

Tópico 7

Transdutores

Autores: José Raimundo de Oliveira e Wu Shin-Ting

DCA - FEEC - Unicamp

Setembro de 2019

Sensores e Atuadores	3
Modelamento de sensores e de atuadores	3
Propriedades de Sensores Digitais	4
Precisão	4
Faixa Dinâmica (Dynamic Range)	4
Quantização	5
Ruído	5
Amostragem	6
Sensores	7
Classificação quanto à grandeza física detectável	7
Classificação quanto ao princípio de operação	8
Classificação quanto à fonte de alimentação	10
Exemplos de Sensores	10
Chave	10
Acelerômetros	12
O que deve ser considerado para especificar um acelerômetro?	13
Exemplos de aplicação de acelerômetro	14
Sensor de pressão	15
O que é pressão?	15
Princípio de funcionamento de um sensor de pressão	16
Sensores de pressão em MEMS	17
Sensores de temperatura	17
Sensores de medição de distância	19

Sensores de rotação (encoder)	21
Tecnologia de Encoder	21
Saída de sinal de Encoder	23
Encoder óptico incremental	23
Encoder absoluto	24
Problemas de projetos com sensores	25
Atuadores	26
Dispositivos Acionadores	27
Transistores	28
Transistor NPN como uma chave	28
Transistor PNP como uma chave	28
Transistores de Potência	29
Tiristores	31
SCR	31
TRIACs	32
Optoacopladores	33
Acoplador óptico foto-transistor	34
Aplicações de optoacopladores	35
PWM - Modulação por largura de pulso	37
Exemplos de Atuadores	37
Circuitos de Acionamento Resistivos	38
Circuitos de Acionamento de Leds	38
Displays de 7 Segmentos	38
Matriz de Leds	39
Circuito integrado para o acionamento de matriz de LED's ou de conjunto de display de 7 segmentos	39
Circuitos de Acionamento de Laser	40
Circuitos de Acionamento Indutivos	41
Solenóides	42
Relés	44
Motores CC	46
Servomotor	50
Micro servomotor	50
Motores sem escova (BLDC = BrushLess DC Motors)	51
Motor de Passo	52
Terras Digitais e Analógicos	52

Abstração dos Sensores de Atuadores em Sistemas Digitais	53
Modos de Acessos Assíncronos	54
Exercícios	57
Referências	58

7 Sensores e Atuadores

Este tópico aborda as propriedades fundamentais de sensores e atuadores como pontes entre **os mundos físico e cibernético**.

Um **sensor** é um dispositivo que mede uma quantidade física. Um **atuador** é um dispositivo que altera uma quantidade física (Lee & Seshia, 2017).

Em sistemas eletrônicos, os sensores geralmente produzem uma voltagem que é proporcional à quantidade física a ser medida. A tensão pode então ser convertida para um número por um conversor analógico-digital (ADC) (Seção 8.3). Um sensor que é empacotado com um ADC é chamado de **sensor digital**, enquanto um sensor sem um ADC é chamado de **sensor analógico**.

Por outro lado, um atuador é comumente acionado por uma tensão que pode ser obtida a partir de um número por um conversor analógico-digital (DAC). Um atuador que é empacotado com um DAC (Seção 8.2) é chamado de **atuador digital**.

Mais recentemente, estão disponíveis no mercado alguns *chips* que integram sensores digitais ou atuadores digitais junto com microprocessadores. São os chamados **sensores inteligentes** ou **atuadores inteligentes**. Se junto com estes sensores e atuadores inteligentes estiverem integradas interfaces de rede, isto permite que eles possam formar as **redes de sensores e de atuadores**, que se ligados à *internet* permitem o acesso remoto aos sensores e aos atuadores.

Os sensores e atuadores podem ser classificados em:

- **simples**: quando a transdução é feita em um único estágio, como a conversão de energia luminosa em energia elétrica em fotodiodos.
- **compostos**: quando a transdução é feita em vários estágios entre o sinal de entrada e o sinal de saída (Figura 7.0-1), como o controle de um motor pelo chaveamento de um relé via um microcontrolador. Neste caso, temos dois estágios de transdução. O primeiro estágio é a conversão de energia elétrica para a energia magnética, responsável pelo acionamento do relé. Este acionamento fecha o circuito de

alimentação de um motor. Ocorre, então, a conversão de energia elétrica em energia mecânica.



Figura 7.0-1: Transdutores compostos (Fonte: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/transdutor.htm>).

7.1. Modelamento de sensores e de atuadores

Idealmente, a função de transferência de um sensor, ou seja, a relação entre a grandeza física medida $x(t)$ e o valor da medição obtida é uma função afim $f(x(t))$ ¹, do tipo

$$f(x(t)) = ax(t) + b, \quad 6-1$$

onde:

- a é **constante de proporcionalidade**, ou seja, a taxa na qual as medições são realizadas, e
- b é o deslocamento ou viés (**offset ou bias**)

Atuadores também podem ser modelados por funções afins. O efeito que um comando a um atuador tem no ambiente físico pode ser razoavelmente aproximado por uma relação como da equação 6-1.

Nenhum sensor ou atuador obedece completamente a relação de uma função afim. Em especial, a faixa de operação (**operating range**) de um sensor, ou seja, o conjunto de valores de uma quantidade física que pode ser medida por ele, é geralmente limitada. Isso vale de forma similar para atuadores.

As faixas de operação de sensores e de atuadores podem ser modeladas por uma função afim dentro de limites inferior (L) e superior (H). Além destes limites, o comportamento da função de transferência é completamente diferente entre os diversos tipos de sensores e atuadores, podendo ser, por exemplo, saturado em valor como:

$$f(x(t)) = \begin{cases} ax(t) + b & \text{se } L \leq x(t) \leq H \\ aH + b & \text{se } x(t) > H \\ aL + b & \text{se } x(t) < L \end{cases}, \quad 6-2$$

onde $L, H \in \mathbb{R}$ e $L < H$.

Mesmo dentro de sua faixa de operação, para muitos sensores e atuadores é útil modelar o grau em que um sensor ou atuador se desvia de uma medida proporcional (sua **não linearidade**) e a quantidade de variação aleatória introduzida pelo processo de medição (seu **ruído**).

Uma das principais preocupações no projeto de sensores e atuadores é que o mundo físico funciona em um espaço multidimensional de tempo e espaço contínuos. É um **mundo analógico**. O mundo do *software*, no entanto, é digital e estritamente quantizado. Medições de fenômenos físicos devem ser quantizadas em magnitude e amostradas em tempo antes do

¹ funções afins (*Affine function*) são, simplesmente, toda funções polinomiais de 1º grau.

software poder operar nelaes. E os comandos para o mundo físico que se originam do *software* também são serão quantificados intrinsecamente. Entender os efeitos dessa quantização é essencial (Lee & Seshia, 2017).

7.2. Propriedades de Sensores Digitais

Especificamente os **sensores e atuadores digitais** possuem algumas propriedades que estão relacionadas à conversão analógica-digital, que detalharemos no Capítulo 8. São elas: Precisão, Faixa dinâmica (*Dynamic range*) e Quantização. Os conceitos destas propriedades são tratados com mais detalhes em (Lee & Seshia, 2017).

7.2.1. Precisão

A **precisão** p de um sensor é a menor diferença absoluta entre dois valores de uma quantidade física cujas leituras do sensor são distinguíveis.

7.2.2. Faixa Dinâmica (*Dynamic Range*)

A faixa dinâmica $D \in R$ de um sensor digital é a razão

$$D = \frac{H-L}{p},$$

onde H e L são os limites da faixa em 6-2. A faixa dinâmica é usualmente medida em decibéis, da seguinte forma

$$D_{dB} = 20 \left(\frac{H-L}{p} \right).$$

7.2.3. Quantização

Um sensor digital representa uma quantidade física usando um número de n bits, onde n é um número inteiro pequeno. Existem apenas 2^n números distintos; portanto, esse sensor pode produzir apenas 2^n medições distintas. A quantidade física real pode ser representada por um número real $x(t) \in R$, mas para cada um desses $x(t)$, o sensor deve selecionar somente um dos 2^n números para representá-lo. Esse processo é chamado de **quantização**. Para um sensor digital ideal, duas grandezas físicas que diferem pela precisão p serão representadas por grandezas digitais que diferem em um *bit*, de modo que a precisão e a quantização se entrelaçam.

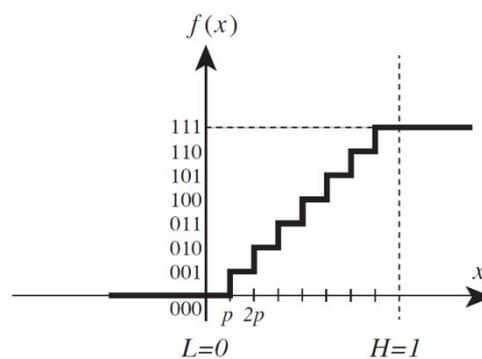


Figura 7.2-1 - Função de distorção de sensor de um sensor digital de 3-bits capaz de medir uma faixa de 0 a 1 volts, onde a precisão é $p = 1/8$ (Lee & Seshia, 2017).

Uma função f como a da Figura 7.2-1 que define a saída de um sensor como uma função de sua entrada é chamada **função de distorção do sensor**. Em geral, um sensor digital ideal de n bits com uma função de distorção do sensor como a mostrada na Figura 7.1-17.1 terá uma precisão p dada por

$$p = \frac{(H-L)}{2^n}.$$

7.2.4. Ruído

Por definição, ruído $n(t)$ é a parte de um sinal que nós não queremos. Ao invés de Se quisermos medir o sinal físico $x(t)$ no tempo t , mas medimos realmente $x'(t)$ que é a soma do que queremos mais o ruído.

$$x'(t) = x(t) + n(t).$$

Para a redução do ruído, primeiro é necessário conhecer a sua fonte. Se for possível identificá-la como interferência externa, adota-se mecanismo de blindagem e isolamento do sinal. Mas muitas vezes, o ruído é inerente ao processo de aquisição do sinal. A própria quantização do sinal pode ser considerada e tratada como ruído.

É importante determinar a **relação sinal-ruído**, que é quanto do sinal medido é o sinal real desejado e quanto é o ruído.

A redução do ruído requer a adoção de filtros. Estes podem ser realizados como circuitos de filtragem com base em capacitores, indutores, resistores e amplificadores sintonizados. A filtragem pode ainda ser feita por processamento digital de sinais, usando métodos estatísticos que fogem ao escopo desta disciplina.

7.2.5. Amostragem

Uma grandeza física $x(t)$ é uma função do tempo t . Um sensor digital irá amostrar a quantidade física em pontos específicos no tempo para criar um **sinal discreto**. Na amostragem uniforme, existe um intervalo de tempo fixo T entre as amostras; T é chamado de **intervalo de amostragem**. O sinal resultante pode ser modelado como uma função $s: Z \rightarrow R$ definido da seguinte forma,

$$\forall n \in Z, s(n) = f(x(nT)),$$

onde Z é o conjunto de inteiros. Ou seja, a quantidade física $x(t)$ é observada apenas em momentos $t = nT$, e a medição é submetida à função de distorção do sensor. **A taxa de amostragem** é $1/T$, que tem unidades de **amostras por segundo**, muitas vezes dadas como Hertz (escrito Hz, significando ciclos por segundo).

Na prática, quanto menor o intervalo de amostragem T , mais custoso se torna fornecer mais *bits* em um ADC. Com o mesmo custo, os ADCs mais rápidos normalmente produzem menos *bits* e, portanto, têm um erro de quantização mais alto ou um intervalo menor.

Sendo o sinal x amostrado decomponível em uma combinação infinita de senóides dividida como uma soma de senos e cossenos, Uma preocupação importante quando o sinal é amostrado é que existem muitas funções distintas x que, quando amostradas estas senóides, produzirão o mesmo sinal s . Esse fenômeno é conhecido como **aliasing**. Os dados amostrados são vulneráveis ao *aliasing*, onde os componentes de alta frequência se disfarçam como componentes de baixa frequência.

Por exemplo, na Figura 7.2-2 uma senóide de alta frequência amostrada com uma baixa taxa parece exatamente como uma senóide de baixa frequência.

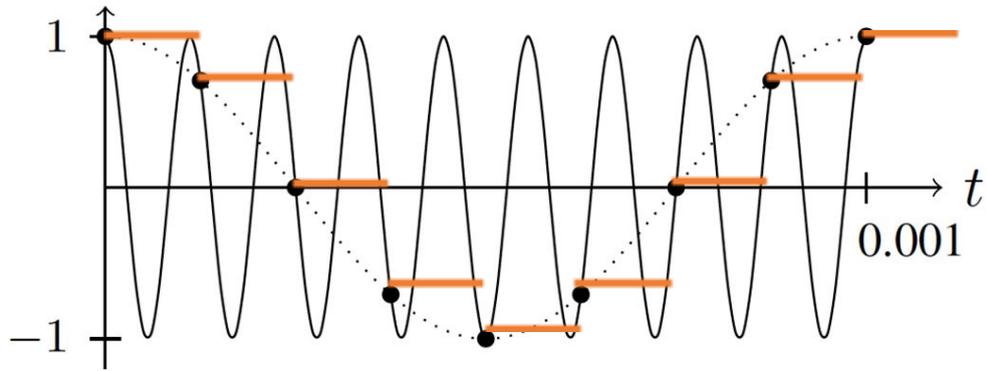


Figura 7.2-2 - Senóide de alta frequência amostrada com uma taxa de amostragem de baixa frequência.

As imagens amostradas digitalmente também são vulneráveis ao *alias*, onde padrões e bordas aparecem como um efeito colateral da amostragem (Figura 7.2-3). A desfocagem óptica da imagem antes da amostragem evita o *alias*, uma vez que a desfocagem é uma filtragem espacial de passagem baixa, que remove frequências altas que não podem ser amostradas adequadamente pela frequência de amostragem.

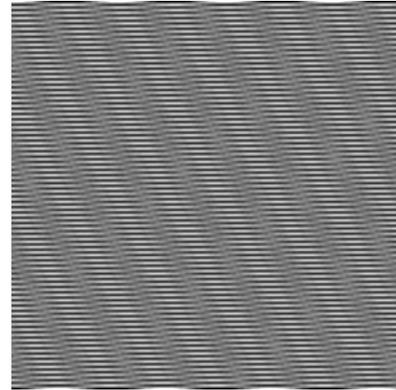


Figura 7.2-3 - Imagens subamostradas

A modelagem cuidadosa das fontes de sinal e o condicionamento de sinal analógico, ou a sobreamostragem (*oversampling*) digital, são necessários para atenuar o efeito.

O *aliasing* é um fenômeno complexo e sutil, mas uma regra prática útil para amostragem uniforme é fornecida pelo **teorema de amostragem de Nyquist-Shannon**. Este teorema nos diz que um sinal com frequência máxima de f_{max} deve ser amostrado numa taxa de amostragem de, pelo menos, $2 \times f_{max}$ (Figura 7.2-4)

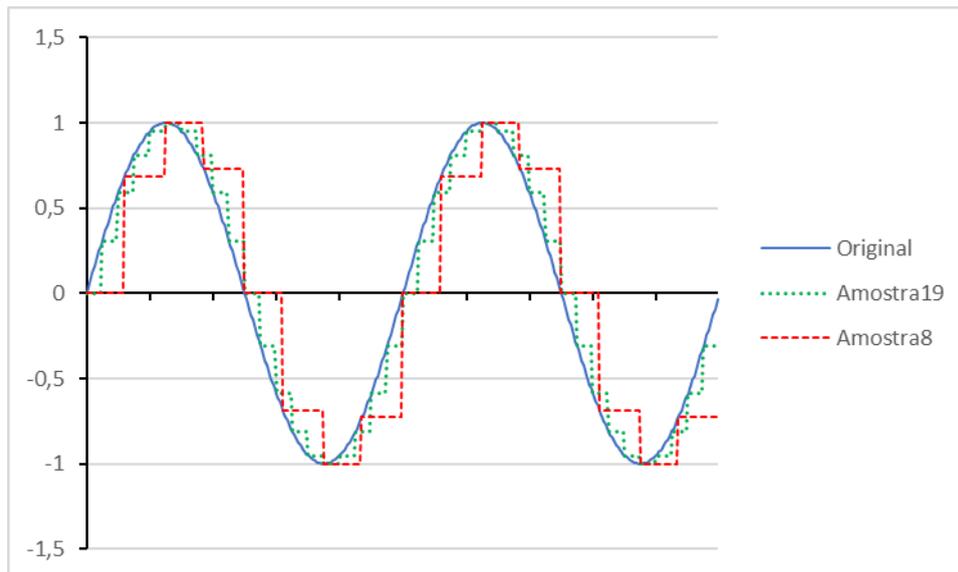


Figura 7.2-4 -- Sinal senoidal amostrado com diferentes frequências de amostragem maiores que a frequência do sinal original

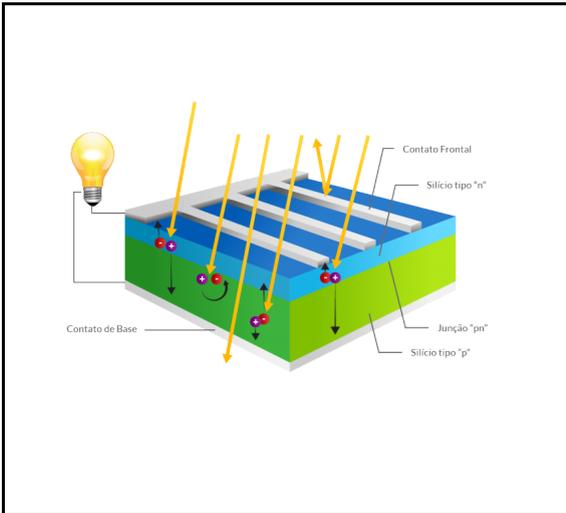
7.3. Sensores

Sob o ponto de vista de projetos de circuitos de interface com microcontroladores ou microprocessadores, é importante ter uma noção do princípio de funcionamento dos sensores.

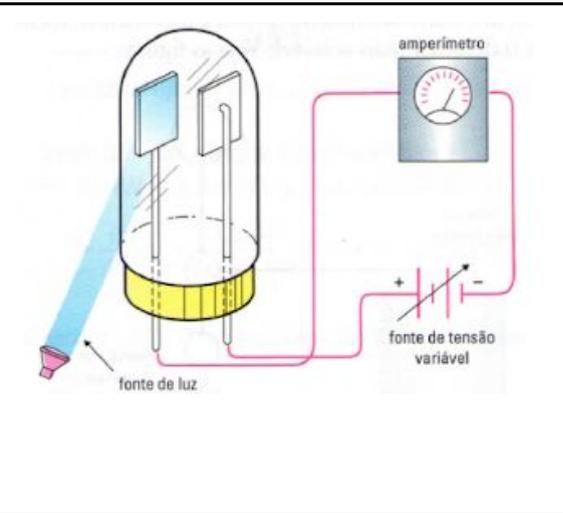
7.3.1. Classificação quanto ao princípio de operação

Quanto ao princípio de operação, estes podem ser classificados em (Figura 7.3-1):

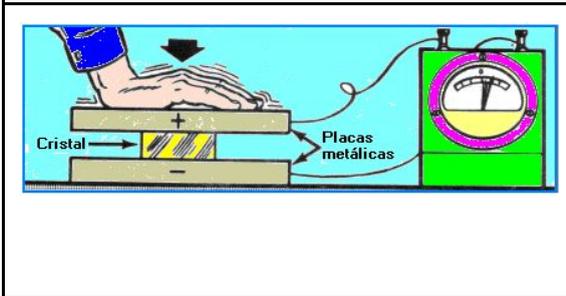
- **efeito fotovoltaico:** surgimento de uma tensão elétrica num material **semi-condutor**, quando exposto à radiação luminosa.
- **efeito fotoelétrico**, ou efeito Hertz: emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando exposto à radiação luminosa.
- **efeito piezoelétrico:** capacidade de alguns cristais gerarem uma corrente elétrica como resposta a uma força mecânica.
- **efeito resistivo:** variação da resistência em função da variação da resistividade do material.
- **efeito por indução mútua:** variação da indução mútua (força eletro-motriz f.e.m) entre uma bobina primária e um ou vários enrolamentos secundários, em resposta ao deslocamento de um campo magnético.
- **efeito eletromagnético:** variação na força eletro-motriz (f.e.m) induzida nos terminais de uma ou mais bobinas como resposta ao movimento do campo magnético.
- **efeito Hall:** deflexão (diferencial transversal no potencial) de um feixe de elétrons quando passa através de um campo magnético perpendicular ao feixe.
- **efeito capacitivo:** variação da capacitância em função da distância das placas condutoras, dielétrico, ou variação da propriedade do material condutor.
- **efeitos químicos:** reações químicas do biomaterial, compostos químicos, ou ambos, resultando na variação das propriedades elétricas destes elementos.



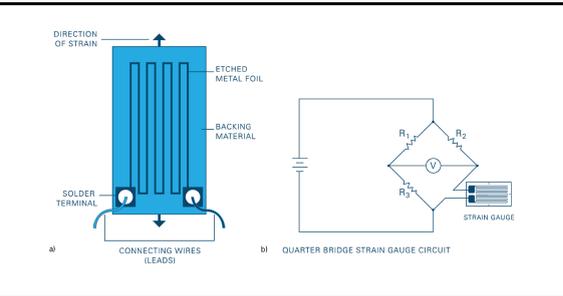
(a) efeito fotovoltaico



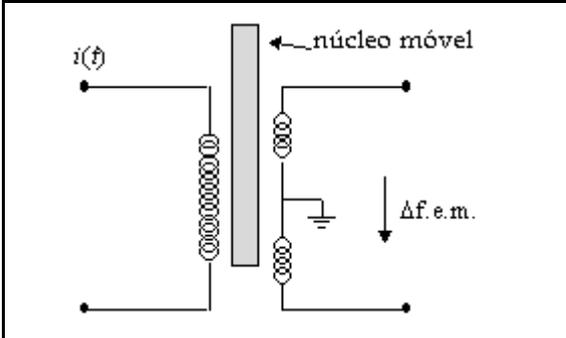
(b) efeito fotoelétrico



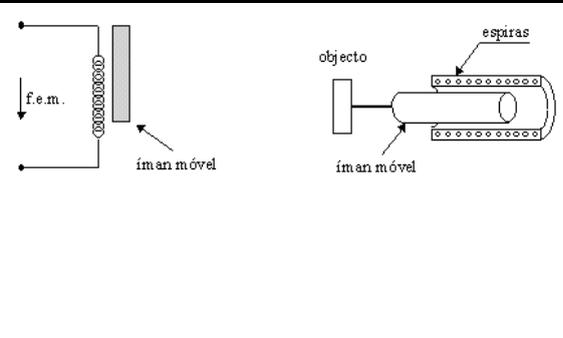
(c) efeito piezoelétrico



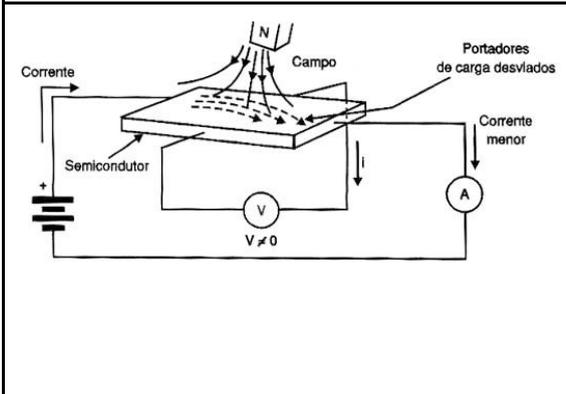
(d) efeito resistivo



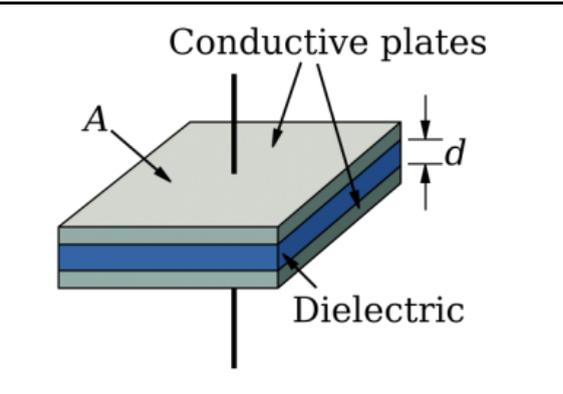
(e) efeito por indução mútua



(f) efeito eletromagnético



(g) efeito Hall



(h) efeito capacitivo

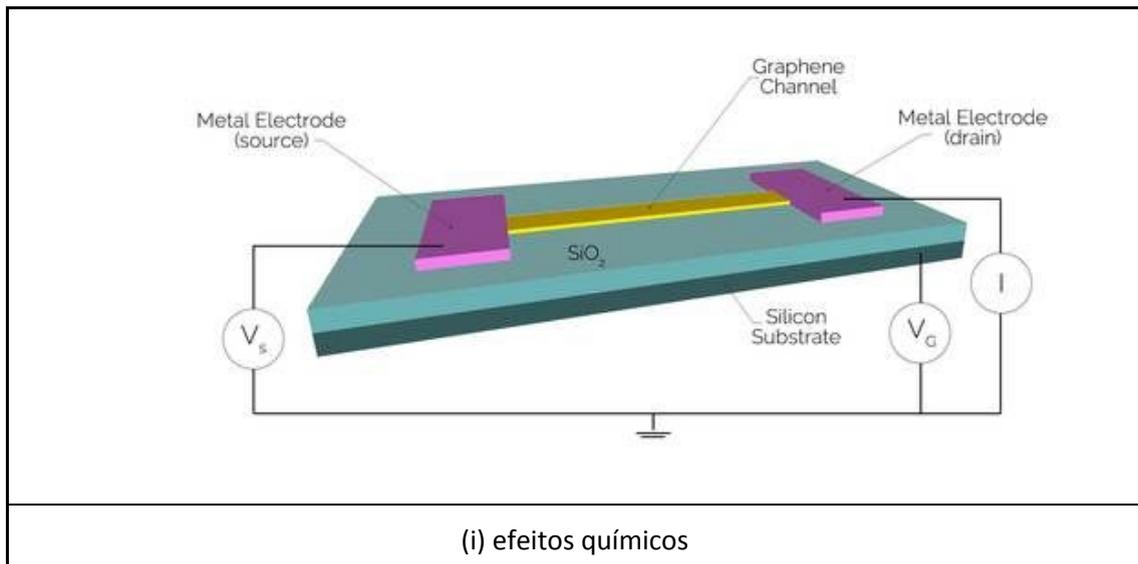


Figura 7.3-1: Princípios de operação dos sensores.

7.3.2. Classificação quanto à fonte de alimentação

Igualmente importante para projeto de circuitos de interface entre os sensores e os micro-processadores ou controladores é a demanda por uma fonte de alimentação externa para identificar as variações das grandezas físicas de interesse. Quanto à fonte de alimentação, os sensores podem ser classificados em:

- **ativos:** geram um sinal elétrico de saída em resposta a um estímulo sem uma fonte de alimentação externa. Células fotovoltaicas, cristais piezoelétricos e termopares são exemplos de sensores ativos.
- **passivos:** precisam ser excitados por uma fonte de alimentação externa para gerar um sinal elétrico de saída. Potenciômetros são exemplos de sensores resistivos passivos.

7.4. Exemplos de Sensores

Nesta seção, serão considerados somente exemplos dos seguintes dispositivos de sensoriamento construídos, a maioria com uso dos sensores apresentados na Seção 7.3: chaves (*switches*), acelerômetros, sensores de pressão, sensores de temperatura, sensores de medição de distância e sensores de velocidade de giro (*encoder*).

7.4.1. Chave

Uma chave (*switch*) é o sensor mais simples. Trata-se de um dispositivo puramente mecânico que, simplesmente, fecha ou abre circuito elétrico. Em circuitos eletroeletrônicos, o seu uso mais conhecido é na interação com o humano, por exemplo, o teclado de computador. Contudo, se projetado corretamente, uma chave pode, por exemplo, sentir pressão, inclinação ou movimento e muitas vezes pode ser conectado diretamente aos pinos GPIO de um microcontrolador.

Existem vários tipos de chaves. Elas são identificadas pelo número de polos (*poles*), ou seja, o número de circuitos separados a chave pode controlar e pelo número de posições (*throws*), ou seja, quantas posições cada polo pode estar conectado. Por exemplo, uma chave SPDT tem um único polo (*SP – Single Pole*) e duas posições de contato (*DT – Double Throw*). A Figura 7.4-1 ilustra os símbolos de algumas configurações possíveis de chaves. Um contato, ainda, pode ser classificado como Normalmente Aberto (*NO – Normally Open*), ou Normalmente Fechada (*NC – Normally Closed*). Isto indica que ao pressionar, o contato fecha ou abre o circuito, respectivamente.

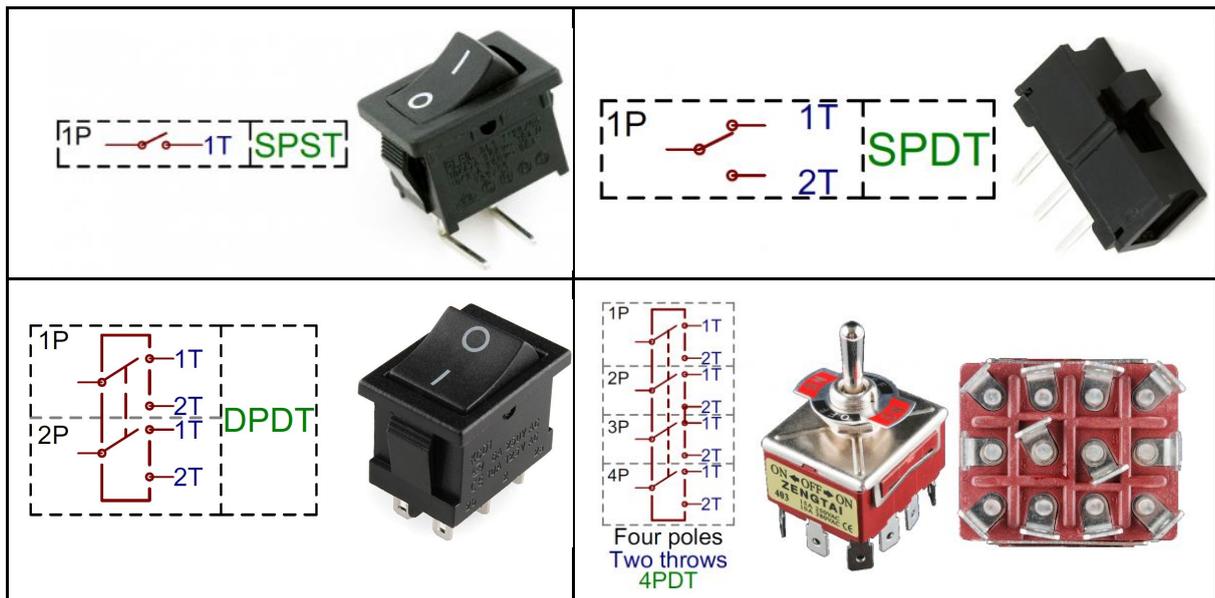


Figura 7.4-1 - Algumas configurações de chaves (Sparkfun, 2019).

O uso de chaves mecânicas, no entanto, requer um cuidado com o fenômeno no contato de **repique (bounce)**. Este fenômeno é baseado no fato de que o fechamento da chave é feito pela colisão entre dois metais. Nessa colisão, durante alguns milissegundos, os metais se separam e se tocam gerando diversos estados de fechamento e abertura do circuito (Figura 7.4-2). Dependendo da aplicação da chave, a duração deste repique não tem significado. Mas se esta chave é utilizada para gerar eventos num sistema computacional, a duração deste repique de um único fechamento de circuito pode gerar diversas reações do sistema, como se esta chave estivesse sendo aberta e fechada inúmeras vezes. O uso de chaves nesta aplicação requer a adoção de mecanismos de proteção contra o repique, chamados em inglês de *Debouncer*. Os mecanismos de *debouncer* podem ser feitos via circuito (*hardware*) ou via programação (*software*). Em *hardware*, ele pode ser feito pelo uso de um *Flip-flop*, por meio de um filtro passa-baixa, ou por meio de chips próprios para isto, como por exemplo, a família MAX6816/MAX6817/MAX6818 da Maxim Integrated (Maxim, 2019) (Figura 7.4-3). Por meio de programação é possível evitar o *bounce* de duas formas:

- **por atraso**, ao ser detectado uma variação na porta de entrada, espera-se um tempo maior que 20ms e lê de novo, se a variação for confirmada assume como existindo. Se não, esquece;
- **por varredura**, porta de entrada do sinal é amostrada periodicamente em intervalos maiores que 20ms. Assim se for detectado uma variação esta é aceita uma única vez.

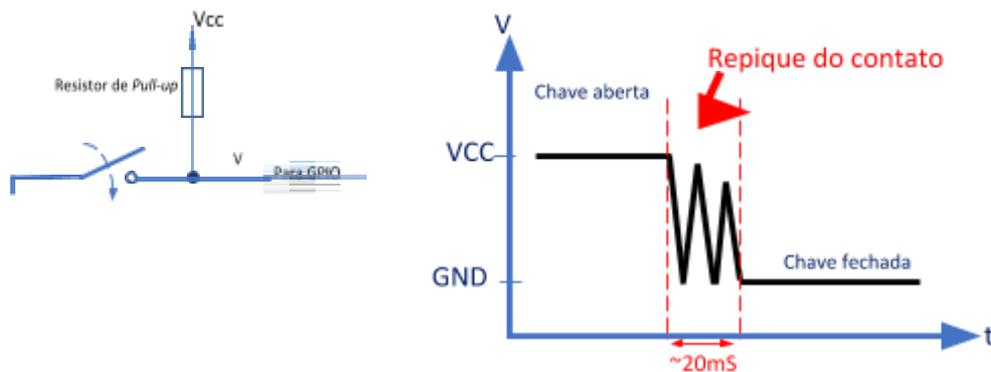
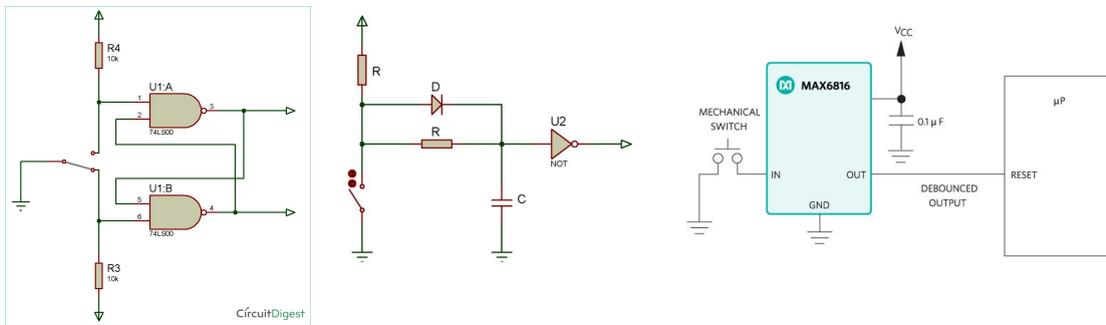


Figura 7.4-2 - Circuito de entrada em GPIO do sinal de uma chave (a) e o efeito de bounce (b)



(a) (b) (c)

Figura 7.4-3 - Circuitos de Debouncer. (a) com uso de chave SPDT e flip-flop (CircuitDigest, 2019); (b) com uso de filtro RC, passa baixa (CircuitDigest, 2019) e (c) com uso de chip dedicado (Maxim,2019).

As chaves podem ser aplicadas como sensores nos seguintes circuitos:

Circuito **detector de limite de curso** indicando, por exemplo, o final de abertura de um portão. Exemplo de chaves de detecção de fim de curso na Figura 7.4-4:

Circuito de **detecção de contato** indicando, por exemplo, um choque com obstáculo;

Sensor de nível, por exemplo, uma chave acionada por uma boia numa caixa d’água, indicando o seu nível máximo;

Sensor de carga, numa balança.



Figura 7.4-4 - Exemplos de chaves de limite de curso.

7.4.2. Acelerômetros

Sensores que detectam mudanças de posição, velocidade, orientação, choque, vibração e inclinação por movimento de sensoriamento são chamados de acelerômetros. Sensores piezoelétricos, piezoresistivos e capacitivos são tipicamente usados nos acelerômetros comerciais para converter os movimentos mecânicos (queda gravitacional) em sinais elétricos. Acelerômetros piezoelétricos são aplicados em condições de alta frequência e alta temperatura. Acelerômetros piezoresistivos são preferíveis em aplicações sujeitas a altos impactos. E acelerômetros capacitivos são apropriados para situações de baixa frequência.

Esses acelerômetros estão disponíveis como sensores analógicos e digitais, com base no sinal de saída. O acelerômetro analógico produz uma tensão variável constante com base na quantidade de aceleração aplicada ao acelerômetro.

Atualmente, acelerômetros são tipicamente implementados em silício segundo a técnica de MEMS – *Micro-Electro-Mechanical Systems*² (veja a Figura 7.3-5), onde o material de silício se deforma sob força gravitacional ou aceleração (Lemkin e Boser, 1999). Circuito mede a deformação e fornece uma leitura digital. Muitas vezes, três acelerômetros são empacotados juntos, dando um acelerômetro de três eixos. Isso pode ser usado para medir a orientação de um objeto em relação à gravidade, além de aceleração em qualquer direção no espaço tridimensional.

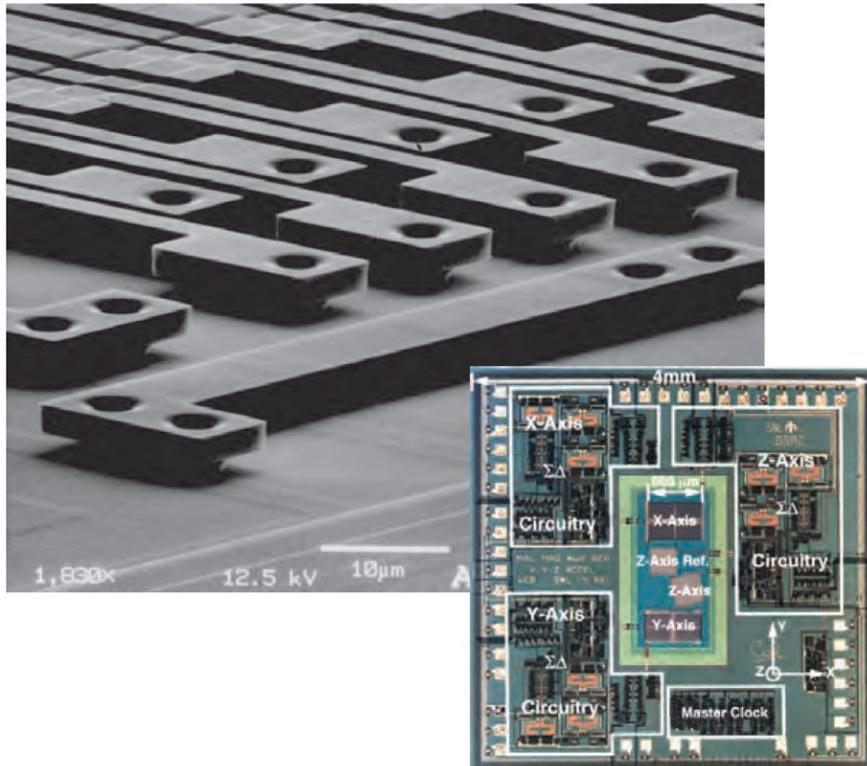
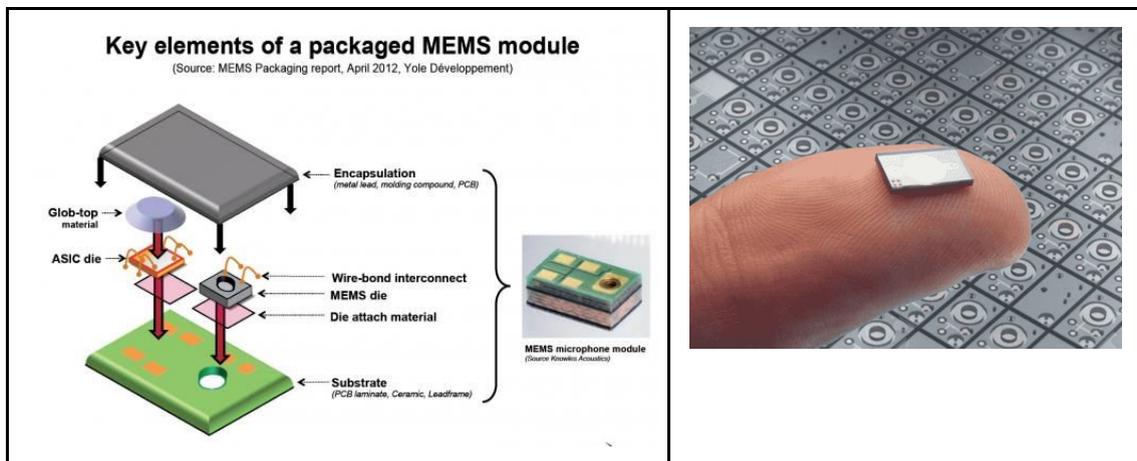


Figura 7.3-5 - Detalhe de um chip acelerômetro

Figura 7.3-z ilustra um dispositivo construído na base da tecnologia MEMS e a sua dimensão média.



² Sistemas Microeletromecânicos, em inglês *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS) é a tecnologia que integra elementos mecânicos, sensores e eletrônicos em um pequeno módulo programável para execução de uma tarefa específica.

Figura 7.3-z: Tecnologia MEMS.

7.4.2.1. O que deve ser considerado para especificar um acelerômetro?

Segundo Dimension (2019) ao iniciar um projeto que envolva o uso de acelerômetro deve-se prestar atenção aos seguintes pontos:

Analógico vs digital - Em primeiro lugar, você deve escolher entre um acelerômetro com saídas analógicas ou saídas digitais. Isso será determinado pelo *hardware* com o qual você está conectando o acelerômetro. Acelerômetros de estilo analógico emitem uma tensão contínua proporcional à aceleração. Por exemplo, 2,5V para 0g³, 2,6V para 0,5g, 2,7V para 1g. Acelerômetros digitais geralmente usam modulação de largura de pulso (PWM) para sua saída. Isso significa que haverá uma onda quadrada de uma certa frequência, e a quantidade de tempo que a tensão é alta será proporcional à quantidade de aceleração.

Se a ligação for com um microcontrolador com entradas puramente digitais, você provavelmente precisará de um acelerômetro de saída digital. A desvantagem aqui é que ele requer que você use os recursos de temporização do microcontrolador para medir o ciclo de trabalho, bem como realizar uma operação de divisão computacionalmente intensiva.

Se estiver usando um microcontrolador com entradas analógicas, ou um circuito completamente analógico, o analógico é quase sempre ao melhor escolha caminho a percorrer. Dependendo do compilador, a medição da aceleração analógica pode ser tão simples quanto à execução de uma instrução a *aceleração = read_adc ();* e pode ser feito em poucos microssegundos.

Número de eixos - para a maioria dos projetos, dois são suficientes. No entanto, se você quiser tentar o posicionamento em 3D, precisará de um acelerômetro de 3 eixos ou dois de 2 eixos montados em ângulos retos.

Balanço máximo - Se você só se importar em medir a inclinação usando a gravidade da Terra, um acelerômetro de $\pm 1,5$ g será mais que suficiente. Se você for usar o acelerômetro para medir o movimento de um carro, avião ou robô, ± 2 g deverá lhe dar espaço suficiente para trabalhar. Para um projeto que experimenta partidas ou paradas muito súbitas, você precisará de um que possa lidar com ± 5 g ou mais.

Sensibilidade - De um modo geral, quanto mais sensibilidade, melhor. Isso significa que, para uma determinada mudança na aceleração, haverá uma mudança maior no sinal. Como as mudanças de sinal maiores são mais fáceis de medir, você obterá leituras mais precisas.

Largura de banda - Isso significa que a quantidade de vezes por segundo que você pode obter uma leitura de aceleração confiável. Para aplicações de detecção de inclinação em movimento lento, uma largura de banda de 50Hz provavelmente será suficiente. Se você pretende fazer medições de vibração ou controlar uma máquina em movimento rápido, você precisará de uma largura de banda de várias centenas de Hz.

Problemas de impedância/buffer - Esta é de longe a fonte mais comum de problemas em projetos envolvendo acelerômetros analógicos, porque tão poucas pessoas leem a documentação exigida. Tem que levar em conta a compatibilidade da impedância de saída do sensor com a esperada pelo circuito de conversão. A solução envolve o uso de amplificador operacional como *buffer* para diminuir a impedância de saída.

7.4.2.2. Exemplos de aplicação de acelerômetro

Cabe citar aqui três exemplos corriqueiros de aplicação do nosso dia a dia que têm embutidos dispositivos acelerômetro, são eles:

³ A unidade de medida de um acelerômetro é a gravidade da Terra: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

- **Airbag**, permite o seu disparo ao sentir uma desaceleração brusca.
- Contador de passos (**pedômetro**), por exemplo, em *smartwatch*
- Em *smartphone*, a **orientação da tela**, vertical ou horizontal em função de como é segurado o aparelho

Exemplos de dispositivos acelerômetro

ADXL345: é um acelerômetro de 3 eixos, pequeno, fino, ultrabaixo, com alta resolução (13 bits) e medição de até ± 16 g. Os dados digitais de saída são formatados em 16 bits em completo de dois e podem ser acessados por meio de uma interface digital SPI (3 ou 4 fios) ou I2C (Capítulo 9). Fabricado pela Analog Devices, Inc. Data sheet disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf>.

Kionix KXTF9: é um acelerômetro de 3 eixos. Size: 3x3x0.9mm. Usado em smartphones. Fabricado pela Kionix Inc. Data sheet disponível em: <http://kionixfs.kionix.com/en/datasheet/KXTF9-4100%20Specifications%20Rev%206.pdf>

LIS244ALH: acelerômetro analógico de dois eixos. Fabricado pela STMicroelectronics. Data sheet disponível em <https://datasheetspdf.com/pdf-file/643053/STMicroelectronics/LIS244ALH/1>.

7.4.3. Sensor de pressão

(Tradução de Avnet, 2019)

Como existem muitos tipos diferentes de aplicações para sensores de pressão, existem muitos tipos de sensores disponíveis com uma ampla variedade de características, seja para ambientes agressivos ou corrosivos, equipamentos médicos ou dispositivos móveis. Selecionar um sensor de pressão significa escolher entre uma vasta gama de tecnologias, pacotes, níveis de desempenho e recursos, a fim de atender a diversas demandas por medições precisas de pressão, como:

- Pressão de gás dentro de um tanque, como um reservatório de compressor industrial.
- Nível de medição ou volume de líquido contido pela detecção da pressão no fundo de um vaso.
- Medir diferenças de pressão entre dois pontos em um sistema, como um meio de monitorar ou quantificar o fluxo de líquidos ou gases.
- Pressão barométrica: alteração da pressão atmosférica com as condições meteorológicas ou com a altitude. Útil em estações meteorológicas, monitoramento ambiental ou para ajudar a calcular a navegação morta⁴ junto com GPS ou triangulação de células.

7.4.3.1. O que é pressão?

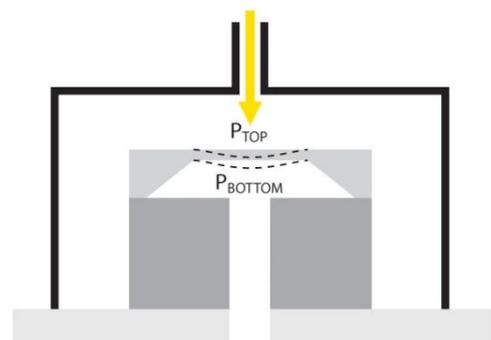
$$Press\tilde{a}o = \frac{For\tilde{c}a}{\tilde{A}rea}$$

Em unidades do Sistema Internacional (MKS), uma força de um Newton, aplicada a uma área de um metro quadrado, exerce uma pressão de um **Newton por metro quadrado, ou um Pascal**.

Qualquer tipo de sensor de pressão contém um mecanismo ou estrutura que reage proporcionalmente a uma força aplicada. A área sobre a qual a força é aplicada é constante, para uma dada estrutura de sensor.

Existem três tipos diferentes de pressão que podem ser medidos: manométrica, absoluto e diferencial.

Pressão manométrica



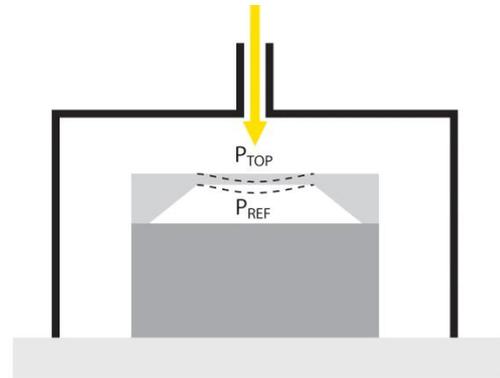
⁴ Navegação em regiões onde a GPS perde a sensibilidade.

Pressão manométrica é a pressão medida em relação à pressão atmosférica ambiente. Pode ser positivo para pressões mais altas que atmosféricas ou negativo para pressões mais baixas. Um sensor de pressão de manômetro terá duas portas, permitindo que a mídia seja à pressão de referência e à pressão. Uma aplicação típica para um sensor de pressão manométrica é medir os níveis de líquido em um tanque ventilado usando a diferença de pressão hidrostática e pressão atmosférica ambiente.

Pressão absoluta

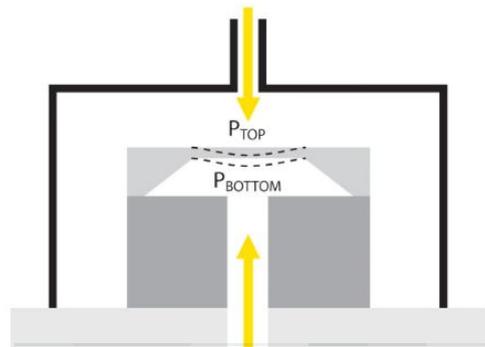
Sensores de pressão absoluta fornecerão o resultado em relação a zero (um vácuo perfeito). Os sensores terão uma porta para a mídia entrar e exercer pressão no elemento sensor, produzindo uma mudança positiva na saída, de magnitude proporcional à pressão aplicada.

Isso é útil em aplicações que estão medindo a pressão atmosférica, talvez para determinar a altitude. Sensores de pressão absoluta também são usados em aplicações de medição de pressão que serão usadas em diferentes altitudes, uma vez que a pressão atmosférica varia com a altitude, a pressão do manômetro não forneceria uma leitura precisa. Esse tipo de sensor é usado em sistemas de monitoramento de pressão dos pneus para otimizar o desempenho dos pneus.



Pressão diferencial

Os sensores de pressão diferencial medem a diferença de pressão entre dois pontos, semelhante à maneira como um sensor de manômetro funciona. Mas, neste caso, a pressão de referência é um dos pontos no sistema, conforme determinado pelo projetista do sistema. A mudança na saída diferencial é positiva ou negativa, dependendo de qual é maior. A magnitude da mudança é proporcional à diferença de pressão entre os dois domínios.



Por exemplo, às vezes, sensores diferenciais são usados para detectar a diferença de pressão em ambos os lados de um objeto. Sensores de pressão diferencial são frequentemente usados para monitorar o fluxo de ar em aplicações de HVAC⁵.

7.4.3.2. Princípio de funcionamento de um sensor de pressão

Um sensor eletrônico de pressão depende de uma reação física à pressão aplicada e depois mede eletronicamente a alteração proporcional resultante. Os fenômenos comumente usados incluem alterações na capacitância ou alterações na resistência ôhmica de um extensômetro ou elemento piezoelétrico, que são proporcionais à magnitude da deflexão quando a pressão é aplicada.

Critérios importantes como faixa de medição, adequação ambiental, tamanho físico e requisitos de energia e o tipo de medição de pressão necessária terão uma influência significativa nos engenheiros que procuram uma solução específica para a aplicação.

Sensores de pressão capacitiva

⁵ A sigla HVAC, *Heating, Ventilating and Air Conditioning*, é traduzida para português em AVAC, Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado, refere-se à funções básicas dos sistemas de climatização.

Um sensor de pressão capacitiva contém um capacitor com uma placa rígida e uma membrana flexível como eletrodos. A área desses eletrodos sendo fixa, a capacitância é proporcional à distância entre os eletrodos. A pressão a ser medida é aplicada ao lado da membrana flexível e a deflexão resultante causa uma alteração na capacitância que pode ser medida usando um circuito elétrico.

Sensores de pressão para manômetros

Em um sensor de pressão do tipo extensômetro, os extensômetros de folha ou de silício são dispostos como uma ponte de Wheatstone. O extensômetro é acoplado a algum tipo de diafragma, que desvia quando a pressão é aplicada. O sinal resultante é então medido, amplificado e condicionado pelo circuito da ponte de Wheatstone para fornecer uma saída adequada de tensão do transdutor ou corrente do transmissor representativa da pressão aplicada, conforme mostrado no diagrama da Figura 7.3-y.

Sensores de pressão piezoresistivos

Os elementos sensores piezoresistivos também podem ser dispostos em uma formação de ponte semelhante. O diagrama na Figura 7.4-y ilustra como os elementos sensores de um sensor de pressão do tipo ponte são conectados a um diafragma flexível, de modo que a resistência muda de acordo com a magnitude da deflexão do diafragma. A linearidade geral do sensor depende da estabilidade do diafragma, ao longo da faixa de medição indicada, bem como da linearidade dos extensômetros ou elementos piezoresistivos.

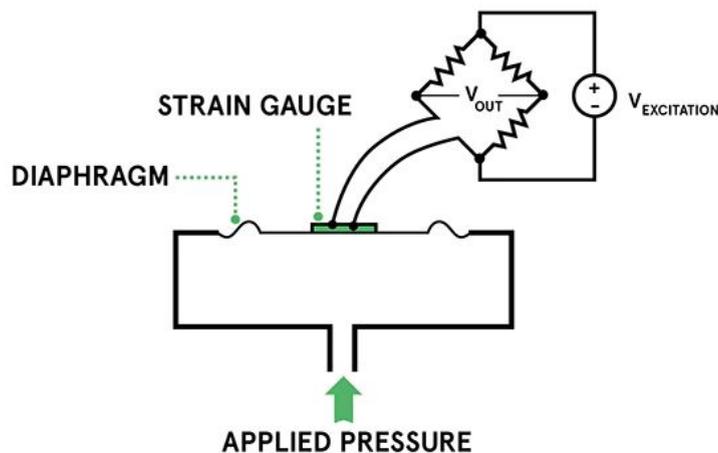


Figura 7.4-y: Sensor de pressão piezoresistivo.

7.4.3.3. Sensores de pressão em MEMS

É fácil imaginar um sensor de pressão piezoresistivo ou capacitivo como um grande dispositivo, como um componente eletrônico grande ou um módulo pronto para se fixar na lateral de um tanque - mas nem sempre é esse o caso.

Um mecanismo piezo ou sensor de pressão capacitivo também pode ser fabricado em silício como um dispositivo MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) e embalado como um dispositivo de montagem SMD compacto, medindo tipicamente apenas cerca de 2-3 mm por lado.

Dispositivos MEMS, que incluem não apenas sensores de pressão, mas também sensores de movimento ou posição, e microfones de silício, são extremamente pequenos, estáveis e econômicos, trazendo funcionalidades avançadas para equipamentos com espaço e custo limitados, como celulares e pontos de extremidade de IoT (Figura 7.3-z).

7.4.4. Sensores de temperatura

A temperatura é uma das quantidades ambientais mais comumente medidas por diferentes razões. Existem diferentes tipos de sensores de temperatura que podem medir a temperatura, como termopares, termistores, sensores de temperatura semicondutores, detectores de temperatura de resistência (RTDs) e assim por diante. Com base no requisito, diferentes tipos de sensores são usados para medir a temperatura em diferentes aplicações.

O DS1620 é um sensor de temperatura digital que fornece a temperatura do dispositivo com leituras de temperatura em 9 *bits*. Ele atua como termostato com suas três saídas de alarme térmico (Figura 7.3-9(a)). Se a temperatura do dispositivo for maior ou igual à temperatura TH definida pelo usuário, THIGH será elevado. Se a temperatura do dispositivo for menor ou igual à temperatura definida pelo usuário TL, o TLOW será acionado alto. Se a temperatura do dispositivo exceder TH e permanecer alta até cair abaixo da temperatura TL, o TCOM será acionado alto. Usuários podem configurar/programar o sensor tanto para leitura quanto para escrita através de comandos, em 8 *bits*, enviados serialmente até o pino DQ (Figura 7.3-9(b)). A leitura serial é também feita pelo pino DQ.

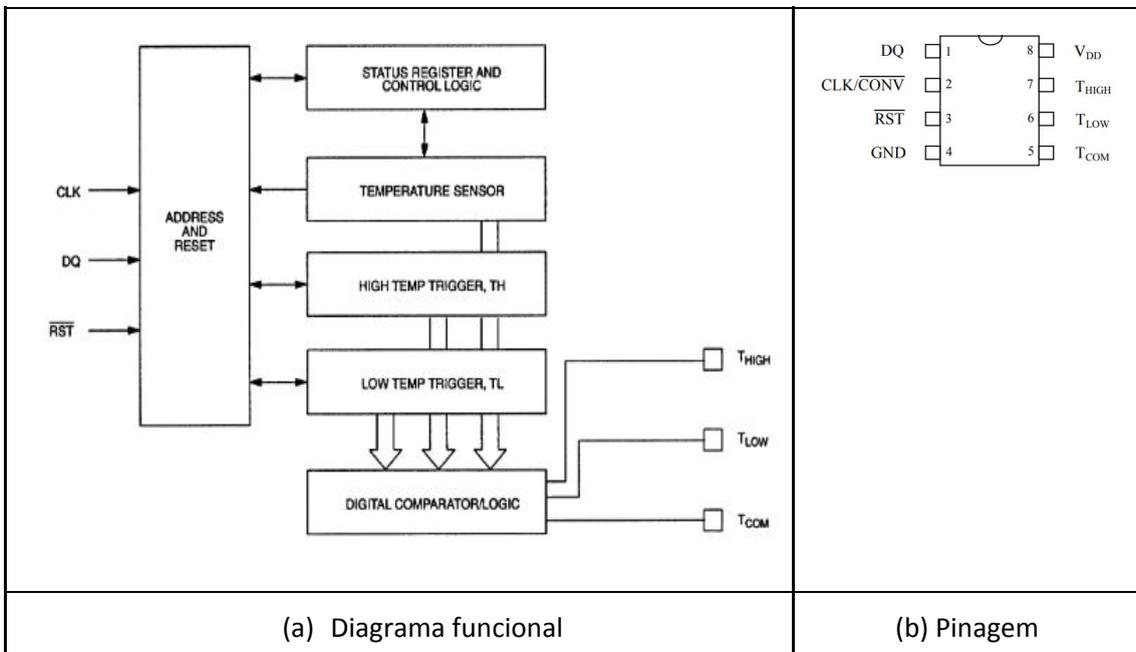


Figura 7.3-9: Sensor de temperatura DS1620 programável.

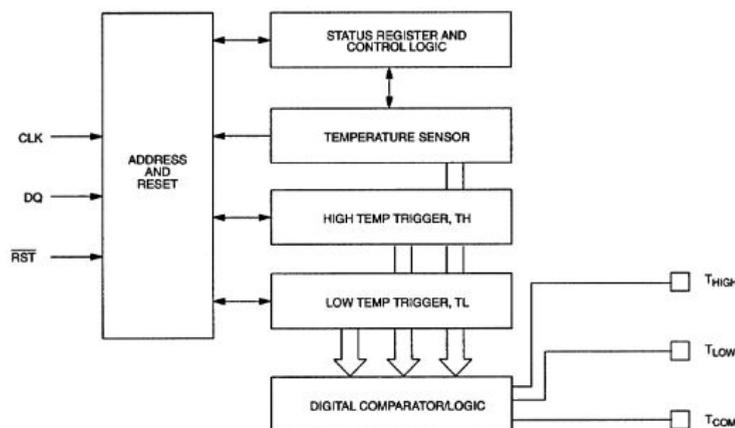
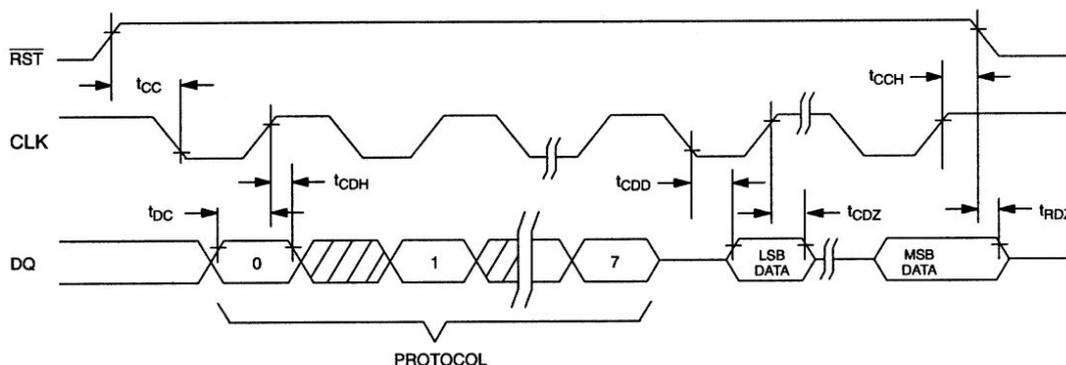


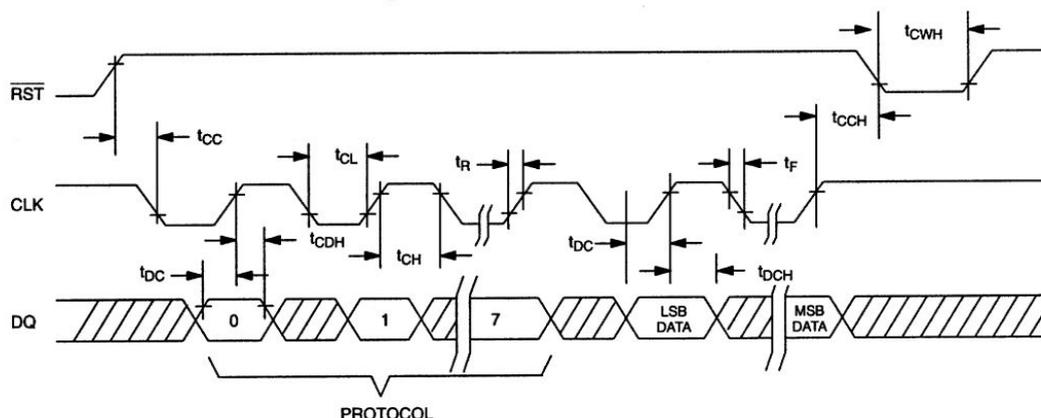
Figura 7.3-9 - Diagrama funcional do DS1620

Os diagramas de tempo na Figura 7.3-w mostram a temporização dos sinais nos ciclos de leitura e de escrita do sensor DS1620. Observe que os *bits* são transferidos na borda de subida do sinal de CLK e que os dados, na ordem de LSB (*Least Significant Bit*) a MSB (*Most Significant Bit*), são transferidos após o envio dos 8 *bits* de comando. Tanto no ciclo de leitura quanto no ciclo de escrita o sinal /RST deve estar em 1.

READ DATA TRANSFER Figure 4



WRITE DATA TRANSFER Figure 5



NOTE: t_{CL} , t_{CH} , t_R , and t_F apply to both read and write data transfer.

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (-55°C to +125°C; $V_{DD}=2.7V$ to 5.5V)

PARAMETERS	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Temperature Conversion Time	T_{IC}			750	ms	
Data to CLK Setup	t_{DC}	35			ns	8
CLK to Data Hold	t_{CDH}	40			ns	8
CLK to Data Delay	t_{CDD}			150	ns	8, 9, 10
CLK Low Time	t_{CL}	285			ns	8
CLK High Time	t_{CH}	285			ns	8
CLK Frequency	f_{CLK}	DC		1.75	MHz	8
CLK Rise and Fall	t_R, t_F			500	ns	
RST to CLK Setup	t_{CC}	100			ns	8
CLK to RST Hold	t_{CCH}	40			ns	8
RST Inactive Time	t_{CWH}	125			ns	8, 11
CLK High to I/O High-Z	t_{CDZ}			50	ns	8
RST Low to I/O High-Z	t_{RDZ}			50	ns	8
Convert Pulse Width	t_{CNV}	250 ns		500 ms		12

Figura 7.3-w: Diagramas de tempo do sensor DS1620.

7.4.5. Sensores de medição de distância

Um transdutor que trabalha com o princípio semelhante ao sonar ou radar e estimar atributos do alvo através da interpretação é chamado de sensor ultrassônico ou transceptor. Existem diferentes tipos de sensores que são classificados como sensores ultrassônicos ativos e passivos que podem ser diferenciados com base no funcionamento dos sensores.

As ondas sonoras de alta frequência geradas pelos sensores ultrassônicos ativos são recebidas de volta pelo sensor ultrassônico e agem sobre um diafragma flexível, acoplado por exemplo ao núcleo de um eletroímã, à placa de um capacitor ou a um material piezoelétrico, para sinalizar o seu retorno, avaliar o eco. Assim, o intervalo de tempo necessário para transmitir e receber o eco é usado para determinar a distância a um objeto. Este método é usado, onde não podemos implementar os métodos convencionais para medir áreas inacessíveis, como zonas de alta temperatura ou pressão, etc. Os Porém, sensores ultrassônicos passivos são, por sua vez, usados apenas para detectar ruídos ultrassônicos, presentes em condições específicas.

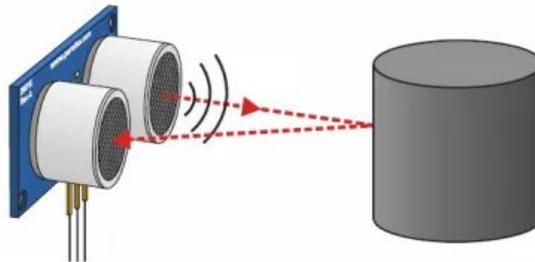


Figura 7.3-10 - Sensor de distância por ultrassom (<https://portal.vidadesilicio.com.br/hc-sr04-sensor-ultrassonico/>)

Figura 7.3-v ilustra a temporização dos sinais do sensor ultrassônico de distância HC-SR04. Note que é necessário gerar um pulso de gatilho (pino *Trigger*) de 10us para iniciar o processo de envio automático de uma sequência de 8 ciclos de pulsos em 40kHz. Quando a sequência de 8 pulsos atinge um obstáculo, ela é refletida e retorna para o sensor. Esse eco sensibiliza o seu sensor interno de áudio e gera o pulso ECHO.

The Timing diagram is shown below. You only need to supply a short 10uS pulse to the trigger input to start the ranging, and then the module will send out an 8 cycle burst of ultrasound at 40 kHz and raise its echo. The Echo is a distance object that is pulse width and the range in proportion. You can calculate the range through the time interval between sending trigger signal and receiving echo signal. Formula: $\mu\text{S} / 58 = \text{centimeters}$ or $\mu\text{S} / 148 = \text{inch}$; or: the range = high level time * velocity (340M/S) / 2; we suggest to use over 60ms measurement cycle, in order to prevent trigger signal to the echo signal.

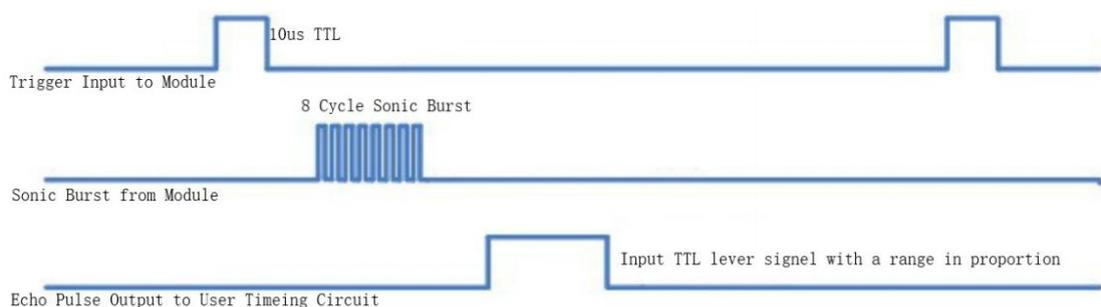


Figura 7.3-v: Diagrama de tempo dos sinais do sensor ultrasônico HC-SR04.

7.4.6. Sensores de rotação (*encoder*)

No controle do acionamento de motores é importante ter uma medição da velocidade de giro do eixo. Um dispositivo importante para esta medida é o chamado *Encoder*. De forma geral, esse dispositivo é acoplado ao eixo de giro, em geral, o próprio eixo do motor, como na Figura 7.3-11.

Encoder são dispositivos/sensores eletromecânicos cuja funcionalidade é transformar posição angular em sinal elétrico analógico ou digital. Com a utilização de *encoders* é possível quantizar distâncias, controlar velocidades, medir ângulos de giro, número de rotações, realizar posicionamentos, rotacionar braços robóticos e plataformas de radar, controlar lentes fotográficas, ler a posição do *mouse* de computador, dentre outras aplicações.



Figura 7.3-11 - Servo motor com o encoder acoplado a seu eixo.

7.4.6.1. Tecnologia de Encoder

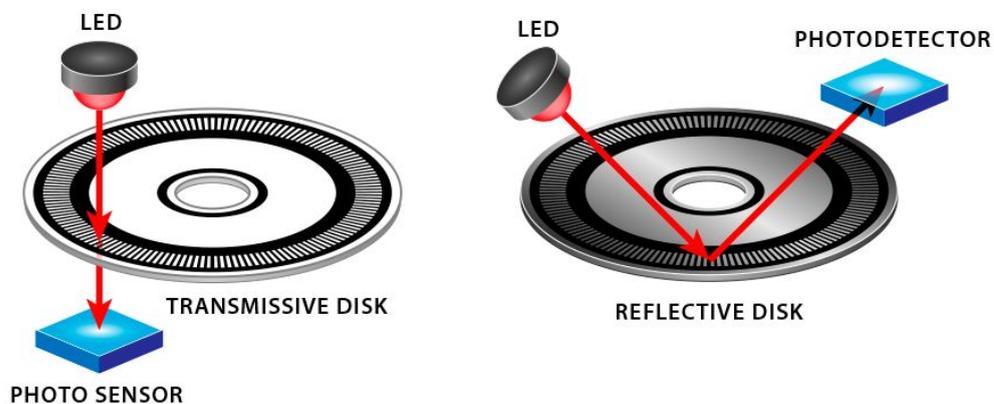
Basicamente um encoder pode ser construído usando uma de quatro tecnologias: por contato, óptico, magnético e capacitivo.

Por contato, feito por escovas condutoras: um disco de PCB (circuito impresso) com trilhas de cobre gravadas em circunferência é usado para codificar as informações de posição e giro. Escovas de contato tocam estas trilhas detectando suas áreas condutoras. Sua aplicação mais frequente é em detecção manual de posição de giro, como por exemplo, o botão seletor de um multímetro como na Figura 7.3-12.



Figura 7.3-12- Detalhe de um circuito de multímetro, mostrando o disco de codificação e as escovas (https://sigrok.org/wiki/UNI-T_UT61D)

Óptico: podem ser de duas formas: a primeira usa uma luz de um LED através de fendas em um disco de metal ou de vidro (**disco transmissivo**), a segunda forma, usa a reflexão de luz sobre um disco com áreas claras e escuras (**disco refletivo**). O tipo óptico de *encoder* é o mais comum. Entretanto, os *encoders* ópticos são muito sensíveis ao pó.



a) Disco transmissivo

b) Disco refletivo

Figura 7.3-13 - Princípio de encoder óptico (<https://www.usdigital.com/news/posts?year=2019&month=4>).

Magnético: Essa tecnologia normalmente usa um ímã e a detecção de campos magnéticos para identificar posição e giro de eixo girante. Esta detecção pode ser por efeito hall. Os *encoder* magnéticos podem operar em ambientes hostis, como alta temperatura, poeira, umidade e vibração nos quais os codificadores ópticos não funcionariam.

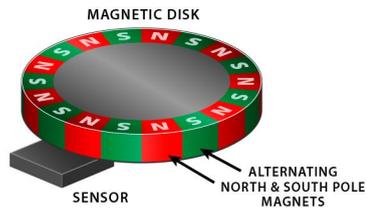


Figura 7.3-14 - Exemplo de encoder magnético (<https://www.usdigital.com/news/posts?year=2019&month=4>)

Capacitivos: *encoders* capacitivos é uma tecnologia mais recente, inerentemente possuem todas as mesmas vantagens ambientais que os codificadores magnéticos de suportar ambientes hostís em termos de poeira e umidade. Um *encoder* capacitivo detecta as mudanças na capacitância usando um sinal de referência de alta frequência. O rotor tem um padrão gravado nele ou usa um *design* especialmente moldado como no lado esquerdo da Figura 7-3.15 nos desenhos acima. Quando este rotor se move entre o transmissor e o receptor, esse padrão modula o sinal de alta frequência do transmissor. O receptor lê as modulações e essas mudanças são traduzidas em incrementos de movimento rotativo. Embora os *encoders* capacitivos possam ser mais suscetíveis a ruídos e interferência elétrica, o seu fabricante pode atenuar esse possível problema com uma construção apropriada. Outro benefício de usar um *encoder* capacitivo é o consumo de corrente tipicamente menor - 10 miliampères não são incomuns.

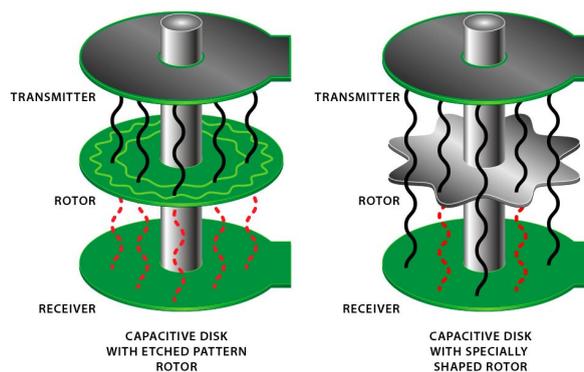


Figura 7.3-15 - Exemplos de encoders capacitivos (<https://www.usdigital.com/news/posts?year=2019&month=4>).

7.4.6.2. Saída de sinal de Encoder

Com respeito à saída do código do *encoder*, ele pode ser de dois tipos, o absoluto e o incremental. A saída do **encoder absoluto** é a posição atual do eixo, fazendo dele um transdutor de ângulo. A saída do **encoder incremental** fornece informação sobre o movimento do eixo, que tipicamente é processado externamente, gerando informação como posição, velocidade e distância. Para descrever as diferenças entre esses tipos, será considerado o *encoder* óptico

O *encoder* óptico é composto basicamente por um disco com marcações, um componente emissor e um receptor. Os *encoders* ópticos utilizam *led* como o componente emissor e um sensor fotodetector como o receptor.

As marcações no disco possuem a funcionalidade de bloqueio e desbloqueio do feixe de luz do *led* para o fotodetector, desse modo à medida que o disco vai girando o fotodetector juntamente com um circuito eletrônico repassa para as saídas do *encoder* um sinal em forma de uma onda quadrada, proporcional ao número de marcações do *encoder*. Este número

define a resolução do mesmo, que equivale à quantidade de pulsos da onda quadrada gerada em uma volta do eixo do *encoder*.

7.4.6.2.1. Encoder óptico incremental

O *encoder* óptico incremental, o mais comum do mercado, possui 3 sinais de saída: "A", "B" e "O". Com esses sinais adquire-se o ângulo de rotação, o sentido da rotação e o início/fim de uma volta. O sinal A é o sinal principal, que fornece os pulsos à medida que o *encoder* gira. O sinal B é equivalente ao sinal A, porém defasado em + ou -90°, cujo objetivo é sinalizar o sentido da rotação, e o sinal O (ou Z ou I) indica o início de um giro.

Considere a Figura 7.3-16 1.6.6, quando o sinal B estiver adiantado em 90° do sinal A, o *encoder* gira no sentido anti-horário, neste caso a borda de subida de um sinal A se encontra com o sinal B no estado 1, analogamente, quando a B estiver em 0 durante a borda de subida do sinal A, o *encoder* estará girando no sentido horário. O terceiro sinal do *encoder*, o sinal O ou Z ou I, tem por objetivo indicar a posição "0" (zero) do *encoder*, com essa informação é possível detectar o número de voltas completas que o dispositivo acoplado ao *encoder* gerou.

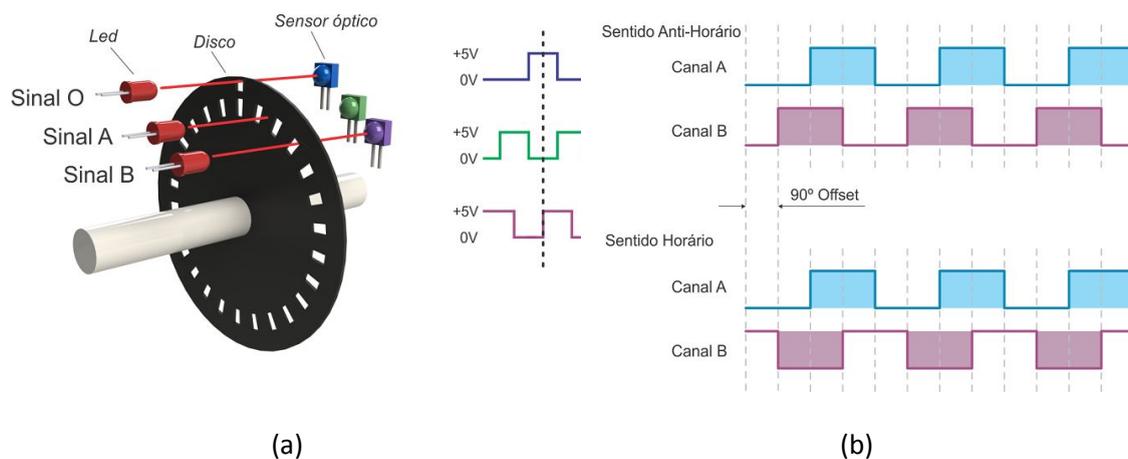


Figura 7.3-165 - Encoder óptico incremental e a forma de onda da saída (Hitecnologia, 2019).

7.4.6.2.2. Encoder absoluto

O *encoder* óptico absoluto é mais complexo, e mais caro. Eles indicam a posição absoluta através de saídas digitais codificadas em um valor binário. O código binário utilizado pode ser binário puro, ou por código gray. O uso de código gray⁶ evita possíveis erros de leitura na transição de uma posição para outra, pois neste código, os valores adjacentes são codificados variando somente um *bit*.

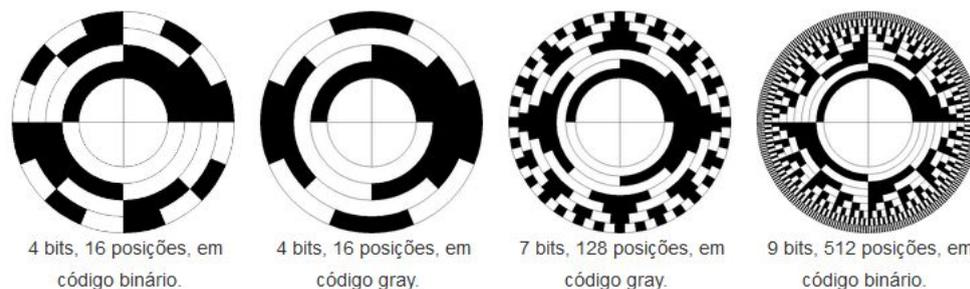


Figura 7.3-17 - Discos de Encoder Absolutos (hitecnologia, 2019)

⁶ Código de Gray é um sistema de código binário em que dois números sucessivos diferem só de um *bit*. Por exemplo, 0001 (1) e 0011 (2).

A resolução é representada em *bits* que correspondem ao número de faixas disponíveis no sensor, por exemplo como um *encoder* absoluto de 4 *bits* irá gerar uma representação de posição absoluta de 16 valores. Figura 7.3-17 ilustra encoders de diferentes resoluções. A grande vantagem do *encoder* absoluto é que, em qualquer momento, independente por exemplo de uma queda de energia, é possível saber a posição do dispositivo sem necessidade de resincronizar a posição.

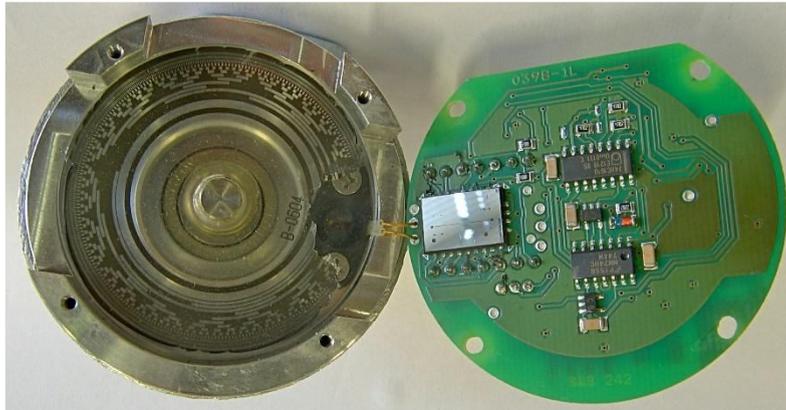


Figura 7.3-17 - Encoder óptico absoluto desmontado. A direita, o detalhe do disco codificado em gray. A esquerda o circuito de controle (https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder).

7.5. Problemas de projetos com sensores

Os sensores são dispositivos físicos e como todos os dispositivos físicos eles sofrem desgaste e podem ter defeitos de fabricação. Não se pode assumir que todos os sensores em um sistema funcionem corretamente o tempo todo. Uma solução para isto é o uso de redundância, ou seja, para medições críticas usar mais de um sensor ou a combinação de sensores com tecnologias diferentes. No entanto, isto deve ser feito com cuidado. Por exemplo se forem usados dois sensores enquanto eles tiverem as mesmas medidas, tudo bem! Mas se as leituras forem muito diferentes? O que fazer? Pode-se adotar três sensores e por votação escolher a leitura com dois valores próximos. Enfim o problema pode continuar, se as três leituras forem diferentes, mas há grande chance de se ter mais de uma leitura igual. A escolha deve ser feita considerando a aplicação, o custo e as dimensões dos sensores.

Em resumo, o uso de sensores requer atenção com:

Calibração, eventualmente os sensores podem requer uma adequação em sua aplicação, um **ajuste de um parâmetro específico** do fenômeno físico. Isto pode aumentar drasticamente os custos da fabricação do sensor.

Não-linearidade, as medições podem não ser proporcionais ao fenômeno físico, ou seja, a função não é tão linear como o modelo. Pode ser necessária uma correção. **Estratégias de realimentação** podem ser usadas para manter o ponto de operação na região linear.

Amostragem, as medições feitas periodicamente podem **gerar o aliasing** em sensores digitais. Ou mesmo, a amostragem pode esconder eventos importantes que serão perdidos.

Ruído, é o pesadelo do tratamento de sinal! As soluções passam por condicionamento do sinal, principalmente feito no nível analógico. **A adoção de filtragem digital (processamento digital de sinais) introduz latência**, ou seja, atraso na disponibilidade da leitura.

Falhas, além daquelas que podem ser tratadas com redundância, cabe destacar os cuidados que devem ser tomados com os ataques cibernéticos que podem levar a falhas

propositais. Este cuidado deve ser redobrado quando o sistema estiver ligado à internet, em aplicações de IoT.

7.6. Atuadores

Num sistema ciber-físico, os atuadores são os dispositivos que, sob o comando do subsistema computacional, atuam no subsistema físico. Tipicamente, eles recebem os comandos numéricos de um sistema computacional. Esses comandos são transformados em sinais analógicos através de conversores digital-analógicos (DAC). Como os subsistemas computacionais dispõem de saídas de sinais que são, no máximo, compatíveis com os níveis elétricos de portas TTL, tipicamente $V_{ol} \sim 0\text{volts}$, $V_{oh} \sim +5\text{volts}$, $I_{ol} < 20\text{mA}$, $I_{oh} < 5\text{mA}$, esses sinais precisam ser amplificados para a atuação em circuitos que utilizam níveis elétricos mais elevados. Figura 7.6-1 ilustra um atuador piezoelétrico controlado por um sistema computacional. Com base nos algoritmos de controle são geradas tensões analógicas, que amplificadas por um *Driver amplifier*, aumentam o volume do material piezoelétrico. Este **efeito piezoelétrico** pode ser aplicado na atuação de deslocamentos ou movimento de altíssima precisão.

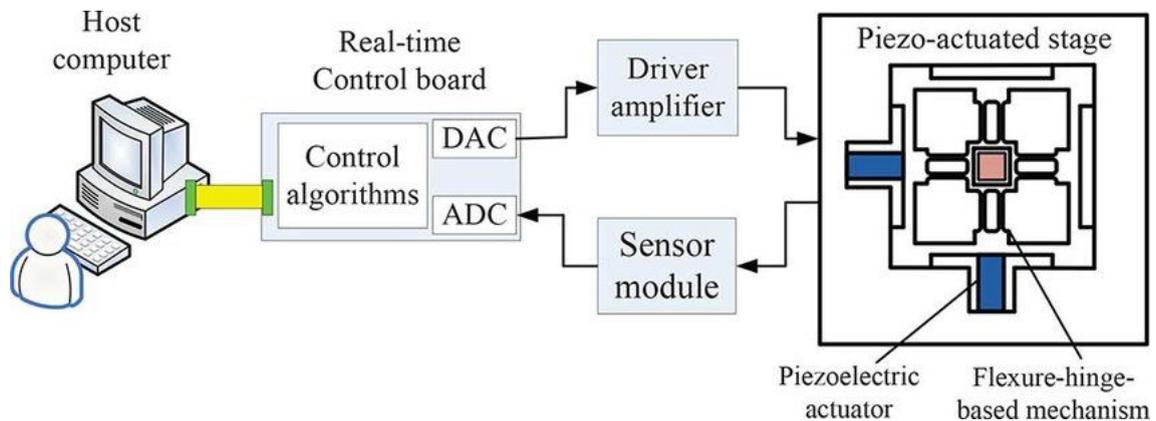


Figura 7.6-1: Diagrama de bloco básico de um atuador.

Além do efeito piezoelétrico aplicados nos atuadores, alguns dos efeitos já discutidos na Seção 7.3.2 são vastamente explorados para converter a energia elétrica em ações no mundo físico analógico (Figura 7.6-2):

- **efeito eletroluminescente:** processo de emissão de radiações visíveis em resposta a uma corrente elétrica ou a um forte campo elétrico. Um *led* é um dispositivo que transforma a energia elétrica em luz visível.
- **efeito Joule** ou **efeito térmico:** estabelece a relação entre as radiações (de calor e luminosas) e a corrente elétrica que percorre um condutor em determinado tempo. Um resistor de ligas metálicas de alta resistividade e elevado ponto de fusão, como a liga nicromo constituída de 15%-25% Cromo, 19%-80% Níquel e complementando o restante com Ferro, consegue transformar quase integralmente a energia elétrica em calor.
- **efeito de arco elétrico:** emissão de radiações visíveis (luminosas) por arcos elétricos como em lâmpadas fluorescentes.

- **efeito de indução eletromagnética:** processo de alinhamento entre dois campos, um campo móvel e um campo estacionário, como motores.

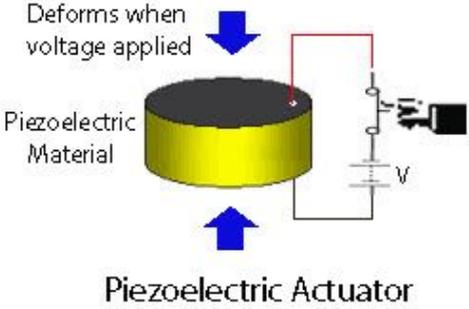
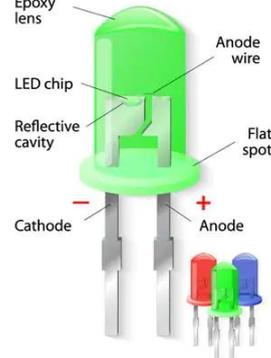
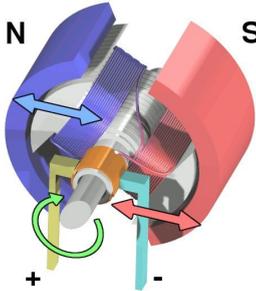
 <p>Deforms when voltage applied</p> <p>Piezoelectric Material</p> <p>Piezoelectric Actuator</p>	<h3>LIGHT-EMITTING DIODE</h3> 
<p>(a) Efeito piezoelétrico</p>	<p>(b) Efeito eletroluminescente</p>
	
<p>(c) Efeito Joule</p>	
	<h3>How a DC Motor Works</h3> 
<p>(d) Efeito de arco elétrico</p>	<p>(e) Efeito de indução eletromagnética</p>

Figura 7.6-2: Fenômenos físicos em que são baseados os atuadores.

7.7. Dispositivos Acionadores

Como é muito variado o nível de tensão e potência dos atuadores para realizarem uma grande gama de atividades no mundo físico analógico, a interface “*Driver amplifier*” da Figura 7.6-1 tipicamente faz parte do projeto de um sistema embarcado. Cabem aos projetistas selecionarem os componentes eletrônicos adequados para um circuito de interface entre o mundo digital e o mundo físico analógico. Nesta seção são apresentados quatro tipos de dispositivos que podem ser utilizados para essa adequação dos sinais, são eles: transistores, transistores de potência, tiristores e acopladores ópticos. Estes últimos são usados, principalmente, para o isolamento dos circuitos.

7.7.1. Transistores

Em condições normais de operação, um **transistor** pode operar em uma das três regiões: corte, ativa (amplificação), e saturação. Ele é usado em inúmeras aplicações eletrônicas, como sistemas embarcados, circuitos digitais, sistemas audio-visuais, sistemas de controle, dentre outras. Nas aplicações analógicas e digitais, os transistores são amplamente utilizados, como amplificadores, em operações lógicas, e sistemas de chaveamento.

Interessa neste contexto o uso de transistores como chaves. Um transistor é usado para operação de chaveamento para abertura ou fechamento de um circuito. Esse tipo de chaveamento de estado sólido oferece confiabilidade significativa e menor custo em comparação com os relés convencionais.

Os transistores NPN e PNP podem ser usados como chaves operando em duas regiões: corte (*cut-off*) e saturação.

7.7.1.1. Transistor NPN como uma chave

Considere a Figura 7.7-1, dependendo da tensão aplicada no terminal base do transistor (V_{in}), a função de chaveamento é realizada. Quando uma tensão suficiente ($V_{BE} > 0,7\text{ V}$) é aplicada entre a base e o emissor, a tensão do coletor para o emissor (V_{CE}) é aproximadamente igual a 0. Portanto, o transistor atua como um curto-circuito. Assim, a corrente flui de V_{CC} para o GND através do resistor R_C , aproximando V_{out} de 0 volts.

Da mesma forma, quando nenhuma tensão ou tensão zero é aplicada na base, o transistor opera na região de corte (*cut-off*) e atua como um circuito aberto.

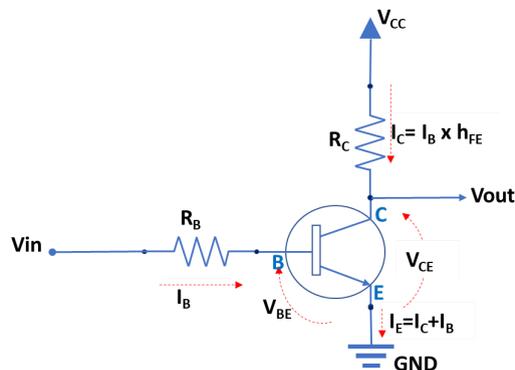


Figura 7.7-1 - Transistor NPN como chave.

7.7.1.2. Transistor PNP como uma chave

O transistor PNP funciona de maneira similar ao NPN para uma operação de chaveamento. Este tipo de chaveamento é usado, principalmente, para circuitos com a tensão de referência (GND) negativa. Considere a Figura 7.7-2. Para o transistor PNP, o terminal base é sempre polarizado negativamente em relação ao emissor. Nesta configuração, a corrente de base flui quando a tensão de base é mais negativa. Simplesmente uma baixa voltagem ou voltagem mais negativa faz com que o transistor entre em curto-circuito. Se uma tensão próxima de V_{CC} for aplicada em V_{in} , não haverá condução e o transistor será um circuito aberto.

Nesta conexão, a carga é conectada entre a saída do coletor e o ponto de referência (GND). Quando o transistor é ligado, a corrente flui do V_{CC} através do transistor para a carga (V_{out}) e, finalmente, para o GND.

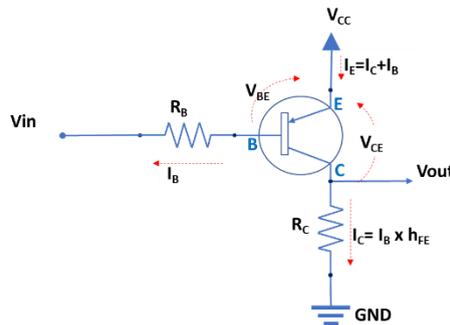


Figura 7.7-2 - Transistor PNP como chave

7.7.2. Transistores de Potência

As principais características que diferenciam os transistores são potência e velocidade de comutação. Os transistores BJT e MOS já foram tratados aqui no curso. Nesta seção apresentamos os chamados **transistores de potência**.

Se um transistor puder lidar com mais de 1 A de corrente de coletor, geralmente é considerado um transistor de potência. Tais transistores devem ter baixa resistência de saída para fornecer grandes correntes de carga e bom isolamento de junções para resistir a altas tensões. Eles também devem dissipar o calor muito rapidamente para evitar o superaquecimento. A junção coletor-base deve ser o maior possível, pois a maior parte do calor é gerada nessa área. Como o nome indica, o transistor de potência é projetado para funcionar em níveis de potência elevados. Isso significa que ele pode lidar com altos valores de tensão e de corrente.

Para dissipar o calor, o encapsulamento dos transistores de potência, em geral, possui área metálica para contato com os chamados *heatsinks* (dissipadores térmicos) como ilustra a Figura 7.7-3. *Heatsink* são estruturas metálicas com alta condutividade térmica (por exemplo, ligas de alumínio) e com um perfil com várias aletas que permitem uma grande área de contato com o ar.

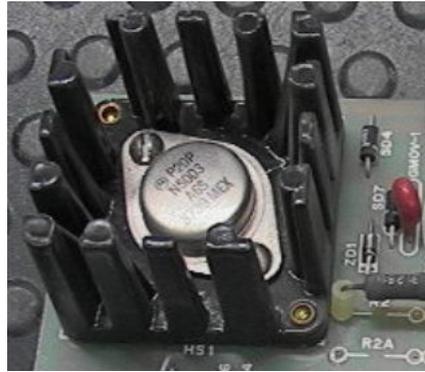


Figura 7.7-3 - Detalhe de um transistor de potência com seu heatsink. (Fonte: Recorte de [cavlon,2019](#))

A estrutura e construção de um transistor de potência é completamente diferente daquela de um transistor de sinal, mas suas características de operação são quase iguais. Transistores de potência podem ser de 3 tipos: Power BJT, Power MOSFET e IGBT.

O **Power BJT** (*Bipolar Junction Transistor*), como todo transistor BJT, possui 3 terminais - coletor, base e emissor. É um dispositivo controlado por corrente.

Transistor **MOSFET de potência**, como todo transistor MOS, tem 3 terminais - dreno, fonte e porta. É um dispositivo controlado por voltagem. É a voltagem da porta que controla o dispositivo.

O **IGBT** (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) tem 3 terminais - coletor, emissor e porta (Figura 7.7-4). Também é um dispositivo controlado por voltagem. É a voltagem da porta que controla o dispositivo. O IGBT é um dispositivo que combina as vantagens do MOSFET e do BJT. Ele tem alta impedância de entrada como um MOSFET e baixa perda de energia no estado ON como em um BJT. Além disso, o IGBT está livre do segundo problema de *breakdown* presente no BJT. O IGBT também é chamado de MOSIGT (*metal oxide insulated gate transistor*).

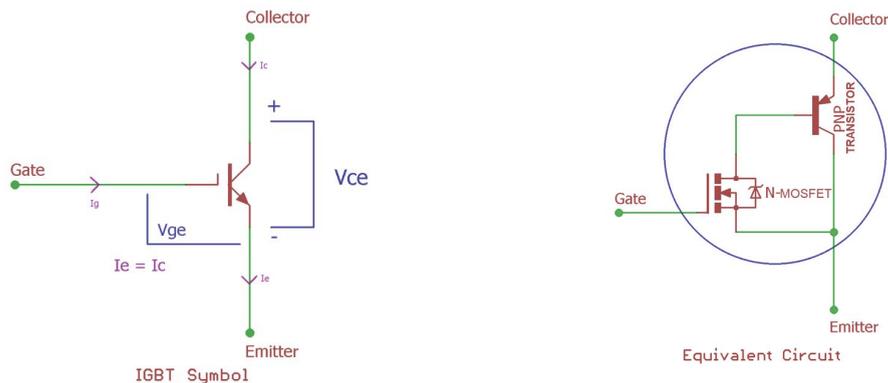


Figura 7.7-4 - IGBT - Símbolo e circuito equivalente (Fonte da Imagem)

Figura 7.7-5 sintetiza comparativamente as características das três famílias de transistores de potência.

Device Characteristic	Power Bipolar	Power MOSFET	IGBT
Voltage Rating	High <1kV	High <1kV	Very High >1kV
Current Rating	High <500A	Low <200A	High >500A
Input Drive	Current, h_{FE} 20-200	Voltage, V_{GS} 3-10V	Voltage, V_{GE} 4-8V
Input Impedance	Low	High	High
Output Impedance	Low	Medium	Low
Switching Speed	Slow (μ S)	Fast (nS)	Medium
Cost	Low	Medium	High

Figura 7.7-5 - Comparação entre transistores de potência ([Fonte da Imagem](#))

7.7.3. Tiristores

O nome **tiristor** engloba uma família de dispositivos semicondutores que operam em regime chaveado, tendo em comum uma estrutura de 4 camadas semicondutoras numa sequência p-n-p-n, apresentando um funcionamento biestável. Um tiristor é análogo a um relé em que uma pequena corrente induzida por tensão pode controlar uma tensão e corrente muito maiores. O tiristor de uso mais difundido é o Retificador Controlado de Silício – SCR (*Silicon Controlled Rectifier*), usualmente chamado simplesmente de tiristor. Outros componentes, no entanto, possuem basicamente a mesma estrutura: LASCR (SCR ativado por luz), TRIAC (tiristor tríodo bidirecional), DIAC (tiristor diodo bidirecional), GTO (tiristor comutável pela porta), MCT (Tiristor controlado por MOS), IGCT (Tiristor controlado com gate isolado) (Pomilio, 2019).

7.7.3.1.SCR

O **SCR** (*Silicon Controlled Rectifier*) muitas vezes é chamado simplesmente de tiristor. SCRs podem parecer componentes eletrônicos incomuns de várias maneiras (Figura 7.7-7), mas são particularmente úteis para controlar circuitos de potência. O seu símbolo em esquemáticos é mostrado na Figura 7.7-6.

Esses componentes eletrônicos são usados para muitas aplicações de controle de energia, geralmente onde os níveis de corrente e tensão são relativamente altos. Os SCR também podem ser usados em aplicações de baixa potência, incluindo controle de luz, bem como na proteção da fonte de alimentação e em muitas outras aplicações. Os SCR são simples de usar e baratos, o que os torna a opção ideal para muitos circuitos.

A ideia do dispositivo foi apresentada pela primeira vez em 1950 por William Shockley, um dos inventores do transistor. Embora algumas investigações posteriores do dispositivo tenham sido realizadas por outros dois anos depois, somente no início dos anos 1960 eles se tornaram disponíveis. E logo os tiristores se tornaram populares nos circuitos de alimentação.

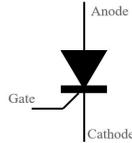


Figura 7.7-6 - Símbolo esquemático de um SCR ([wiki_scr,2019](http://wiki.scr,2019))

https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/scr/what-is-a-thyristor.php
p



Figura 7.7-7 - Típico SCR (Fonte: [electronics-tutorials_tiristores](http://electronics-tutorials.tiristores))

<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/ee833/Modulo2.pdf>

7.7.3.2. TRIACs

TRIAC, *Triode for Alternating Current* (**Triodo para corrente alternada**), é uma marca comercial genérica para um componente eletrônico de três terminais que conduz a corrente em qualquer direção quando acionada. Seu nome formal é tiristor de triodo bidirecional ou tiristor de triodo bilateral. A Figura 7.7-8 mostra o símbolo do circuito para um TRIAC em que A1 é o ânodo 1, A2 é o ânodo 2 e G é a porta (*Gate*). O ânodo 1 e o ânodo 2 são normalmente denominados Terminal Principal 1 (MT1) e Terminal Principal 2 (MT2), respectivamente.

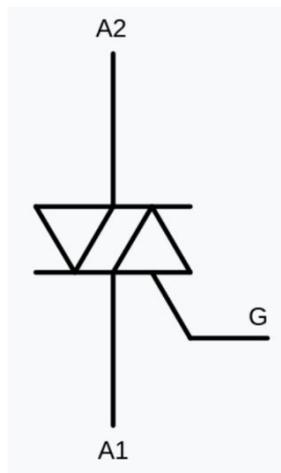


Figura 7.7-8 - Símbolo esquemático de TRIAC.

TRIACs são um subconjunto de tiristores e estão relacionados a SCRs, como mostra o esquemático na Figura 7.7-9. Os TRIACs diferem dos SCRs, pois permitem o fluxo de corrente em ambas as direções, enquanto um SCR só pode conduzir corrente em uma única direção. A maioria dos TRIACs pode ser acionada aplicando uma tensão positiva ou negativa à porta (um SCR requer uma tensão positiva). Uma vez acionados, os SCRs e TRIACs continuam a conduzir, mesmo que a corrente do *gate* cesse, até a corrente principal cair abaixo de um determinado nível chamado corrente de retenção (*Holding current*).

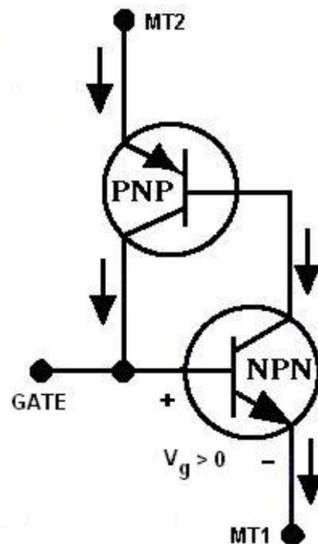


Figura 7.7-9 -Circuito equivalente de um triac (wiki.triac,2019)

A bidirecionalidade dos TRIACs os torna comutadores convenientes para corrente alternada (CA). A aplicação de TRIACs em controle de fase permite o controle da corrente média que flui para uma carga. Isso é comumente usado para controlar a velocidade de um motor universal, controlar a luminosidade (*dimming*) de lâmpadas e controlar aquecedores elétricos. Maiores informações sobre a aplicação de triacs com microcontroladores podem ser encontradas no [AN442 da ST](#).

Os GTOs (*Gate turn-off thyristors*) são semelhantes aos TRIACs, mas se desligam automaticamente quando o sinal do *gate* é interrompido. Isso proporciona um melhor controle.

7.7.4. Optoacopladores

(Toda esta seção foi traduzida de <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/optocoupler.html>)

É possível obter um isolamento elétrico entre uma fonte de entrada e uma carga de saída usando apenas luz através de um componente eletrônico chamado **acoplador óptico** (*Optocoupler*), também conhecido como opto-isolador ou Opto-acoplador.

A estrutura interna básica de um acoplador óptico consiste em um LED que produz luz infravermelha e um dispositivo fotossensível semiconductor usado para detectar o feixe infravermelho emitido. O LED e o dispositivo fotossensível são colocados em um encapsulamento à prova de luz, como mostrado na Figura 7.7-10.



Figura 7.7-10 - - Exemplo de um acoplador óptico (PC817 da Sharp)

O dispositivo fotossensível pode ser construído com um único foto-diodo, foto-transistor, foto-resistor, foto-SCR ou foto-TRIAC. A operação básica de um acoplador óptico é muito simples. Por efeito fotoelétrico, radiações infra-vermelhas (não visíveis) emitidas por um transmissor fazem um receptor, que não está fisicamente conectado, conduzir.

7.7.4.1. Acoplador óptico foto-transistor

Assuma um dispositivo de foto-transistor como mostrado na Figura 7.7-11. A corrente proveniente do sinal da fonte passa pelo LED de entrada que emite uma luz infra-vermelha cuja intensidade é proporcional ao sinal elétrico.

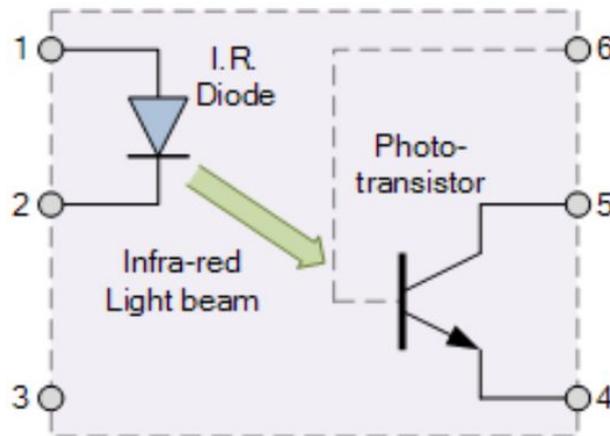


Figura 7.7-11 - Estrutura básica de um acoplador óptico com foto transistor ([Eletronics tutorial,2019](#))

Esta luz emitida incide sobre a base do foto-transistor, fazendo com que ele ligue e conduza de maneira semelhante a um transistor bipolar normal.

A conexão da base do foto-transistor pode ser deixada aberta (desconectada) para máxima sensibilidade à energia de luz infra-vermelha dos LEDs ou conectada ao *Ground* através de um resistor externo de valor adequado para controlar a sensibilidade de comutação tornando-a mais estável e resistente a falso disparo por ruído elétrico externo ou a transientes de tensão.

Quando a corrente que passa pelo LED é interrompida, a luz emitida por infravermelho é cortada, fazendo com que o foto-transistor pare de conduzir. O foto-transistor pode ser usado para ligar a corrente no circuito de saída. A resposta espectral do LED e do dispositivo fotossensível está intimamente relacionada, sendo separada por um meio transparente, como vidro, plástico ou ar. Como não há conexão elétrica direta entre a entrada e saída de um optoacoplador, o isolamento elétrico é de até 10kV.

Os acopladores ópticos estão disponíveis em quatro tipos, cada um com uma fonte de LED infra-vermelha, mas com diferentes dispositivos fotossensíveis. Os quatro optoacopladores são chamados de: Foto-transistor, Foto-Darlington, Foto-SCR e Foto-triac, como mostrado na Figura 7.7-12.

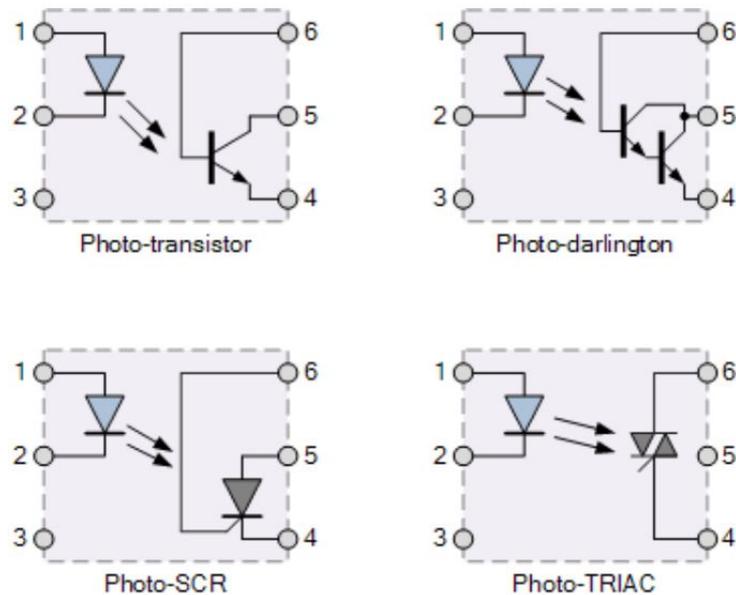


Figura 7.7-12 - Tipos de acopladores óptico ([Eletronics tutorial,2019](#))

Os dispositivos foto-transistor e foto-darlington são, principalmente, para uso em circuitos CC, enquanto o foto-SCR e o foto-triac permitem que circuitos alimentados por CA sejam controlados.

7.7.4.2. Aplicações de optoacopladores

Acopladores óticos e opto-isoladores podem ser usados sozinhos ou para chavear vários outros dispositivos eletrônicos maiores, como transistores e triacs, fornecendo o isolamento elétrico necessário entre um sinal de controle de baixa tensão. Aplicações comuns para acopladores óticos incluem chaveamento de entrada/saída de microprocessador, controle de potência DC e AC (um fornecido por um microcontrolador, e um sinal de saída de voltagem ou corrente muito maior), comunicações de PC, isolamento de sinal e regulação de alimentação que sofrem de corrente de terra, etc. O sinal elétrico transmitido pode ser analógico (linear) ou digital (pulsos). Nesta aplicação, o acoplador ótico é utilizado para detectar o funcionamento da chave ou outro tipo de sinal de entrada digital. Isso é útil se a chave ou o sinal que está sendo detectado estiver dentro de um ambiente eletricamente ruidoso. A saída pode ser usada para operar um circuito externo, luz ou como entrada para um PC ou microprocessador.

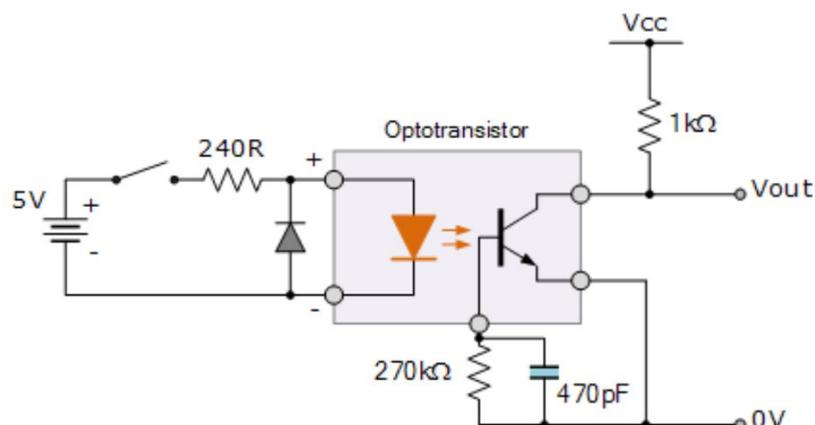


Figura 7.7-13 - Uma chave CC com fototransistor ([Eletronics tutorial,2019](#))

Figura 7.7-13 ilustra uma aplicação do optoacoplador como chave. O resistor de $270k\Omega$ conectado externamente é usado para controlar a sensibilidade da região de base do foto-transistor. O valor do resistor pode ser escolhido para se adequar ao dispositivo foto-acoplador selecionado e à quantidade de sensibilidade de comutação necessária. O capacitor impede que quaisquer picos ou transientes indesejados sejam acionados de forma falsa na base dos opto-transistores.

Além de detectar sinais e dados CC, também estão disponíveis isoladores opto-triac que permitem o controle de lâmpadas e equipamentos alimentados por CA. Triacs opto-acoplados, como o MOC 3020, têm voltagens de cerca de 400 volts, o que os torna ideais para conexão direta à rede elétrica e uma corrente máxima de cerca de 100mA. Para cargas mais altas, o opto-triac pode ser usado para fornecer o pulso de *gate* para outro triac maior através de um resistor limitador de corrente, como mostrado na Figura 7.7-14.

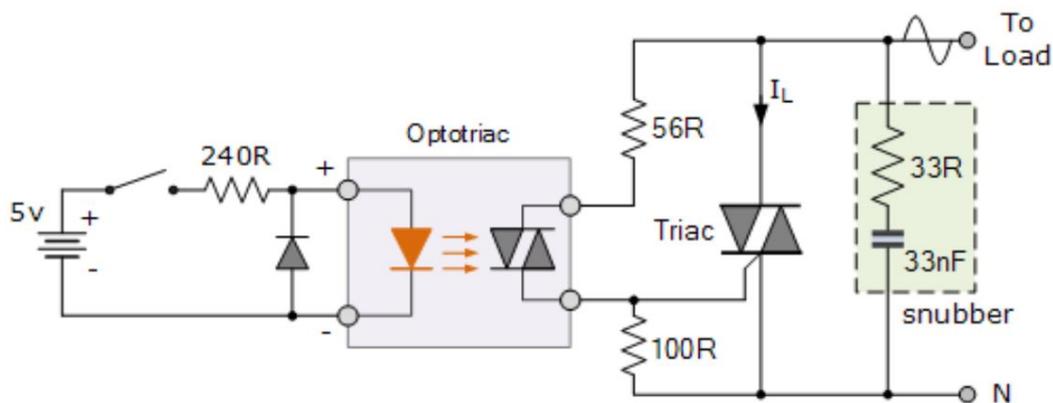


Figura 7.7-14 - Aplicação de acopladores óptico com Triac ([Eletronics tutorial,2019](#))

Esse tipo de configuração do acoplador óptico forma a base de uma aplicação muito simples de relé de estado sólido que pode ser usada para controlar qualquer carga alimentada por rede CA, como lâmpadas e motores. Também diferente do tiristor (SCR), um triac é capaz de conduzir em ambas as metades do ciclo CA da rede elétrica com **detecção de cruzamento zero**, permitindo que a carga receba potência total sem as fortes correntes de energização ao alternar cargas indutivas.

Acopladores ópticos e opto-isoladores são ótimos dispositivos eletrônicos que permitem que dispositivos como transistores de potência e triacs sejam controlados a partir da porta de saída de um PC, comutador digital ou de um sinal de dados de baixa tensão, como o de uma porta lógica. A principal vantagem dos acopladores ópticos é o alto isolamento elétrico entre os terminais de entrada e saída, permitindo que sinais digitais relativamente pequenos controlem tensões, correntes e energia CA muito grandes.

Um acoplador óptico pode ser usado com sinais DC e CA com funções de um SCR (tiristor) ou triac, pois o dispositivo de detecção de luz foi projetado principalmente para aplicações de controle de energia CA. A principal vantagem dos foto-SCRs e foto-triacs é o isolamento completo de todos os picos de ruído ou tensão presentes na linha de fonte de alimentação CA, bem como a detecção de cruzamento zero da forma de onda senoidal, que reduz as correntes de comutação e de irrupção, protegendo de estresse térmico e de choque os semicondutores de potência usados.

7.8. PWM - Modulação por largura de pulso

Traduzido parcialmente do livro Lee & Seshia 2017 "Introduction to Embedded Systems: A Cyber-physical Systems Approach"

A **modulação por largura de pulso** (PWM) é uma técnica para fornecer uma quantidade variável de energia com eficiência a dispositivos de *hardware* externos. Ele pode ser usado para controlar, por exemplo, a velocidade de motores elétricos, o brilho de uma luz LED e a temperatura de um elemento de aquecimento. Em geral, ele pode fornecer quantidades variadas de energia a dispositivos que toleram mudanças rápidas e abruptas de tensão e corrente. O *hardware* PWM usa apenas circuitos digitais e, portanto, é fácil de integrar no mesmo *chip* com um microcontrolador. Os circuitos digitais produzem apenas dois níveis de tensão, alto e baixo num período T como mostra a Figura 7.8-1. Um sinal PWM alterna rapidamente entre alto e baixo em alguma frequência fixa ($1/T$), variando a quantidade de tempo que mantém o sinal alto. O ciclo de serviço é a proporção tempo em que a tensão é alta. Se o ciclo de trabalho for 100%, a tensão será sempre alta. Se o ciclo de trabalho for 0%, a tensão será sempre baixa.

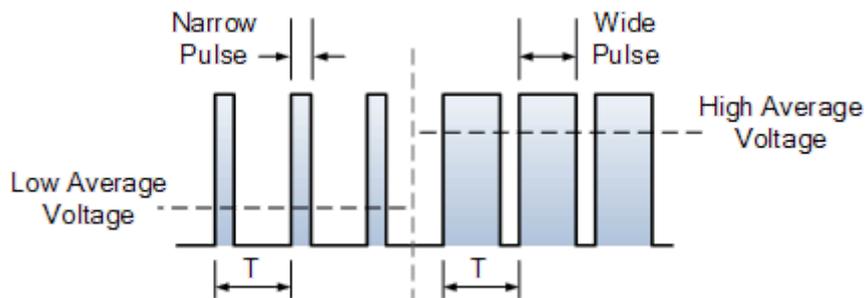


Figura 7.8-1 - PWM. Fonte: [\(electronics-tutorials, 2019\)](#)

Muitos microcontroladores fornecem interfaces de saída em PWM. Para usá-los, o programador normalmente grava um valor em um registrador para definir o ciclo de serviço (a frequência também pode ser configurável). O dispositivo fornece energia ao hardware externo na proporção do ciclo de trabalho especificado.

O PWM é uma maneira eficaz de fornecer quantidades variáveis de energia, mas apenas para determinados dispositivos. Um elemento de aquecimento, por exemplo, é um resistor cuja temperatura aumenta à medida que mais corrente passa por ele. A temperatura varia lentamente, em comparação com a frequência de um sinal PWM, de modo que a tensão do sinal que varia rapidamente é calculada pelo resistor e a temperatura fica muito próxima da constante por um ciclo de trabalho fixo. Da mesma forma, os motores medem variações rápidas na tensão de entrada. O mesmo acontece com as lâmpadas incandescentes e LED. Qualquer dispositivo cuja resposta a mudanças de corrente ou tensão seja lenta em comparação com a frequência do sinal PWM é candidato a ser controlado via PWM.

7.9. Exemplos de Atuadores

Nesta seção vamos descrever alguns atuadores mais aplicados nos projetos de sistemas embarcados no nosso curso. Observe na descrição dos atuadores que muitos deles têm sensores integrados para realimentar o sinal de saída do atuador e compará-lo com a referência estabelecida, formando um **sistema de controle de malha fechada** esquematizado na Figura 7.6-1. A técnica de controle por realimentação da saída mais aplicada é o **controle proporcional-integral-derivativo** (PID). Esta técnica consiste em gerar iterativamente novos

sinais de atuação em função do erro sensoreado (proporcional), da sua persistência no tempo (integral) e da sua taxa de variação (derivativo), até que o erro fique próximo de zero.

7.9.1. Circuitos de Acionamento Resistivos

O aquecimento de um fluido pode ser feito pela passagem de uma corrente em um resistor imerso neste fluido. Para um mesmo valor de resistência, quanto maior a corrente maior será a potência dissipada e maior será a temperatura transferida para o fluido. A intensidade da corrente pode ser controlada por um sistema microcontrolado ajustando o valor da corrente que passa pelo resistor. Isto pode ser feito por circuitos amplificadores, ou por PWM (Seção 7.8).

7.9.2. Circuitos de Acionamento de Leds

Como discutido anteriormente, o transistor pode ser usado como uma chave. O esquema da Figura 7.9-1 mostra como um transistor é usado para ligar e desligar um o diodo emissor de luz (LED).

Quando não existir sinal na entrada V_{in} o terminal da base está aberto, nenhuma corrente flui através da base, de modo que o transistor fica no estado de corte. Portanto, o circuito atua como circuito aberto e o LED apaga. Quando V_{in} tiver um valor próximo de V_{cc} , a corrente de base flui através do transistor e leva o transistor à saturação com corrente suficiente para o LED acender. Os resistores são colocados para limitar as correntes através da base e do LED. Também é possível variar a intensidade do LED variando a resistência no caminho da corrente de base.

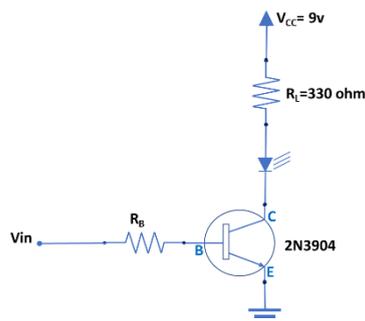


Figura 7.9-1 - Exemplo de um acionador de LED

7.9.2.1. Displays de 7 Segmentos

Para a exibição de caracteres numéricos existem os chamados *displays* de 7 segmentos. Trata-se de um circuito integrado de oito diodos emissores de luz (LED's) dispostos de forma a exibir os algarismos pela combinação de LED's acessos. Neste circuito integrado, tipicamente, todos os seus LED's têm sempre um dos seus terminais (anodo ou catodo) ligados em comum e o outro terminal disponível para a seleção do segmento. São oito led's, sete para a formação do algarismo e um para o ponto decimal. A Figura 7.9-2 mostra um *display* de sete segmentos com o anodo comum. Para este *display* exibir um algarismo é necessário ligar o anodo comum a uma voltagem positiva e os catodos dos leds que formam este algarismo devem ser ligados a um nível de voltagem mais baixa. Por exemplo, para exibir o algarismo "3", os catodos dos led's (segmentos) "A", "B", "C", "D" e "G" devem ser ligados a um nível próximo de 0 volts.

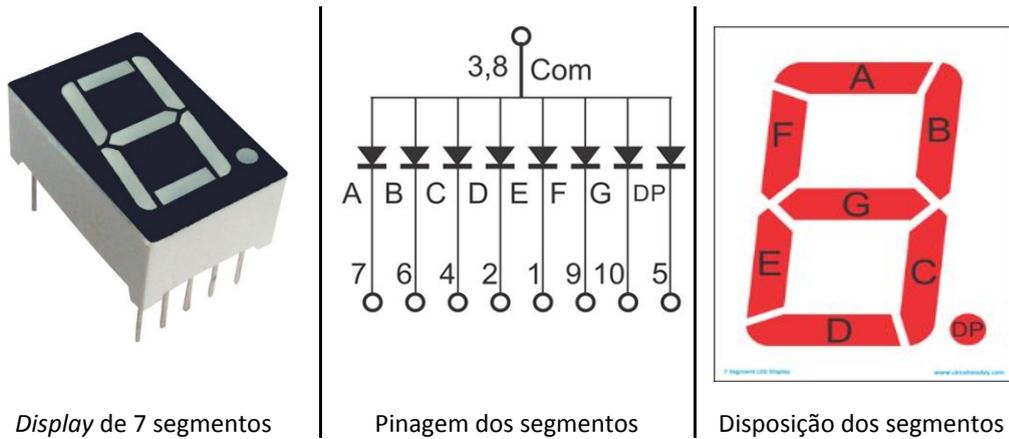


Figura 7.9-2 - Display de sete segmentos com anodo comum

7.9.2.2. Matriz de Leds

Uma matriz de diodos emissores de luz (LED's) permite a exibição de caracteres alfanuméricos. A Figura 6.4-3 mostra um exemplo de matriz de LED's com 8 linhas de 8 colunas. Em cada cruzamento linha-coluna tem-se um LED. Para acender um LED específico, é necessário acionar adequadamente a linha e a coluna a que ele está ligado. Por exemplo, na Figura 7.9-3(a), para acender o LED do canto superior esquerdo, será necessário colocar o pino 13 (coluna 1) num nível elétrico positivo e o pino 9 (row 1) num nível próximo de zero volts. Os LED são, portanto, acionados individualmente. Se o acionamento de uma sequência de LED for feito numa taxa menor que 30 acendimentos por segundo, o olho humano não perceberá o apagamento dos LED's, ficando a impressão que vários estarão acessos. Assim qualquer combinação de LED's poderá ser representada. Várias destas matrizes podem ser combinadas formando um painel de maior dimensão.

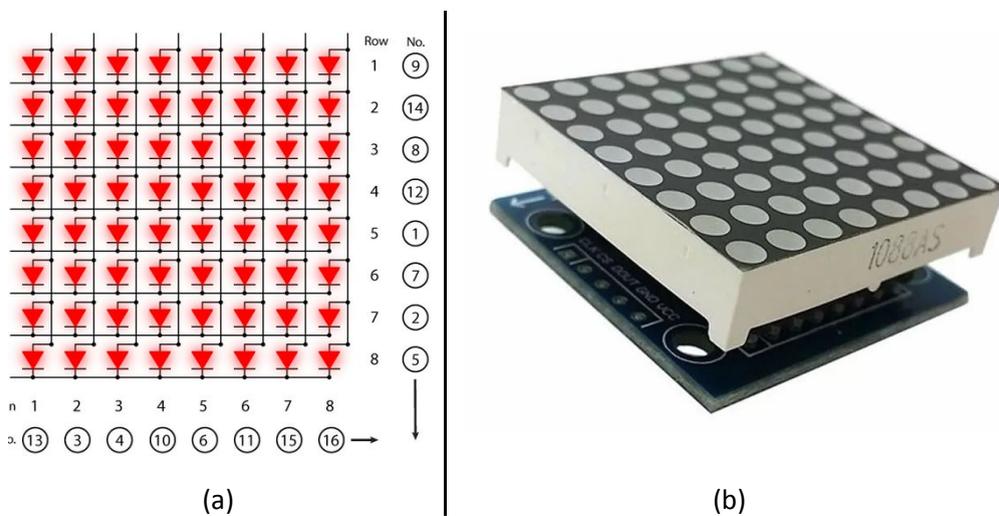


Figura 7.9-3 - Matriz de Leds 8x8

7.9.2.3. Circuito integrado para o acionamento de matriz de LED's ou de conjunto de display de 7 segmentos

O circuito integrado MAX7219 da Maxim permite a ligação de vários *displays* de 7 segmentos (até 8) formando por exemplo um painel de números. Ele tem uma entrada SPI (Capítulo 9) para a conexão com o microcontrolador e saídas para a ligação com os *displays*. Este mesmo

chip pode ser usado para a ligação de matriz de LED's. Vide o seu datasheet para maiores informações, disponível em:

<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX7219-MAX7221.pdf>.

7.9.3. Circuitos de Acionamento de Laser

O LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou em português, Amplificação de luz por emissão estimulada de radiação) tem tido várias aplicações. A Tabela 1 relaciona a potência necessárias às diversas aplicações de LASER.

Tabela 1 - Potência versus Aplicação de Raios LASER

Potência	Aplicação
1–5 mW	Apontadores de palestras
5 mW	Drive CD-ROM
5–10 mW	DVD player ou drive DVD-ROM
100 mW	Gravador de CD-RW de alta velocidade
250 mW	Gravador DVD-R
400 mW	Gravador dual-layer DVD 24x
1 W	Laser verde do prototipo de disco holográfico versátil.
1–20 W	Saída da maioria dos lasers de estado sólido disponíveis no mercado para micro usinagem
30–100 W	Típico laser cirúrgico de CO ₂
100–3000 W	Típico laser de CO ₂ usado em corte industrial
100 kW	Saída alegada do laser de CO ₂ para uso militar desenvolvido pela Northrop Grumman

O acionamento de luz LASER segue os mesmos princípios do acionamento de LED. Essencialmente é um resistor em série com o dispositivo diodo LASER. A intensidade do brilho pode ser controlada pelo valor do resistor ou pela fonte de alimentação. Um exemplo de acionamento de raio LASER é mostrado na Figura 7.9-4. Neste exemplo é usada uma fonte de 9 volts, que pode ser uma bateria e um regulador de voltagem controlado por um potenciômetro. O ajuste deste potenciômetro irá determinar a intensidade de brilho do raio, pelo controle da voltagem aplicada ao diodo LASER.

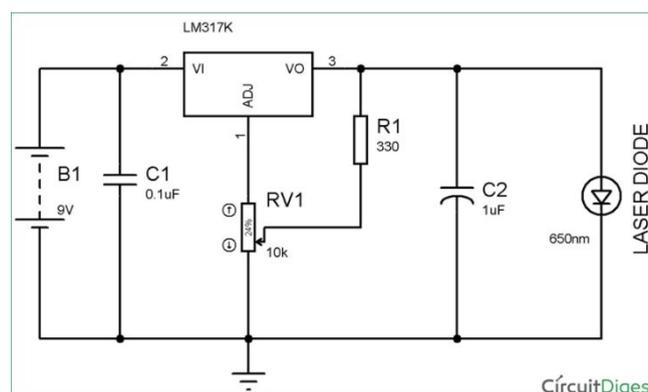


Figura 7.9-4: Circuito acionador de diodo laser Fonte: [circuitdigest.2019](http://circuitdigest.com)

Uma aplicação de raio LASER bastante comum é para a detecção de passagem, por exemplo num corredor. Esta aplicação usa, além do acionamento do raio LASER, um detector, sensível à luz LASER, como ilustra a Figura 7.9-5. A detecção é feita pela interrupção da recepção do raio no sensor. Sem passagem o raio incide no sensor. Passando algo ou alguém, este raio é interrompido e não chega ao sensor. Um sistema de microcontrolador fica monitorando o sensor de forma que, na ocorrência de uma interrupção, é gerada uma ação. Existem no mercado diversos circuitos, tanto de acionamento do LASER quanto do sensor sensível ao raio LASER.

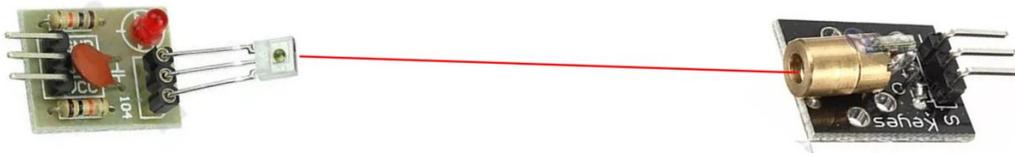


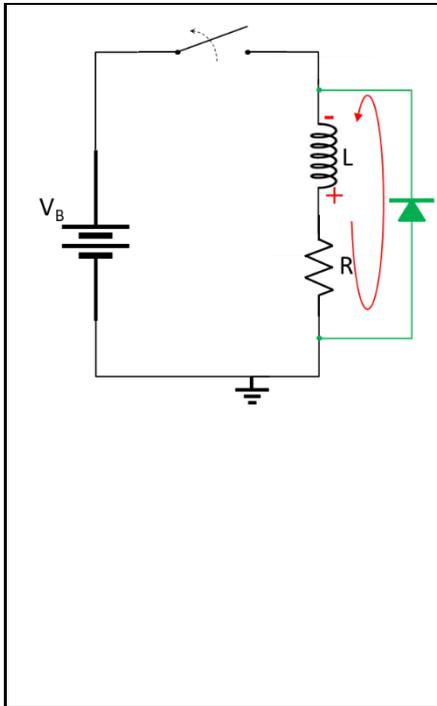
Figura 7.9-5 - Sistema de detecção de passagem a LASER.

7.9.4. Circuitos de Acionamento Indutivos

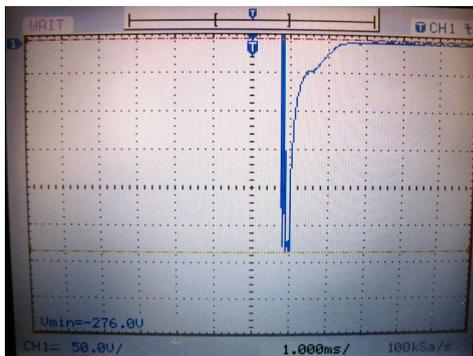
Os circuitos que envolvem indutores, como por exemplo, motores, solenóides, relés, enfim todos dispositivos que têm a passagem de corrente por um enrolamento de bobina precisam de uma **Proteção Contra Surto de Tensão Reversa**. Figura 7.9-6 ilustra a diferença nos transientes entre um circuito sem e com proteção

	<p>A figura ao lado mostra um indutor conectado a uma bateria - uma fonte de tensão CC. O resistor representa a pequena resistência residual dos enrolamentos de fio do indutor. Quando a chave é fechada, a tensão da bateria é aplicada ao indutor, fazendo com que a corrente do terminal positivo da bateria flua através do indutor e do resistor. O aumento da corrente provoca uma força eletromotriz (tensão) reversa sobre o indutor, devido à lei de indução de Faraday, que se opõe à mudança na corrente. Como a voltagem através do indutor é limitada à voltagem da bateria de 24 volts, a taxa de aumento da corrente é limitada a um valor inicial de $\frac{dI}{dt} = \frac{V_B}{L}$. Assim, a corrente através do indutor aumenta lentamente à medida que a energia da bateria é armazenada no campo magnético do indutor. À medida que a corrente sobe, mais tensão recai sobre o resistor e menos através do indutor, até que a corrente atinja um valor estável de $I = \frac{V_B}{R}$ com toda a voltagem da bateria sobre a resistência e nenhuma sobre a indutância.</p>
	<p>Quando a chave é aberta, a corrente cai rapidamente. O indutor resiste à queda de corrente desenvolvendo uma tensão de polaridade induzida muito grande na direção oposta da bateria, positiva na extremidade inferior do indutor e negativa na extremidade superior. Esse pulso de tensão, às vezes chamado de "kick" indutivo, que pode ser muito maior do que a voltagem da bateria (aprox. 20 vezes), aparece nos contatos da chave. Faz com que os elétrons pulem o entreferro entre os contatos, fazendo com que um arco elétrico momentâneo se desenvolva através dos contatos enquanto o interruptor é aberto. O arco continua até que a energia armazenada no campo magnético do indutor seja dissipada como calor no arco. O arco pode danificar os contatos da chave mecânica, causando corrosão e queima, acabando por</p>

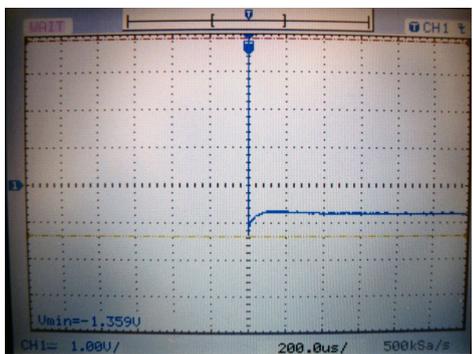
destruí-los. Se a chave for um transistor, ou outro dispositivo eletrônico, a alta voltagem reversa pode destruí-lo.



Para evitar o pulso de voltagem indutivo no desligamento, um diodo é conectado em paralelo com o indutor como mostrado na figura ao lado. O diodo não conduz a corrente enquanto a chave estiver fechada porque é polarizado inversamente a voltagem da bateria, de modo que não interfira com a operação normal do circuito. No entanto, quando a chave é aberta, a tensão induzida através do indutor de polaridade oposta está diretamente polarizado sobre o diodo que conduz a corrente, limitando a tensão sobre o indutor e impedindo assim que o arco se forme na chave. O indutor e o diodo formam momentaneamente um *loop* ou um circuito alimentado pela energia armazenada no indutor. Este circuito fornece uma corrente ao indutor para substituir a corrente da bateria, de forma que a corrente do indutor não caia abruptamente e não desenvolve uma alta tensão. A tensão através do indutor é limitada à tensão direta do diodo, em torno de 0,7 a 1,5V. Esta corrente "freewheeling" ou "flyback" através do diodo e do indutor diminui lentamente para zero quando a energia magnética no indutor é dissipada como calor na resistência em série dos enrolamentos. Isso pode levar alguns milissegundos em um pequeno indutor.



Varredura de osciloscópio mostrando o pico de voltagem indutivo no solenóide conectado a uma fonte de alimentação de 24 VCC. Note a escala de 50.0Volts/divisão.



O mesmo transiente de chaveamento, agora com um diodo *flyback* (1N4007) conectado ao solenóide. Observe a escala diferente 1 V / divisão.

Figura 7.9-6 - Varredura de osciloscópio mostrando a transição de uma chave. Fonte: [wiki/Flyback diode](http://wiki/Flyback_diode)

7.9.4.1.Solenóides

Os solenóides eletromecânicos consistem em uma bobina eletromagneticamente indutiva, enrolada em torno de um núcleo móvel de aço ou ferro (denominada armadura). Figura 7.9-7 ilustra o campo magnético criado pela corrente que circula na bobina. A bobina é modelada de

forma que a armadura possa ser movida para dentro e para fora do centro, alterando a indutância da bobina e, assim, tornando-se um eletroímã. A armadura é usada para fornecer uma força mecânica a algum mecanismo (como controlar uma válvula pneumática). Os solenóides podem ser controlados diretamente por um circuito e têm tempos de reação muito rápidos. A força aplicada à armadura é proporcional à mudança na indutância da bobina em relação à mudança de posição da armadura e à corrente que flui através da bobina (lembre-se da lei de indução de Faraday). A força aplicada à armadura sempre moverá a armadura em uma direção que aumente a indutância da bobina (wiki, 2019).

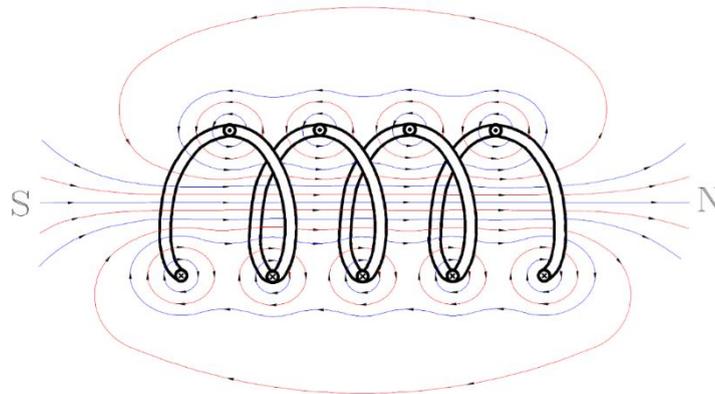


Figura 7.9-7 - Campo magnético a partir de corrente em bobina

Um primeiro exemplo do uso de solenóide é em motor de partida de automóvel, como mostra a Figura 7.9-8. Na figura, em espanhol, ele é identificado como *relé*. Ao acionar a chave de ignição, além de girar o motor elétrico de arranque, uma tensão é aplicada ao solenóide que puxa uma alavanca (*palanca*) e esta empurra o pinhão para se acoplar ao volante do motor a explosão, fazendo que este gire sob força do motor de arranque, até que o motor pegue.

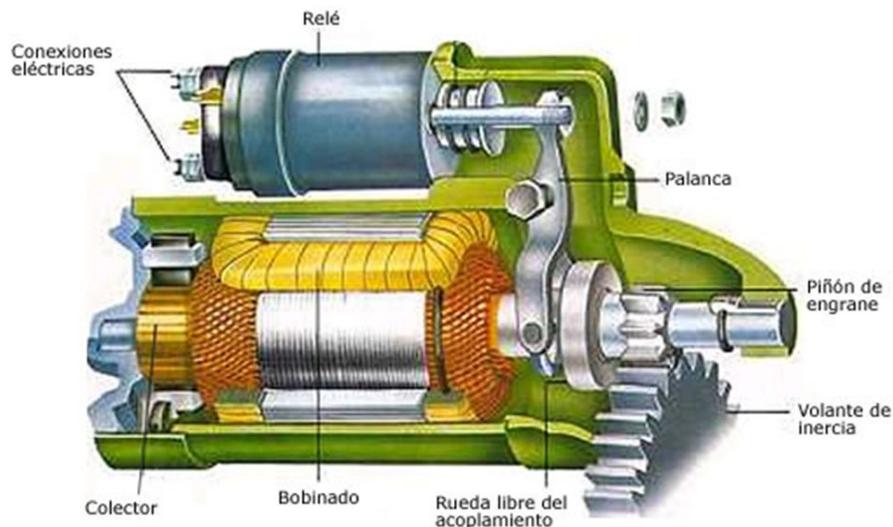


Figura 7.9-8 - Acoplamento do motor de arranque [Fonte: autoytecnica,2019](#)

Outro exemplo de aplicação muito comum para solenóides é para a abertura e fechamento de válvula em tubulações de líquidos. Na Figura 7.9-9 mostra uma válvula solenóide para máquina de lavar roupas. Ela é usada para encher o tanque de lavagem. Em repouso, sob a força de uma mola, a passagem de água é bloqueada. Ao aplicar uma voltagem nos terminais da bobina do

solenóide, o seu núcleo se movimenta e puxa o bloqueio da passagem de água, desobstruindo assim sua passagem.



Figura 7.9-9 -Válvula Solenóide para Água 12V 180º [Fonte](#)

7.9.4.2.Relés

O relé é um recurso que permite a interação isolada entre dois domínios elétricos. Os domínios são, de um lado um circuito de baixa voltagem e/ou corrente e do outro lado um circuito com alta voltagem e/ou corrente. Por exemplo na Figura 7.9-10, um circuito alimentado por 12 volts CC e do outro uma comutação entre lâmpadas de 220 volts AC de 100W. Não existe nenhuma ligação elétrica comum aos dois circuitos (domínios). Normalmente, sem a aplicação de corrente na bobina (*coil*) do relé, a chave SPDT do relé encontra-se com o pólo ligado ao contato da lâmpada verde, fazendo ela acender Figura 7.9-10(a).

Ao aplicar uma corrente na bobina (*coil*) do relé a magnetização do seu núcleo (*core*) procura fechar o circuito magnético atraindo o elemento móvel (em “L” na figura 7.9-10). Este elemento que estava afastado do núcleo pela força de uma mola se movimenta. Este elemento tem um pino isolante que pode empurrar o pólo de uma chave a mudar de contato, ligando agora a lâmpada vermelha Figura 7.9-10(b).

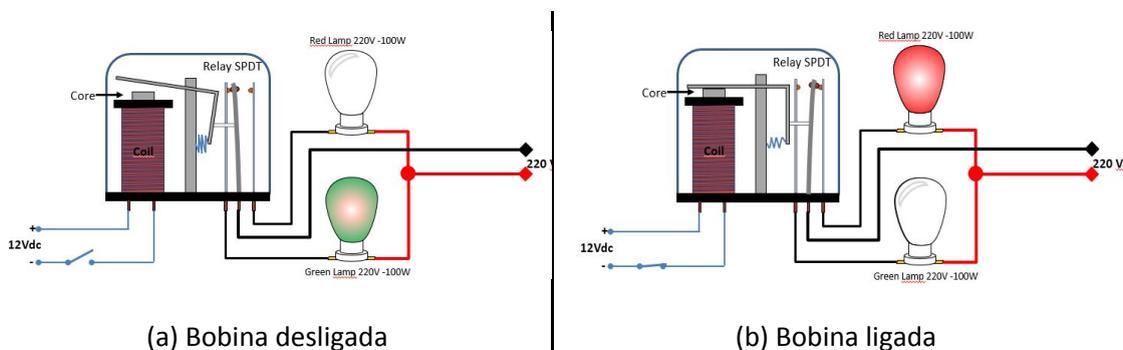
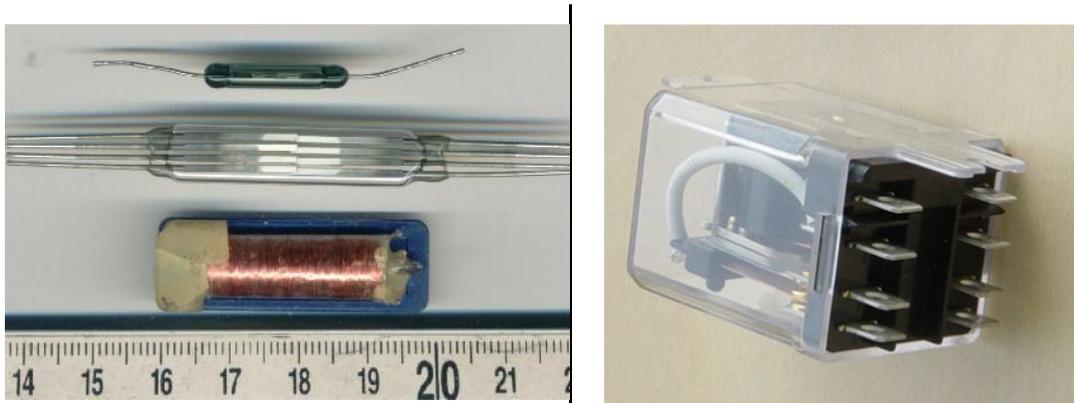


Figura 7.9-10 - Exemplo da comutação de duas lâmpadas de 220 volts a partir de relê

Existem vários tipos de relés, na Figura 7.9-11 são mostrados dois tipos muito comuns. O relé Reed (Figura 7.9-11(a)) é muito pequeno e pode ser ligado numa placa de circuito impresso. Em automóveis é bastante comum o uso de relés para isolar circuitos de baixa corrente dos circuitos de alta corrente, como por exemplo, a chave do farol no painel do automóvel do circuito de alimentação da lâmpada, cerca de 20 Amperes. A Figura 7.9-11(b), mostra um relé para esta aplicação.



(a)

(b)

Figura 7.9-11 – Exemplos de relês. (a) Reed relay; (b) relê de farol automobilístico

A especificação de um relê passa pelas características elétricas de voltagem e corrente na bobina e no circuito de chaveamento, mas também pelo tipo de chave que ela pode acionar. Para isto é usada a mesma designação de chaves vistas na Seção 7.4.1, ou seja, em função do número de pólos (*Pole*) e de contatos (*throw*) por pólo. A Figura 7.9-11 mostra alguns símbolos de relês para algumas designações de pólos e contatos.

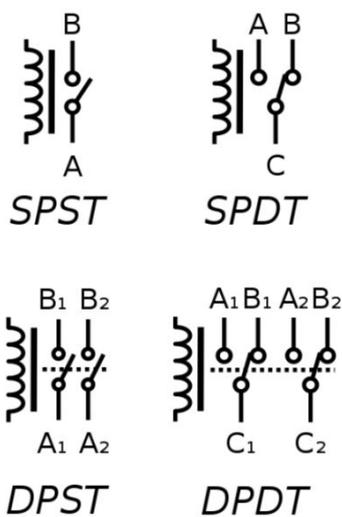


Figura 7.9-11 - Simbologia de relês [Fonte \(Wiki-Relay, 2019\)](#)

É cada vez mais comum o uso dos chamados relês de estado sólidos. São na verdade circuitos integrados que utilizam foto-SCR ou foto-triac que tem um excelente isolamento elétrico, além de não envolverem dispositivos mecânicos. A Figura 7.9-12 ilustra um exemplo de relê de estado sólido.

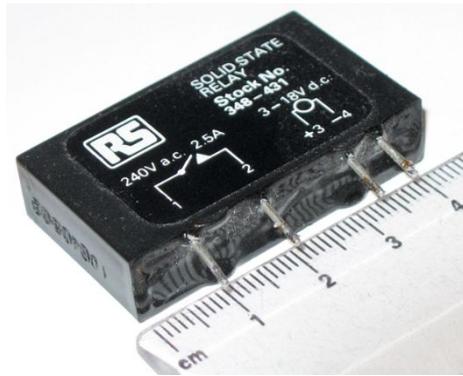


Figura 7.9-12 - A solid-state relay (SSR) [Fonte \(Wiki-Relay, 2019\)](#)

Na Figura 7.9-13 temos um exemplo de circuito de relés para uso com microcontroladores. Trata-se de um pequeno módulo com dois relés que podem ser ligados a GPIO de Arduino, de PIC ou de Raspberry Pi. De um lado os relés podem ser acionados por conexão do tipo “header” a uns pinos de GPIO do microcontrolador e de outro através de conectores aparafusados podem ser ligados circuitos de alta tensão. A Tabela 2 detalha as especificações deste módulo.

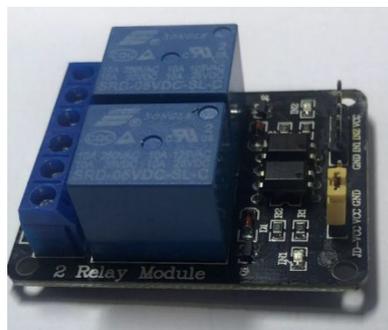


Figura 7.9-13 - Módulo Relé Rele Relay 2 Canais 5v Arduino Pic Raspberry Pi

Tabela 2 Especificação do módulo de relês

Modelo:	SRD-05VDC-SL-C
Características:	Permite controlar cargas de 220V AC Furos de 3mm para fixação nas extremidades da placa LED indicador de status
Tensão de operação:	5VDC
Corrente de operação:	15~20mA
Pinagem (cada relê):	Normal Aberto, Normal Fechado e Comum
Tensão de saída:	(30 VDC a 10A) ou (250VAC a 10A)
Tempo de resposta:	5~10ms
Dimensões:	51 x 38 x 20mm
Preço (agosto 2019):	R\$ 14,10

7.9.4.3.Motores CC

(Parcialmente traduzido de (wiki,2019a) https://en.wikipedia.org/wiki/H_bridge)

O circuito mais usado para interfacear um motor CC com um acionador que permita que o motor gire em dois sentidos, horário e anti-horário é a **ponte H**. Uma ponte H é um circuito eletrônico que muda a polaridade de uma tensão aplicada a uma carga. Esses circuitos são frequentemente usados em robótica.

As pontes H estão disponíveis como circuitos integrados ou podem ser construídas a partir de componentes discretos.

O termo ponte H é derivado da representação gráfica típica de um circuito desse tipo, vide

Figura 7.9-14. Uma ponte H é construída com quatro interruptores (de estado sólido ou mecânico).

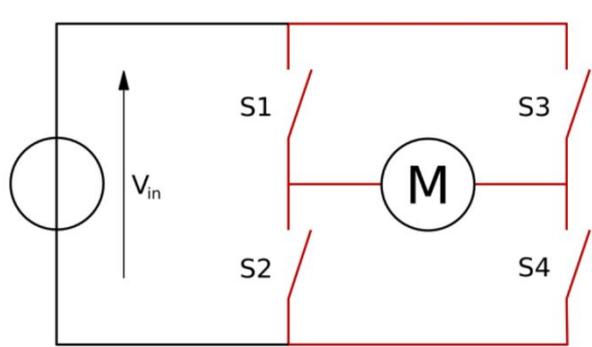


Figura 7.9-14 - Estrutura de uma Ponte H ([Fonte wiki,2019a](#))

Quando os interruptores S1 e S4 (de acordo com a Figura 7.9-15(a)) estão fechados (e S2 e S3 estão abertos), uma tensão positiva será aplicada no motor. Ao abrir os interruptores S1 e S4 e fechar os interruptores S2 e S3, essa tensão é revertida, como na Figura 7.9-15(b), permitindo a operação reversa do motor.

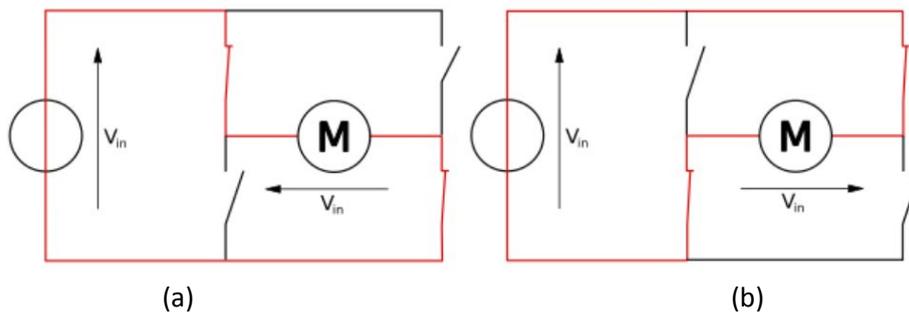


Figura 7.9-15 – Operação básica de uma Ponte H ([Fonte wiki,2019a](#))

Usando a nomenclatura acima, os interruptores S1 e S2 nunca devem ser fechados ao mesmo tempo, pois isso poderia causar um curto-circuito na fonte de tensão de entrada. O mesmo se aplica aos comutadores S3 e S4. Essa condição é conhecida como *shoot-through*.

O arranjo da ponte H geralmente é usado para reverter a polaridade/direção do motor, mas também pode ser usado para 'travar' o motor, onde o motor pára repentinamente, quando os terminais do motor estão em curto, ou para deixar o *'free run'* do motor, ou para uma parada, pois o motor é efetivamente desconectado do circuito. Figura 7.9-16 resume a operação, com S1-S4 correspondente ao diagrama acima.

S1	S2	S3	S4	Resultado
1	0	0	1	O motor gira num sentido

0	1	1	0	O motor girar noutro sentido
0	0	0	0	O motor gira livre até parar
1	0	0	0	
0	1	0	0	
0	0	1	0	
0	0	0	1	
0	1	0	1	O motor trava (freia)
1	0	1	0	
x	x	1	1	Curto circuito
1	1	x	x	

Figura 7.9-16 - Resumo do funcionamento da ponte H da Figura 7.9-15.

Uma maneira de construir uma ponte H é usar uma **matriz de relés**.

Um relé do tipo DPDT (*Double Pole Double Throw*) pode geralmente alcançar a mesma funcionalidade elétrica que uma ponte H (considerando somente a operação básica do dispositivo). No entanto, uma ponte H baseada em semicondutores é preferível ao relé em aplicações que exigem um tamanho físico menor, ou um chaveamento em alta velocidade, ou baixa voltagem (ou baixa potência), ou onde o desgaste de peças mecânicas é indesejável.

Outra opção é ter um relé DPDT para definir a direção do fluxo de corrente e um transistor para ativar o fluxo de corrente. Isso pode prolongar a vida útil do relé, pois o relé será comutado enquanto o transistor estiver desligado e, portanto, não há fluxo de corrente. Também permite o uso de comutação PWM para controlar o nível de voltagem aplicado ao motor.

Semicondutores de canal N e P

Uma ponte H de estado sólido é tipicamente construída usando dispositivos de polaridade oposta, como transistores de junção bipolar PNP (BJT) ou MOSFETs de canal P conectados ao barramento de alta tensão e BJTs NPN ou MOSFETs de canal N conectados ao barramento de baixa tensão.

Semicondutores apenas de canal N

Os projetos MOSFET mais eficientes usam MOSFETs de canal N no lado alto e no lado baixo, porque geralmente possuem um terço da resistência ON dos MOSFETs de canal P. Isso requer um design mais complexo, uma vez que os *gates* dos MOSFETs do lado superior devem ser positivos com relação à alimentação CC. Muitos *drivers* de portas MOSFET de circuito integrado incluem um circuito de conversor CC – CC dentro do *chip* para conseguir isso.

Ponte H com IGBT

A Figura 7.9-17 ilustra um circuito de ponte H implementada com IGBT. A vantagem de usar IGBT em ponte H é que, com eles, altas voltagem e corrente que podem ser operadas.

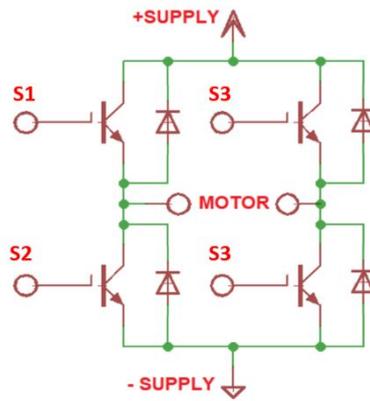


Figura 7.9-17 - Ponte H implementada com IGBT's.

O L298 é um circuito integrado com duas pontes H cujas entradas de controle são compatíveis com níveis de lógica TTL, como mostra o seu diagrama na Figura 7.9-18. Suas duas pontes H podem acionar cargas indutivas como relês, solenóides e motores de corrente contínua com valores máximos de tensão até 46 volts e de corrente até 2 ampéres em cada ponte. Para maiores informações, vide o datasheet do L298 no [site da STm](#).

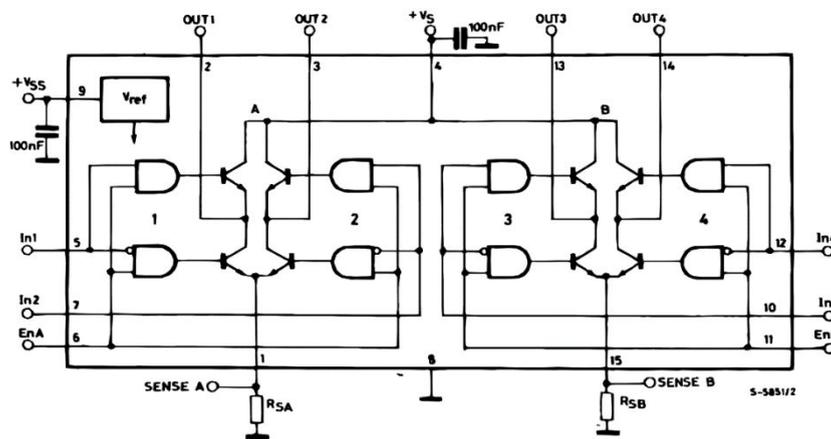


Figura 7.9-18 - Diagrama do L298 - Dual H Bridge

7.9.4.4. Servomotor

Servo-motor é o nome dado a uma construção de motor incorporando em sua carcaça um dispositivo de *encoder*, tratado aqui na seção de sensores, como na Figura 7.9-19. Isto permite, por exemplo, a implementação de um sistema realimentado de controle da velocidade de giro e do sentido de rotação do motor, como na Figura 7.9-20.



Figura 7.9-19 - Exemplo de um servo motor da Schneider, destacando a conexão de alimentação do motor e a conexão do encoder. Fonte: [RSDELIVERS,2019](#)

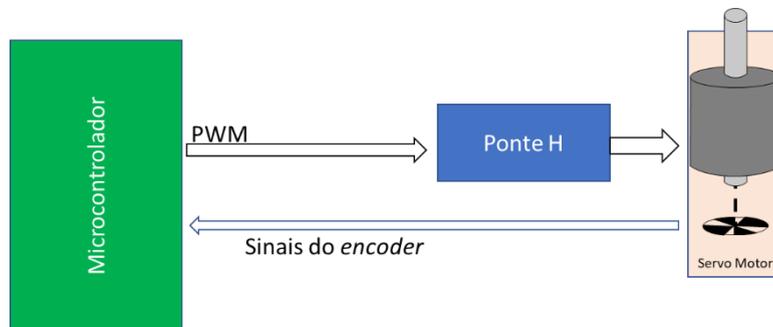


Figura 7.9-20 - Sistema de controle de um servo motor

7.9.4.5. Micro servomotor

Os micro servomotores existem há muito tempo e são utilizados em muitas aplicações. Eles são pequenos, mas têm um grande impacto e são muito eficientes em termos energéticos. Inicialmente desenhados para a aplicação em aeromodelismo, eles são usados para operar carros de brinquedo e pequenos robôs.

O servo circuito é construído dentro da unidade do motor e possui um eixo posicionável equipado com um sistema de engrenagem, como mostrado na Figura 7.9-21.



(a)



(b)



(c)

Figura 7.9-21 (a) Micro servo-motor; (b) dimensionamento de um micro servomotor; (c) micro servomotor desmontado

O motor é controlado com um sinal elétrico que determina a quantidade de movimento do eixo. Este sinal pode ter 0 Volts ou 5 Volts. O circuito de controle do servo fica monitorando este sinal em intervalos de 20ms (mili segundos), conforme mostra a Figura 7.9-22.

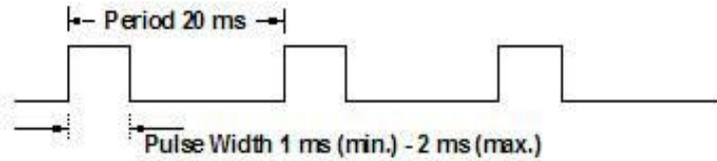


Figura 7.9-22 -Sinal básico de controle de um micro servomotor

Se dentro deste intervalo ele percebe uma alteração do sinal de 0v para 5v durante 1ms até 2ms, ele altera a posição do seu eixo para coincidir com o sinal que recebeu (Figura 7.9-23):

- Um sinal de 1ms corresponde a uma posição do braço do servo todo a esquerda ou 0°.
- Um sinal de 1,5ms é o que se chama de posição central do servo ou 90°.
- Um sinal de 2ms corresponde a uma posição do braço do servo todo a direita ou 180°.

Uma vez que o servo recebe um sinal de 1,5ms (por exemplo), ele verifica se o potenciômetro encontra-se na posição correspondente. Se estiver ele não faz nada. Se o potenciômetro não estiver na posição correspondente ao sinal recebido, o circuito de controle aciona o motor até o potenciômetro estar na posição certa. A direção de rotação do motor do servo vai depender também da posição do potenciômetro, o motor vai girar na direção que mais rápido levar o potenciômetro até a posição certa.

Se for tentado alterar a posição do braço do servo, ver-se-á que ele faz uma resistência e tenta manter a posição que lhe foi designada pelo sinal que recebeu. Ele faz isto porque o potenciômetro está conectado diretamente ao eixo de saída, e detecta qualquer alteração na posição dele. E é isto que faz o servo ser tão importante, quando é mandado ele ir para uma posição ele vai e fica lá até receber outra "ordem".

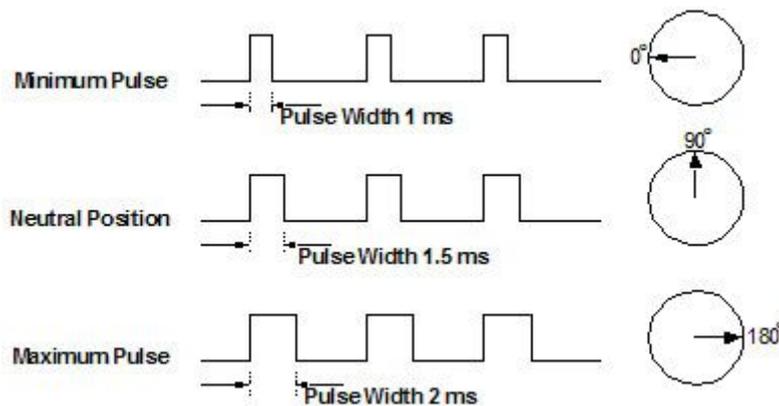


Figura 7.9-23 - Duração do pulso e a posição do eixo do micro servomotor

7.9.4.6. Motores sem escova (BLDC = BrushLess DC Motors)

O motor de corrente contínua sem escovas é baseado no estabelecimento de um campo magnético girante a partir de uma sequência de sinais em bobinas posicionadas no estator em ângulos, por exemplo, de 120° para um motor de 3 fases. O rotor é tipicamente formado por elementos magnetizados que irão se alinhar com o campo girante do estator. Este tipo de motor evita o possível faiscamento do contato da escova com o anel comutador dos motores

CC tradicionais. A Figura 7.9-24 ilustra um exemplo do acionamento de um motor BLDC com três fases. Neste exemplo é destacado o sensor de posicionamento do eixo usando sensores do tipo *Hall*.

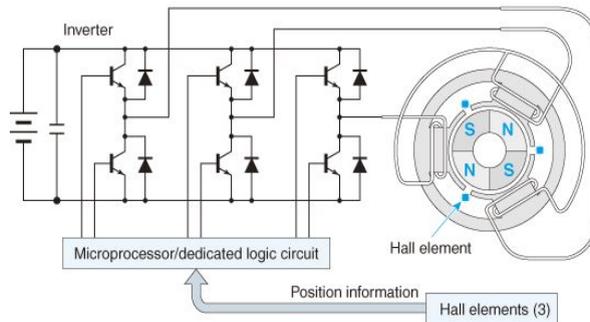


Figura 7.9-24 - Acionamento de um motor BLDC

7.9.4.7. Motor de Passo

O motor de passo é baseado num campo magnético girante gerado por enrolamentos em pólos no estator. O rotor é feito de material ferroso de baixa relutância e possui pólos que se alinham com o campo girante do estator. A sequência de acionamento dos enrolamentos dos pólos do estator definem o sentido e a velocidade de giro do campo e por consequência do rotor. A Figura 7.9-25 mostra o exemplo de um motor de passos simplificado de três pólos no estator. Uma apresentação com animação, disponível em jro2017, pode ajudar no entendimento do funcionamento de um motor de passos.

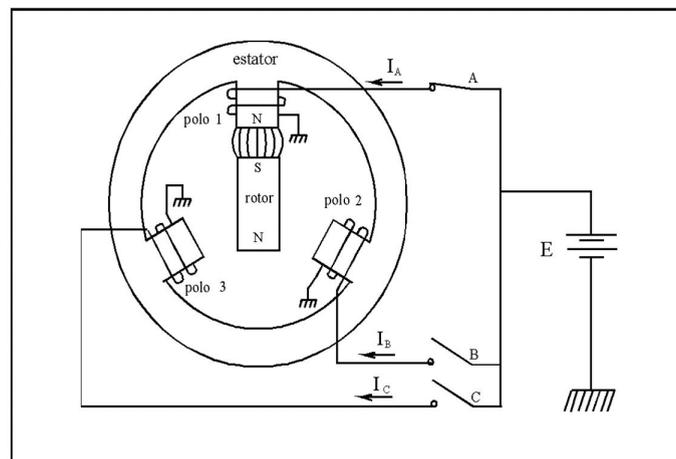


Figura 7.9-25 - Exemplo de um motor de passo com três pólos no estator.

7.10. Terras Digitais e Analógicas

(Extraído de

<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/staying-well-grounded.html>)

É fato que os circuitos digitais são bem ruidosos. A lógica de saturação, como TTL e CMOS, aciona grandes e rápidos picos de corrente durante a comutação. Por outro lado, os circuitos analógicos são bastante vulneráveis a ruídos, tanto nos trilhos de alimentação quanto nos

aterramentos. Portanto, é altamente recomendável separar os circuitos analógico e digital para evitar que o ruído digital prejudique o desempenho analógico. Essa separação envolve a separação dos retornos de terra e dos trilhos de potência, o que pode ser uma tarefa difícil em um sistema de sinal misto. No entanto, para um sistema de sinal misto de alta precisão com alto desempenho, é essencial esta separação.

O fato da especificação de alguns circuitos analógicos "operarem" a partir de uma única fonte de +5V não significa que estes circuitos possam apresentar o mesmo desempenho com uma mesma fonte bem ruidosa de +5V do microprocessador, RAM dinâmica, ventilador elétrico e outros dispositivos de corrente mais alta. Não basta ter uma fonte compatível funcionalmente, é necessário que a fonte esteja sem ruído se quisermos que a parte analógica tenha um desempenho máximo.

Muitos circuitos analógicos e digitais possuem pinos terra analógico (AGND) e terra digital (DGND) separados. Estes pinos referem às partes internas dos circuitos em que estes pinos estão conectados e não aos pontos de terra do sistema em que estes pinos devem ser conectados. Externamente, os terras analógico e digital devem ser conectados de alguma forma num ponto comum para assegurar que todos os sinais tenham um mesmo referencial. Note na Figura 7.10-1 a conexão recomendada destes terras num mesmo referencial que evita o retorno de transientes prejudiciais pelos trilhos analógicos.

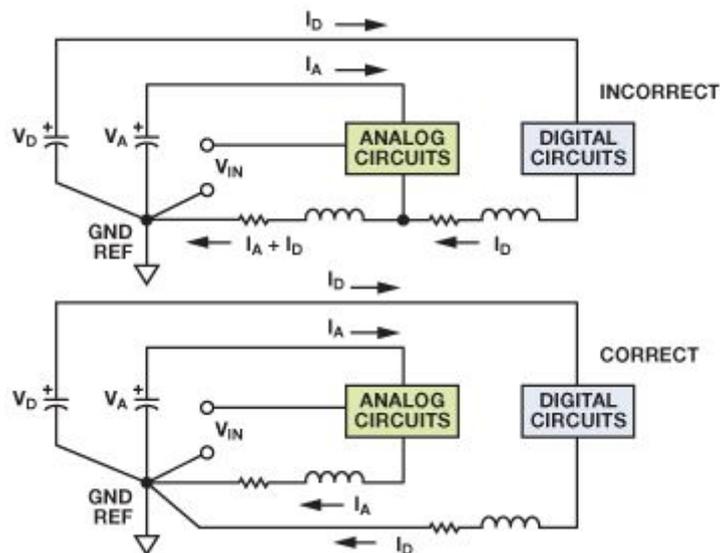


Figura 7.10-1: Aterramento de sistemas com sinais mistos.

7.11. Abstração dos Sensores de Atuadores em Sistemas Digitais

Para que os sensores e os atuadores apresentados neste capítulo possam interagir com um processador, transferindo os dados coletados por eles para a CPU ou da CPU para eles, é necessário elaborar um esquema em que estas transferências ocorram de forma eficiente, acessível diretamente pelas instruções do processador, como as transferências entre a memória principal e o processador como vimos nos Capítulos 4 e 6. Em outras palavras, é desejável que o processamento dos dados oriundos destes dispositivos externos seja similar ao processamento dos dados oriundos da memória principal. O primeiro passo para uniformizar o tratamento da grande variedade de tecnologias que vimos nas seções anteriores foi abstraí-los numa classe de **dispositivos de entrada e saída**, ou simplesmente em **periféricos**, representados por **registradores de controle, de estado e de dados**. O conteúdo dos registradores de controle é transformado em sinais de controle do dispositivo, o de estado

contém condições de operação (estado) do dispositivo, e o de dados tem informações sobre as quais os sinais de controle atuam.

Há duas estratégias para endereçar os dispositivos de entrada e saída via CPU (Figura 7.11-1):

- **E/S isolada ou E/S mapeada em E/S:** quando o espaço de endereços dos registradores dos dispositivos de E/S e o espaço de endereços do sistema de memória são distintos (Figura 7.11-1(a)), de forma que sejam necessárias instruções distintas para processarem os dados de cada espaço.
- **E/S mapeada (em memória):** quando o espaço de endereços dos registradores dos dispositivos de E/S é um sub-espaço de endereços do sistema de memória (Fig. 7.11-1(b)), de forma que se possa utilizar o mesmo conjunto de instruções para endereçar os seus dados.

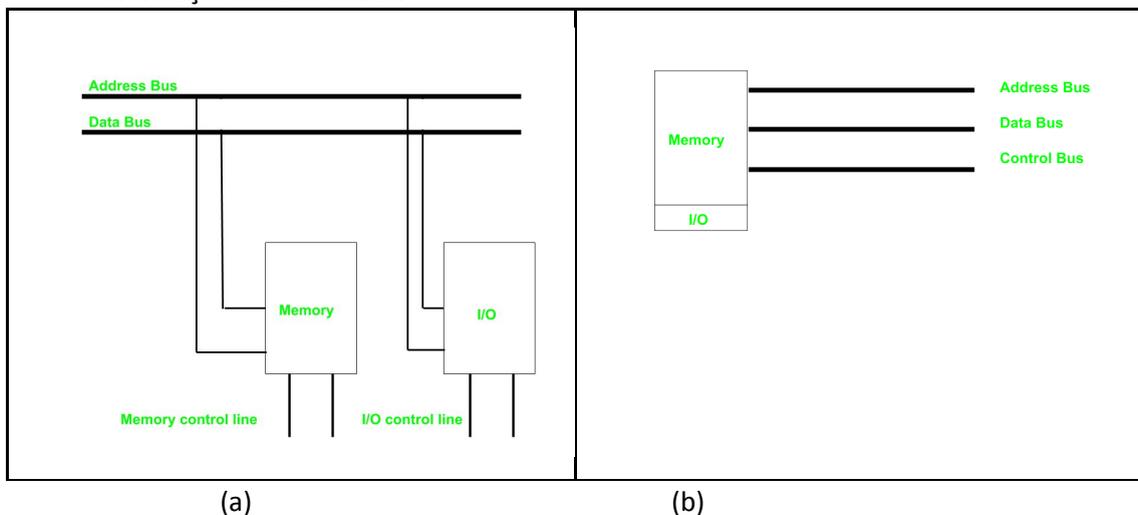


Figura 7.11-1: Entrada e Saída

A estratégia adotada em sistemas embarcados modernos é a de E/S mapeada, como mostra a Figura 7.11-2. Observe que os endereços 0x9800 a 0x9FFF do espaço endereçável por um barramento de 16 bits é reservado para endereçar os registradores dos dispositivos de entrada e saída.

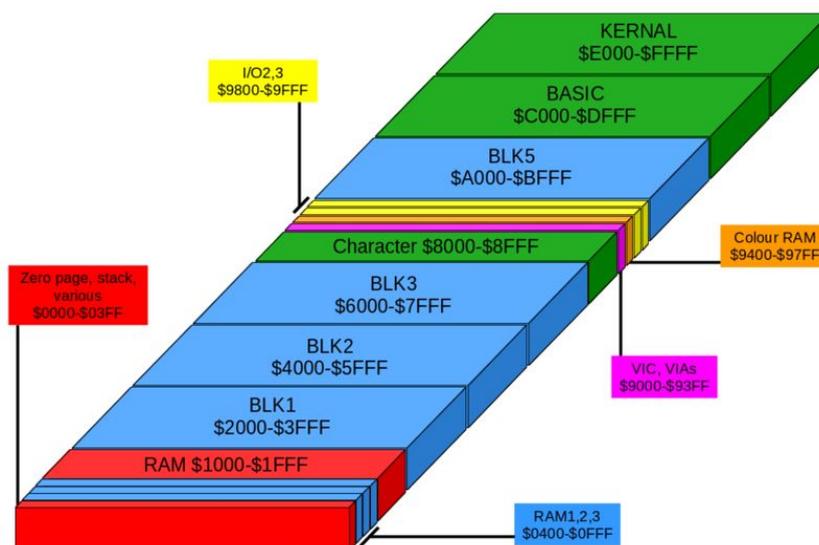


Figura 7.11-2: E/S mapeada no mesmo espaço de endereços da memória

7.12. Modos de Acessos Assíncronos

Para os projetistas de sistemas embarcados, a principal função dos dispositivos E/S é permitir interações do processador com o mundo físico. No entanto, vimos no Capítulo 4 que um processador tem o seu ritmo de execução baseado no relógio do sistema. E ao longo deste capítulo mostramos que cada dispositivo E/S tem a sua velocidade estabelecida, de forma totalmente independente, pelos seus fabricantes conforme a tecnologia. Um dos desafios de um projetista é decidir por uma estratégia para compatibilizar os diversos tempos dos dispositivos com o tempo da CPU em termos de transferência de dados.

Essencialmente existem três formas de interações com um processador para coletar os dados dos sensores. Elas podem ser por:

- **requisição**: CPU aguarda o sinal de entrada depois de habilitar a entrada do sinal.
- **amostragem (polling)**: amostra periodicamente o sinal de entrada mesmo que nenhuma mudança tenha ocorrido
- evento ou **interrupção**: o sinal de entrada gera um evento de interrupção ao processador, disparando a rotina de serviço para tratar o evento como vimos na Seção 4.5. No Capítulo 11 discutiremos em maiores detalhes processamentos por interrupção.

De acordo com o esquema convencional de transferência de dados, quando se faz uma transferência de dados dos dispositivos E/S, incluindo a memória secundária, para a memória principal, deve-se transferi-los primeiro para os registradores da CPU e depois para da CPU para a memória. E quando se inverte o sentido de transferência, o procedimento é inverso: transfere-se primeiro da memória principal para a CPU e desta para a memória secundária. Nesta forma de transferência via CPU, ocupa-se desnecessariamente o tempo de processamento do processador com instruções que utilizam a CPU como um ponto de passagem, além de reduzir o fluxo dos dados no gargalo do processador, .

O mecanismo de **acesso direto à memória**, em inglês *direct memory access* (DMA), é uma alternativa proposta às transferências via CPU, com o objetivo de melhorar o desempenho geral de um processador, permitindo que os dados sejam transferidos diretamente entre os periféricos (dispositivos E/S) e a memória principal sem intervenção do processador. Um circuito dedicado, conhecido como **controlador de acesso direto à memória**, gerencia essas transferências e, somente quando se finaliza a transferência, notifica a CPU para que esta esteja ciente da disponibilidade dos dados. Em outras palavras, olhando do lado da CPU, podemos considerar que o método de E/S seja por evento em que o controlador tenha executado toda a transferência. Figura 7.12-1 ilustra o acesso de direto à memória via um controlador e acesso convencional via CPU.

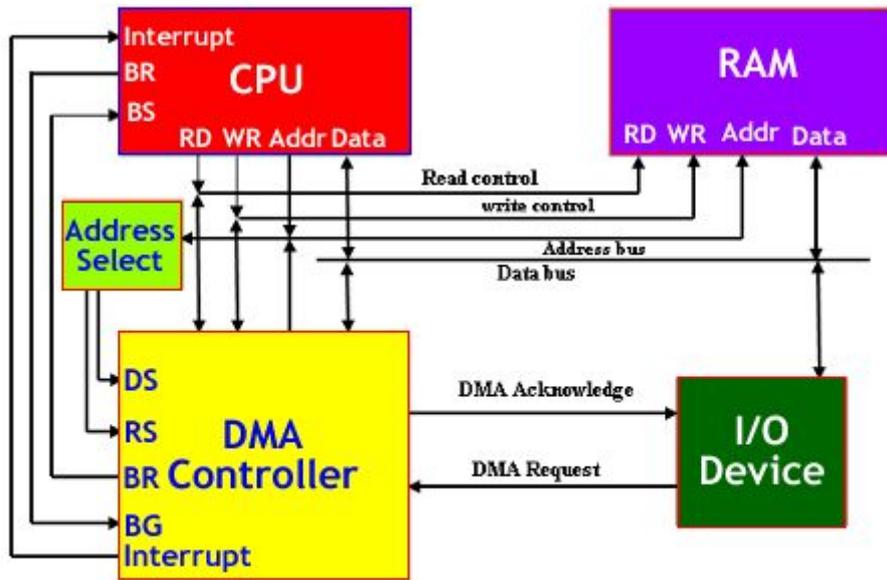


Fig: Showing DMA Mode of Data Transfer

Figura 7.12-1: Acesso direto à memória e via CPU.

Lembra-se de que comentamos na Seção 5.4 que a memória secundária deve ser considerada como um periférico de E/S em projetos de um sistema computacional. Vamos mostrar um esquema de acesso direto a uma memória por um disco para facilitar o entendimento da nossa afirmação. Figura 7.12-2 esquematiza o fluxo de controle básico de um controlador de DMA na transferência de <Count> bytes a partir do endereço <Address> de uma memória secundária (disco) para uma memória principal. Em primeiro lugar, é necessário programar o controlador para que este saiba <Address> e <Count>. O controlador requisita iterativamente a transferência dos bytes, um por um. Após a transferência de cada byte, o controlador de disco envia um sinal <Ack> para incrementar <Address> e decrementar <Count>. Quando <Count> atinge o valor zero, o controlador de DMA envia um aviso para a CPU, notificando a conclusão da transferência de todos os dados.

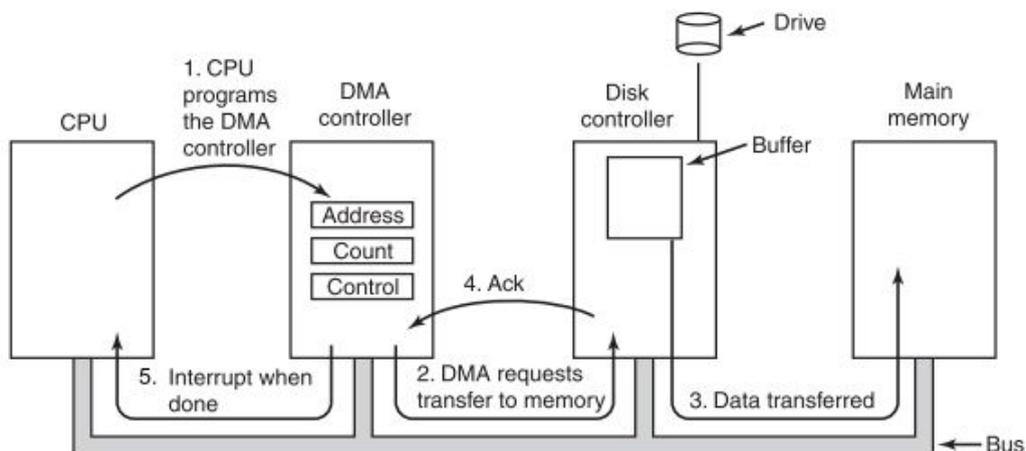


Figure 5-4. Operation of a DMA transfer.

Figura 7.12-2: Fluxo de controle numa transferência por DMA.

Quando a transferência direta pelo controlador de DMA ocorre no mesmo **barramento de dados** em que ocorre a transferência entre o controlador de um periférico e a CPU, ela pode ser por: **rajada**, em inglês *burst transfer mode*, quando o controlador assume total controle sobre o barramento durante toda a transferência, ou **roubo de ciclo**, em inglês *cycle stealing mode*, quando a transferência ocorre nos intervalos em que o barramento fique ocioso. Outra estratégia muito aplicada é o compartilhamento dos **barramento de controle e de endereços** entre o controlador de DMA e a CPU de maneira que, para um controlador de periférico, fique transparente as fontes dos sinais. O compartilhamento dos barramentos aumenta, certamente, a eficiência no uso dos recursos, mas traz com ele um problema de seleção do dono, em inglês *master*, do barramento num dado instante. Voltaremos a este assunto no Capítulo 9.

7.13. Exercícios

1. Considere a saída de um microcontrolador com as seguintes informações que interessam a esta ligação:

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Collector-Emitter Breakdown Voltage (Note 2) (I _C = 1.0 mA _{dc} , I _B = 0)	V _{(BR)CEO}	40	-	V _{dc}
Collector-Base Breakdown Voltage (I _C = 10 μA _{dc} , I _E = 0)	V _{(BR)CBO}	60	-	V _{dc}
Emitter-Base Breakdown Voltage (I _E = 10 μA _{dc} , I _C = 0)	V _{(BR)EBO}	6.0	-	V _{dc}
Base Cutoff Current (V _{CE} = 30 V _{dc} , V _{EB} = 3.0 V _{dc})	I _{BL}	-	50	nA _{dc}
Collector Cutoff Current (V _{CE} = 30 V _{dc} , V _{EB} = 3.0 V _{dc})	I _{CEX}	-	50	nA _{dc}
ON CHARACTERISTICS				
DC Current Gain (Note 2) (I _C = 0.1 mA _{dc} , V _{CE} = 1.0 V _{dc})	2N3903 2N3904	h _{FE}	20 40	- -
(I _C = 1.0 mA _{dc} , V _{CE} = 1.0 V _{dc})	2N3903 2N3904		35 70	- -
(I _C = 10 mA _{dc} , V _{CE} = 1.0 V _{dc})	2N3903 2N3904		50 100	150 300
(I _C = 50 mA _{dc} , V _{CE} = 1.0 V _{dc})	2N3903 2N3904		30 60	- -
(I _C = 100 mA _{dc} , V _{CE} = 1.0 V _{dc})	2N3903 2N3904		15 30	- -
Collector-Emitter Saturation Voltage (Note 2) (I _C = 10 mA _{dc} , I _B = 1.0 mA _{dc}) (I _C = 50 mA _{dc} , I _B = 5.0 mA _{dc})	V _{CE(sat)}	- -	0.2 0.3	V _{dc}
Base-Emitter Saturation Voltage (Note 2) (I _C = 10 mA _{dc} , I _B = 1.0 mA _{dc}) (I _C = 50 mA _{dc} , I _B = 5.0 mA _{dc})	V _{BE(sat)}	0.65 -	0.85 0.95	V _{dc}

- Saída em open-collector
- Corrente máxima de saída em nível baixo (I_{OL}) = 18mA
- VCEsat. Voltagem Coletor-emissor quando saturado =

E o LED com as seguintes informações relevantes ao projeto:

Electrical / Optical Characteristics at TA=25°C

Symbol	Parameter	Device	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
λ _{peak}	Peak Wavelength	Super Bright Red	660		nm	I _F =20mA
λ _D [1]	Dominant Wavelength	Super Bright Red	640		nm	I _F =20mA
Δλ _{1/2}	Spectral Line Half-width	Super Bright Red	20		nm	I _F =20mA
C	Capacitance	Super Bright Red	45		pF	V _F =0V; f=1MHz
V _F [2]	Forward Voltage	Super Bright Red	1.85	2.5	V	I _F =20mA
I _R	Reverse Current	Super Bright Red		10	uA	V _R = 5V

Notes:
1. Wavelength: +/-1nm.
2. Forward Voltage: +/-0.1V.

Precisa-se determinar o valor do resistor que será colocado em série com o LED para limitar a corrente.

7.14. Referências

Lee, Edward A. & Seshia, S.A. Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach. Second Edition. MIT Press, 2017.

Lemkin, M. and B. E. Boser, 1999: A three-axis micromachined accelerometer with a cmos position-sense interface and digital offset-trim electronics. IEEE J. of Solid-State Circuits, 34(4), 456–468.

Dimension Engineering LLC. A beginner's guide to accelerometers. Disponível em <https://www.dimensionengineering.com/info/accelerometers>. Acessado em agosto 2019

Analog Devices, Inc. Data Sheet ADXL345 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g Digital Accelerometer. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf>. Acessado em agosto 2019.

Electronics hub. Types Of Switches. Disponível em: <https://www.electronicshub.org/switches/>. Acessado em agosto 2019.

Sparkfun. Switch Basics. Disponível em: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/switch-basics/all>. Acessado em agosto 2019.

CircuitDigest What is Switch Bouncing and How to prevent it using Debounce Circuit. Disponível em: <https://circuitdigest.com/electronic-circuits/what-is-switch-bouncing-and-how-to-prevent-it-using-debounce-circuit>. Acessado em agosto 2019.

Maxim. MAX6816 ± 15 kV ESD-Protected, Single/Dual/Octal, CMOS Switch Debouncers. Disponível em: <https://www.maximintegrated.com/en/products/interface/signal-line-protection-ics/switch-debouncers-protectors/MAX6816.html>. Acessado em agosto 2019.

AVNET. Pressure sensors: The design engineer's guide. Disponível em: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/>. Acessado em agosto 2019.

Hitecnologia. O que é *Encoder*? Para que serve? Como escolher? Como interfacear?. Disponível em: <https://www.hitecnologia.com.br/blog/o-que-%C3%A9-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>. Acessado em agosto 2019

<https://newtoncbraga.com.br/index.php/projetos-educacionais/8280-circuitos-de-tiristores-como-chaves-e-reles-art1121>

<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/ee833/Modulo2.pdf>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Solenoid>

<http://www.pictronics.com.br/artigos-tecnicos/43-eletronica-e-automacao/89-como-funciona-um-servo-motor.html>

<https://www.electronics-tutorials.ws/blog/optocoupler.html>

<https://circuitdigest.com/tutorial/igbt-transistor>