Receptor All American Five com caixa em plástico Baquelita, fabricado pela companhia norte-americana Tele-Tone, em 1949

Disponível em: <http://tinyurl.com/4v83wszf>. Acesso em: 3 jan. 2024.

## 5.1.7 Válvulas tetrodo

Quando De Forest patenteou o tríodo em 1906, ficou claro que ainda tinham muitos melhoramentos necessários a seu projeto original para que válvulas verdadeiramente eficazes pudessem ser construídas.

Uma das principais dificuldades encontradas pelos primeiros engenheiros responsáveis por produzir circuitos eletrônicos era a de amplificar correntes elétricas acima de alguns miliampères, com o objetivo de produzir alguma potência para acionar um alto-falante, por exemplo – trabalho que os tríodos não conseguiam fazer muito bem.

Esse obstáculo se dava por um problema inerente à disposição dos elementos dentro da válvula: quando circulava uma corrente mais alta por ela, ocorria um fenômeno chamado emissão secundária, em que elétrons que a princípio seriam desviados do caminho do ânodo pela grade acabavam encontrando-o depois, produzindo uma queda do rendimento do sinal amplificado, distorcendo-o.

Ainda em 1920, o engenheiro inglês H. J. Round decidiu adicionar mais uma grade ao desenho original do tríodo, chamada de grade auxiliar (ou simplesmente screen), dessa vez polarizada com um potencial positivo com vistas a recolher os elétrons perdidos que haviam sido bloqueados pela grade principal – ou simplesmente grade de controle (figura 98).

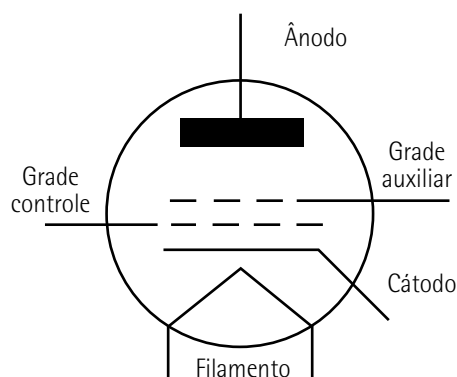


Figura 98 – Válvula tetrodo

A esse novo arranjo, foi atribuído o nome de **tetrodo**, dado que o esquema adicionava mais um elemento aos três que já faziam parte do tríodo. Eles são válvulas que encontraram larga aplicação em circuitos de radiofrequência e também nos primeiros amplificadores de áudio, permitindo que fossem produzidos alguns watts de bom volume sonoro sem muita distorção.

## 5.1.8 Válvulas pêntodo

Muito embora as válvulas tetrodo já permitissem a construção de bons amplificadores de áudio, ainda havia espaço para mais melhoramentos, especialmente na produção de válvulas que possibilitassem construir equipamentos de alta potência e também de alta estabilidade e confiabilidade.

Assim, surgiu a ideia de criar válvulas dotadas de uma terceira grade, com o objetivo de permitir que os elétrons que passaram pela grade de controle diretamente para o cátodo fossem guiados para que não se desviassem do caminho, potencializando o rendimento da válvula. O primeiro pêntodo foi inventado pelos cientistas holandeses Gilles Holst e Bernhardt Tellegen, em 1926, e foi denominado válvula de três grades. A notação esquemática de uma válvula pêntodo pode ser vista na figura 99.

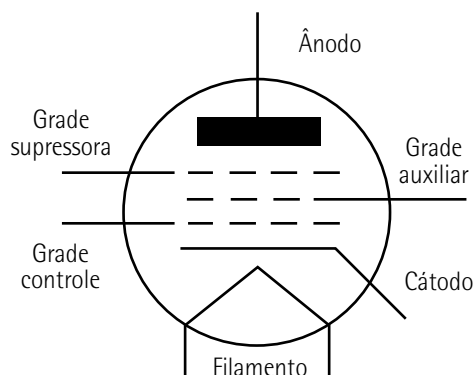


Figura 99 – Representação esquemática de uma válvula pêntodo

A terceira grade é denominada supressora, uma vez que destina-se a suprimir os efeitos de quaisquer elétrons perdidos no caminho para o ânodo. Por esse motivo, os pêntodos mostraram-se ideais como válvulas para aplicações em que altas potências de operação são requeridas, bem como para operar altas frequências – inclusive em micro-ondas.

Foram desenvolvidos diversos tipos destas válvulas ao redor do mundo até o final da década de 1950, inclusive tipos subminiatura para aplicações militares e aeroespaciais (vide a figura 100).



Figura 100 – Diversos pêntodos, convencionais, miniatura e subminiatura. Os tipos exibidos são para aplicações militares, de procedência americana (esquerda) e soviética (direita)

## 5.1.9 Válvulas com seis ou mais elementos

Também foram implementadas, ao longo do tempo, diversas válvulas com seis, sete e até mais elementos, como as pentágrades (como o próprio nome diz, dotadas de cinco grades), os heptodos e outros tipos congêneres, destinados a aplicações sobretudo em receptores de rádio de alta performance.

Um arranjo utilizando uma válvula heptodo de aquecimento direto tipo 2G21 pode ser visto na figura 101, em que ela é empregada em um circuito oscilador/conversor de um receptor de rádio alimentado por baterias. Esse tipo de válvula subminiatura foi desenvolvido para aplicações em equipamentos militares norte-americanos nos anos 1950, e apresenta características muito interessantes, como baixo consumo e bom rendimento, com alimentação de apenas 1,4 V no filamento.

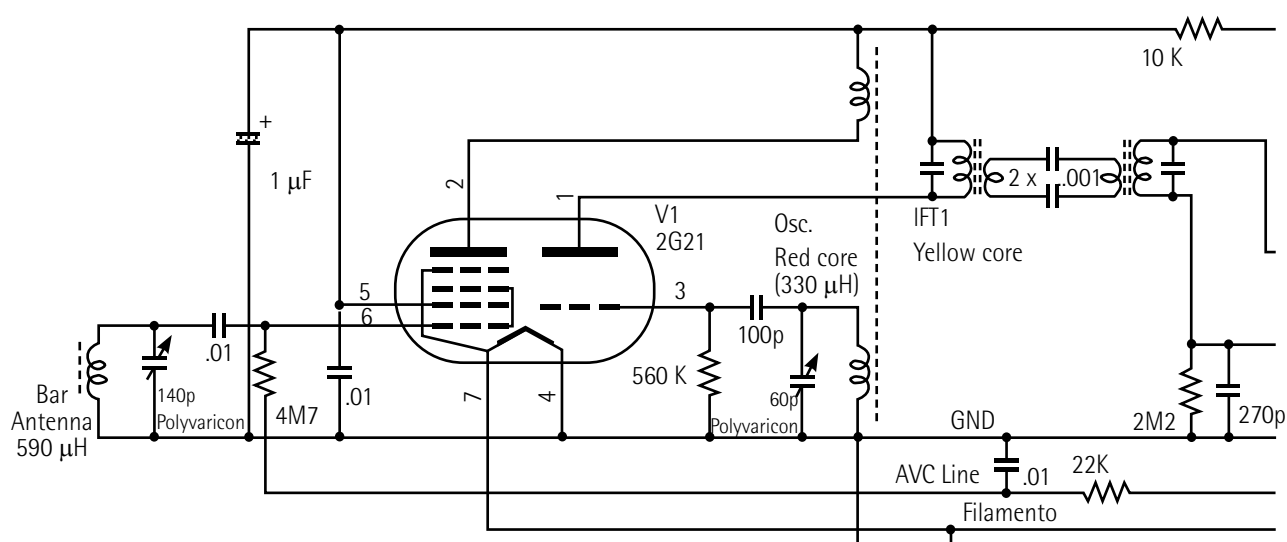


Figura 101 – Circuito oscilador/conversor com válvula heptodo 2G21. Observe a presença de dois ânodos e cinco grades de controle nesta válvula destinada a aplicações militares

Outro tipo de expediente muito adotado pela fabricante General Electric já nos anos 1960, quando os transistores começavam a apresentar potencial para substituir as válvulas em uma série de aplicações, foi o agrupamento de mais de uma válvula em um mesmo envelope de vidro, permitindo que a mesma válvula executasse o papel de, por exemplo, três tríodos completamente independentes, ou dois tríodos e um pêntodo, ou até mesmo dois pêntodos.

Isso permitia economizar bastante espaço, e equipamentos que antes eram grandes e pesados, como aparelhos de TV a cores, fossem construídos de forma muito mais compacta e até portátil – a exemplo dos televisores GE Portacolor, os primeiros portáteis a cores (figura 102). A este tipo de válvula múltipla foi dado o nome compactron, sendo característica distintiva seu aspecto bojudo, que acomodava os diversos elementos em seu interior, além de seu soquete com 12 pinos.



Figura 102 – A) Televisor GE Portacolor (esquerda); B) válvula compactron (direita)

Fonte: A) <http://tinyurl.com/ye4map4v>; B) <http://tinyurl.com/f6vmbdb>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Durante esse mesmo período em que as válvulas começavam a dividir espaço com os transistores, surgiram também os tipos denominados nuvístores (figura 103). Triodos ou pêntodos eram usualmente os componentes subminiatura, direcionados para aplicações de baixa potência e alta frequência.

Sua construção diminuta, com base cerâmica e corpo de metal, permitia a estas válvulas excelente estabilidade térmica, ao mesmo tempo que podiam chegar a frequências na faixa de UHF ( $> 200$  MHz), sendo bastante utilizadas em circuitos críticos, como osciladores de frequência variável (VFOs) e seletores de canais de televisores em cores, apresentando baixo ruído de operação e também pouco consumo de filamento.

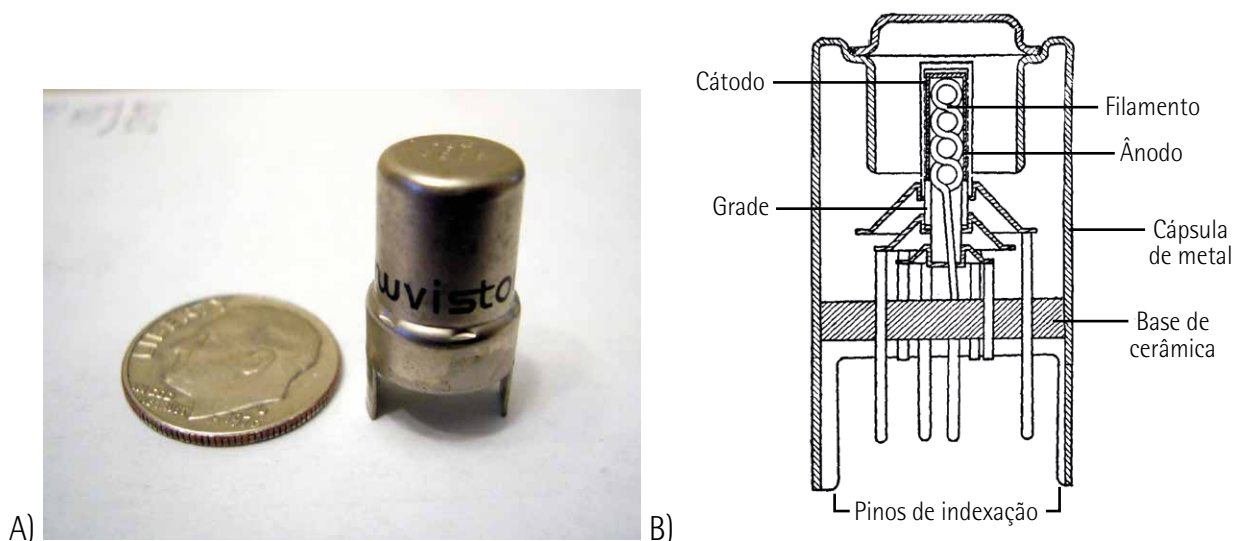


Figura 103 – Válvulas tipo Nuvistor

Disponível em: A) <http://tinyurl.com/3uy93mbd>;  
Adaptada de: <http://tinyurl.com/rj2kdrv>. Acesso em: 1º fev. 2024.





## Observação

Os Nuvístores foram inicialmente desenvolvidos pela RCA americana, mas também foram fabricados no Japão pela Hitachi, além de terem sido produzidos clones na extinta União Soviética.

## 5.2 Funções lógicas com válvulas

Executar funções lógicas usando válvulas termiônicas é uma prática bastante conhecida e documentada na literatura especializada, e foi extensivamente utilizada dos anos 1940 até a introdução dos primeiros transistores que trabalhavam nas frequências necessárias em torno de quinze anos mais tarde.

Foram vários os computadores construídos com base nesses componentes, começando pelo lendário Eniac – destinado primariamente a fazer cálculos de trajetórias balísticas na Segunda Guerra Mundial – e passando por outros, como o Edvac, o Ferranti Mark I, o Univac e o Bendix G15, já desenvolvidos em tempos de paz para aplicações comerciais.

Na figura 104 podemos conferir uma porta OR implementada com duas válvulas do tipo triodo.

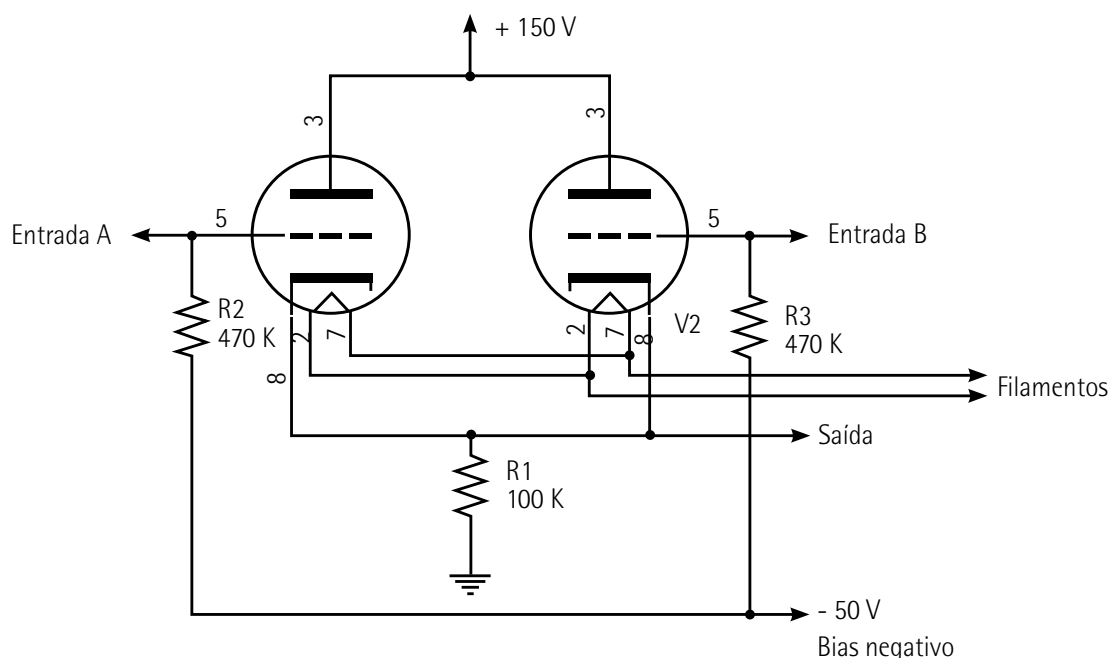


Figura 104 – Porta OR com duas válvulas triodo

Observe que a alimentação dos ânodos é feita com uma tensão relativamente alta (150 V), algo de praxe para circuitos com esse tipo de componente. Uma polarização negativa é também oferecida para as grades de controle (-50 V), de forma que, quando as entradas se encontrarem em nível lógico

baixo, as válvulas não deverão conduzir, estando os seus cátodos com 0 volt, indicando um nível lógico baixo na saída.

Caso uma tensão positiva (nível lógico alto) seja aplicada a qualquer uma das grades das válvulas, ela deverá começar a conduzir, gerando uma queda de tensão sobre o resistor de cátodo R1 e produzindo um nível alto na saída.

De forma semelhante, uma porta lógica AND pode ser implementada utilizando uma válvula pêntodo, conforme a figura 105.

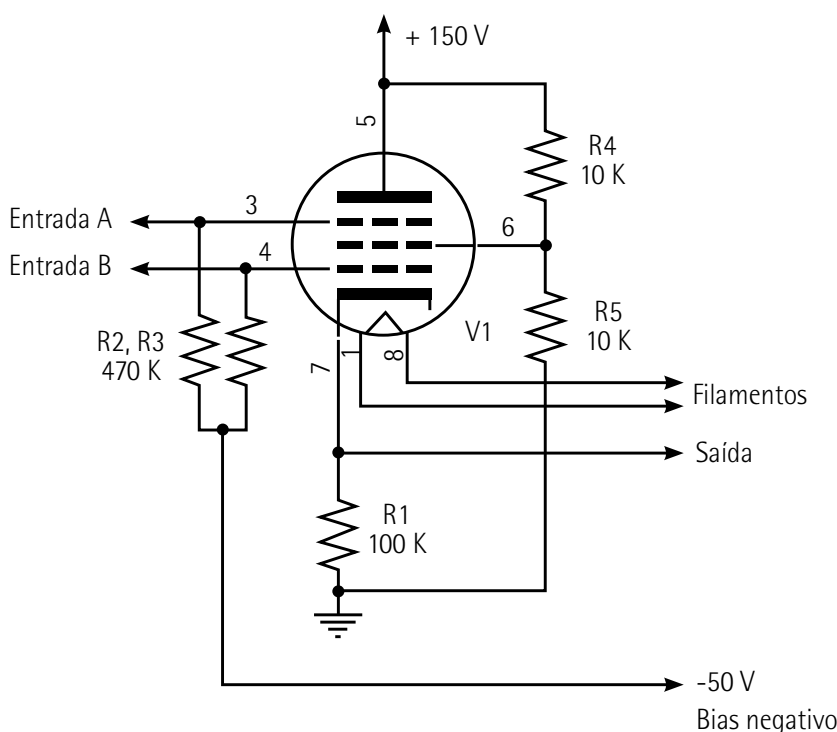


Figura 105 – Porta AND com uma válvula pêntodo

Nesse arranjo, tanto a grade de controle (pino 4) quanto a grade supressora (pino 3) da válvula são polarizadas negativamente, bloqueando a passagem de elétrons quando o nível lógico da entrada for baixo. A grade auxiliar (pino 6), por sua vez, recebe uma polarização fixa pelo divisor de tensão formado pelos resistores R4 e R5.

Observe que, neste caso, a presença de uma tensão positiva (nível lógico alto) em qualquer uma das duas grades não fará com que a válvula conduza, dado que a outra grade seguirá bloqueando a passagem de elétrons, mantendo o cátodo com 0 volt e, conseqüentemente, em nível baixo.

O cátodo somente entrará em nível alto quando ambas as grades estiverem com uma tensão positiva, situação em que uma queda de tensão se produzirá sobre o resistor de cátodo R1, colocando a saída em nível alto.

Igualmente, de forma semelhante às portas AND e OR, um inversor lógico (porta NOT) pode ser implementado com facilidade ao utilizar uma válvula tipo tríodo comum, conforme a figura 106.

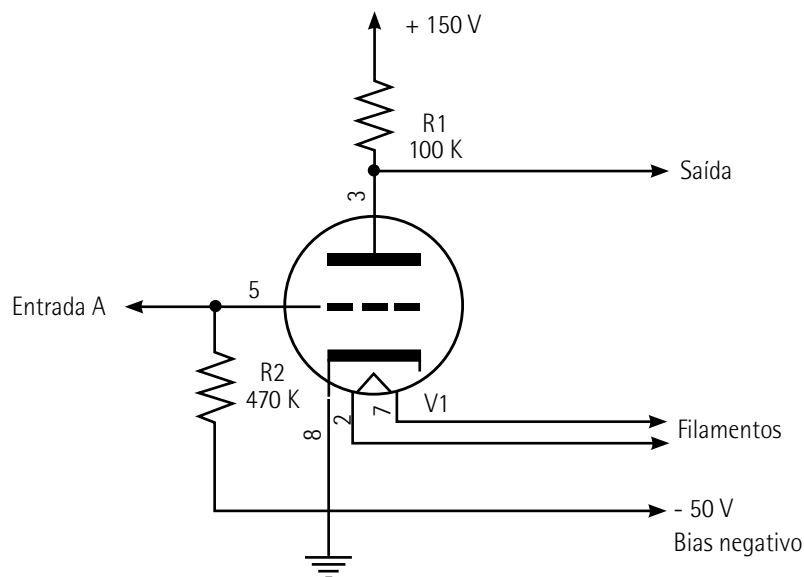


Figura 106 – Porta lógica NOT com válvula tríodo

Nesta situação, temos a saída lógica não mais no cátodo da válvula, e sim no ânodo, o que produzirá a inversão do nível lógico presente na grade de controle. Dessa forma, quando ela estiver negativa (nível lógico baixo), a válvula não irá conduzir, fazendo com que a tensão sobre o seu ânodo (pino 3) seja igual à tensão da fonte de alimentação (150 V), caracterizando um nível lógico alto.

Contudo, quando uma tensão positiva for aplicada à grade de controle (pino 5), a válvula será forçada a conduzir, produzindo uma queda de tensão sobre o resistor R1 com valor praticamente igual ao da fonte (cerca de 150 V), restando muito pouco sobre o ânodo da válvula, caracterizando um nível lógico baixo.

Muito embora a implementação de portas lógicas com válvulas seja possível e produza resultados práticos, com boas velocidades de chaveamento entre os estados lógicos, elas ainda apresentam algumas desvantagens, como o alto consumo de energia para os filamentos das válvulas e a necessidade da manipulação de tensões altas (muitas vezes acima de 100 V) nos ânodos, o que oferece risco de choque elétrico durante procedimentos de manutenção e análise de defeitos, muito comuns nesse tipo de circuito.

### Exemplo de aplicação

Um exemplo interessante de aplicação das válvulas termiônicas em circuitos lógicos digitais é o computador G15 (figura 107), produzido pela companhia americana Bendix a partir de 1956.



Figura 107 – Computador Bendix G15

Disponível em: <http://tinyurl.com/c6eh27b8>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Seus circuitos utilizavam um total de 450 válvulas, além de 3 mil diodos de estado sólido (que estudaremos logo adiante), dispondo de uma memória principal magnética do tipo de tambor rotativo, e aceitando periféricos como um teclado de teletipo, leitora de cartões perfurados e também unidade de fita.

Todo o sistema trabalhava a uma velocidade de 96 KHz (ou 96 mil pulsos por segundo), com um interpretador rudimentar para linguagem Algol – apesar de existirem outros softwares escritos para a arquitetura da máquina, que pesava quase 750 kg e consumia pouco mais de 3000 watts em funcionamento.

Muito embora seu custo fosse de aproximadamente 55 mil dólares americanos, um valor muito alto à época, ele era bastante atrativo em relação a outros sistemas maiores e também mais caros, colocando o sistema do Bendix G15 ao alcance de muitas empresas e universidades que desejavam fazer o uso da computação – especialmente na área da engenharia civil, em que era muito utilizado na solução de problemas envolvidos em atividades de corte e aterro.

O G15 foi descontinuado em 1961 em razão da introdução do seu sucessor, o G20, já completamente transistorizado. Ao todo, foram produzidas cerca de 400 unidades do G15, algumas das quais ainda seguiam em plena operação no início dos anos 1970.

## 5.3 Aplicações atuais das válvulas

Muito embora as válvulas sejam hoje em dia consideradas uma tecnologia ultrapassada, ainda existem certos segmentos de nicho em que elas seguem em uso, especialmente em aplicações profissionais e em equipamentos de alta qualidade.

### 5.3.1 Áudio de alta fidelidade

O uso das válvulas em aplicações de áudio de alta fidelidade já é amplamente difundido desde a primeira metade do século XX, e segue em uso por entusiastas altamente exigentes no que concerne à qualidade do som reproduzido, e por aqueles que buscam equipamentos com características sonoras únicas – já que o próprio conceito de qualidade de áudio é relativamente subjetivo, indo mais ao encontro das preferências de cada um do que de conceitos predefinidos, que, embora existam, são passíveis de grande discussão (e de controvérsia) entre diversas correntes diferentes dos denominados audiófilos.

São muitos aqueles que ainda seguem fiéis a tecnologias mais antigas, integrando-as ou não a arranjos circuitais mais modernos, e também desenvolvendo equipamentos híbridos (com transistores e/ou circuitos integrados e válvulas), com vistas a obter resultados que mais lhes satisfaçam.

Determinados tipos de válvulas como certos tipos de tríodos têm características de baixa distorção e linearidade que permitem a construção de amplificadores com excelentes características até poucos anos atrás muito difíceis de serem replicadas com circuitos mais modernos – como os transistores, que por sua vez foram por muitos anos taxados como meros dispositivos para consumo em massa, de baixo custo e de qualidade inferior, por esse mesmo grupo de entusiastas.

Alguns exemplos de fabricantes de equipamentos de alta qualidade para reprodução musical são as companhias americanas Cary Audio Design, situada em Raleigh, na Carolina do Norte, e a Audio Research, que há mais de meio século está estabelecida em Mineápolis (figura 108).



Figura 108 – Amplificador Audio Research Reference 160S, com 140 W de potência e oito válvulas KT150, introduzido em 2018

Disponível em: <http://tinyurl.com/bdsetavk>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Ambas produzem esses equipamentos em baixíssimas quantidades, de forma praticamente artesanal, unindo circuitos e conceitos modernos com elementos clássicos de amplificadores *vintage* consagrados, fazendo com que seus produtos cheguem a custar muitos milhares de dólares.

Adicionalmente, não são raros os aficionados que constroem seus próprios equipamentos de áudio, situação em que muitas vezes procuram refletir seu gosto e filosofias pessoais na construção e também na sonoridade do equipamento, como é o caso dos dispositivos desenvolvidos pelo lendário técnico japonês Susumu Sakuma (1943-2018).

Um apaixonado ouvinte de jazz e música clássica, Sakuma (figura 109) desenvolveu, desde meados de 1950 até seu falecimento em 2018, amplificadores de áudio extremamente peculiares, utilizando majoritariamente válvulas de aquecimento direto e de transmissão de rádio (então muito abundantes) que adquiria a baixo preço nas casas especializadas em Tóquio.

Seus amplificadores ficavam expostos – sempre funcionando – em seu restaurante, o *Concorde*, na cidade de Tateyama, atraindo visitantes do mundo todo que desejavam ouvir sua sonoridade única.

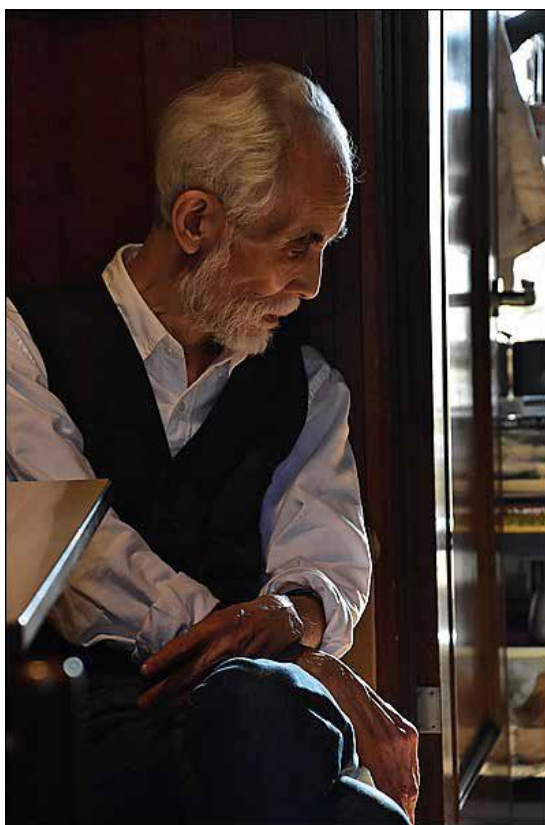


Figura 109 – O técnico Susumu Sakuma com seus equipamentos

Disponível em: <http://tinyurl.com/3jpzcunm>. Acesso em: 1º fev. 2024.



## Saiba mais

A relação dos equipamentos produzidos por Susumu Sakuma, com descrição de seus métodos construtivos e esquemas elétricos, pode ser encontrada em:

DIRECT HEATING. 2023. Disponível em: <http://tinyurl.com/e5v89b2y>. Acesso em: 3 jan. 2024.

### 5.3.2 Amplificadores para guitarras e afins

Na contramão do áudio de alta qualidade, que busca a maior fidelidade possível ao reproduzir um som, vão os equipamentos direcionados aos músicos – notadamente guitarristas e baixistas – cujas distorções e características de não linearidade (que a princípio são considerados defeitos) tornam-se elementos de primeira importância.

As guitarras elétricas surgiram ainda na década de 1930, mas foi 20 anos depois, durante a década de 1950, que ganharam popularidade com os primeiros artistas de rock'n'roll (como Chuck Berry) e de blues (como T-Bone Walker), que utilizavam seus amplificadores com volumes próximos ao máximo e produziam uma distorção por saturação (também chamada de *overdrive* ou simplesmente *clipping*), que em muito se opunha ao timbre suave e adocicado das já onipresentes guitarras do jazz ao produzir uma sonoridade que, embora mais ardida, agrada muito os ouvidos, dada sua riqueza em harmônicos, destacando-se dos demais instrumentos de um conjunto de rock (vide a figura 110).

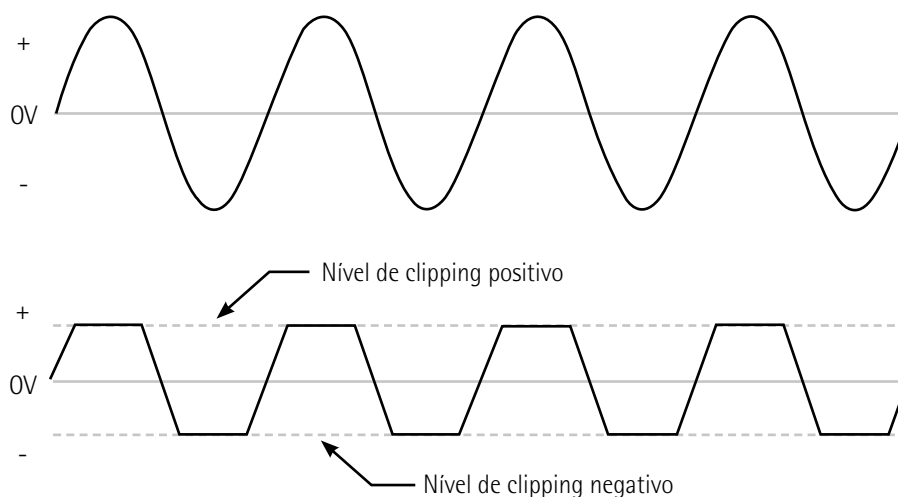


Figura 110 – Sinal puro, sem distorção (acima) e com distorção *overdrive* (abaixo). Observe o achatamento da forma de onda no sinal distorcido

Adaptada de: Overton (2006).

O efeito chamado **overdrive** é o preferido por guitarristas de diversos gêneros musicais ainda hoje, e são fabricados e comercializados diversos pedais de efeitos – analógicos e também com processadores de sinais digitais – capazes de emular a sonoridade desses antigos amplificadores quando próximos de seu volume máximo, conforme a figura 111.



Figura 111 – Pedal de distorção *The Drive*, um clone do projeto *Brown Sound in a Box*, da General Guitar Gadgets, fabricado pela companhia brasileira MG Music

Disponível em: <http://tinyurl.com/lyxmt2j3z>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Ao mesmo tempo, ainda são muitos os guitarristas que preferem investir nos amplificadores valvulados para guitarras e baixos elétricos que, apesar de seu tamanho e peso pouco práticos, além de seu custo inerentemente alto, seguem fascinando diversas gerações de músicos, ouvintes e entusiastas por conta de sua sonoridade e visual únicos – muito embora cada vez mais ferramentas DSP (*digital signal processing*) consigam, via dispositivos embarcados ou *plug-ins* específicos para uso com ferramentas de computador em estúdio (como ProTools ou o Ableton Live), emular com notável grau de perfeição os resultados oferecidos pelos equipamentos clássicos antigos, fabricados por marcas lendárias, como Fender, Marshall, Vox, e muitas outras.

Ao mesmo tempo, ainda existe mercado para kits desses amplificadores para montagem caseira, bem como um nicho para equipamentos novos, fabricados sob encomenda por marcas de boutique e vendidos por valores bastante altos, assim como também para equipamentos de época restaurados.





Figura 112 – Amplificador Phelpa "Falcão", clone do Fender Vibrolux 6G11, fabricado no Brasil em 1966, restaurado para uso

### 5.3.3 Sinalização

Um tipo de válvula que tem sido procurada nos últimos anos por seu visual único é a **nixies**, que nada mais é do que um indicador numérico luminoso de cátodo frio (não têm filamento) contendo em seu interior gás neon que, quando percorrido por uma corrente elétrica, ioniza-se, iluminando o cátodo com um brilho alaranjado bastante característico e bonito.

No passado, tais válvulas foram muito utilizadas em calculadoras eletrônicas primitivas e em instrumentos de medição de laboratório, além de outras aplicações, mas começaram a perder espaço ainda nos anos 1970 quando outras alternativas mais modernas surgiram.

Em contrapartida, ainda são diversos os entusiastas que veem nessa tecnologia uma estética única, existindo, portanto, um seleto mercado para relógios digitais e outros produtos congêneres que utilizam esses componentes nos dias de hoje. O único fabricante de válvulas nixie em atividade é a companhia Dalibor Farny, de Březolupy, na Chéquia, que fabrica, além de seus próprios modelos de nixies, toda uma gama de relógios digitais de alta qualidade (figura 113).



Figura 113 – Relógio digital modelo Puri Nixie Clock 6, fabricado pela Dalibor Farny, que, entre outras modernidades, dispõe de conexão com a internet para ajuste automático do horário

Outro tipo de indicador visual ainda bastante cultuado por seu visual único é a válvula olho mágico, chamada assim por dispor de um ânodo de fósforo em forma de anel que, ao ser atingido por elétrons em movimento provenientes do cátodo, apresenta um brilho esverdeado que lembra a figura de um olho (figura 114).

Uma área de sombra produzida por uma grade de controle especial pode ser variada, permitindo que, com uma tensão aplicada a ela, o olho mágico abra ou feche, promovendo seu uso como indicador de sintonia em equipamentos de rádio, de testes, indicadores de nível em gravadores e muitos outros. São componentes já não mais fabricados, relativamente escassos no comércio, mas ainda muito procurados e valorizados – especialmente por colecionadores e restauradores de rádios antigos.

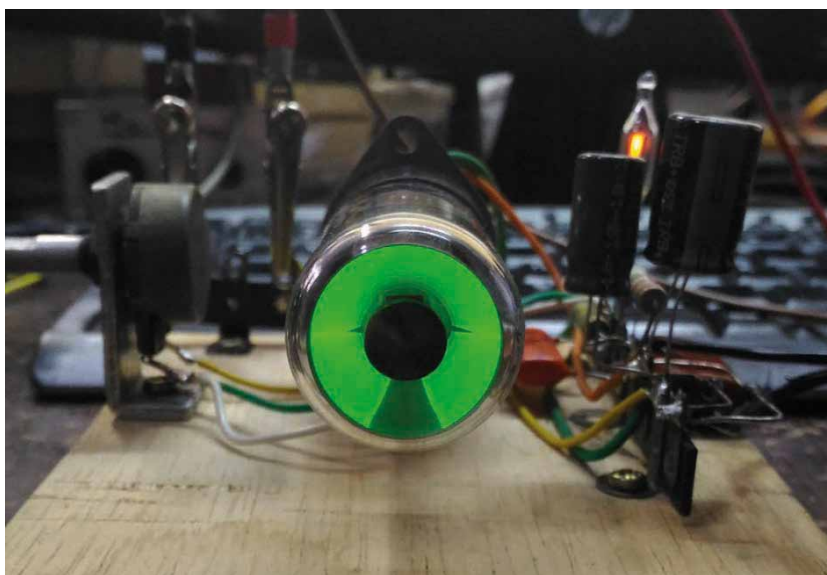


Figura 114 – Válvula olho mágico tipo VT138 e circuito de alimentação

### 5.3.4 Fornos de micro-ondas

Outra aplicação ainda universal para as válvulas ocorre nos fornos de micro-ondas domésticos e industriais, destinados a aquecer comida. Neles, um tipo especial de componente chamado **magnetron**, é usado para bombardear o que se deseja aquecer com elétrons acelerados, provocando o seu aquecimento.

É uma válvula que contém uma ampola feita em cerâmica e metal que trabalha com uma tensão de ânodo bastante alta (normalmente na ordem de 4.000 ou 5.000 volts), e ao seu redor ficam dispostos ímãs que, em interação com o grande número de cavidades no interior da ampola que atuam como um circuito ressonante feito de **indutores** e **capacitores**, produzem uma oscilação com uma frequência aproximada de 2.5 GHz, emitida por uma espécie de antena ligada a seu ânodo. A potência obtida é bastante alta, podendo chegar a cerca de 1 quilowatt (figura 115).

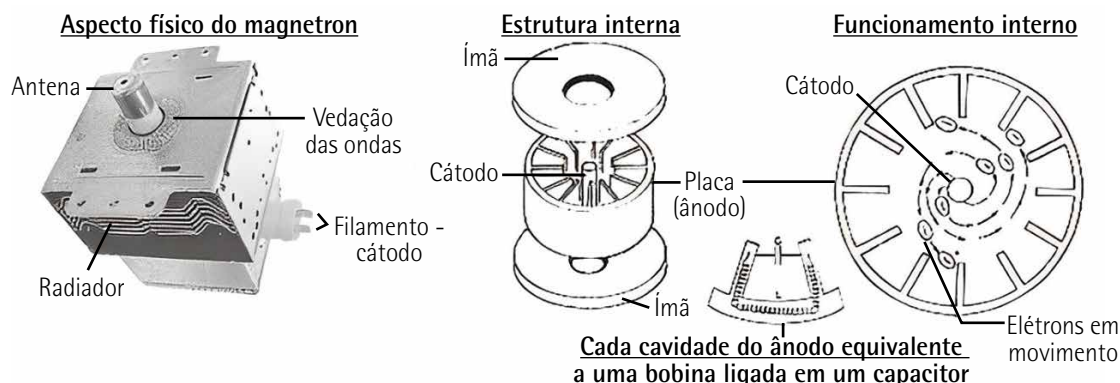


Figura 115 – Estrutura interna e operação de uma válvula magnetron

Adaptada de: <http://tinyurl.com/y33k8xhc>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Dessa forma, não apenas as tensões presentes no circuito que alimenta o magnetron são potencialmente fatais, mas a própria radiofrequência produzida é perigosa ao corpo humano caso não esteja devidamente blindada dentro da câmara de aquecimento do forno, podendo causar sérias queimaduras e até mesmo cegueira em quem operá-la sem blindagem.

## 6 DISPOSITIVOS DE ESTADO SÓLIDO: OS DIODOS

Uma válvula diodo permite apenas a condução de corrente elétrica em um sentido, e os diodos de estado sólido permitem executar as mesmas funções, mas com muito mais praticidade, economia de espaço e custo. Esses componentes, como o próprio nome diz, são feitos com cristais de germânio, silício e outros mais, independentemente de uma ampola de vácuo – como no caso de uma válvula.

Eles são componentes eletrônicos altamente empregados nos equipamentos modernos, permitindo a operação com grande estabilidade, qualidade, economia de espaço e também com baixo custo quando comparados às válvulas diodo, e é sobre eles que falaremos neste tópico.

### 6.1 Breve histórico

A propriedade da condução assimétrica – isto é, a capacidade de certos materiais cristalinos conduzirem a corrente elétrica em apenas um sentido – é conhecida desde finais do século XIX, determinada pelo físico alemão Ferdinand Braun (figura 116) ainda em 1874, antes mesmo da descoberta do efeito Edison e da invenção das válvulas termiônicas.



Figura 116 – O físico Ferdinand Braun, em retrato de 1909

Disponível em: <http://tinyurl.com/bdd76zmv>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Braun, à época um jovem pesquisador da Universidade de Würzburg, estudava as características elétricas de diversos cristais e eletrólitos quando descobriu por acaso, ao testar a condutividade elétrica da superfície de uma pedra de sulfeto de chumbo (também conhecido popularmente como galena), que dependendo de onde fosse feito o contato elétrico, a corrente elétrica somente circulava em um sentido, sendo bloqueada no outro.

Tal descoberta foi publicada por ele em uma conferência dada em Leipzig dois anos depois, em 1876, mas como não foi identificado na época nenhum uso prático para ela, o estudo ficaria parado por mais de 20 anos. Foi apenas em 1900 que o físico indiano Jagadis Chandra, da Universidade de Calcutá, descobriria a aplicação dos cristais de galena em circuitos detectores de rádio, estabelecendo a primeira patente de um diodo primitivo um ano depois e pavimentando o primeiro uso prático para o efeito de condução assimétrica em um mineral.

Em 1909, junto ao italiano Guglielmo Marconi, Ferdinand Braun foi laureado com um prêmio Nobel pelas suas descobertas com a galena, que levaram ao desenvolvimento do rádio e também da eletrônica no geral.

Os receptores que utilizavam detectores de galena eram, via de regra, muito simples, e desprovidos de qualquer tipo de amplificação, tendo, portanto, sensibilidade e volume bastante baixos. Apesar disso, não precisavam de fonte alguma de alimentação para funcionar, bastando vários metros de fio esticado que servissem de antena e uma conexão de terra – uma vez que seu funcionamento dependia inteiramente da energia proveniente da estação transmissora (figura 117).

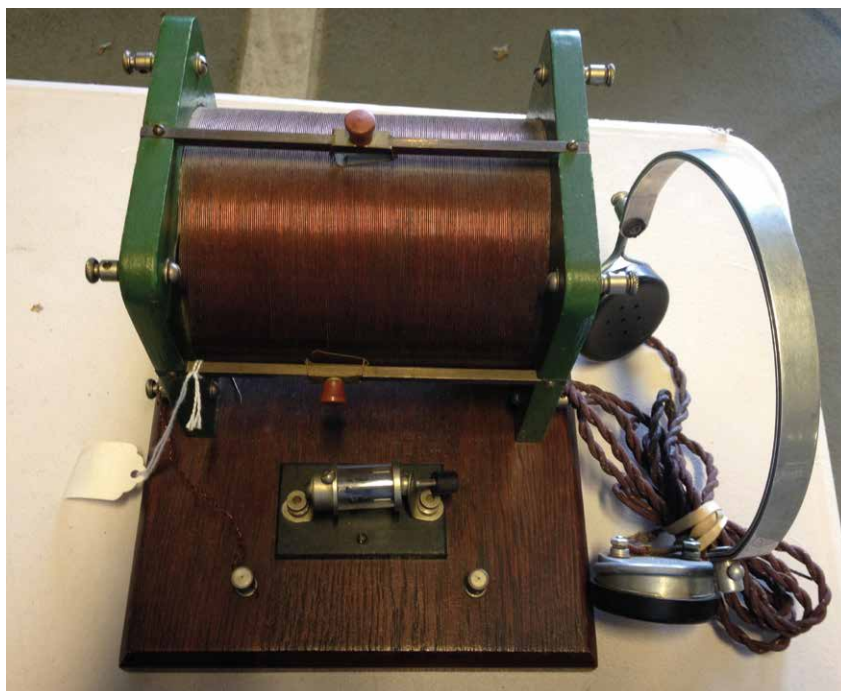


Figura 117 – Receptor com detector de galena

Disponível em: <http://tinyurl.com/yc4dx34x>. Acesso em: 1º fev. 2024.

Seu uso caiu em declínio com o advento das válvulas termiônicas, mas ganhou destaque durante a Segunda Guerra Mundial, em que soldados utilizavam esses circuitos construídos de forma completamente improvisada com materiais encontrados nas trincheiras, que se tornaram uma importante fonte de informação durante as batalhas.

### 6.2 O uso de minerais como diodos

Os primeiros diodos de estado sólido, embora práticos, apresentavam características muito rudimentares, aproveitando as propriedades semicondutoras de diversos óxidos, bem como de minerais em seu estado bruto, e obtinham resultados que variavam muito e, a princípio, não exibiam grande confiabilidade. Eles eram, contudo, a única opção disponível para aplicações em rádio durante muitos anos.

Neste tópico exploraremos algumas dessas implementações, feitas à base de galena e de outros materiais facilmente encontrados.



### 6.2.1 Galena (sulfeto de chumbo – PbS)

A galena é um minério bastante abundante, composto essencialmente de sulfeto de chumbo (PbS), mas que também pode conter traços de prata, quartzo e fluorita. Ele tem aspecto acinzentado, com brilho metálico geralmente prateado. É muito empregado na obtenção de chumbo para a fabricação de baterias, e também para a extração da prata, embora esta esteja disponível em baixa quantidade no minério. O aspecto de uma pedra de galena pode ser visto na figura 118.



Figura 118 – Minério de galena em estado bruto, com alguns sinais de oxidação

Para que suas propriedades semicondutoras sejam extraídas, a pedra de galena precisa ser montada em um dispositivo especial, denominado *Cat's whisker* (bigode de gato), em que é soldada ou afixada a uma base metálica criando um ponto de contato, e o outro ponto é feito por um fio fino de algum material flexível, que é movimentado pela superfície da pedra até que o ponto de condução seja encontrado (figura 119).

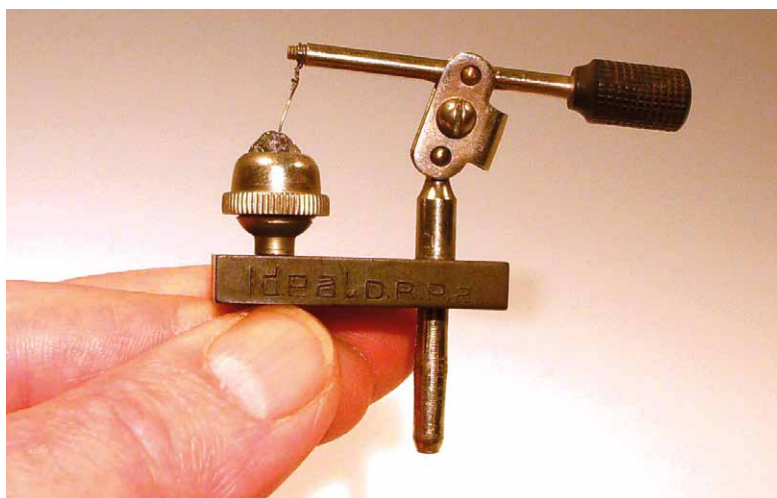


Figura 119 – Detector tipo bigode de gato, com cristal de galena montado

Acertar o ponto de operação em um diodo do tipo não era uma tarefa fácil, e demandava paciência e mão muito firme – uma vez que o ponto da pedra que apresenta condução em apenas um sentido é geralmente bem pequeno –, e qualquer vibração no fio de contato pode fazê-lo saltar para fora deste.



### Lembrete

Em um pedaço de galena podem haver vários pontos de condução, mas nem todos apresentam bons resultados necessariamente, o que pode tornar o ajuste do ponto de contato algo especialmente complexo.

### 6.2.2 Pirita de ferro

Outro minério que pode ser utilizado no lugar da galena, por vezes com resultados até melhores, é a pirita de ferro – ou dissulfeto de ferro ( $\text{FeS}_2$ ). Ela tem aparência semelhante à galena, mas com estrutura em forma de cubos e um brilho mais amarelado, sendo por vezes confundida com ouro sob o brilho das velas e lanternas de chama utilizadas pelos antigos mineiros; por isso, era também denominada como ouro dos tolos.



Figura 120 – Pirita de ferro em estado bruto

A pirita aparece naturalmente em associação com o cobre, arsênio, níquel e cobalto, e pode ocorrer com o próprio ouro.

### 6.2.3 Outros materiais

Dentre toda uma infinidade de outros minérios que podem oferecer condução assimétrica, também podemos encontrar diversos exemplos de outros materiais comuns que permitem a construção de diodos rudimentares, alguns até inusitados.

A primeira edição da revista *Antenna* – a primeira dedicada ao campo da eletrônica no Brasil –, de abril de 1926, anunciava os experimentos dos cientistas americanos J. Hutchinson e G. M. Leod,

que determinaram que um diodo poderia ser construído encostando um fio fino na superfície de uma gota de mercúrio. No mesmo artigo, eles descrevem que um efeito similar poderia ser obtido encostando, parcialmente, duas pontas de cobre muito bem polidas.

Outros tipos de detectores, usando carvões de pilhas gastas, lâminas de barbear e até pedaços de lápis, foram também bastante empregados por experimentadores nos anos subsequentes (vide exemplo na figura 121).

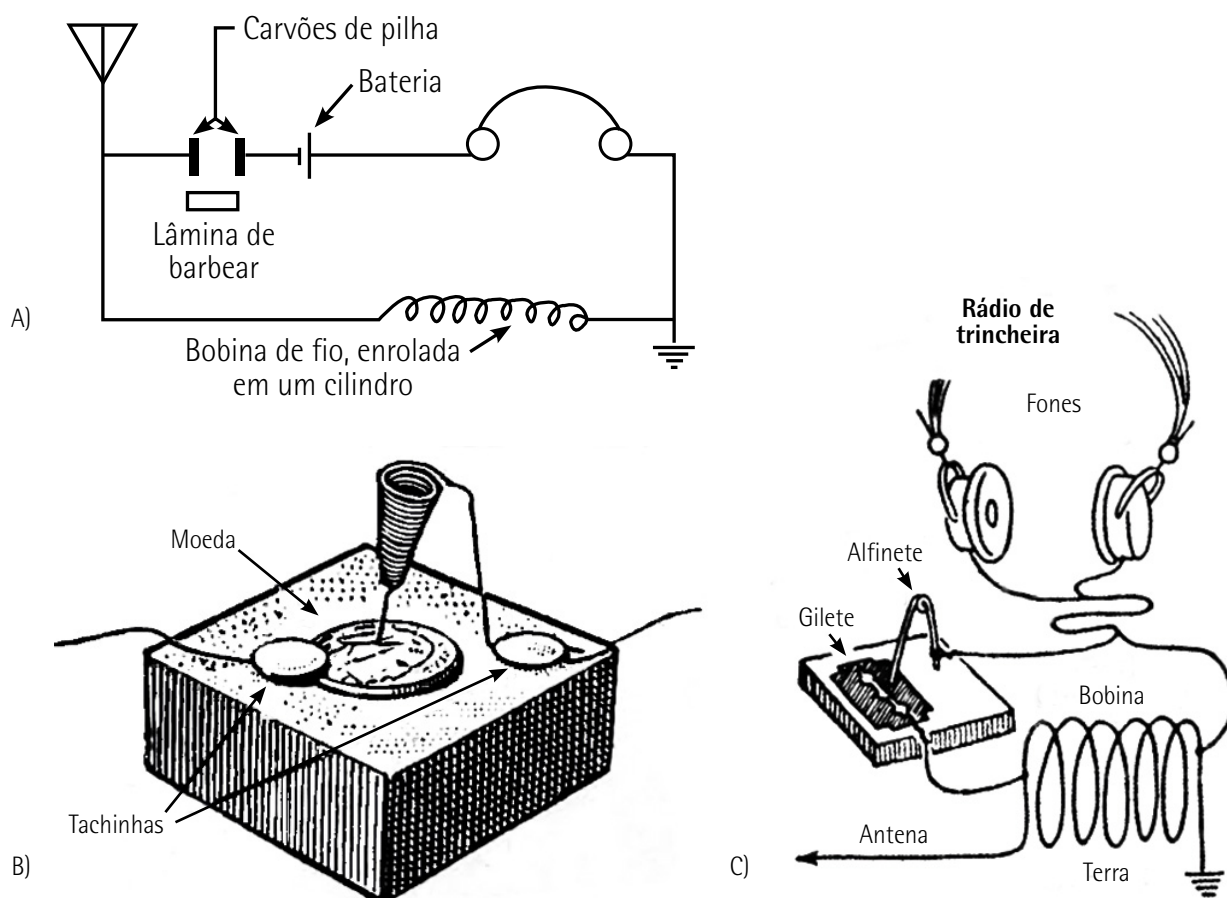


Figura 121 – Diversos tipos de detectores para receptores de rádio feitos com materiais improvisados, como carvões de baterias gastas (esquerda superior), com uma lâmina de barbeador e um alfinete (direita) e com uma moeda de níquel (esquerda inferior)

Adaptada de: Gernsback (1944, p. 730).

### 6.3 Materiais mais utilizados nos diodos modernos

Muito embora aproveitemos das propriedades semicondutoras da galena e da pirita e façamos experimentos com materiais alternativos e fáceis de se obter, o resultado desses diodos experimentais sempre deixa algo a desejar, especialmente nos quesitos de estabilidade e praticidade. Qualquer deslocamento no fio de contato do bigode de gato significa que o ponto de condução deve ser pacientemente ajustado de novo.



Outro ponto negativo é que a resistência intrínseca desses semicondutores não tem um valor certo, variando muito de acordo com a posição do fio no cristal. Por isso, os resultados obtidos podem variar muito, às vezes indo do excelente ao muito ruim, bastando para tanto que a posição do fio de contato sobre a superfície da pedra mude de lugar.

Em decorrência disso, os avanços da eletrônica durante a primeira metade do século XX experimentaram novos tipos de materiais, possibilitando a fabricação de diodos mais confiáveis e que proporcionavam melhores resultados.

A seguir trataremos de alguns dos materiais mais empregados na fabricação atual de diodos.

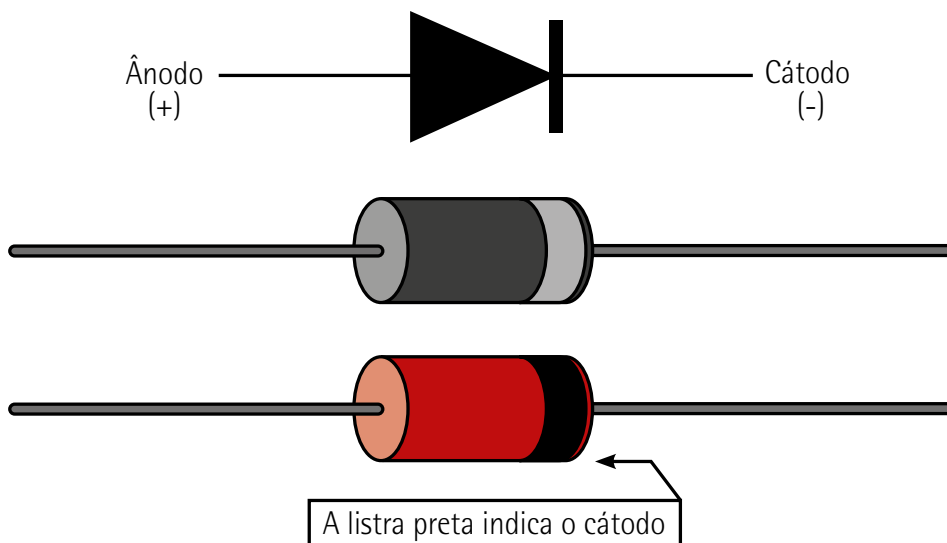


Figura 122 – Aspecto de um diodo moderno, bem como seu símbolo, e identificação de seus terminais de ânodo e cátodo

Adaptada de: <http://tinyurl.com/3y3tpmmc>. Acesso em: 3 jan. 2024.

### 6.3.1 Germânio

O germânio é um elemento químico da tabela periódica, da família dos semimetais. Ele ocorre na natureza em forma de mineral sólido e cristalino, com brilho metálico. Normalmente é obtido pelo processamento de minérios como a germanita, argirodita ou mesmo o carvão mineral, que o contém em baixa quantidade na sua composição. É um elemento químico relativamente raro e de custo elevado, de forma que seu uso já não é tão preferido justamente por esse motivo.

Sua principal vantagem é ter uma resistência elétrica bastante baixa, permitindo que os diodos fabricados com este material tenham uma queda de tensão bem pequena quando polarizados diretamente (em torno de 0,3 V), o que os torna especialmente interessantes em circuitos em que não pode haver muitas perdas.

Esses diodos normalmente são construídos de forma muito similar aos antigos detectores de galena: um pedacinho de germânio é encapsulado dentro de um envelope de vidro, com um finíssimo fio fazendo contato com ele (o que os faz ser chamados de diodos de ponto de contato).

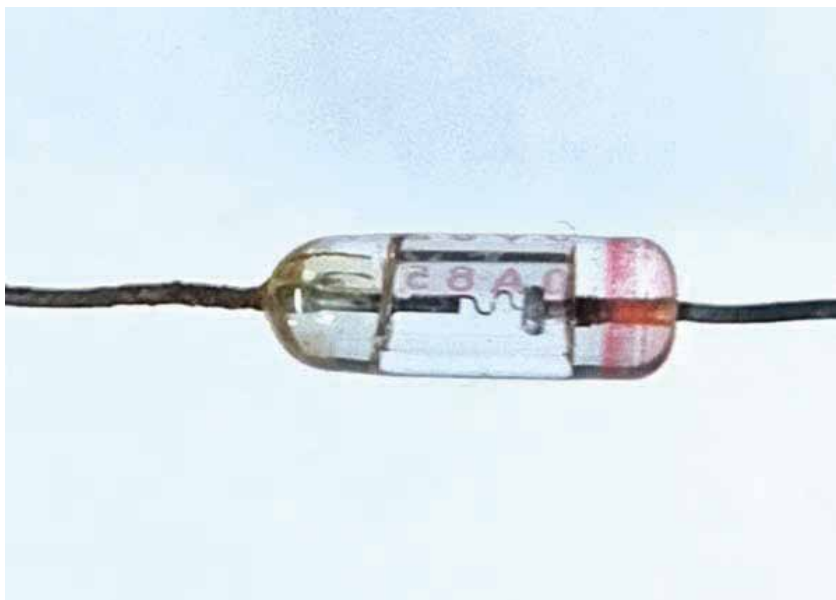


Figura 123 – Diodo tipo OA85, produzido pela Philips. Seu tamanho permite que o fio do ponto de contato com a superfície do germânio seja claramente visível

### 6.3.2 Silício

Diferentemente do germânio, o silício é um elemento químico muito abundante na superfície terrestre, considerado essencial para a vida vegetal e animal. Pode ser obtido pela purificação da areia de sílica, sendo, portanto, muito barato de se produzir em grandes quantidades, razão pela qual é preferido para a fabricação da maior parte dos semicondutores hoje em dia.

O silício, embora mais fácil de obter e mais barato, levou ainda algumas décadas para ser utilizado em dispositivos semicondutores com sucesso, dado que seu processo de purificação era mais complexo que o do germânio.

Os diodos de silício têm uma resistência interna um pouco maior, fazendo com que sua queda de tensão seja também um pouco maior (na faixa de 0,7 V, contra os 0,3 V do germânio, vide a figura 124) – o que, embora pareça ruim à primeira vista, não é um grande problema, uma vez que essa diferença é desprezível para grande parte das aplicações destes diodos, em fontes de alimentação, chaves eletrônicas e circuitos de proteção e chaveamento.

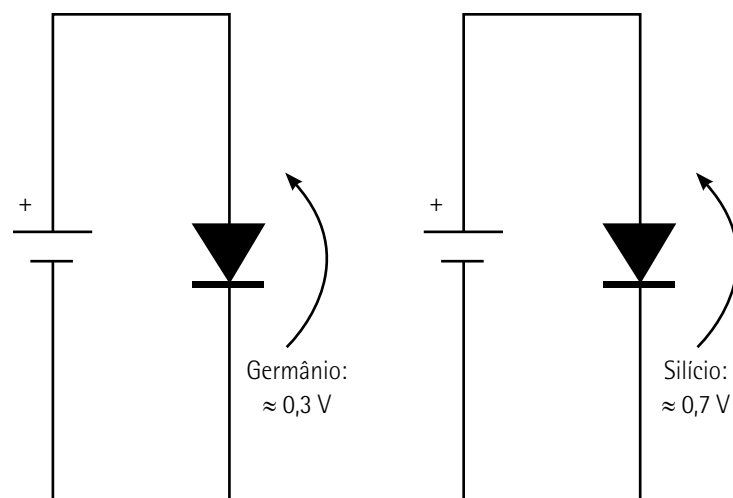


Figura 124 – Queda de tensão em diodos de silício e de germânio

Os diodos de silício são construídos de forma diferente dos diodos de germânio, que é feito pelo método do ponto de contato. Nos de silício são utilizadas duas peças diminutas do mineral purificado, cada um deles dopado (ou simplesmente sujo) com alguma impureza que lhe confira uma carga **positiva** (silício tipo P) ou **negativa** (silício tipo N). Para essa função, são geralmente utilizados o fósforo ou o alumínio. Ao serem fundidas lado a lado, as duas partes formam uma junção semicondutora, (ou simplesmente **junção P-N**), que já apresenta todas as características desejáveis de um diodo, conforme a figura 125. Esse processo dá aos diodos de silício a denominação de **diodos de junção**.

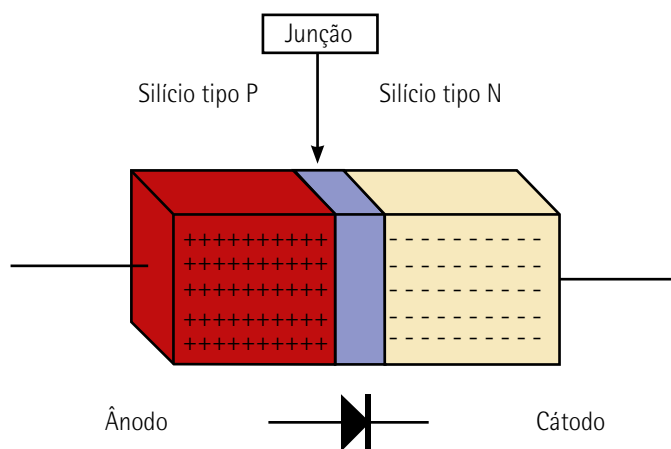


Figura 125 – Aspecto da construção de um diodo de junção

## 6.4 Polarização do diodo

Em um diodo, sua capacidade de operar em regimes de polarização direta e reversa é de particular importância para o funcionamento adequado de diversos dispositivos eletrônicos. A própria configuração da junção P-N estabelece uma barreira de potencial que influencia o comportamento do diodo em diferentes condições.

Quando uma tensão positiva é aplicada ao terminal da junção P do diodo (ânodo), e o terminal N (cátodo) é conectado à terra ou a uma tensão negativa, isso reduz a **barreira de potencial** na junção, permitindo a passagem de corrente elétrica. Nesse regime, **os portadores de carga** (que nada mais são que os elétrons que fluem entre os materiais tipo P e N) são impulsionados em direção à junção, resultando em uma condução no diodo (figura 126).

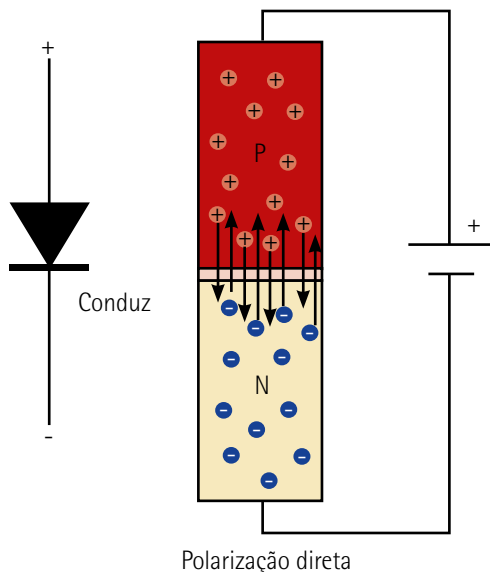


Figura 126 – Diodo polarizado diretamente, conduzindo

Ao contrário, na polarização reversa, uma tensão negativa é aplicada ao terminal da junção tipo P, enquanto o terminal da junção tipo N é mantido a uma tensão positiva. Isso aumenta a barreira de potencial na junção, cessando a passagem da corrente elétrica. Nesse regime, basicamente não há condução alguma no diodo, de forma que ele se comporta como uma chave aberta (figura 127). Por esse motivo, podemos dizer que o diodo apenas conduzirá quando estiver diretamente polarizado.

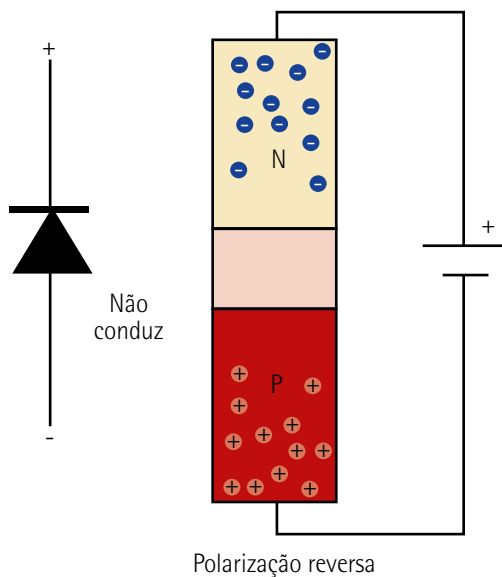


Figura 127 – Diodo polarizado reversamente, sem conduzir

Mas atenção: deve-se tomar cuidado com diodos reversamente polarizados, uma vez que eles têm um limite máximo de tensão aceitável quando funcionam nesse regime de polarização. Se o limite não é respeitado, o diodo pode apresentar uma corrente de fuga elevada e aquecimento, o que pode destruí-lo. Esse fenômeno chama-se **avalanche** (do inglês *breakdown*), e os parâmetros seguros para evitá-lo são específicos para cada tipo de diodo.

### 6.4.1 Queda de tensão no diodo

É sempre possível medir a queda de tensão em um diodo para determinar se ele apresenta alguma avaria, ou de que material é feito (silício ou germânio). Quando polarizado diretamente, com um resistor ligado em série, ele sempre deverá apresentar alguma tensão. Na figura 128, é usado um resistor de 1 k $\Omega$  para limitar a corrente circulante pelo circuito, evitando danos tanto ao diodo quanto à bateria ou à fonte de alimentação.

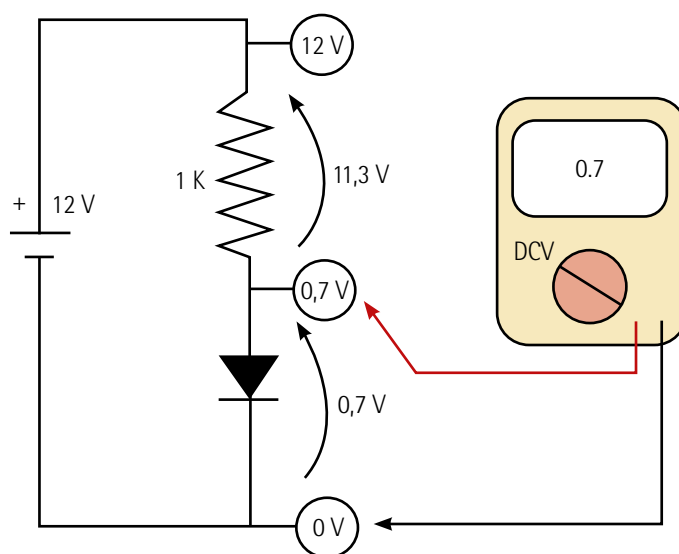


Figura 128 – Medição da queda de tensão em um diodo de silício em boas condições, utilizando um multímetro digital

Para qualquer que seja a tensão da bateria, a queda de tensão sobre o diodo deverá ser sempre em torno dela – neste caso, de aproximadamente 0,7 V, indicando que se trata de um diodo de silício e que está com a junção em boas condições.

Note que todo o restante da tensão (no caso, os 11,3 V que faltam para chegar aos 12 V da bateria) ficarão sobre o resistor de 1 k $\Omega$ .

O mesmo procedimento pode ser feito para testar se a junção semicondutora de um diodo está em curto. Nesse caso, o dispositivo apresentará sobre si uma queda de tensão muito próxima ou igual a 0 volt, mantendo os 12 V da bateria sobre o resistor em série. Da mesma forma, se um diodo polarizado reversamente apresentar condução com queda de tensão tão baixa, isso também indica que o dispositivo está em curto (figura 129).

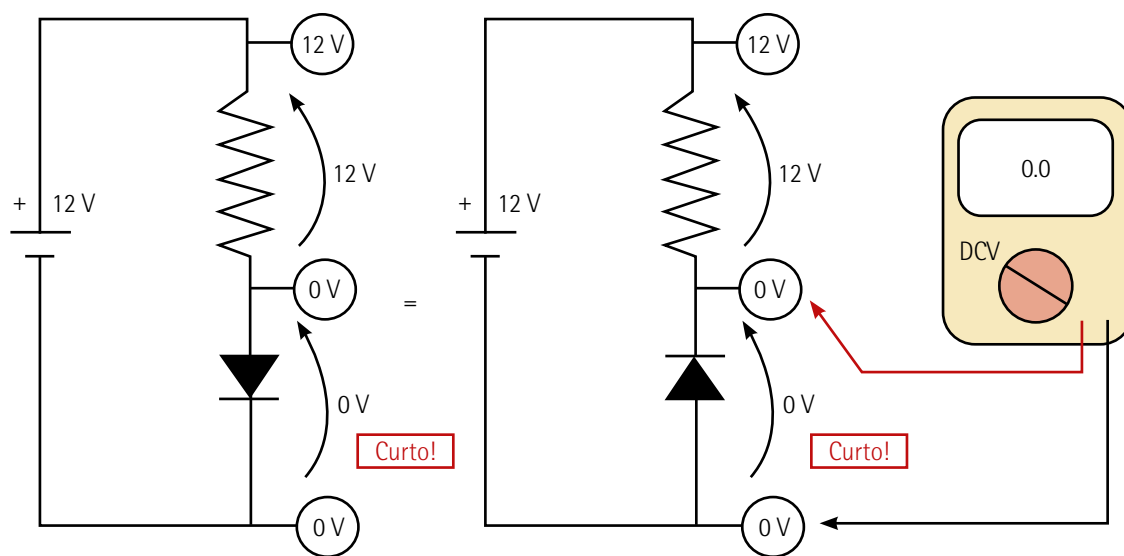


Figura 129 – Medição de um diodo em curto

Não é raro um diodo simplesmente queimar, situação em que não conduzirá nada em qualquer sentido, seja qual for a polarização a ele aplicada. Nessa situação, será sempre medida sobre ele a tensão total da bateria (12 V), ficando 0 V sobre o resistor, indicativo de que não está circulando corrente pelo circuito (vide a figura 130).

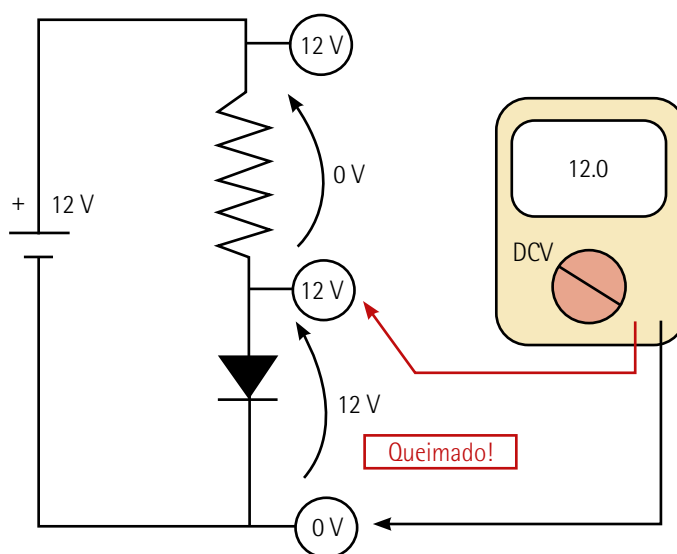


Figura 130 – Um diodo queimado irá sempre apresentar a tensão total da bateria sobre si

A melhor forma de evitar destruir um diodo é sempre ficar atento às suas especificações máximas, especialmente a **tensão máxima em polarização reversa** (identificada como **VR**), a **corrente máxima em polarização direta** (**IF**) e a **potência máxima** (**P<sub>max</sub>**). Todos esses parâmetros são encontrados nas folhas de dados dos diodos, e são específicos para cada tipo. É necessário prestar atenção a eles em todas as situações, em nome de evitar destruir componentes bons. Alguns diodos comuns e seus respectivos parâmetros podem ser conferidos a seguir, na tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de alguns diodos mais comuns

Tipo	Parâmetros		
	VR	IF	Pmax
BA315	5 V	0,1 A	0,35 W
1N4148	75 V	0,15 A	0,5 W
1N4007	700 V	1 A	3 W
1N5060	400 V	1,5 A	1,5 W
1N5408	800 V	3 A	10 W

## 6.5 Principais circuitos com diodos

Dentre as principais aplicações dos diodos nos dias atuais, podemos citar os circuitos retificadores em fontes de alimentação, as portas lógicas – implementadas de forma discreta com a ajuda de resistores, sem o uso de circuitos integrados – e também como chaves eletrônicas.

Muito embora esses circuitos pareçam simples e até rudimentares, conhecê-los e entender seu funcionamento é importante tanto para construir alguma solução rápida para uso na bancada ou no dia a dia, ou para compreender o funcionamento de um circuito maior, para consertá-lo.

A seguir, estudaremos alguns desses arranjos circuitais simples, utilizando diodos e outros poucos componentes externos.

### 6.5.1 Retificadores

O circuito retificador é normalmente utilizado para transformar uma corrente alternada em corrente contínua, como em fontes de alimentação tipo “eliminadores de pilhas”, usadas, por exemplo, para alimentar pequenos aparelhos portáteis pela rede elétrica.

Muito embora o circuito retificador tenha papel de destaque nesse processo de conversão, ele não o faz sozinho, precisando também de um transformador para baixar a tensão da rede elétrica, e de um capacitor de filtro, além do diodo (figura 131).

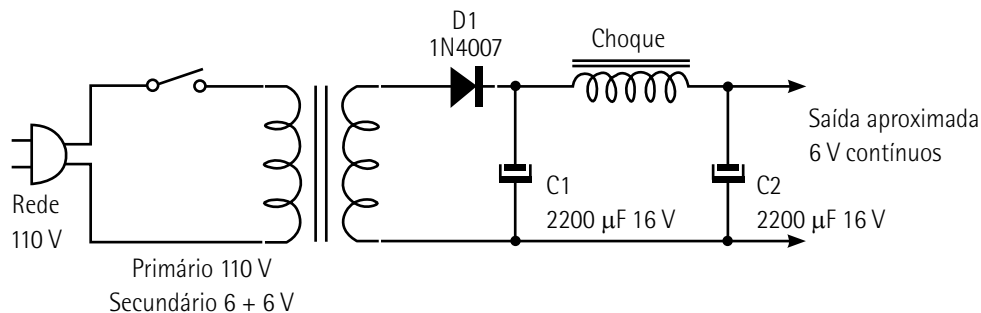


Figura 131 – Fonte de alimentação com retificação por meia-onda

Este circuito, que se utiliza de apenas um diodo retificador, é denominado **meia-onda**, dado que retifica apenas um semiciclo da corrente alternada proveniente do transformador, oferecendo um rendimento modesto e com bastante ondulação residual da frequência da rede elétrica. O processo de retificação pode ser conferido na figura 132.

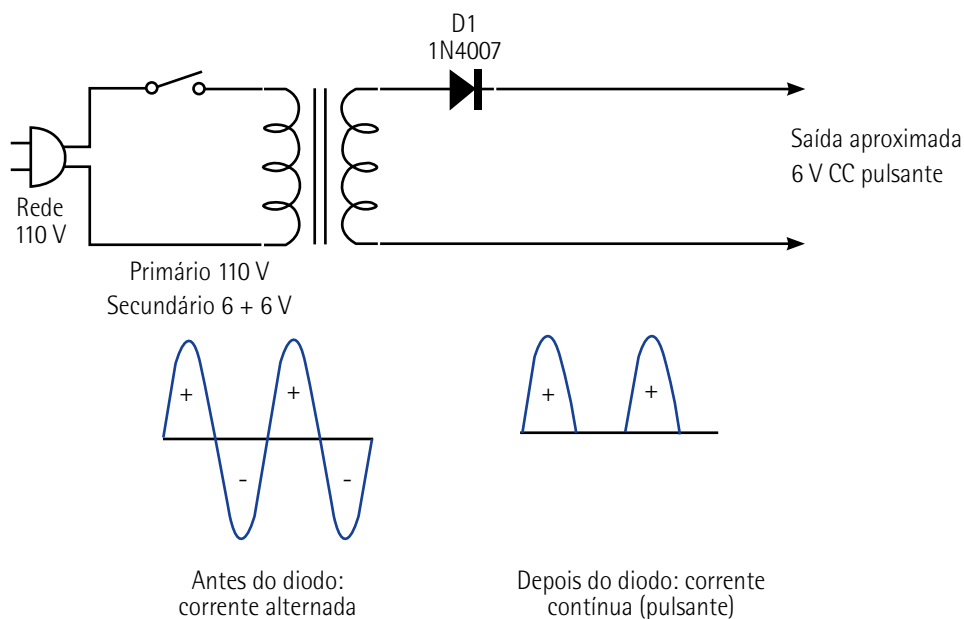


Figura 132 – Saída do retificador, com corrente contínua pulsante

Antes do diodo, a corrente é alternada, apresentando uma excursão completa com dois semiciclos: um positivo e um negativo. Após o diodo, apenas o semiciclo positivo é mantido, uma vez que o componente apenas permitirá a passagem da corrente quando diretamente polarizado. A essa corrente contínua retificada, mas ainda não filtrada, dá-se o nome de **corrente contínua pulsante**, já que ela ainda apresentará uma forte **ondulação** característica dos 60 Hz da rede elétrica, também denominada **ripple**.

Para eliminar a ondulação – que em grande parte das situações impediria a utilização da fonte com circuitos em que a pureza da corrente contínua é desejada, como em um amplificador de áudio (cujo zumbido dos 60 Hz seria a única coisa ouvida no alto-falante, no caso), deve-se utilizar uma boa **filtragem**, usualmente feita com capacitores eletrolíticos de alto valor (no caso, de  $2200\ \mu\text{F} \times 16\text{ V}$ ), e se possível um indutor de choque, de forma a eliminar ainda mais os vestígios do **ripple**, que são bastante proeminentes nesse tipo de retificação (figura 133).



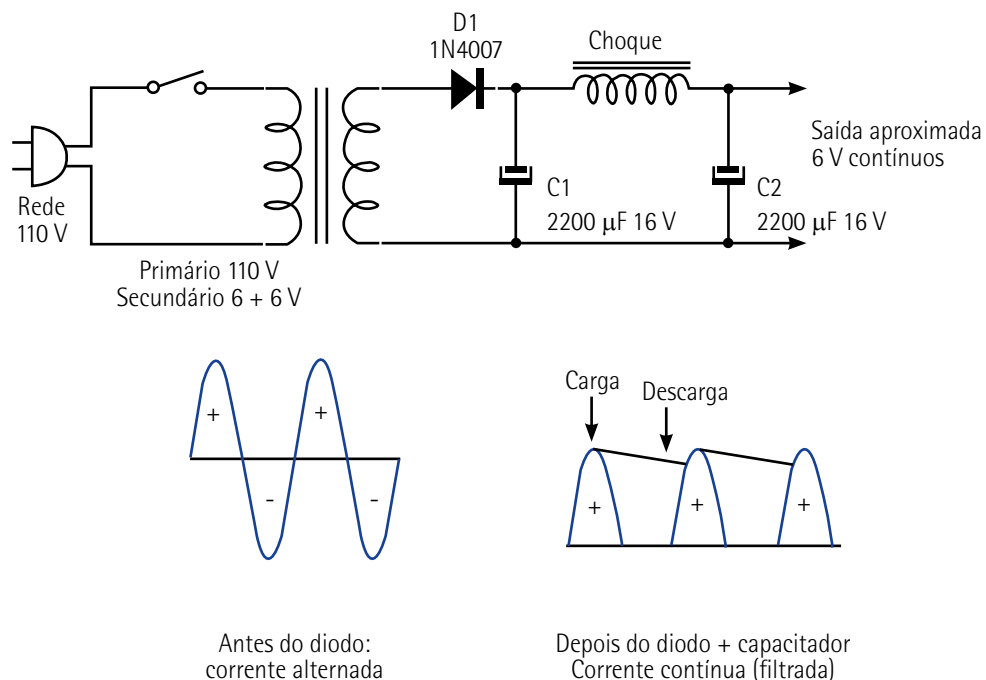


Figura 133 – Fonte completa, com retificador de meia-onda e filtragem, com as formas de onda de entrada e saída

Com a adição dos capacitores e do indutor após o retificador, temos um filtro em  $\pi$ , que eliminará em grande parte o *ripple* proveniente dos 60 Hz da rede. Isso se dá por conta do ciclo de carga e descarga dos capacitores, que se carregarão durante o semiciclo positivo e também pela ação do indutor, alimentando a saída do circuito pelo período que antecederá o próximo semiciclo.

Contudo, o tempo entre um semiciclo e o outro ainda é relativamente longo, de forma que mesmo com uma boa filtragem, a retificação por meia-onda sempre sofrerá com algum *ripple* residual.

É por isso que, para uma performance melhor, são empregadas fontes com retificação de onda completa, um método mais eficaz e que produz melhores resultados – especialmente no que concerne à eficiência e também à menor ondulação *ripple* residual. Um circuito de retificação de onda completa pode ser conferido na figura 134.

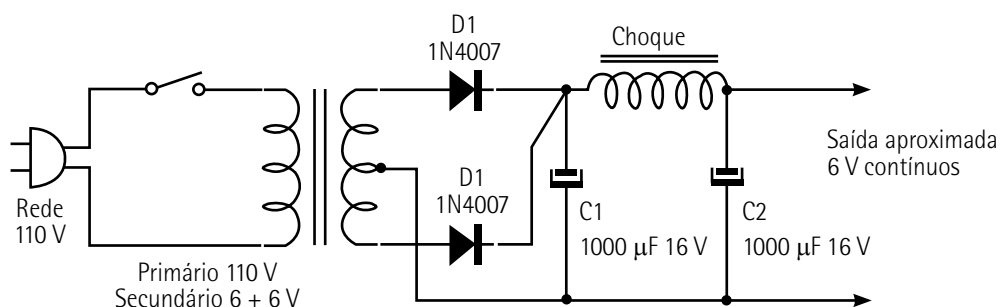


Figura 134 – Emprego da retificação por onda completa em fonte de alimentação

Nesse tipo de circuito, o transformador utilizado difere do de meia-onda por ter um secundário com **center-tap**. Isso permite que se obtenham os semiciclos negativos e positivos **dobrados**, com um pequeno **atraso** entre si, dado pela **fase** das duas metades do secundário do transformador.

Dessa forma, o tempo entre os semiciclos positivos retificados é **menor**, proporcionando mais eficiência no preenchimento entre eles pelos capacitores de filtro. Isso permite não somente usar valores de capacitância menores, mas também que a filtragem seja muito mais eficiente, restando uma ondulação *ripple* muito menor na saída, conforme a figura 135.

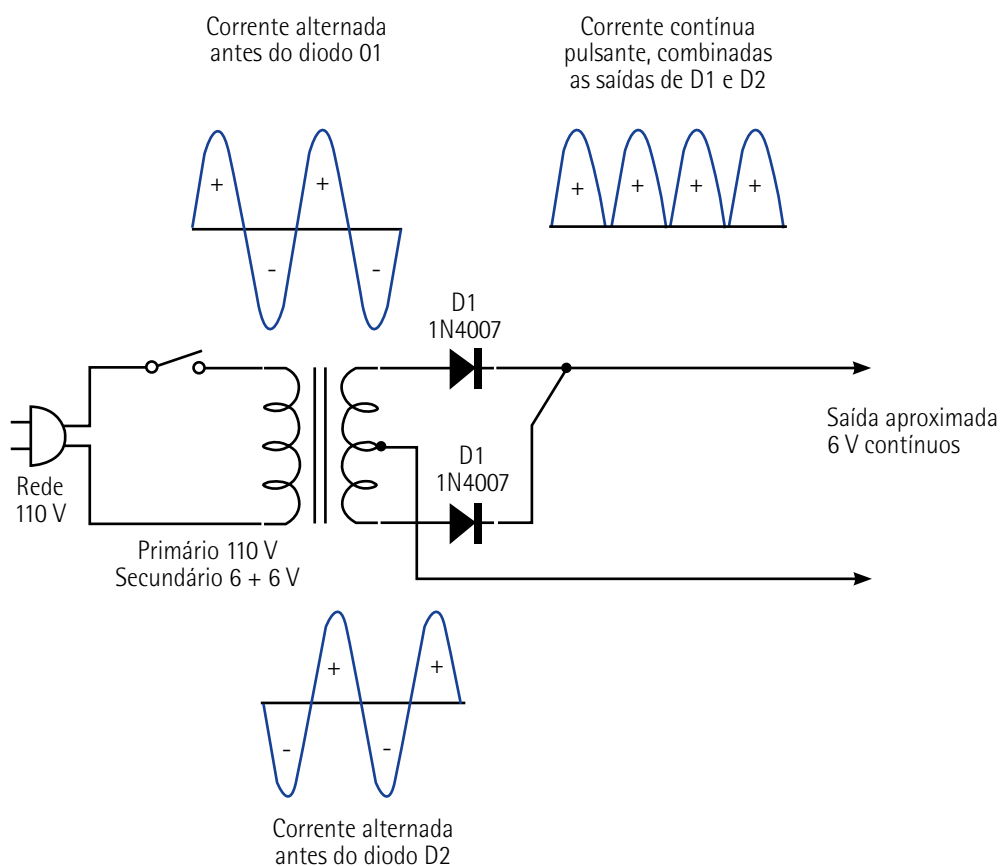


Figura 135 – Retificação por onda completa, e as formas de onda obtidas antes e depois dos diodos

Assim, torna-se muito mais compensador o uso de um transformador com center-tap e um par de diodos para retificação, que se tornou a saída mais adotada por grande parte dos fabricantes já há muitos anos por sua simplicidade, custo e também pelos bons resultados oferecidos.

Alternativamente, o indutor de choque pode ser também substituído por um simples resistor de fio, de baixo custo e potência compatível com o consumo da carga que a fonte vai alimentar – basta que os valores dos capacitores sejam aumentados para compensar a perda da filtragem extra oferecida pelo indutor, conforme configuração apresentada na figura 131 (já com as formas de ondas em cada ponto do circuito e a filtragem).

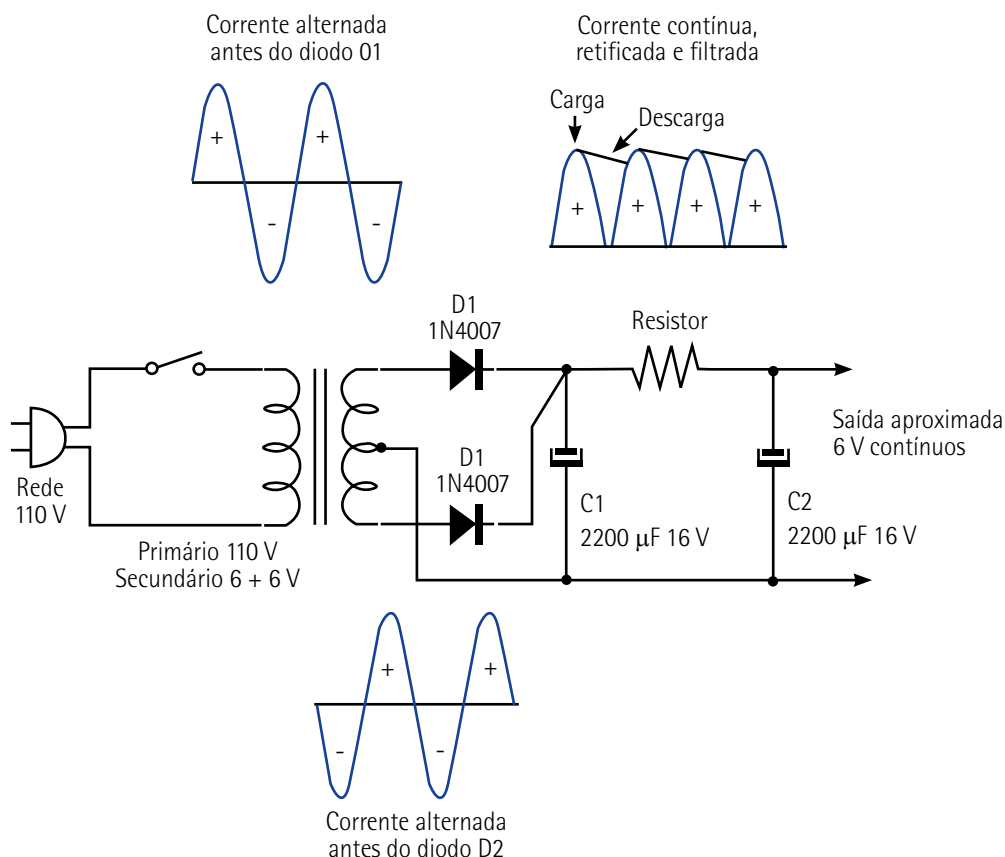


Figura 136 – Formas de onda em um circuito retificador de onda completa, com filtragem

Outro arranjo também bastante utilizado em fontes de alimentação é o chamado **retificador em ponte**. Sua grande vantagem é proporcionar uma retificação em onda completa a partir de um transformador sem center-tap, com secundário simples, do mesmo tipo que os que se destinam aos circuitos de meia-onda, muitas vezes mais baratos e também mais disponíveis no mercado.

Esse tipo de circuito retificador funciona simulando a ação de um center-tap fictício, pelo do uso de uma ponte com quatro diodos idênticos, com seus ânodos e cátodos ligados em uma configuração especial (vide a figura 137).

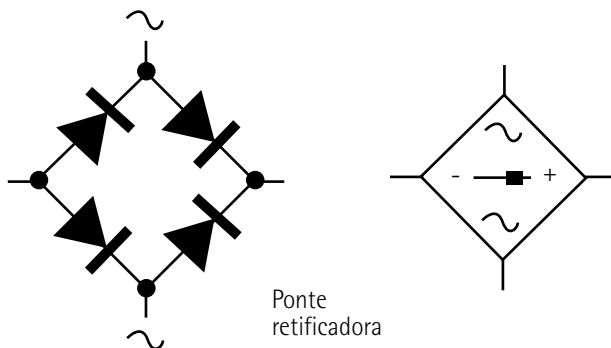


Figura 137 – Duas representações para uma ponte retificadora: com quatro diodos discretos (esquerda) ou integrada (direita). Os pontos das ligações são os mesmos nos dois casos

Estas pontes podem ser feitas tanto a partir de diodos comuns como compradas prontas. No caso da montagem, basta que sejam preferencialmente do mesmo tipo e fabricante, o que minimiza diferenças entre eles e possíveis desequilíbrios decorrentes disso. Os comprados prontos são disponibilizados no mercado e ofertam diversas características de potência, corrente máxima e também tensão reversa, adequados a toda uma série de circuitos diferentes.

O aspecto de algumas pontes retificadoras comerciais já compradas prontas pode ser conferido na figura 138. Observe que, em todas, os terminais de ligação ao transformador, ao positivo e ao negativo já retificados encontram-se bem destacados.

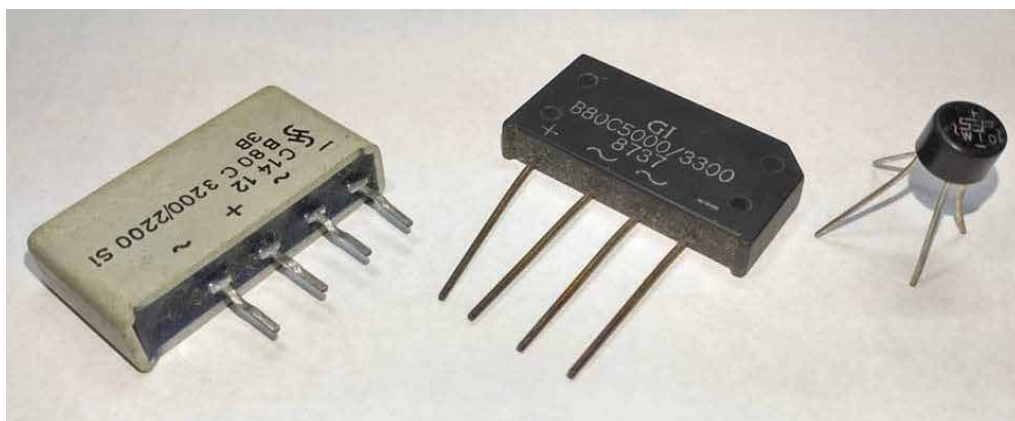


Figura 138 – Pontes retificadoras diversas, para altas correntes (esquerda) e baixas correntes (direita)

O circuito de uma fonte com retificação de onda completa em ponte, já com os capacitores de filtragem, está na figura 139. Observe que os diodos ficam ligados de uma forma muito particular nessa configuração: os extremos do secundário do transformador vão ligados na junção entre o cátodo de D1 e o ânodo de D2, bem como entre o cátodo de D3 e o ânodo de D4.

No ponto de união entre os cátodos de D2 e D4 ficará a saída do positivo da corrente contínua retificada, pronta para ser filtrada pelo capacitor, enquanto na ligação entre os ânodos D1 e D3 será o center-tap fictício a ser ligado ao negativo dos capacitores eletrolíticos e, conseqüentemente, ao terra do circuito.

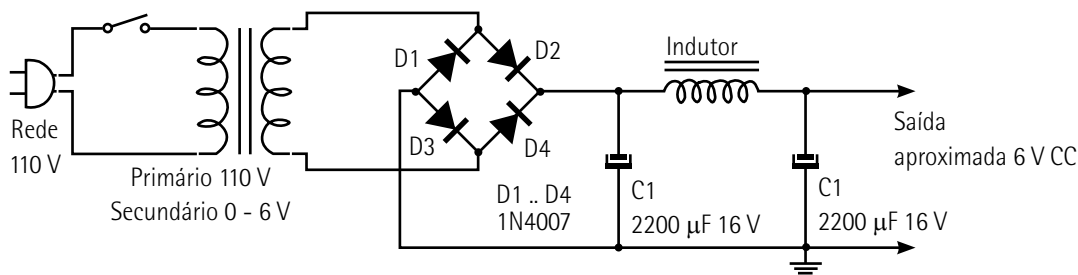


Figura 139 – Circuito de uma fonte de alimentação com retificador em ponte

A forma como a ponte retificadora é ligada garantirá sempre que ao menos dois diodos estejam conduzindo, seja durante um semiciclo positivo ou um negativo, de forma que o tempo entre eles seja idêntico ao oferecido por um retificador de onda completa e transformador com secundário duplo (vide a figura 140).

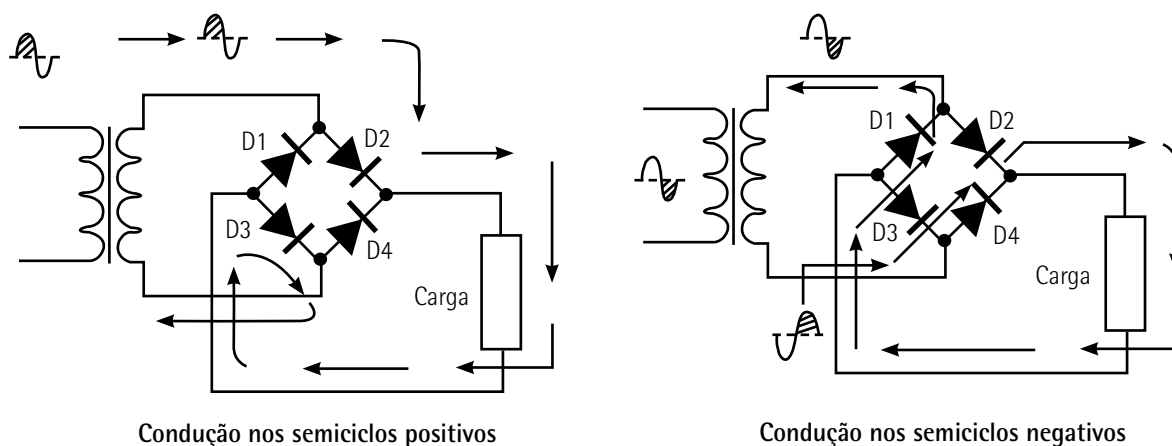


Figura 140 – Condução da ponte retificadora nos semiciclos positivos e negativos

Adaptada de: Braga (2018b).

A única desvantagem oferecida pelo arranjo em ponte é em relação às perdas por queda de tensão dos diodos. Quando utilizamos um retificador em onda completa normal, sempre devemos considerar uma perda de aproximadamente 0,6 ~ 0,7 V em virtude da queda de tensão interna dos diodos de silício.

Como nos retificadores em ponte teremos sempre dois diodos em série em cada semiciclo da corrente alternada retificada, essa queda de tensão passará a ser da ordem de 1,2 ~ 1,4 V, o que impacta levemente a tensão máxima retificada e filtrada que o circuito conseguirá entregar na sua saída.

## 6.5.2 Portas lógicas

Portas lógicas podem ser implementadas de diversas formas diferentes. No passado, para os primeiros computadores, eram construídas com válvulas, relês e mais uma infinidade de componentes diferentes, inclusive lâmpadas neon.

Contudo, com o advento dos diodos de estado sólido e posteriormente dos transistores, tornou-se possível construí-las de forma bem mais simples, com menos partes sujeitas ao desgaste físico (como no caso dos relês) e elétrico (como no caso das válvulas, que enfraquecem com o uso), com soluções muito mais compactas, baratas e mais confiáveis.

Neste tópico abordaremos algumas das portas que podemos construir utilizando esses componentes a título de executar funções lógicas simples, como AND e OR com duas, três e até quatro entradas.

### Portas AND

Nas portas lógicas do tipo AND, há apenas uma saída verdadeira (ou com nível lógico alto, ou 1) quando todas as entradas encontram-se também em nível lógico alto, vide tabela-verdade na tabela 5.

**Tabela 5 – Tabela-verdade para uma porta lógica do tipo AND, com duas entradas**

Entrada A	Entrada B	Saída
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Qualquer circuito que seja capaz de executar uma função AND deverá apresentar um nível alto na sua saída apenas quando ambas as entradas também estiverem em nível alto. Uma forma de implementar uma porta do tipo com duas entradas utilizando diodos é demonstrada na figura 141.

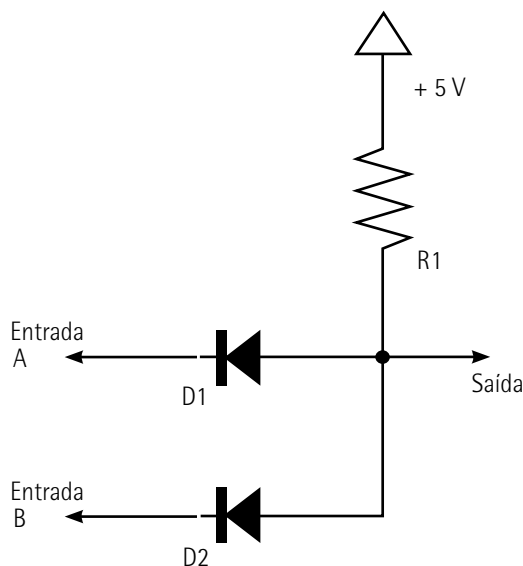


Figura 141 – Porta AND com duas entradas, utilizando diodos

Para compreender o funcionamento desse arranjo circuitual, consideremos que um nível alto é igual a 5 V, aplicado a cada uma das entradas e medido na saída, e que um nível baixo será qualquer valor menor ou igual 0,7 V, também em qualquer uma das entradas ou saída – valor que explicaremos logo adiante.

Assim, se ambas as entradas se encontram em nível baixo (0 V), uma corrente circulará pelo circuito vindo da alimentação de 5 V, produzindo uma queda de tensão no resistor R1 e sendo desviada para os 0 V através de D1 e D2, que estarão diretamente polarizados. Logo, a saída apresentará apenas a queda

de tensão sobre os diodos, que não será maior que 0,7 V (caso sejam diodos de silício), podendo então considerá-la em nível baixo (figura 142).

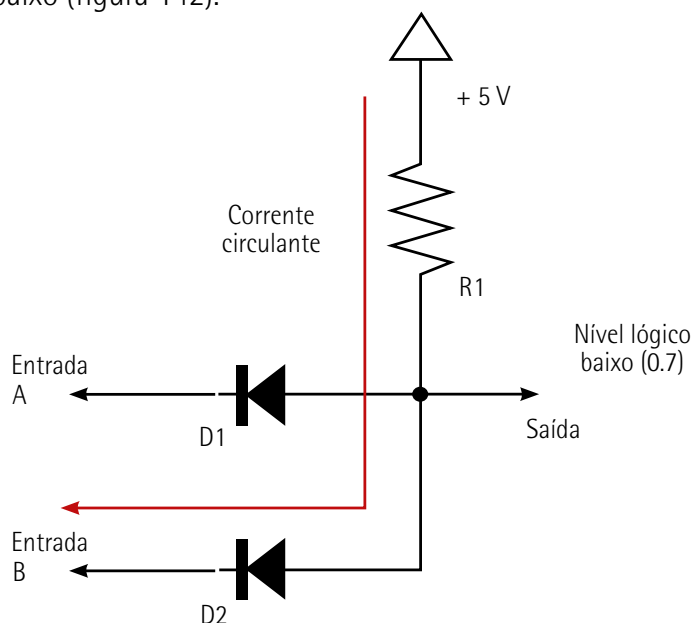


Figura 142 – Porta lógica AND com saída em nível baixo

Ao aplicar um nível lógico alto (5 V) em qualquer uma das entradas – por exemplo, na entrada A – o diodo D1 não estará mais polarizado diretamente, e não fluirá corrente alguma por dele. Contudo, como a entrada B ainda continua em nível baixo (0 V), e o diodo D2 ainda segue polarizado diretamente, isso faz com que na saída ainda se apresente um nível lógico baixo (0,7 V), conforme a figura 143.

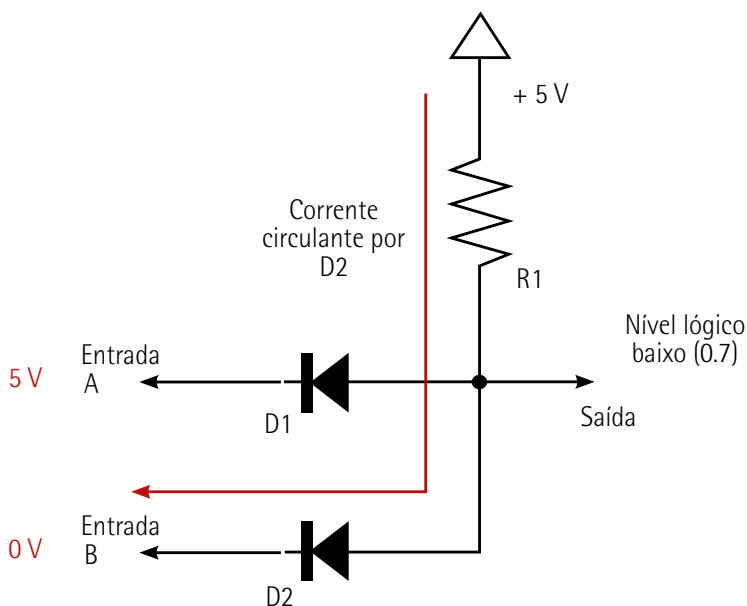


Figura 143 – Porta lógica AND com apenas uma entrada em nível alto, e saída em nível alto



Caso ambas as entradas A e B estejam em nível alto, não haverá corrente circulando através de D1 e D2, estando ambos despolarizados – uma vez que não haverá diferença de potencial suficiente para que conduzam, dado que tanto ânodo quanto cátodo estarão no mesmo potencial elétrico. Nesse caso, os 5 V da alimentação estarão então presentes na saída do circuito, perfazendo uma situação em que o nível lógico estará alto (vide a figura 144).

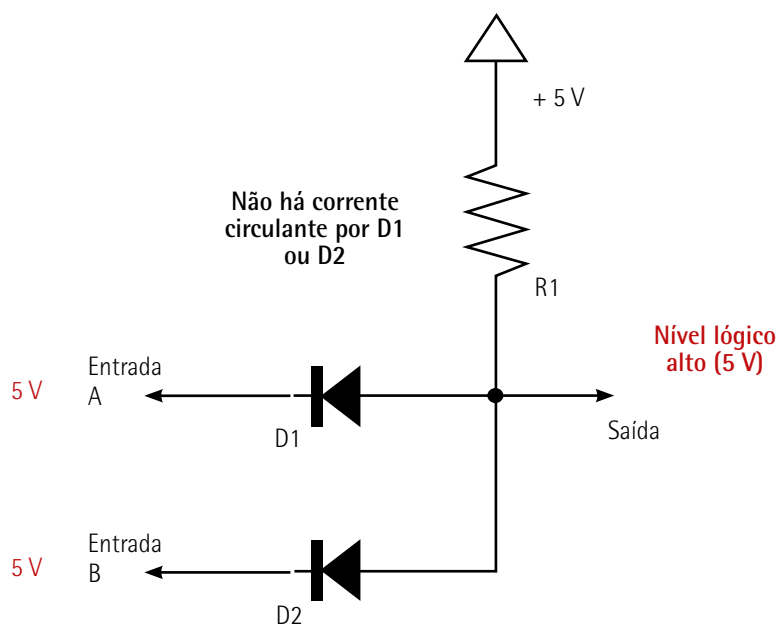


Figura 144 – Porta lógica AND com ambas as entradas em nível lógico alto e a saída em nível lógico alto

### Portas OR

De forma semelhante, podem ser implementadas portas lógicas do tipo OR utilizando-se uma configuração muito similar. Nas portas OR, basta que tenhamos um nível alto (5 V) em qualquer uma das entradas para que a saída esteja também em nível alto. Ela ficará em nível baixo apenas quando ambas as entradas também estiverem em nível baixo, conforme tabela-verdade apresentada na tabela 6.

**Tabela 6 – Tabela-verdade para uma porta lógica do tipo OR, com duas entradas**

Entrada A	Entrada B	Saída
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Nesse caso, a alimentação de 5 V pode ser dispensada, mas o resistor precisará conectar-se à linha de 0 V (ou terra) do circuito para que a corrente tenha por onde circular, conforme a figura 145.

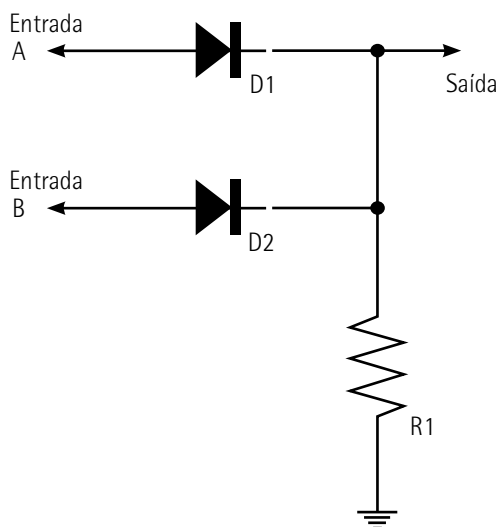


Figura 145 – Porta lógica OR com duas entradas, implementada com diodos

Caso ambas as entradas do exemplo se encontrem em nível baixo (0 V), não haverá corrente alguma circulando pelo circuito, de forma que ambos os diodos estarão despolarizados e não haverá queda de tensão sobre o resistor, estando a saída também em nível baixo, apresentando um valor de tensão de 0 V (figura 146).

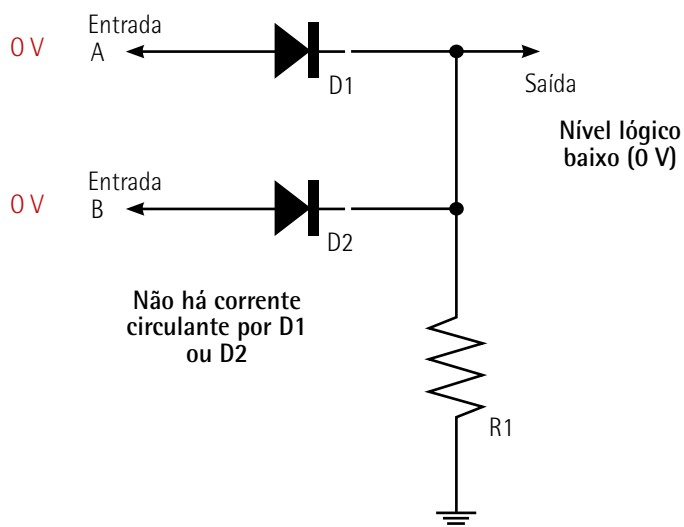


Figura 146 – Porta lógica OR com ambas as entradas e a saída em nível baixo

Caso qualquer uma das entradas (A ou B) seja posta em um nível lógico alto, o diodo respectivo (D1 ou D2) será forçado a conduzir, entrando em polarização direta e estabelecendo uma corrente que será desviada para a terra pelo resistor R1, produzindo sobre ele uma queda de tensão. Essa queda de tensão, que será equivalente ao nível lógico (5 V) menos a queda de tensão do diodo, irá perfazer um nível alto na saída da porta lógica, com um valor de aproximadamente 4,7 V, conforme a figura 147.

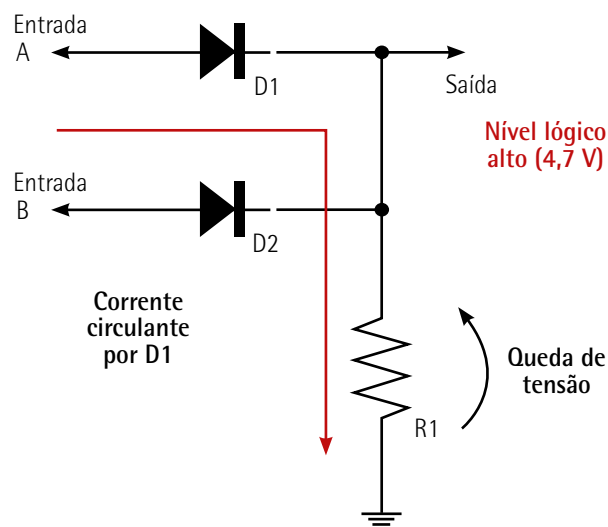


Figura 147 – Porta lógica OR com duas entradas, estando uma delas em nível alto

Da mesma forma, se ambas as entradas forem colocadas em nível lógico alto, a saída também ficará alta, apresentando a mesma tensão de 4,7 V, conforme a figura 148.

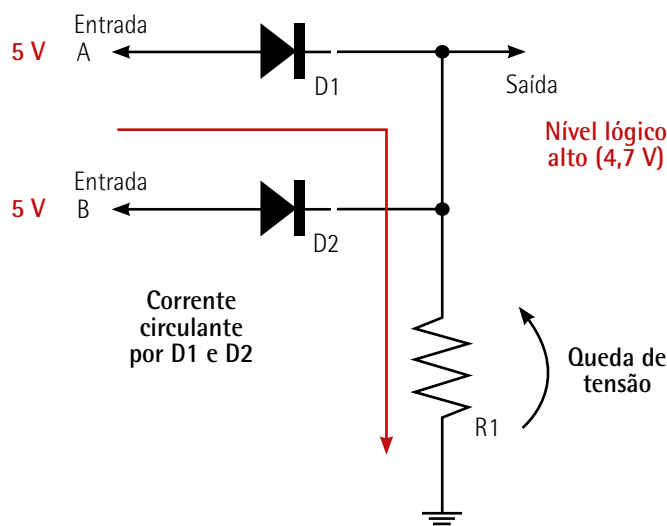


Figura 148 – Porta lógica OR com duas entradas, estando ambas em nível alto

Com o mesmo grau de facilidade, mais entradas podem ser adicionadas a uma porta lógica construída com diodos: basta que os diodos correspondentes sejam instalados às entradas que serão adicionadas (figura 149). Esses tipos de circuitos lógicos, dotados unicamente de diodos e resistores, são chamados de **RDL** (*resistor-diode logic*), ou simplesmente **lógica diodo-resistor**.

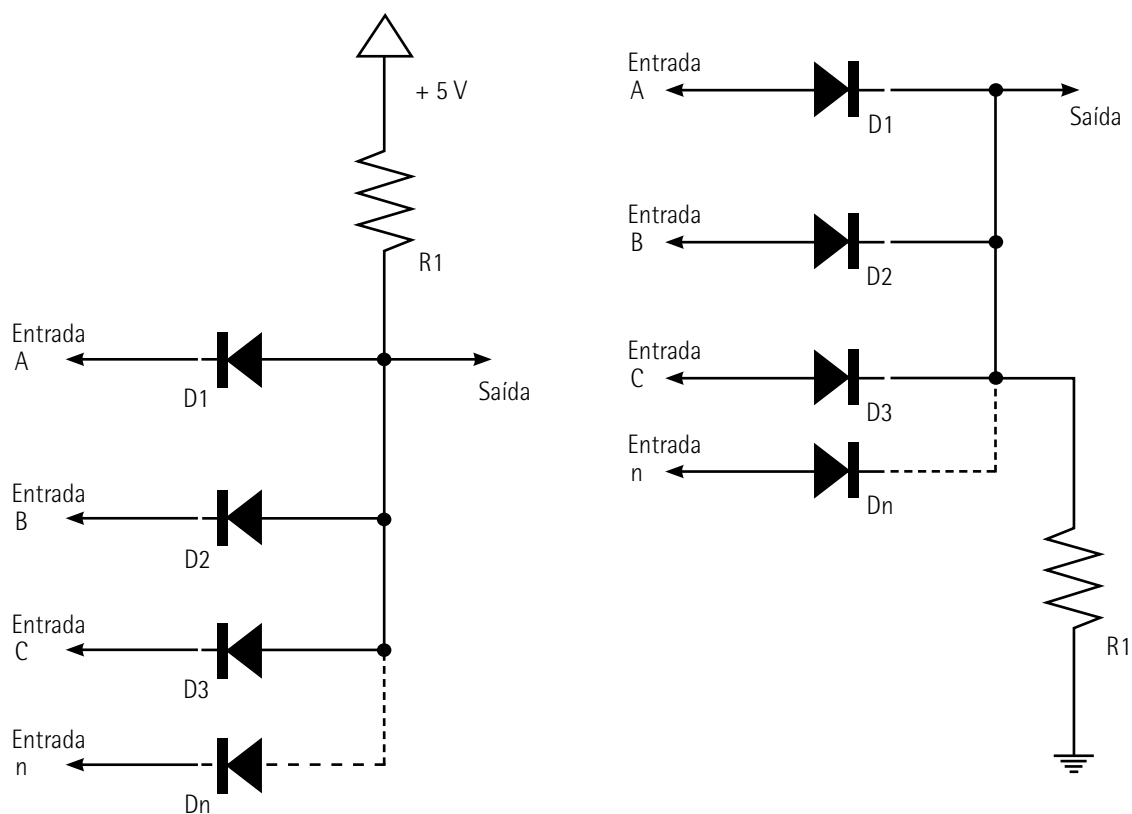


Figura 149 – Portas lógicas AND (esquerda) e OR (direita), com múltiplas entradas

Tamanho flexibilidade é um dos fatores que ainda confere a esse tipo de circuito de porta lógica rudimentar bastante aceitação entre projetistas e entusiastas – mesmo nos dias de hoje, em que a oferta de circuitos integrados com portas que executam funções mais complexas (NAND, NOR, XNOR, XOR etc.) é muito grande.

Contudo, uma desvantagem desse tipo de porta lógica se dá justamente pelo seu excesso de simplicidade, uma vez que as quedas de tensão oferecidas pelos diodos e resistores roubam parte dos níveis lógicos, impedindo que estes sejam de 0 V na saída quando em nível baixo (como no caso da porta AND) e que não cheguem a 5 V (como no caso da porta OR). Em adição a isso, os requisitos de corrente e potência dissipada para tais portas aumentam consideravelmente à medida que novas entradas são adicionadas, de forma que esse tipo de circuito lógico convém ser dimensionado sempre com cautela.

Uma alternativa que pode melhorar a performance deles é o uso de circuitos transistorizados para amplificar a saída da porta lógica, recuperando as tensões perdidas nos diodos e nos resistores (vide a figura 150). Essa é uma alternativa bem aceita pelos experimentadores da eletrônica digital, e a ele foi dado o nome de **buffer**.

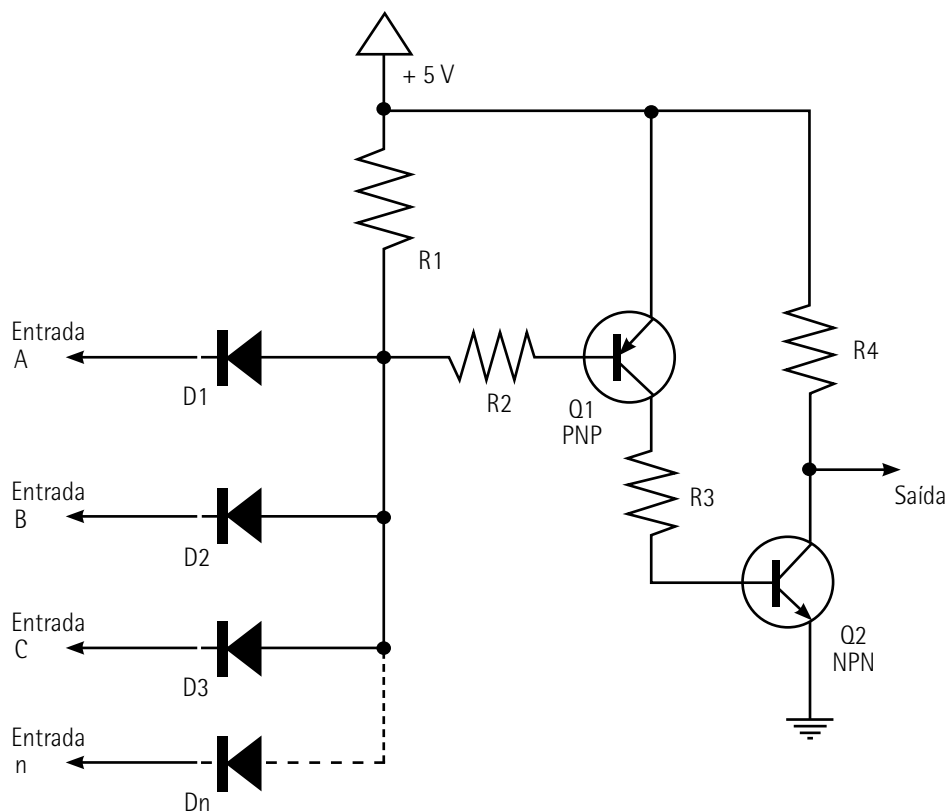


Figura 150 – Porta lógica AND com diversas entradas, feita com diodos e dotada de um amplificador buffer na saída, com dois transistores

### 6.6 Tipos especiais de diodos

Durante o transcorrer desta unidade, falamos sobre os diodos de estado sólido, abordando os dois tipos principais: os **diodos retificadores** de uso geral, como os utilizados nas fontes de alimentação com retificação por meia-onda, onda completa ou em ponte que estudamos em detalhes, e os **diodos de sinal**, cujas capacidades de corrente e potência são menores, sendo mais adequados para a detecção de sinais de rádio e a implementação de portas lógicas, conforme vimos no último tópico.

Eles não são, contudo, os únicos tipos de diodos existentes. Há uma infinidade deles para conhecer, especialmente os utilizados em aplicações mais específicas e que, muitas vezes, não sabemos muito bem o que fazem ou como trabalham. Por esse motivo, neste capítulo falaremos de alguns diodos especiais e suas principais aplicações e princípios de funcionamento.

#### 6.6.1 Diodos zener

Os diodos tipo zener são uma classe de componentes eletrônicos que se destinam à regulação e estabilização de tensões elétricas em circuitos com exigências a respeito dos valores das tensões presentes.

Um diodo comum, quando polarizado diretamente, apresentará sempre a mesma queda de tensão: cerca de 0,3 V se for de germânio e 0,7 V se for de silício. Quando polarizados reversamente, eles não irão conduzir, e sobre o componente será medida a mesma tensão da fonte de alimentação, o que significa que o componente em questão está se comportando como uma chave aberta. Caso a tensão da fonte seja muito aumentada, o diodo comum pode entrar em avalanche, situação em que conduzirá corrente em excesso e acabará destruído.

Contudo, os diodos tipo zener dispõem de uma interessante propriedade que permite a eles conduzirem seguramente quando em polarização reversa, travados em uma queda de tensão previamente determinada pelo fabricante.

Em razão disso, esses diodos podem ser utilizados, por exemplo, como referências precisas para tensões em fontes estabilizadas. O símbolo de um diodo zener pode ser visto na figura 151, e seu aspecto físico em pouco ou nada difere de um diodo comum, tornando fácil confundir os dois tipos.

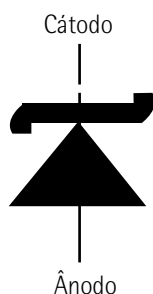


Figura 151 – Símbolo de um diodo zener

Uma forma bastante simples de extrair a tensão de referência de um diodo do tipo zener pode ser vista na figura 152, em que a tensão proveniente de uma bateria de 12 V polariza o dispositivo através de um resistor de 1 K. Assim, o diodo terá sobre si sua tensão nominal (no caso, 9,1 V), ficando sobre o resistor toda a tensão restante (no caso, 2,9 V). Portanto, é possível obter no ponto médio entre os dois essa tensão, que, por sua precisão, pode-se dizer que é estabilizada.

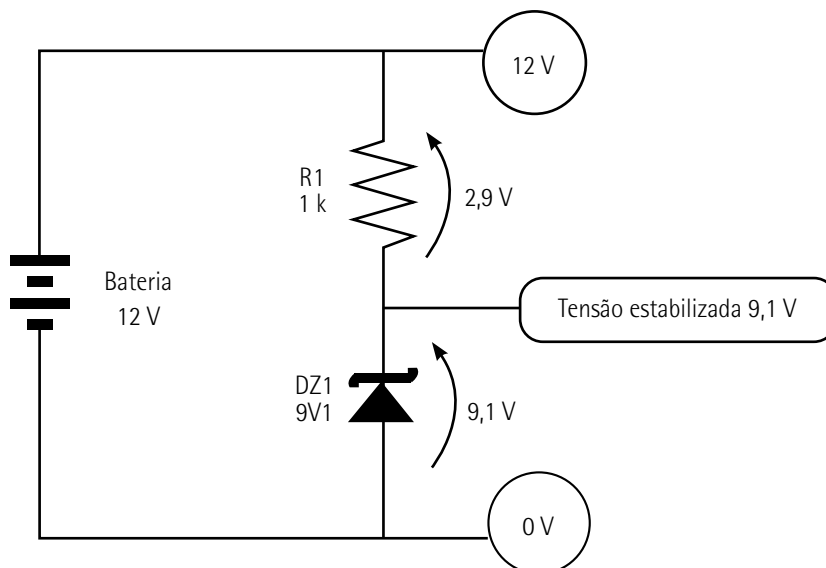


Figura 152 – Arranjo com um diodo zener para obter uma tensão estabilizada

Os diodos zener podem funcionar com toda uma infinidade de valores de tensão, usualmente indo desde 2,7 V até mais de 200 V. Um fator importante é em relação à potência que um diodo zener pode dissipar, ressaltando que o valor adequado deve ser escolhido de acordo com o produto da tensão multiplicado pela corrente que atravessará o componente quando polarizado – o que depende da aplicação escolhida.

Usualmente, os zener são encontrados em potências que vão de 0,5 até 5 W, muito embora existam componentes aptos a dissipações maiores – o que leva seu tamanho físico e robustez a serem adaptados para melhor se adequarem a esses regimes de operação, diferentemente dos diodos de menor potência.

Junto de outros componentes (como um transformador, diodos retificadores, capacitores de filtragem e um transistor regulador), o diodo zener pode servir como base para a construção de uma fonte de tensão regulada fixa com precisão bastante aceitável (vide a figura 153).

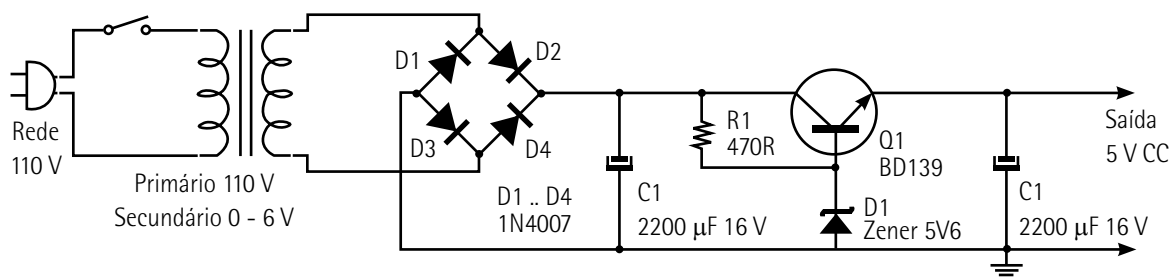


Figura 153 – Exemplo de circuito de uma fonte de alimentação regulada com diodo zener

Com um diodo zener de 5,6 V (muitas vezes simplesmente denominado 5V6, para melhor visualização), a tensão apresentada na saída será de 5 volts. Isso se deve à queda de tensão da junção base-emissor do transistor, que irá subtrair aproximadamente 0,6 V da tensão regulada pelo diodo, que será compensada pelo ajuste da tensão dele.

### 6.6.2 Diodo zener ajustável

Muitas vezes nos deparamos com situações em que precisamos de alguma tensão regulada que não está disponível nos diodos zener convencionais.

Embora a associação desses componentes em série seja possível, oferecendo tensões mais altas ou com valores específicos, a saída muitas vezes não é muito prática, nem apresenta um visual muito limpo ao ser implementada (vide a figura 154). Dessa forma, um diodo zener ajustável pode ser de grande auxílio em aplicações específicas em que busca-se um resultado limpo e que permita ajustes fáceis.

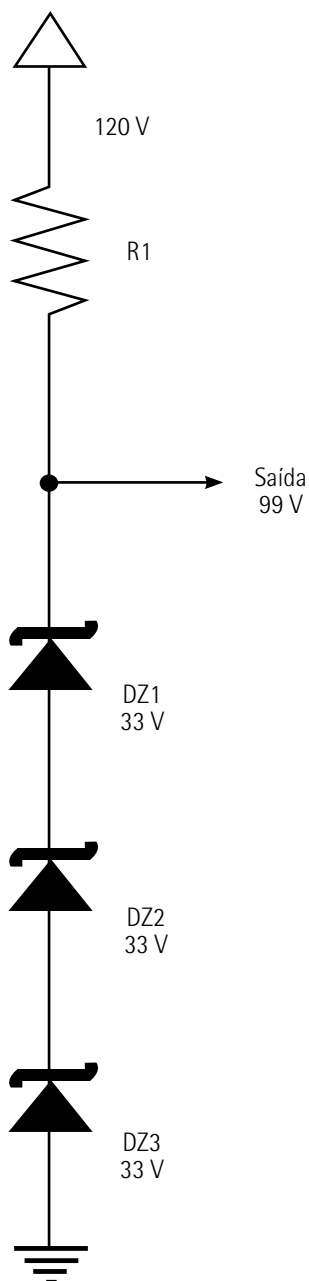


Figura 154 – Associação de três diodos zener de 33 V em série, produzindo uma tensão de 99 V na saída a partir de uma entrada de 120 V

No caso, o componente em questão – identificado pelo código TL431 (ou ainda LM431 ou KA431, dependendo do fabricante) – não é necessariamente um diodo zener, mas sim um conjunto de componentes discretos (transistores, resistores e capacitores), arranjado e encapsulado dentro de um invólucro com três terminais, e que se comporta como um diodo zener comum, mas com o adicional de dispor de um terceiro terminal para o ajuste de sua queda de tensão, além do ânodo e do cátodo (figura 155). Por isso, esse dispositivo pode ser considerado um **circuito integrado**.



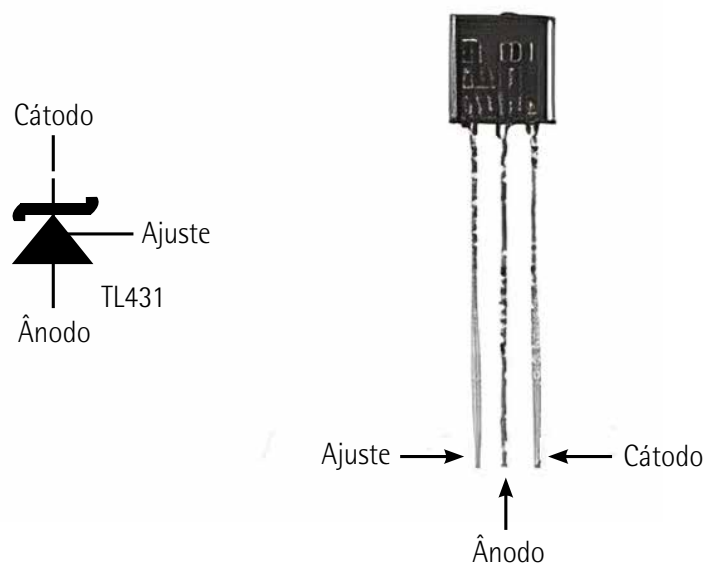


Figura 155 – Símbolo, aspecto externo e pinagem do TL431

Sua aplicação em um circuito regulador de forma semelhante a de um diodo zener comum pode ser feita utilizando um arranjo com um resistor limitador e um potenciômetro para ajuste variável da tensão de zener, conforme a figura 156.

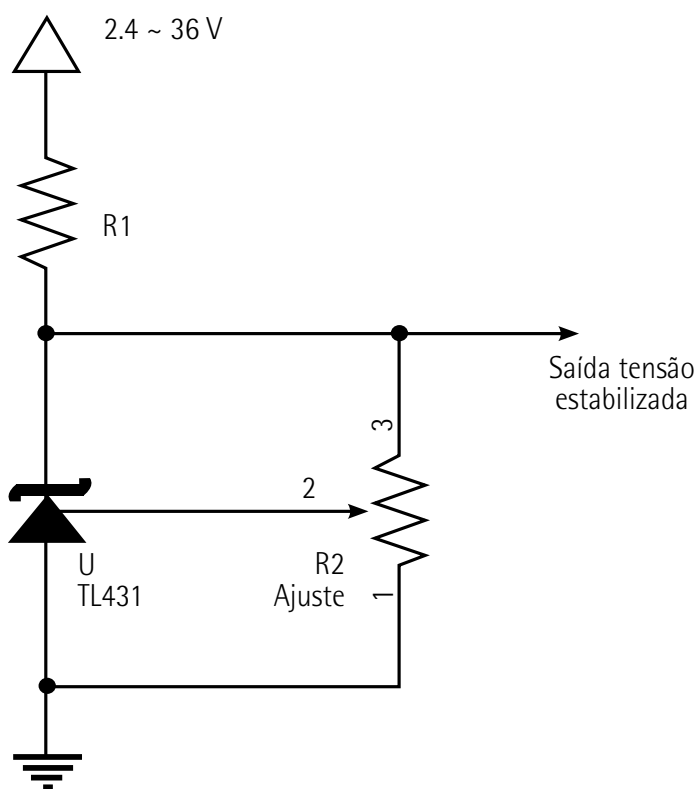


Figura 156 – Utilização do TL431 como regulador contínuo, com ajuste por potenciômetro

Contudo, o TL431 não suporta grandes tensões, podendo regular no máximo 36 V sob uma corrente não maior que 100 mA, de forma que, ao trabalhar acima desses patamares, um regulador transistorizado deverá ser utilizado, de forma semelhante ao arranjo feito com o diodo zener convencional (vide a figura 157).

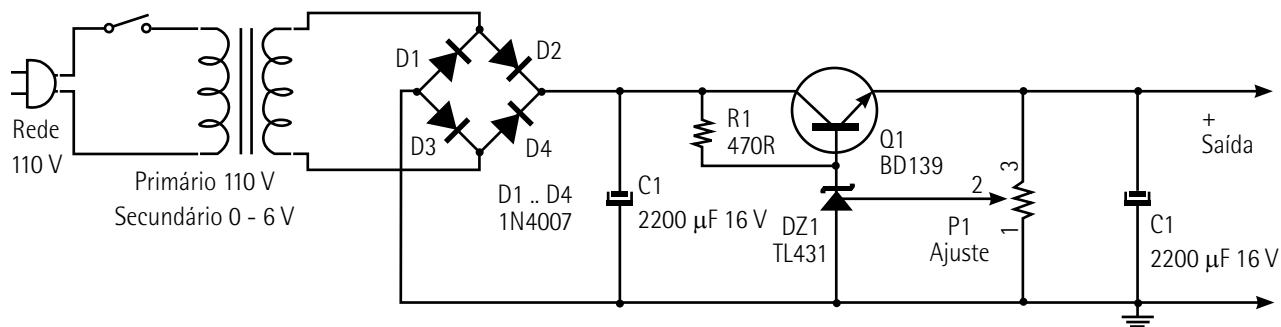


Figura 157 – Fonte com ajuste de tensão ajustável, baseada no regulador TL431 e em um transistor. A tensão pode ser variada mediante giro do eixo do potenciômetro P1

## 6.6.3 Diodos varicap

Via de regra, todo diodo (à exceção do zener) não conduzirá quando polarizado reversamente – e por isso pode-se dizer que ele se comportará como uma chave aberta, por não permitir a passagem de corrente elétrica. Contudo, ao ter uma junção formada por dois pedaços de material semicondutor que estão bem próximos, teremos algo equivalente a um capacitor de valor bem baixo.

A capacitância oferecida por um diodo em polarização reversa pode ser aproveitada em determinados circuitos, como os de controles de sintonia automático de televisores e equipamentos de rádio.

Essa propriedade, embora inerente a qualquer diodo comum, é explorada em alguns circuitos destinados a simular a função dos capacitores variáveis, em que, pela variação da tensão aplicada sobre um diodo especial polarizado reversamente – denominado **varicap** – é possível variar sua capacitância.

Observe que, no circuito, o potenciômetro permite variar a tensão aplicada sobre a junção do diodo que está polarizado reversamente, variando também sua capacitância. O capacitor fixo, de 100 nF, atua isolando a corrente contínua presente sobre o diodo, fazendo com que o circuito conectado ao arranjo apenas enxergue a capacitância do diodo (figura 158).

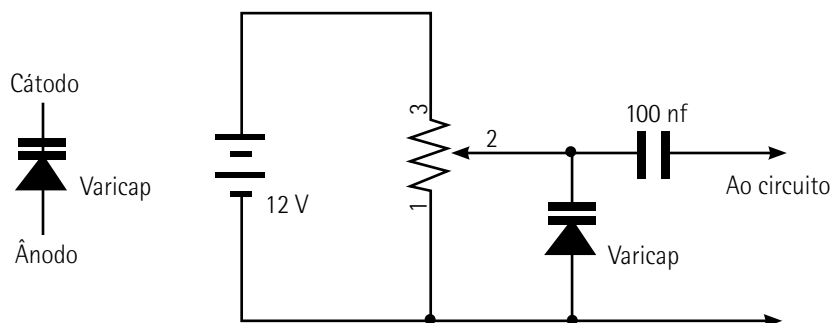


Figura 158 – Simbologia e utilização do diodo varicap

Os varicaps normalmente toleram tensões que vão até os 30 ou 50 V em polarização reversa, oferecendo capacitâncias que vão de 50 a 500 pF. Confira os tipos mais comuns na tabela 7.

**Tabela 7 – Tipos principais de diodos varicap e seus respectivos parâmetros**

Tipo	Tensão máxima	Capacitância máxima
MVAM108	12 V	560 pF
MVAM109	15 V	520 pF
BB104	32 V	36 pF
BB809	30 V	46 pF

Na prática, qualquer diodo comum pode ser utilizado como um varicap. Porém, é necessário tomar os devidos cuidados em relação às tensões máximas de polarização reversa deles. Podem ser usados diodos retificadores (como o 1N4007) ou até mesmo LEDs difusos de 3 mm – lembrando que seu funcionamento não é otimizado para esse tipo de aplicação, e portanto os resultados obtidos podem ser pouco eficazes.

### 6.6.4 Diodos schottky

Os diodos de barreira schottky são um tipo de diodo de silício destinado a aplicações específicas, quando baixas tensões de polarização são desejadas. Seu nome é uma homenagem ao físico alemão Walter H. Schottky, pesquisador responsável por diversas pesquisas que pavimentaram o caminho para o desenvolvimento dos semicondutores modernos ainda no início do século XX.

Diferentemente dos diodos de junção convencionais, estes componentes têm uma estrutura interna que lembra um pouco os diodos de germânio, cuja junção não é composta de um "sanduíche" feito com dois pedaços de silício tipo P e tipo N, mas sim por uma junção entre o material semicondutor e algum metal.

No caso dos diodos schottky, usa-se, em conjunção com o silício, metais como o molibdênio, a platina, o cromo ou o tungstênio, e a queda de tensão obtida quando em polarização direta pode ser tão baixa quanto 0,1 ou 0,2 V.

A presença de quedas de tensão tão baixas influencia de forma positiva a velocidade do diodo – isto é, o tempo que ele leva para iniciar e cessar a condução quando uma polarização direta lhe é aplicada. Logo, os diodos tipo schottky são considerados componentes de alta velocidade por entrar e sair de seu ponto de condução muito rapidamente, o que os torna componentes especialmente interessantes em aplicações de alta frequência, trabalhando bem até próximos da faixa dos 50 GHz (gigahertz).

Uma desvantagem desses componentes, contudo, é a sua baixa tensão máxima reversa suportada, que não passa muito de 50 V. Há, porém, tipos especiais (como diodos mais novos, de carbeto de silício) que permitem tensões reversas máximas de até 1700 V.

## 7 DIODOS EMISSORES DE LUZ (LEDs)

Largamente empregados nos dias de hoje, os LEDs (do inglês *light-emitting diode*) são dispositivos capazes de produzir luz com base na condução eletrônica em razão de uma junção semicondutora.

### 7.1 Histórico

A criação dos LEDs remonta a princípios do século XX com as pesquisas do cientista inglês H. J. Round, que, em 1907, demonstrou o fenômeno da eletroluminescência em um pedaço de carboeto de silício (popularmente conhecido como **carborundum**), montado em um dispositivo do tipo bigode de gato.

Em 1927, o físico russo Oleg Losev propôs o primeiro LED prático em um estudo que, embora publicado em mais de uma revista científica, não atraiu muita atenção devido à falta de aplicação prática na época, dado que a eficiência luminosa desses dispositivos primitivos era baixíssima, servindo apenas como prova de conceito.

Nos anos seguintes, alguns avanços foram feitos por diversos nomes, como os húngaros Zoltán Bay e György Szigeti, que, em 1936, conseguiram implementar um dispositivo semelhante feito em carboeto de boro que emitia uma luz branco-azulada; o americano Rubin Braunstein, então funcionário dos laboratórios da *Radio Corporation of America* (RCA), demonstrou, por sua vez, a emissão de luz infravermelha em uma junção fabricada com arsenieto de gálio (GaAs), em 1955.

Os primeiros LEDs comerciais surgiram em 1962, fabricados por uma das indústrias pioneiras na área de semicondutores, a *Texas Instruments*. Eles produziam apenas luz vermelha com uma eficiência luminosa bastante modesta, e custavam valores muito altos, o que os fez serem destinados apenas a aplicações de sinalização em equipamentos, onde normalmente utilizava-se lâmpadas de baixa tensão.

Outras companhias que também investiram na fabricação desses primeiros LEDs foram a **Monsanto** e a **Hewlett Packard**. A tecnologia depois passaria a ser aplicada extensivamente em displays numéricos por diversos fabricantes, sobretudo em calculadoras eletrônicas – como as clássicas TI-57, também fabricadas pela Texas Instruments (figura 159).

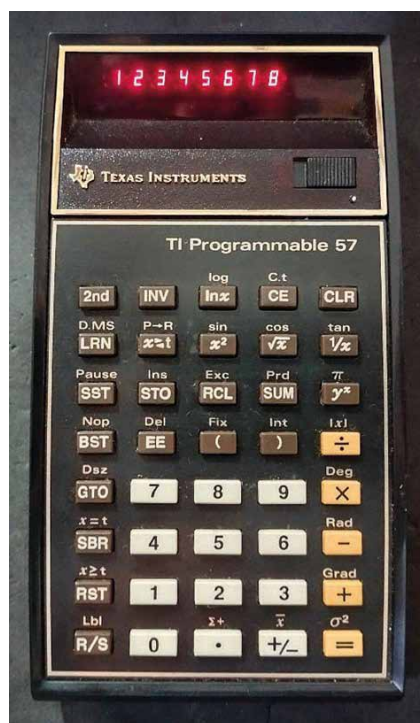


Figura 159 – Calculadora Texas Instruments TI-57 com um característico display de LEDs, fabricada no Brasil no fim dos anos 1970

Embora os primeiros LEDs comerciais viessem encapsulados em metal, com o tempo e o barateamento destes componentes em vista, foram desenvolvidos novos encapsulamentos em epóxi, bem mais baratos e também mais simples de fabricar. Os modelos encontrados atualmente diferem muito pouco dos primeiros disponíveis comercialmente e fabricados nesse material (vide a figura 160).

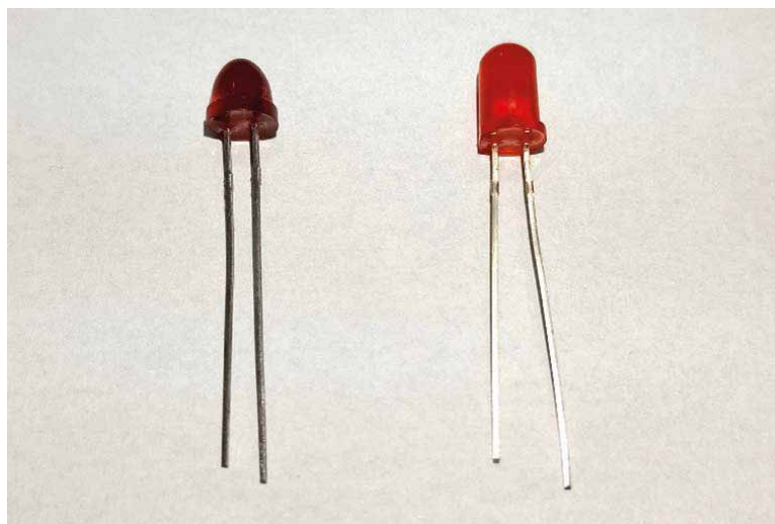


Figura 160 – Um LED produzido ainda nos anos 1970 (esquerda) e um moderno, produzido já na primeira década do século XXI (direita). A parte das dimensões muito similares, a eficiência luminosa aumentou muito

Outra questão também importante ocorre em relação à cor dos LEDs. Por muitos anos, apenas existia a cor vermelha, de eficiência luminosa baixa. Posteriormente começaram a surgir LEDs comerciais amarelos e verdes, com encapsulamento difuso. Essas foram as únicas opções disponíveis no mercado durante muito tempo.

No fim da década de 1990 começaram a se popularizar os LEDs de alto rendimento, mais intensos e encapsulados em epóxi transparente, permitindo visualizar o seu interior – mas somente era possível saber a cor quando ele era energizado. Alguns tipos, com encapsulamento em cor âmbar e luz amarela, também foram populares nesse período, embora com resultados variáveis no quesito eficiência luminosa.

Sucederam, então, os primeiros LEDs azuis e brancos, disponíveis no início dos anos 2000 a preços bastante altos, que foram caindo nos anos seguintes. Atualmente, são muitos os tipos de LEDs, com luz em diversas temperaturas de cor, baratos, de baixo consumo e excelente rendimento, que substituem com vantagens diversos tipos de lâmpadas.

### 7.2 Polarização dos LEDs

À semelhança de qualquer diodo comum, um LED somente emite luz enquanto conduz, precisando para isso estar polarizado diretamente. Dessa forma, é essencial que qualquer LED seja instalado com um resistor em série, que limita a corrente circulante pelo diodo.

A ausência de um resistor em série não irá impedir, a princípio, que o LED se acenda, mas a corrente circulante por ele será muito alta, e **destruirá** a junção semicondutora em pouquíssimo tempo. Esses componentes, diferentemente dos diodos comuns, apresentam uma queda de tensão mais alta, normalmente acima de 1,8 V, e variam de acordo com o fabricante, cor, eficiência luminosa e outros parâmetros (vide a figura 161).

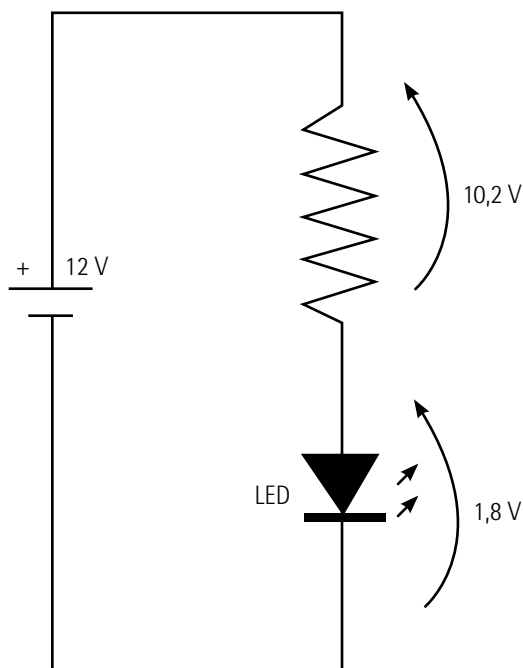


Figura 161 – Polarização de um LED utilizando um resistor e uma bateria de 12 V

Um fator que de início pode confundir é o **valor do resistor**. Ele é muitas vezes escolhido de forma puramente arbitrária, levando em conta os valores tidos à mão, um pouco de senso comum e adivinhação.

Como seu valor não é crítico, não há prejuízo no funcionamento do circuito se ele estiver um pouco fora do ideal, mas saber fazer o cálculo desse resistor corretamente é importante para dimensionar o LED de acordo com seu máximo rendimento e durabilidade. Isto é feito com base na fórmula da **Lei de Ohm**, em que consideraremos, antes de mais nada, a corrente circulante pelo circuito, conforme a figura 162.

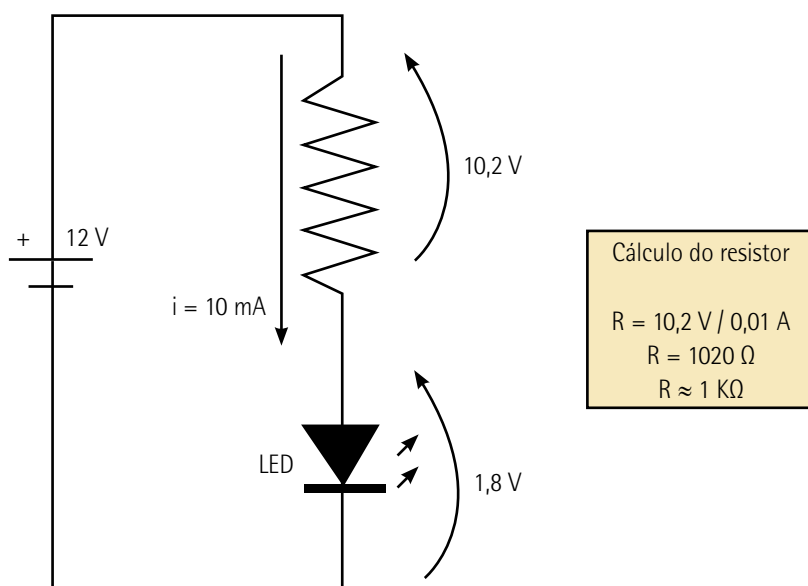


Figura 162 – Cálculo do resistor em série para o LED

Os valores de corrente e de queda de tensão de um LED podem ser encontrados na folha de dados do componente. Eles normalmente apresentam alguma variação, embora não muita.

Para a grande maioria dos LEDs comuns, a queda de tensão ficará entre 1,8 e 2 V, com uma corrente de 10 mA para um brilho normal e de 20 mA para um brilho mais alto.

Para o cálculo, utiliza-se uma variação da fórmula da Lei de Ohm:

$$R = \frac{V}{i}$$

Em que:

- **R** é o valor da resistência.
- **V** é a tensão sobre o resistor.
- **i** é a corrente circulante pela malha.

Portanto, se for utilizada uma bateria de 12 V alimentando o circuito, subtraindo-se a queda de tensão de 1,8 V sobre o LED, obtém-se cerca de 10,2 V sobre o resistor. Assim, se considerarmos uma corrente circulante de 10 mA (ou 0,01 A), temos:

$$R = \frac{10,2 \text{ V}}{0,01 \text{ A}} = 1020 \, \Omega$$

Assim, o resistor adequado para ligar em série com o LED será de cerca de 1000  $\Omega$ , ou 1 k $\Omega$ .

É possível também associar LEDs em série ou em paralelo; nesses casos, o valor do resistor deve ser calculado de acordo com a forma que os LEDs são ligados.

Caso a associação seja em paralelo, devemos considerar que a corrente circulante a ser dividida entre os LEDs será maior. O cálculo pode ser feito conforme o exposto na figura 163.

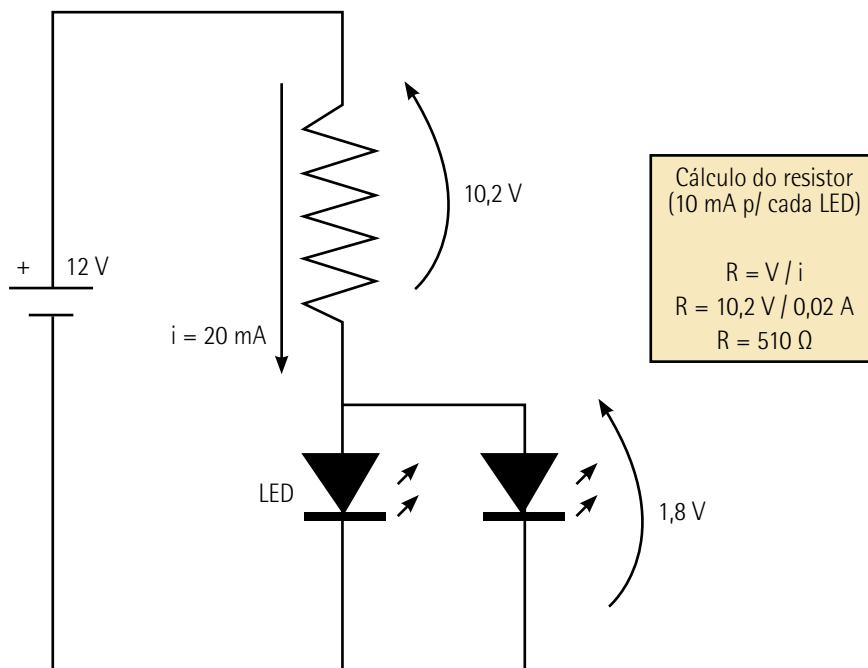


Figura 163 – Cálculo do resistor para dois LEDs em paralelo

Nesse caso, deve-se considerar que para dois LEDs alimentados com uma bateria de 12 V sob uma corrente de 10 mA cada, a corrente total será de 20 mA. O cálculo feito para as mesmas quedas de tensão de um LED só é:

$$R = \frac{10,2 \text{ V}}{0,02 \text{ A}} = 510 \, \Omega$$



Contudo, é preciso levar em conta que, neste caso, a dissipação de potência aumenta, e deve-se escolher um resistor apropriado.

Caso haja dois LEDs em série, deve-se calcular o resistor para uma queda de tensão menor, uma vez que ela se somará de acordo com o número de diodos emissores de luz empregados. Na figura 164, são utilizados dois; observe que, apesar disso, a corrente permanece a mesma, uma vez que ela atravessará primeiro um diodo, e depois o outro.

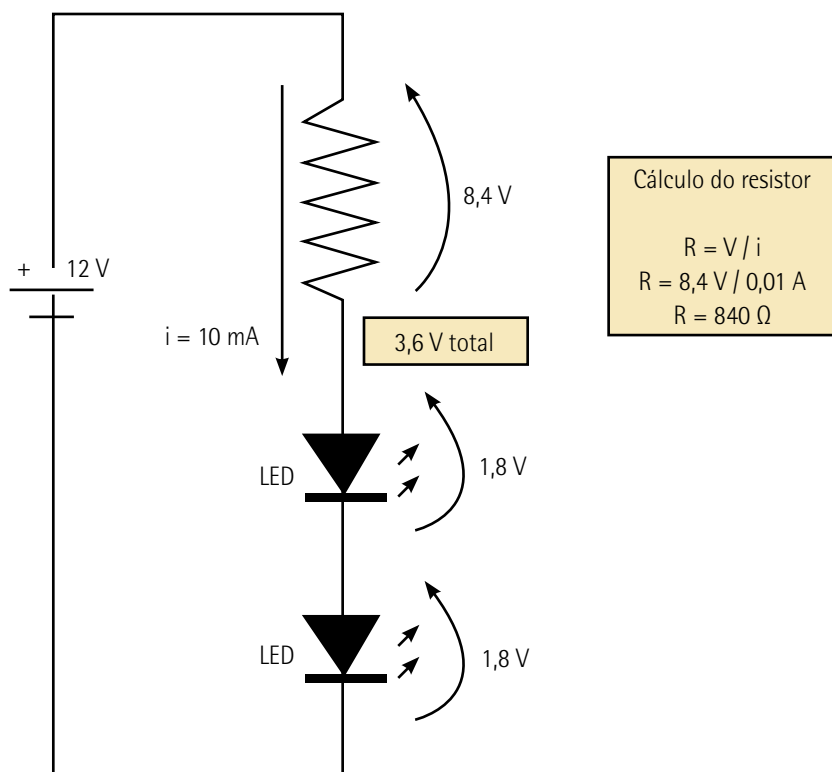


Figura 164 – Associação de dois LEDs em série

Dessa forma, a queda de tensão sobre o resistor será menor: de apenas  $8,4 \text{ V}$ , já que os dois LEDs pegarão para si  $3,6 \text{ V}$  do total, sob uma corrente de  $10 \text{ mA}$ . Ao aplicar a fórmula, temos:

$$R = \frac{8,4 \text{ V}}{0,01 \text{ A}} = 840 \Omega$$

O valor do resistor pode ser arredondado para  $820 \Omega$ . É importante observar que a melhor configuração para associar os LEDs (se em série ou paralelo) dependerá de fatores como a tensão disponível para a alimentação, e também a corrente que a fonte poderá suportar – lembrando que a associação em série é preferida por manter as correntes consumidas em um patamar mais baixo, sendo mais econômica no caso do uso de baterias, por exemplo.

## 7.3 Tipos especiais de LEDs

Embora a maior parte dos diodos emissores de luz destinem-se a aplicações simples de sinalização ou iluminação, outros nichos em que eles poderiam ser empregados foram surgindo com os anos, que estimulou o desenvolvimento de tipos específicos para essas aplicações – que muitas vezes passam batidos ao entusiasta mais distraído.

Listaremos a seguir alguns desses LEDs especiais, com suas aplicações mais comuns.

### 7.3.1 LEDs do tipo pisca

Em algumas aplicações de sinalização deseja-se que uma certa luz pisque continuamente, seja para chamar atenção a determinado sinal de alerta em um painel, por exemplo, ou simplesmente como forma de embelezar um dado efeito visual.

Se o objetivo é que um LED comum fique piscando, necessitaremos de um circuito em que um arranjo chamado de **oscilador de relaxação**, com dois transistores, fará com que o componente alterne entre os estados aceso e apagado, em intervalos que podem ser modificados mediante alteração nos valores dos componentes (vide figura 165).

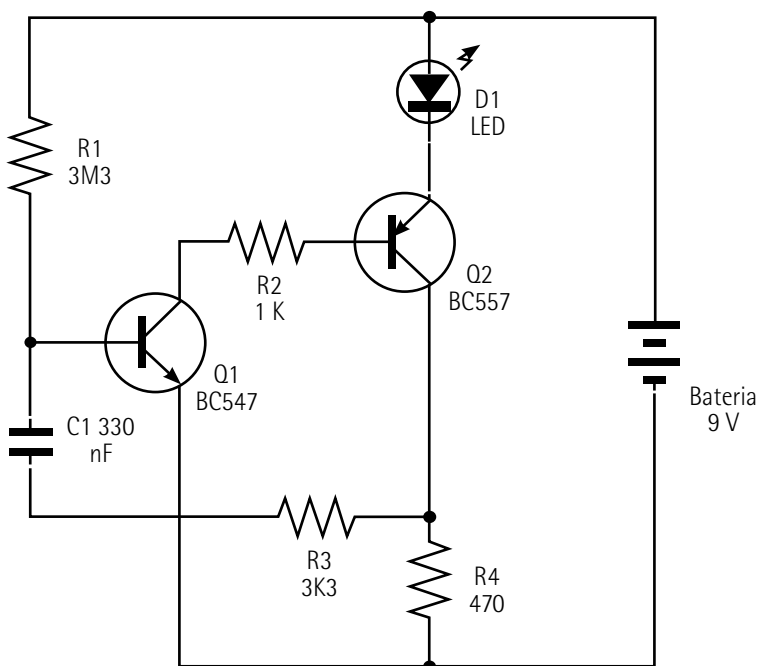


Figura 165 – Oscilador de relaxação para piscar um LED

Em essência, um LED do tipo pisca tem em seu interior, com a pastilha de material fotoemissor, uma outra pastilha semicondutora de silício com um microcircuito muito similar ao implementado, fazendo com que, quando energizado, o diodo pisque em intervalos regulares.

Contudo, diferentemente do circuito acima apresentado, esses LEDs são projetados para trabalhar com tensões baixas – pouco acima de 2 V, de forma que trabalhem com as polarizações adequadas para os diodos emissores de luz comuns, e que dentro de certo grau haja uma certa compatibilidade entre esses componentes.

### 7.3.2 LED bicolor

Outro tipo de diodo emissor de luz que implementa algo além dentro de seu interior é o LED do tipo bicolor. Como o próprio nome diz, ele contém duas pastilhas de material fotoemissor, cada uma com uma dopagem diferente em seu material, emitindo luzes de comprimento de onda (ou cores) diferentes.

Esses componentes podem ter tanto dois quanto três terminais, e a configuração com que são energizados é o que vai determinar a cor que o componente manifestará – normalmente verde ou vermelho (figura 166).

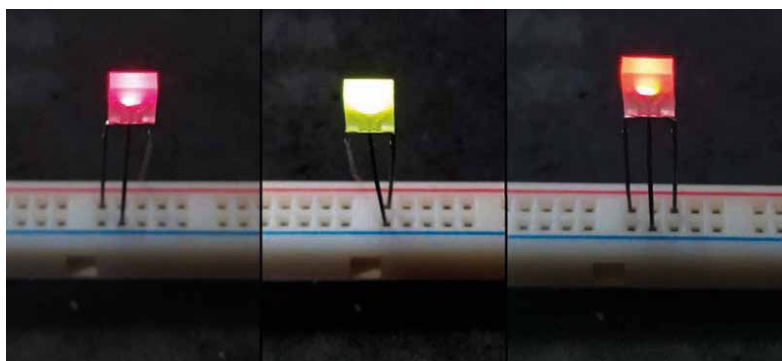


Figura 166 – LED bicolor de três terminais, aceso com a cor vermelha (esquerda), verde (centro) e de ambas as cores ao mesmo tempo, o que lhe confere um tom alaranjado (direita)

Outro tipo de LED bicolor é aquele que contém duas pastilhas semicondutoras ligadas em antiparalelo, de forma que, quando uma estiver polarizada diretamente, a outra estará em polarização reversa, e vice-versa. Assim é possível escolher qual delas acenderá, bastando para mudar o sentido da corrente elétrica (figura 167). Esses componentes são incomuns, raros nos dias atuais.

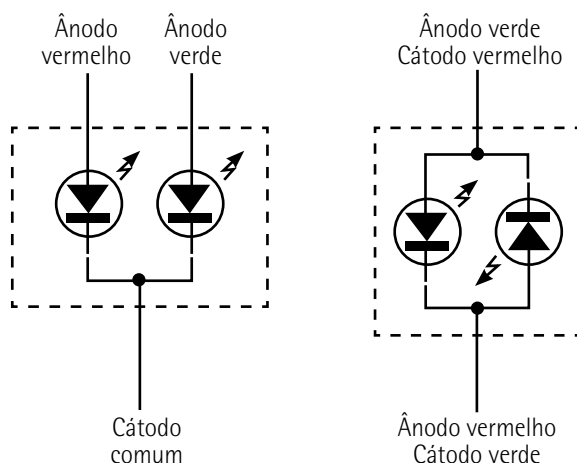


Figura 167 – Estrutura interna de um LED bicolor de três terminais (esquerda) e de um com dois terminais (direita)

## 7.3.3 LEDs RGB

Com a popularização dos LEDs na primeira década do século XXI, começaram a surgir alguns componentes que continham três pastilhas fotoemissoras, que permitiam todas as combinações possíveis dentro do espectro da luz visível com base nas cores primárias: vermelho (**r**ed), verde (**g**reen) e azul (**b**lue).

Esses componentes dispõem de quatro terminais: três deles correspondem a cada um dos ânodos, e o quarto corresponde a um cátodo comum (vide a figura 168).

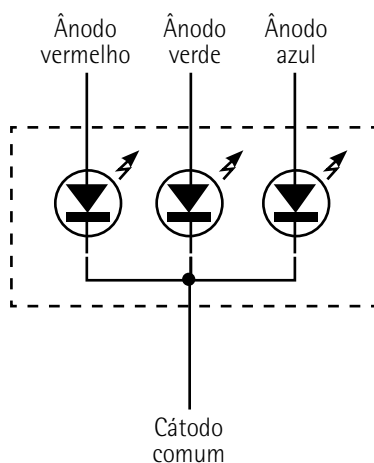


Figura 168 – Estrutura interna de um LED RGB

Eles normalmente estão encapsulados em epóxi transparente, mas também existem versões SMD (*surface mount device*) para montagem em superfície de placas de circuito impresso miniaturizadas (figura 169).



Figura 169 – Pastilhas semicondutoras no interior de um LED RGB

### 7.3.4 LEDs infravermelhos e ultravioletas

Muito embora a maioria dos LEDs seja destinada à produção de luz dentro do espectro visível, também existem aplicações que requerem o uso de luzes invisíveis ao olho humano – como no caso dos ultravioletas e dos infravermelhos. Esses componentes utilizam essencialmente uma estrutura idêntica a dos LEDs comuns, e apenas os materiais utilizados na sua fabricação são diferentes, permitindo que emitam luz em comprimentos de ondas específicos.

A luz infravermelha modulada por pulsos é muito utilizada em sistemas de controle remoto e também de transmissão de dados a pequenas distâncias (também denominados IrDA, do inglês *infrared data association*), e são completamente invisíveis ao olho humano.

Embora invisível, a luz infravermelha pode ser observada usando uma câmera digital qualquer, como a de um celular, que mostrará um brilho esbranquiçado vindo do componente ao estar aceso, permitindo saber se ele está funcionando ou não.

Já os LEDs ultravioletas têm aplicações voltadas à fotopolimerização (ou endurecimento) de certas resinas especiais, como as utilizadas em restaurações odontológicas e em unhas postiças, e também na produção de efeitos visuais em tintas luminescentes, muito usadas em decorações de festas, reagentes químicos e na detecção de notas de dinheiro falso.

Esses LEDs apresentam alguma radiação luminosa dentro do espectro visível, com um brilho pálido e azulado. Contudo, os raios ultravioletas são danosos aos olhos, e não é seguro olhar para a luz emitida por muito tempo sob o risco de sofrer danos na visão em longo prazo.

## 8 CIRCUITOS SIMPLES UTILIZANDO DIODOS E LEDs

Para complementar os conhecimentos abordados neste livro-texto, esta última seção aborda alguns circuitos simples que podem ser construídos pelo aluno, com o uso componentes simples como resistores, capacitores, diodos e LEDs.

Junto dos diagramas esquemáticos e da descrição de seu funcionamento, há imagens dos circuitos montados em matriz de contatos (*protoboard*), que simplificam o entendimento e a reprodução delas por parte do estudante.

### 8.1 Indicador de bateria fraca, com LED e TL431

Muitas vezes, o único indicativo que temos de que uma bateria ou conjunto de pilhas que alimenta um aparelho está no fim de sua vida útil é quando ela começa a apresentar falhas em seu funcionamento em razão da tensão de alimentação insuficiente.

Portanto, um circuito que permita checar se a tensão da bateria está dentro dos limites aceitáveis, mostrando se está na hora de trocá-la, é de grande utilidade para os usuários de uma infinidade de dispositivos portáteis, como microfones sem fio, lanternas, rádios de pilhas, *players* de música e afins.

O circuito apresentado na figura 170 é baseado em um regulador ajustável tipo TL431, e utiliza dois LEDs, D1 e D2, de 3 mm e qualquer cor, em série, como indicadores. O potenciômetro de ajuste semifixo P1 permite variar a tensão em que irão acender, e o circuito pode ser acionado com baterias com tensões que vão de 4,5 até 12 V.

Seu funcionamento é baseado na tensão fornecida ao terminal de ajuste do TL431: quando ela cai abaixo de um determinado patamar, dado pelo divisor de tensão formado por R2 e P1, o regulador DZ1 passará a conduzir menos, fazendo com que a queda de tensão sobre si aumente, permitindo que os LEDs se polarizem diretamente, acendendo.

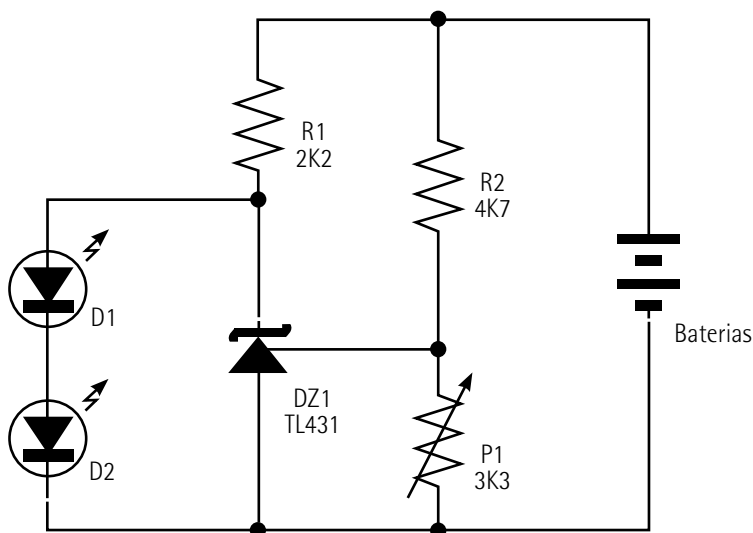


Figura 170 – Indicador de bateria fraca, com o TL431

A única desvantagem desse circuito é o seu consumo de corrente, de cerca de 5 mA com o LED apagado e 15 mA com ele aceso, o que pode acelerar o desgaste das baterias caso fique ligado constantemente. Por isso, recomenda-se a instalação de uma chave tipo *push button* no caminho da alimentação, para acioná-lo apenas quando se deseja fazer o teste do nível de bateria.

Uma versão alternativa desse circuito, sem o uso do TL431, é apresentada na figura 171, que tem um consumo baixíssimo de energia quando o LED está apagado: não passa de 1 mA, e pode ser ainda mais baixo com um ajuste cuidadoso nos valores dos componentes.

O LED D1 pode ser qualquer tipo (3 ou 5 mm), com a cor que se desejar – embora o vermelho seja mais comum nesses casos, por ser mais facilmente disponível. O trimpot P1 ajusta o patamar mínimo de tensão que D1 irá acender, e o circuito adapta-se bem a baterias de 6 até 12 V.

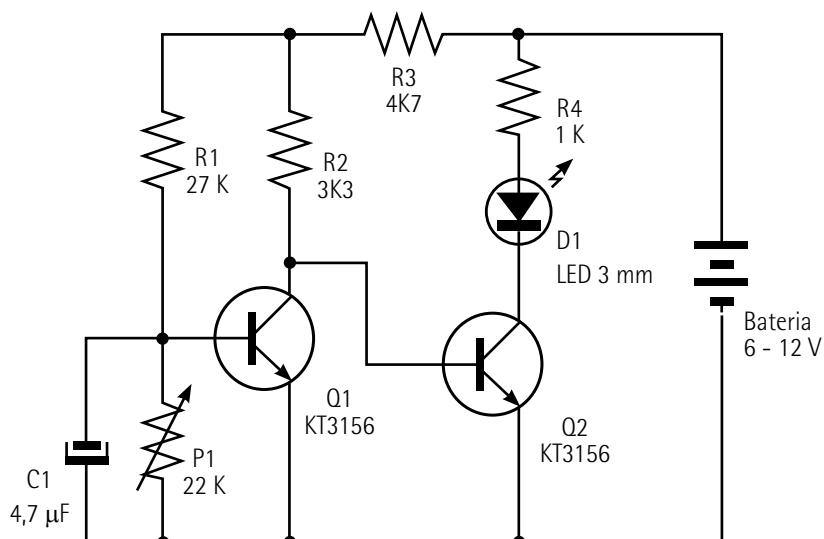


Figura 171 – Indicador de bateria fraca com dois transistores

Novamente, o divisor de tensão formado por R1 e P1, ligado à base do transistor Q1, determina o ponto do acendimento do LED D1, e deve ser ajustado experimentalmente para um funcionamento adequado. Quando a tensão da bateria é normal, o transistor Q1 estará conduzindo, apresentando em seu coletor um nível de tensão baixo, que, por sua vez, manterá o transistor Q2 cortado, fazendo com que D1 fique apagado.

Quando a bateria estiver fraca e apresentar uma tensão baixa, a tensão na base de Q1 fará com que ele entre em corte e apresente um nível de tensão alto em seu coletor, levando Q2 a conduzir e permitir que o LED se acenda. O capacitor C1 atua nivelando quaisquer transientes na base de Q1, fazendo com que o LED não se acenda em momentos inoportunos, quando, por exemplo, há um consumo de corrente mais elevado.

Esse circuito foi, por muitos anos, integrado aos antigos receptores de rádio Meridian (do russo Меридиан), produzidos pela fábrica Radiopribor na extinta URSS e posteriormente na Ucrânia, até meados dos anos 1990, replicado aqui com seus valores de componentes originais (vide a figura 172). Os transistores KT315B, já obsoletos e difíceis de obter no Brasil, podem ser substituídos por tipos comuns como o BC547 ou o 2N3904 sem qualquer prejuízo ou necessidade de alteração no circuito.



Figura 172 – Receptor de rádio Meridian RP-248, produzido na Ucrânia em 1992. O LED indicador das pilhas fica na pequena janela transparente, abaixo do *dial*

## 8.2 Fonte de baixíssima tensão

Este circuito de fonte de tensão bem baixa – na ordem de 1,7 a 1,8 V – destina-se a resolver um problema que se manifesta com mais proeminência nos últimos anos: a durabilidade cada vez mais baixa das pilhas nos relógios de parede analógicos mais novos.

Isso se percebe especialmente nos dispositivos mais baratos, fabricados na China e com mecanismo (ou simplesmente movimento, no jargão dos relojoeiros) de qualidade questionável, usualmente muito mal dimensionados em termos de consumo de energia, sendo verdadeiros devoradores de pilhas.

Em um relógio desses, uma pilha alcalina durará não mais que três meses; em um relógio de boa procedência, mais antigo, uma pilha chega a funcionar com perfeição por até dois anos, sem ser trocada.

Logo, para evitar um gasto desnecessário com pilhas, foi desenvolvido o pequeno circuito apresentado na figura 173, que regula a tensão proveniente de uma fonte de 5 V (podendo, inclusive, ser usado com um carregador de celular fora de uso) para cerca de 1,8 V, tensão mais que suficiente para alimentar o movimento de qualquer relógio movido por uma pilha comum, fazendo-o funcionar de forma ininterrupta a partir da rede elétrica.

No circuito, são utilizados quatro diodos tipo 1N4148 em série, formando uma espécie de zener, com uma queda de tensão de aproximadamente 2,4 V. Subtraindo os 0,6 V perdidos na junção base-emissor



do transistor Q1 (BD135), ficamos com cerca de 1,8 V na saída, tensão um pouco acima da de uma pilha comum (que é de 1,5 V), mas ainda perfeitamente adequada para o correto funcionamento do circuito.

O resistor de  $220\ \Omega$  pode ser de 0,5 W, e o transistor pode ser qualquer tipo que suporte uma dissipação de 500 mW ou superior, como o BC141 ou o 2SC2236. Os diodos podem ser ajustados experimentalmente, para uma tensão de saída mais próxima do ideal.

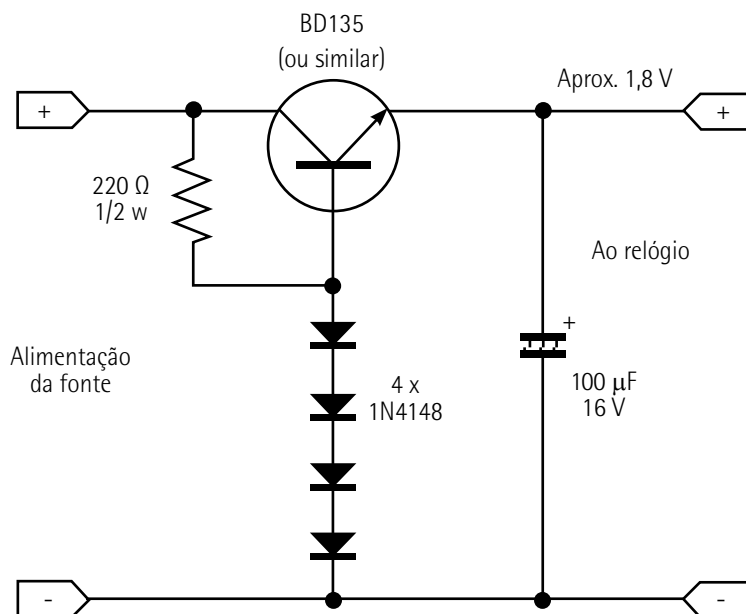


Figura 173 – Regulador de tensão para relógio de parede

Aos terminais identificados como alimentação da fonte, liga-se os 5 V provenientes do carregador de celular, ao passo que aos terminais de saída conecta-se um par de fios finos que podem ser soldados diretamente aos terminais de pilhas do movimento do relógio.

Caso o aluno não tenha um carregador de celular sobrando, mas disponha de um transformador de força com tensão entre 4,5 e 6 V, com corrente mínima de 200 mA, e deseje construir sua própria fonte de alimentação para ligar o circuito à rede elétrica, o circuito da figura 174 pode ser utilizado.

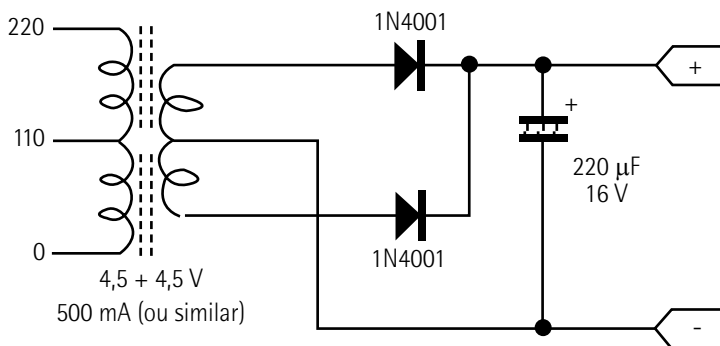


Figura 174 – Fonte de alimentação de 5 V, para o regulador do relógio

A implementação final pode ser montada na parte traseira do relógio e ligada à fonte por um fio fino, conforme a feita pelo autor com o uso da técnica das Ilhas Manhattan (vide a figura 175).



Figura 175 – Dispositivo regulador montado com o uso da técnica das Ilhas Manhattan e instalado na parte traseira do relógio

### 8.3 Adaptador de pilhas de lítio 18650

São cada vez mais raros os dispositivos que funcionam com pilhas médias e grandes (tipos C e D, respectivamente), dado que elas têm um tamanho pouco prático, são pesadas e seu custo é relativamente alto. Essas pilhas estão cada vez mais difíceis de se encontrar, sobretudo em lojas de comércio popular (como mercados e mercearias), de forma que quem têm equipamentos que ainda as utilizam acaba encontrando dificuldades em obtê-las, além do gasto maior e de sua durabilidade limitada.

Sua aplicação mais difundida ainda nos dias de hoje é nos rádios portáteis transistorizados, para FM, ondas médias e curtas (OM e OC), que operam independentemente da luz elétrica e que ainda são muito usados em fazendas, acampamentos e outros locais isolados, distantes das grandes cidades e muitas vezes sem grande parte das comodidades oferecidas pelos grandes centros urbanos.

Contudo, um tipo de bateria cada vez mais abundante e barata, facilmente encontrada em lojas especializadas e no comércio eletrônico, é a 18650 (figura 176), fabricada em lítio e com tensão nominal entre 3,7 e 4,1 V, dispendo de grande capacidade de corrente e podendo ser recarregada quando se esgota.



Figura 176 – Pilhas tipo C (esquerda), D (centro) e uma bateria 18650, de lítio (direita)

O problema é que essas baterias têm dimensões e tensão nominal bastante diferentes das pilhas C e D – que são de 1,5 V –, e são necessárias adaptações para acomodar as tensões oferecidas ao equipamento pretendido, e também o uso de um suporte para fixação e conexão elétrica delas aos terminais originais do aparelho.

Para a primeira questão, pode-se utilizar alguns diodos em série com as baterias, chegando à tensão delas com uma carga média a um valor próximo ao oferecido pelo conjunto de pilhas original do aparelho, como, por exemplo:

- Para uma tensão de alimentação de 9 V (ou seis pilhas tipo C ou D), podem ser usadas três baterias 18650 em série, perfazendo uma tensão máxima que irá de 11,1 até 12,3 V e que, reduzida por três diodos ligados em série, irá fornecer qualquer coisa entre 9,3 e 10,5 V – uma variação bem tolerada por qualquer rádio a transistor sem prejuízos.
- Para uma tensão de 6 V (ou quatro pilhas tipo C ou D), podem ser usadas duas baterias, que fornecerão uma tensão máxima entre 8,2 e 7,4 V, que, reduzida por dois diodos em série, fornecerá ao circuito qualquer coisa entre 7 e 6,2 V – uma variação também tolerada por grande parte dos aparelhos comuns.

Em casos em que não se deseja submeter o circuito do aparelho a uma variação de tensão como a oferecida pelas baterias de lítio à medida que se descarregam, pode ser utilizado, no lugar dos diodos, um CI (circuito integrado) regulador de tensão, como os da família 78XX, que permitem acomodar as variações de entrada, fornecendo uma saída estável de acordo com um valor fixo à medida que as baterias perdem sua carga (vide figura 177).

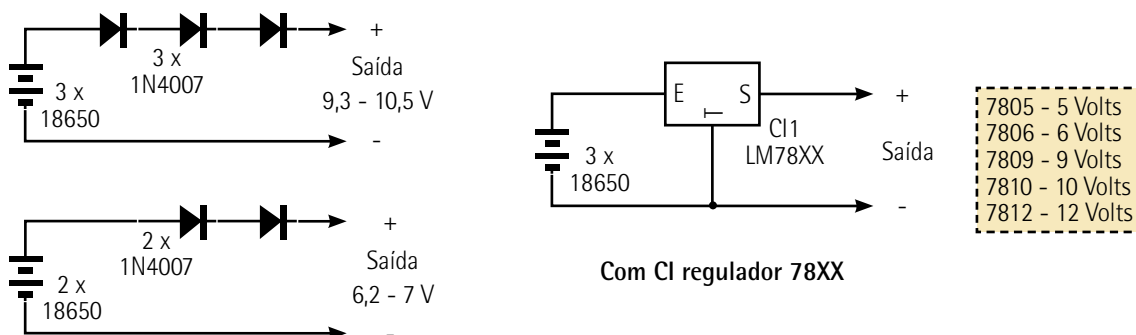


Figura 177 – Circuitos para adequação das tensões, com diodos e regulador da família 78XX

Para acomodar as baterias 18650, são várias as implementações possíveis, como a da figura 178, em que um suporte especial foi impresso em 3D fazendo uso de contatos reaproveitados de aparelhos desmontados, provenientes de sucata, e a ligação ao equipamento se dá por um conjunto de garras tipo jacaré.

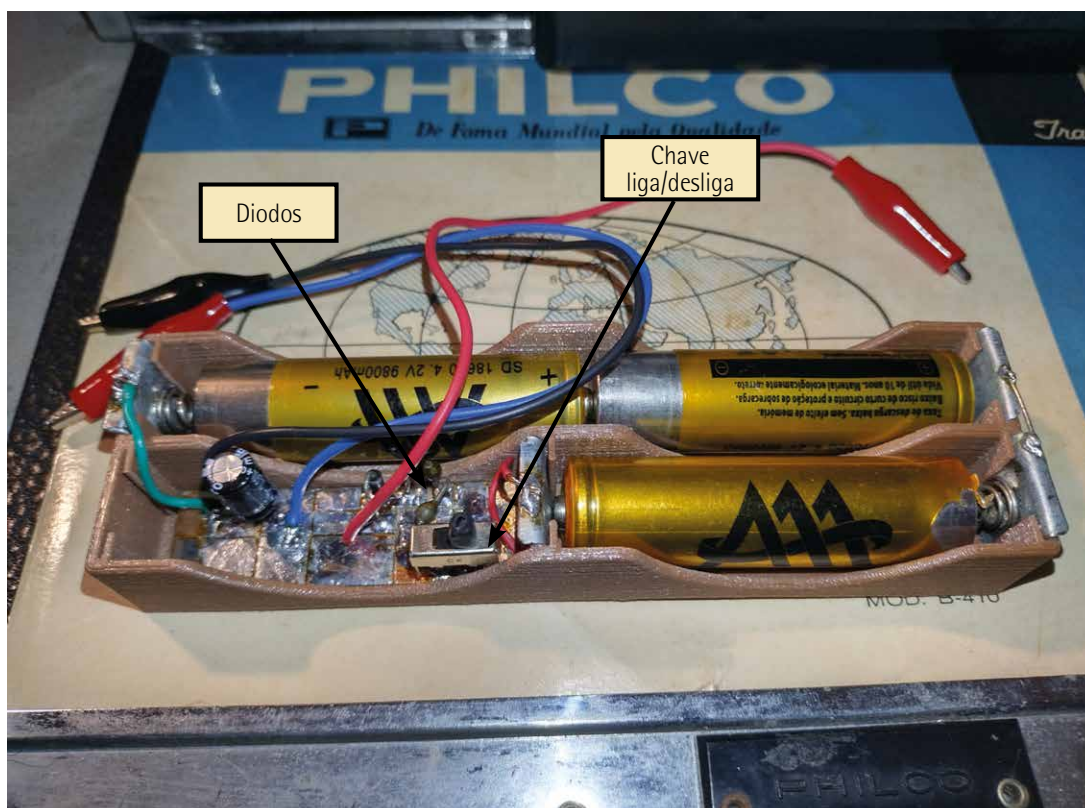


Figura 178 – Suporte de baterias completo, com três diodos em série

Note que o circuito com os diodos fica integrado ao próprio suporte, na plaquinha montada no padrão Ilhas Manhattan, que é encaixada no espaço livre ao lado das baterias. Uma chave liga-desliga permite cortar a alimentação do circuito quando ele não for utilizado, e o indicador de baterias fracas apresentado no subtópico 8.1 foi aqui também implementado, provendo ao usuário um aviso quando as baterias necessitam de recarga.



Esses suportes adaptadores foram implementados pelo autor em diversos rádios Philco Transglobe de sua coleção com grande sucesso, permitindo-os operar com perfeição e grande economia – seja nas versões com diodos ligados em série, com regulador 7809, ou com ou sem indicador de baterias fracas, com a vantagem de que a originalidade desses aparelhos clássicos não foi afetada, permitindo que a adaptação fosse inserida e removida conforme a vontade (figura 179).

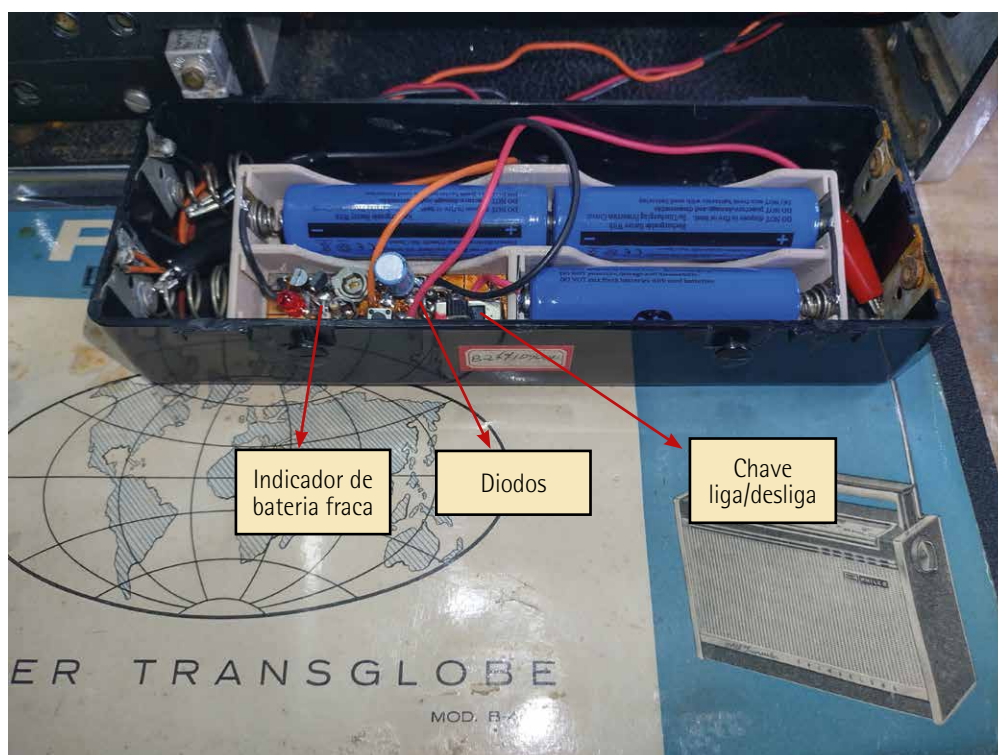


Figura 179 – Suporte completo, com diodos e indicador de bateria fraca, montado dentro da caixa de pilhas de um Philco Transglobe B470, produzido em 1963



## Resumo

Nesta unidade, foi feita uma introdução aos componentes ativos – ou seja, aqueles componentes eletrônicos que são capazes de modificar de forma efetiva, bem como de produzir sinais elétricos.

Foram abordadas também as válvulas termiônicas, seu histórico e os diversos tipos existentes (diodo, tríodo, tetrodo e pêntodo), bem como seu funcionamento e aplicações mais correntes.

Foram apresentados arranjos de circuitos de portas lógicas AND e OR com válvulas tríodo e pêntodo, bem como um inversor NOT, exibindo a aplicação dos componentes no computador comercial G15, fabricado pela companhia americana Bendix.

Em seguida, falou-se dos dispositivos de estado sólido, com os diodos – desde os rudimentares tipos de galena e sua aplicação em circuitos simples, bem como sua elaboração a partir de objetos simples, como alfinetes, carvões de pilhas e lâminas de barbear.

Foram também representados os diodos modernos, de germânio e silício, assim como seus tipos especiais (zener, varicap, schottky), além dos diodos emissores de luz – os LEDs –, e foram mostrados circuitos para sua polarização e utilização, com os cálculos adequados para dimensionamento do valor do resistor em série.

Para finalizar, tivemos uma seleção de três circuitos simples que encontram diversas aplicações práticas, e podem servir de base para eventuais implementações que o estudante porventura queira fazer.



## Exercícios

**Questão 1.** O retificador de onda completa em ponte mostrado na figura a seguir é usado para retificar a entrada de uma tensão alternada de 60 Hz.

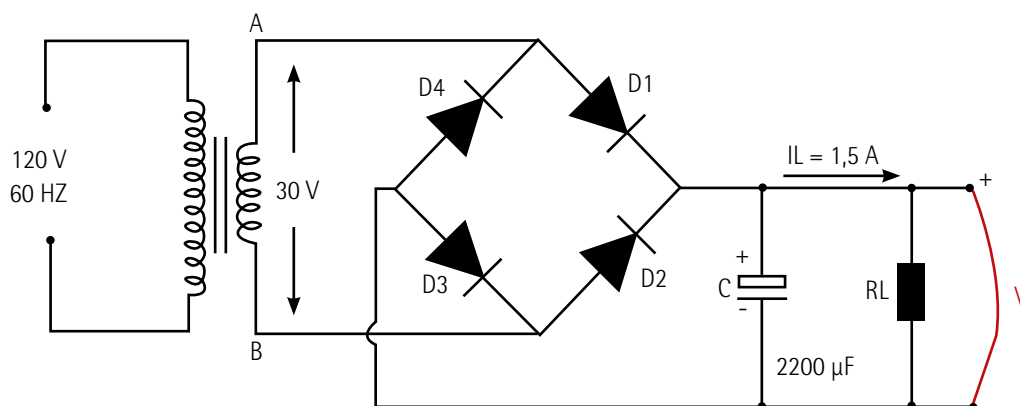
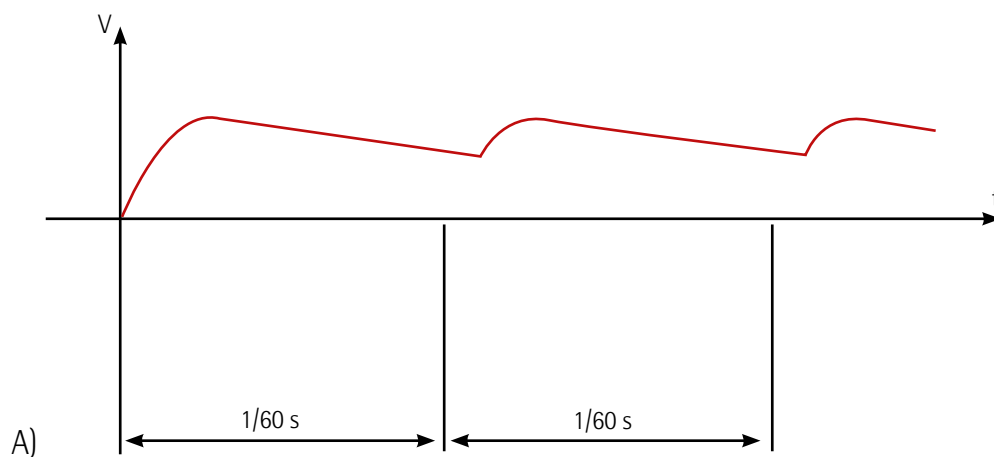
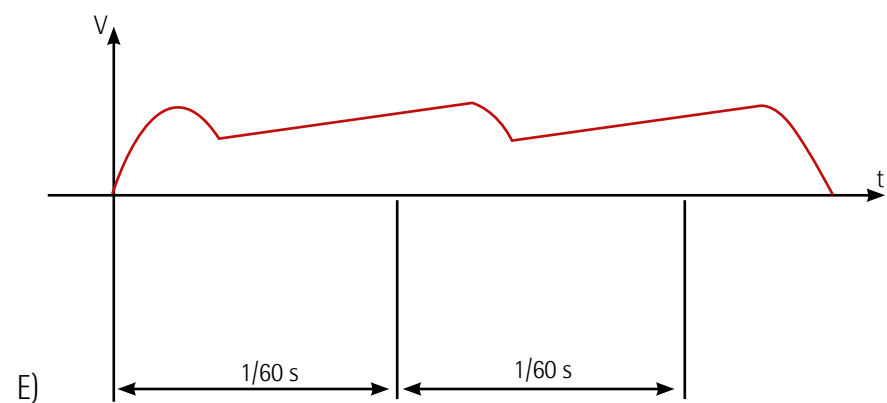
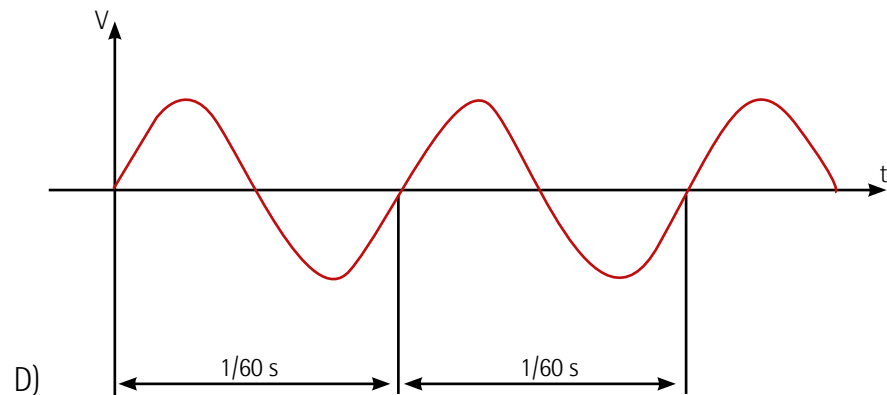
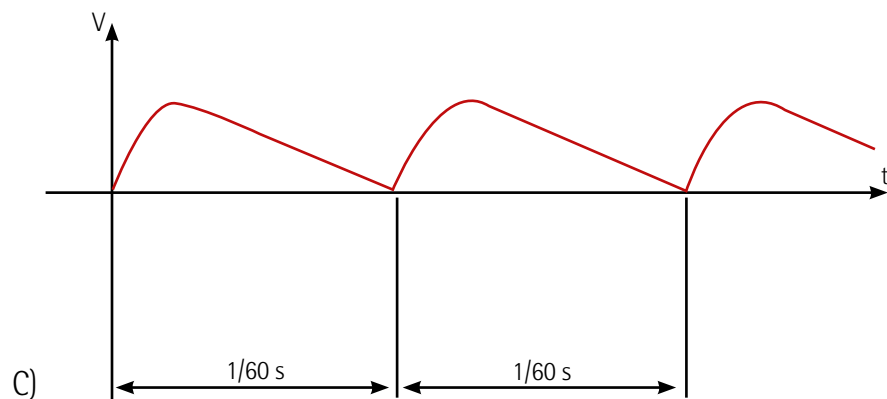
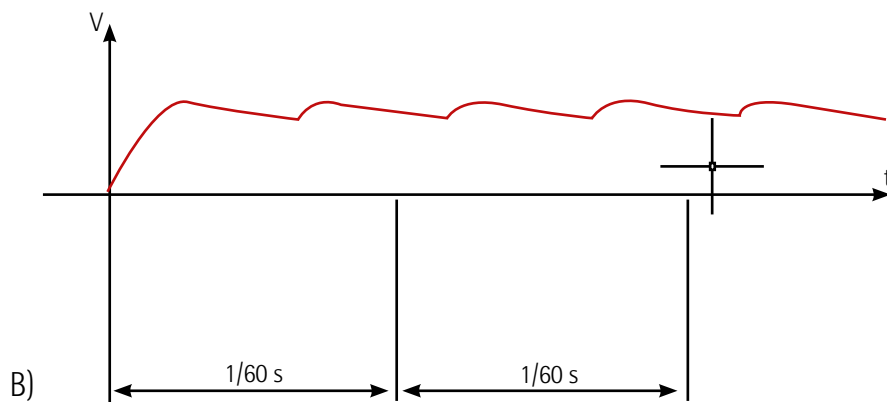


Figura 180

Adaptada de: <http://tinyurl.com/29dnu5nz>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Assinale a alternativa que apresenta corretamente o gráfico da tensão de saída retificada.





Resposta correta: alternativa B.



### Análise das alternativas

A) Alternativa incorreta.

Justificativa: a alternativa A mostra um retificador de meia-onda.

B) Alternativa correta.

Justificativa: note que a retificação é feita nas duas partes da onda (positiva e negativa).

C) Alternativa incorreta.

Justificativa: além de a retificação ser feita em meia-onda, a tensão no final da retificação é zero.

D) Alternativa incorreta.

Justificativa: a alternativa mostra a onda na entrada do circuito.

E) Alternativa incorreta.

Justificativa: não existe a retificação da forma que foi apresentada.

**Questão 2.** Leia o texto a seguir:

O diodo zener é um diodo semiconductor construído especialmente para trabalhar na região da ruptura, sem se danificar, o que não acontece com os diodos retificadores. Trabalha em polarização reversa, pois, nessas circunstâncias, apresenta uma característica de tensão constante para uma faixa de corrente.

Disponível em: <http://tinyurl.com/ycxee5rd>. Acesso em: 3 jan. 2024.

Com relação ao diodo zener, analise as asserções e a relação proposta entre elas.

I – Nos circuitos, a função do diodo zener é regular a tensão elétrica.

porque

II – Quando o diodo zener atinge a tensão zener, ele passa a permitir a passagem de intensidades de correntes bem maiores do que a intensidade de corrente de saturação inversa, mantendo constante a tensão entre os seus terminais.

A respeito dessas asserções, assinale a opção correta.

- A) As asserções I e II são verdadeiras, e a asserção II justifica a I.
- B) As asserções I e II são verdadeiras, e a asserção II não justifica a I.
- C) A asserção I é verdadeira, e a asserção II é falsa.
- D) A asserção I é falsa, e a asserção II é verdadeira.
- E) As asserções I e II são falsas.

Resposta correta: alternativa B.

### **Análise das asserções**

I – Asserção verdadeira.

Justificativa: o diodo zener é uma variação de diodos comuns com junção PN, projetado especificamente para ser inversamente polarizado. Ele opera na região de ruptura e funciona como um dispositivo de proteção ou um regulador de tensão. Esse tipo de diodo, também chamado de diodo de ruptura, é o elemento principal dos reguladores de tensão. Ou seja, é utilizado para garantir tensão constante independentemente da corrente requisitada pela carga do circuito.

II – Asserção verdadeira.

Justificativa: quando o diodo zener atinge uma tensão chamada de zener (geralmente, bem menor do que a tensão de ruptura de um diodo comum), o dispositivo passa a permitir a passagem de intensidades de correntes bem maiores do que a intensidade de corrente de saturação inversa, mantendo constante a tensão entre os seus terminais. Ele pode funcionar polarizado direta ou inversamente. Quando polarizado diretamente, funciona como outro diodo comum.

### **Relação entre as asserções**

Embora as duas asserções sejam verdadeiras, a segunda não justificativa a primeira. A segunda asserção é uma continuação da explicação de como funciona um diodo zener.

## REFERÊNCIAS

### Textuais

ABNT. *ABNT NBR IEC 60065*: aparelhos de áudio, vídeo e aparelhos eletrônicos similares – Requisitos de segurança. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AUDIO RESEARCH. *Reference 160S*: user manual. Minneapolis: Audio Research Corporation, 2018. Disponível em: <http://tinyurl.com/y2tp7x66>. Acesso em: 3 jan. 2024.

BAXANDALL, P. J. Negative-feedback tone control: independent variations of bass and treble without switches. *Wireless World*, London, v. 58, n. 10, p. 402-405, 1952. Disponível em: <http://tinyurl.com/ypfz9tj2>. Acesso em: 3 jan. 2024.

BHANDARI, G. P. *Inductance meter*. 2021. Thesis (Bachelor of Engineering) – Metropolia University of Applied Sciences. Helsinki, 2021. Disponível em: <http://tinyurl.com/9z6pxvhv>. Acesso em: 3 jan. 2024.

BRAGA, N. C. Circuitos ressonantes LC. *Instituto Newton C. Braga*, 11 jul. 2018a. Disponível em: <http://tinyurl.com/46jcz48u>. Acesso em: 3 jan. 2024.

BRAGA, N. C. Retificação: como funciona. *Instituto Newton C. Braga*, 29 jun. 2018b. Disponível em: <http://tinyurl.com/24fubmhe>. Acesso em: 3 jan. 2024.

BRAGA, N. C. Sensíveis detectores de eletricidade estática. *Instituto Newton C. Braga*, 12 nov. 2018c. Disponível em: <http://tinyurl.com/vjnrrn9v>. Acesso em: 3 jan. 2024.

CAPUANO, F. G.; MARINO, M. A. M. *Laboratório de eletricidade e eletrônica*. São Paulo: Érica, 2003.

COATES, E. Module 4.2: amplifier controls. *Learn About Electronics*, 16 maio 2012. Disponível em: <http://tinyurl.com/3bv4um4t>. Acesso em: 3 jan. 2024.

DANYK. Transformer and Inductor tester (ring tester). *Danyk.cz*, Prague, 25 set. 2021. Disponível em: <http://tinyurl.com/yz2aszcc>. Acesso em: 3 jan. 2024.

D'ARISBO, D. A bobina de Ruhmkorff (bobina de indução). *Museu do Rádio*, Porto Alegre, 1º abr. 2013. Disponível em: <http://tinyurl.com/25kxcfvs>. Acesso em: 3 jan. 2024.

DICKINSON, R. How does a relay work? *MRO Electric*, Cary, 14 abr. 2022. Disponível em: <http://tinyurl.com/hkvprhzx>. Acesso em: 3 jan. 2024.

FURUKAWA ELECTRIC. (HTW, SPHTW): high-tension magnet wires. *Furukawa Eletronic*, Chiyoda, 20 jul. 2021. Disponível em: <http://tinyurl.com/yeyxk6k3>. Acesso em: 3 jan. 2024.

GERNSBACK, H. Foxhole emergency radios. *Radio Craft*, Springfield, v. 15, n. 12, p. 730. Disponível em: <http://tinyurl.com/23ww4wtf>. Acesso em: 1º fev. 2024.

HASSAN, U.; ANWAR, S. Filtering and noise in electric circuits (electronics). *LUMS School of Science and Engineering*, Lahore, 1º out. 2008. Disponível em: <http://tinyurl.com/4nb4x33z>. Acesso em: 3 jan. 2024.

HAYT JUNIOR, W. H. *Engineering electromagnetics*. New York: McGraw Hill, 1974.

IEC. IEC 60063: *preferred number series for resistors and capacitors*. London: International Electrotechnical Commission, 2015. Disponível em: <http://tinyurl.com/yeszcepa>. Acesso em: 3 jan. 2024.

KEEN, R. G. The technology of Wah pedals. *Geofex*, 27 set. 1999. Disponível em: <http://tinyurl.com/bddcph8t>. Acesso em: 3 jan. 2024.

OVERTON, W. E. *Digital circuit-level emulation of transistor-based guitar distortion effects*. 2006. Thesis (Master of Electrical Engineering) – Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2006.

PANASONIC INDUSTRY. Optimal solution for circuit design: technical information: LC filters. *Panasonic*, Kadoma, 1º jul. 2020. Disponível em: <http://tinyurl.com/me658zs2>. Acesso em: 3 jan. 2024.

RADIOESCUTA DX. *Antena loop de quadro eficiente para ondas médias*. 22 ago. 2003. Disponível em: <http://tinyurl.com/22jed7fp>. Acesso em: 3 jan. 2024.

RS PRO. Datasheet: RS Pro 1 Phase 3.6kVA Variac, 1 Output, 240V. *RS Pro*, Madrid, 4 fev. 2021. Disponível em: <http://tinyurl.com/5w5kk6z2>. Acesso em: 3 jan. 2024.

SANWA. Datasheet: EM 7000 Analog Multitester, applications and features. *Sanwa Electric*, Tokyo, 26 set. 2015. Disponível em: <http://tinyurl.com/2s4zdjj2>. Acesso em: 3 jan. 2024.

SILVA, H. S. Cálculo de indutores com núcleo de ar. *Research Gate*, 14 fev. 2015. Disponível em: <http://tinyurl.com/ycyjuku4>. Acesso em: 3 jan. 2024.

UNITEL. Manual de instruções: Autotransformador 750VA – Bivolt. *Unitel Transformadores*, Pelotas, 1º jul. 2019. Disponível em: <http://tinyurl.com/yr4kfzpr>. Acesso em: 3 jan. 2024.

WHEELER, H. A. Formulas for the Skin Effect. *Proceedings of the I.R.E.*, New York, v. 30, n. 9, p. 412-424. Disponível em: <http://tinyurl.com/54yy9nh4>. Acesso em: 3 jan. 2024.



Handwriting practice lines consisting of 30 horizontal blue lines. Each line is preceded by a small blue vertical margin line on the left side.



Handwriting practice lines consisting of 28 horizontal blue lines. The first 10 lines are grouped into five pairs, each pair separated by a larger gap. The remaining 18 lines are continuous and closely spaced.







Informações:  
[www.sepi.unip.br](http://www.sepi.unip.br) ou 0800 010 9000