

Eletrônica para Automação de Processos

MET1830

Instrumentação para Engenharia Mecânica

MEC1601

<http://www.dcomm.puc-rio.br/cursos/electronica/>

Prof. Sidnei Paciornik

sidnei@dcomm.puc-rio.br

sala 501L

DCMM

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Programa

- Introdução
 - Sistemas de Medição e Controle
- O Software LabView
- Revisão de Eletricidade
 - Circuitos passivos, resistores, capacitores e indutores.
 - Noção de impedância.
 - Filtros integradores e derivadores.
 - Oscilações.
 - Sistemas de alimentação, fases.
- Eletrônica Analógica
 - Circuitos Ativos.
 - Diodos e transistores.
 - Amplificadores e faixas de frequência.
 - Amplificadores operacionais.
- Sensores e transdutores
- Interfaceamento
 - Introdução, notação binária e hexadecimal.
 - Conversão analógica-digital
 - Conversão digital-analógica
 - Monitoração e controle de processos
- Eletrônica Digital
 - Funções lógicas elementares e aplicações.
 - Unidades aritméticas, Decodificadores, Multiplexadores, ROM e RAM. Sistemas dinâmicos, flip-flop's e contadores.



Formalidades

- Critério de Aprovação

- Provas (P1, P2)
- Laboratórios (L1, L2, L3)
- Média = $(P1+P2+L1+L2+2L3)/6$
- Se Média $> 6 \Rightarrow$ AP
- Se Média $< 6 \Rightarrow$ Prova Final (PF)
- MF = $0.5Média + 0.5PF$
- Se MF $> 5 \Rightarrow$ AP
- Se MF $< 5 \Rightarrow$ RM

- Referências

- Principles of Electronic Instrumentation – Diefenderfer and Holton – 3rd Edition – Saunders College Publishing
- Internet

- Temas para trabalhos

- Automação de laboratórios

- Ambiente de desenvolvimento

- LabView



Introdução

- Evolução histórica

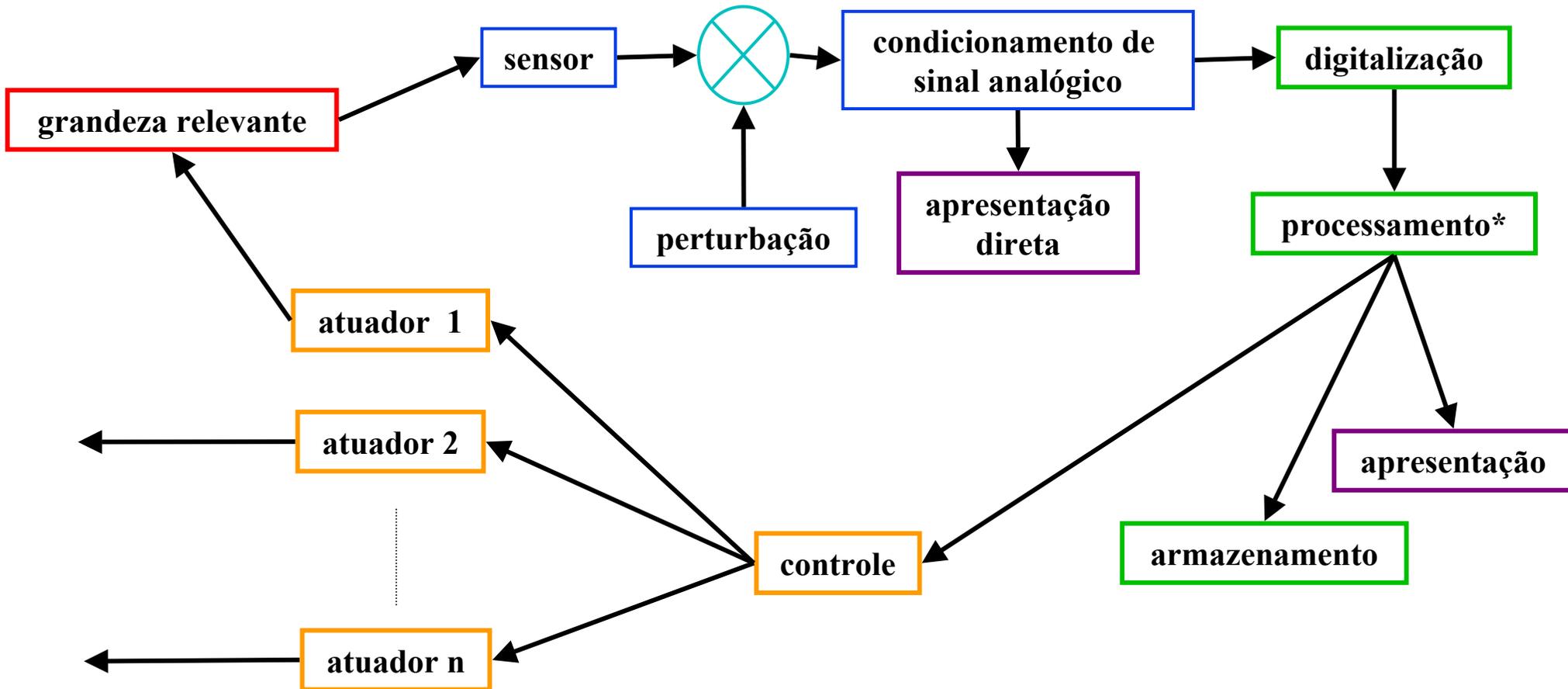
- até final séc.XIX: instrumentação mecânica
- até década de 80: crescente instrumentação eletrônica analógica e digital
- atualidade: instrumentação com computador
 - ✓ Obs.: A evolução de sistemas de medida e controle de processo foi tão rápida nos últimos 20 anos (introdução dos microcomputadores) que ainda se encontram em uso sistemas quase impensáveis hoje como registro de temperatura em rolo de papel.

- Exemplo: Termometria

- termômetro de bulbo, bimetais etc. (pouca ou nenhuma realimentação)
- termopares, Pt 100, termistores (eletrônica analógica ou digital de leitura com crescente capacidade de realimentação baseada nos valores medidos)
- sistemas computadorizados (grande flexibilidade de atuação baseada em grande diversidade de medidores)



Esquema conceitual de instrumentos de medição e controle



*- Este esquema mostra apenas um parâmetro sendo medido e processado. Em sistemas complexos várias grandezas estarão sendo avaliadas e controladas simultaneamente podendo, inclusive, levar a situações de conflito que devem ser consideradas pelo projetista.



Caracterização de um Sistema de Medição

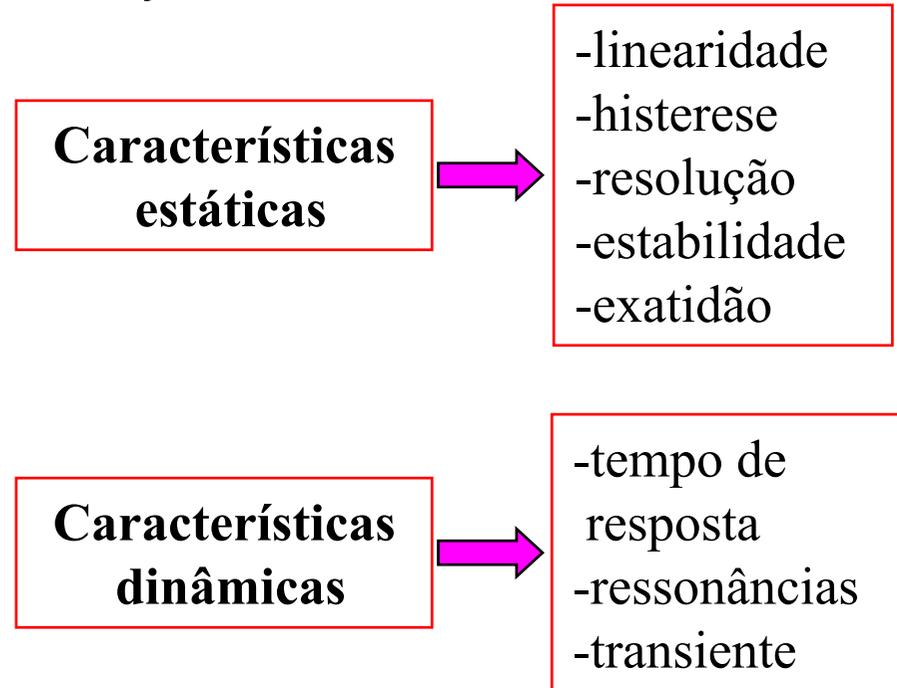
● Sensor

- Elemento de um instrumento de medição ou de uma cadeia de medição que é diretamente afetado pelo mensurando.
- Exemplos
 - ✓ junta de um termopar
 - ✓ rotor de uma turbina de medição de vazão
 - ✓ bóia para medição de nível

● Transdutor

- Dispositivo que fornece uma grandeza de saída que tem correlação direta com a grandeza de entrada.
- Exemplos
 - ✓ termopar
 - ✓ transformador de corrente
 - ✓ extensômetro resistivo (strain gage)

● Análise de um sistema de medição



- obs.: o tempo de resposta e as ressonâncias podem ser entendidos de forma coletiva no que costuma-se denominar resposta em frequência do sistema.



LABVIEW

- Uma linguagem para instrumentação
- Formas de interface com o exterior
- O ambiente de programação
 - Onde encontrar ajuda
 - Painel de Controle e Diagrama
 - Caixas de Ferramentas
 - Outros
- Fundamentos
 - Controles básicos
 - Criando programas (VI's)
 - Ligações
 - Formas básicas de apresentação
 - Indicação de problemas
- Estruturas
 - For
 - While
 - Shift register
 - Case
 - Seqüência
 - Fórmulas
- Arrays e Clusters
- Aquisição de Sinais
- Geração de funções
- Filtragem de Sinais



Exercícios de Labview

- 1 - Crie um programa que executa adição ou subtração de dois números e apresenta o resultado na tela.
- 2 - Crie um programa que detecta se o módulo de um número é menor que um através da verificação de se seu quadrado é maior ou menor que ele e, caso seja, acende um indicador na tela.
- 3 - Use a estrutura “for” ou “while” para obter o fatorial de um número.
- 4 - Monte um programa que faça o somatório de uma função de $i=1$ até $1 = n$.
- 5 - Gere uma função triangular e, com um filtro, obtenha a senóide fundamental do sinal.
- 6 - Armazene os sinais filtrado e não filtrado do exercício 5 em um arquivo para leitura posterior.
- 7 - Recupere os dados armazenados em 6 e obtenha a diferença entre eles. Apresente, em um mesmo gráfico, os sinais recuperados e a diferença.



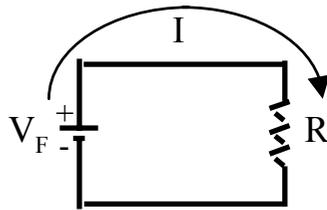
Revisão de Eletricidade



Circuitos Resistivos

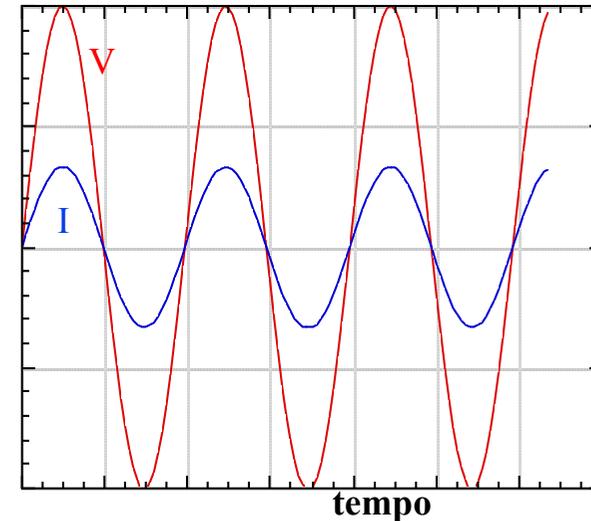
● Circuitos com resistência

- Seja o circuito abaixo com uma fonte de tensão contínua e um resistor com resistência R .



- O resistor é um dispositivo *linear*. Isto quer dizer que qualquer variação ΔV na tensão gera uma variação ΔI na corrente de forma que $\Delta V/\Delta I = \text{constante}$.
- O valor desta constante é justamente a resistência R .
- $V = RI$

- A resposta *linear* implica que qualquer que seja a evolução temporal da tensão, a corrente acompanhará *em fase*.

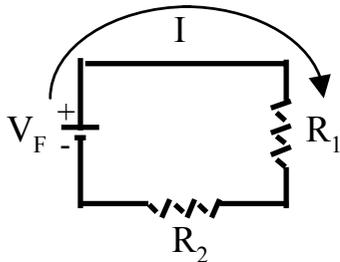


- Isto não será verdade para outros componentes tais como capacitores e indutores. Nesses casos, a corrente estará *adiantada ou atrasada em relação à tensão*.

O Divisor de Tensão

● Divisor de tensão

- Considere o seguinte circuito

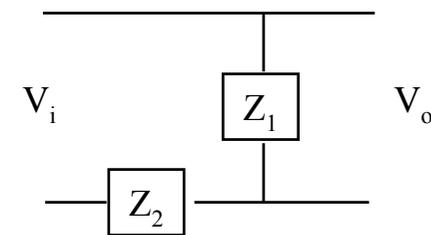


$$I = V_F / (R_1 + R_2)$$

$$V_{R1} = R_1 I = V_F R_1 / (R_1 + R_2)$$

- Este é um divisor de tensão resistivo.
- A tensão em R_1 é proporcional à tensão V_F .
- O fator de proporcionalidade é dado pela razão entre a resistência de interesse e a resistência total do circuito.

- Este conceito é válido, qualquer que seja o elemento passivo sobre o qual se mede a tensão e qualquer que seja a forma de V_F .
- Uma outra maneira de encarar o problema é imaginar que você tem uma *tensão de entrada* V_i , ou de *excitação*, e uma *tensão de saída* V_o , ou de *resposta*.
- O objetivo é calcular V_o em função de V_i e dos componentes do circuito.



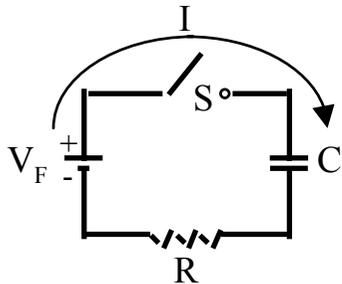
- Z_1 e Z_2 são componentes genéricos, cada um com a sua *impedância*.



Circuitos com Capacitor

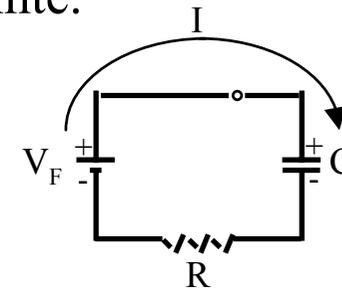
● Circuitos com capacitor

- O capacitor é um dispositivo formado por placas metálicas separadas por material isolante.
- O capacitor pode armazenar carga em suas placas.
- Seja o circuito abaixo formado por uma fonte de tensão contínua V_F , uma chave S , uma resistência R e um capacitor com capacitância C .



- O capacitor começa descarregado. Quando a chave se fecha, a fonte começa a gerar uma corrente no circuito.

- A fonte “rouba” cargas positivas da placa de baixo do capacitor e as transfere através do circuito para a placa de cima.
- Como as cargas não podem atravessar o isolante do capacitor, elas se acumulam na placa metálica.
- Após algum tempo a configuração será a seguinte.



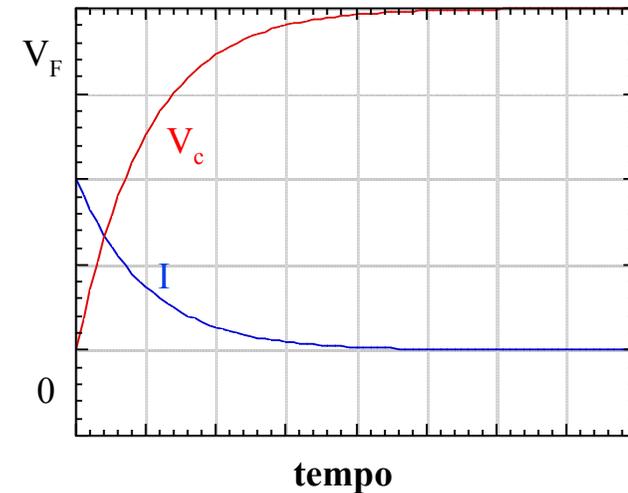
- O capacitor irá se carregar até que a tensão gerada pelo acúmulo de cargas seja igual à tensão da fonte. Neste momento a corrente no circuito irá a zero.

Resposta Transitória

● Circuitos com capacitor (cont.)

- Dá para notar que a queda da corrente não irá ocorrer de forma linear. Isto porque, assim que começar o acúmulo de carga no capacitor, já haverá uma tensão no capacitor que irá se contrapor à tensão da fonte, reduzindo a corrente no circuito.
- Quanto maior a tensão no capacitor, menor será a corrente, o que por sua vez reduz a *taxa* de acúmulo de carga e portanto a *taxa* com que a tensão aumenta.
- Desta forma, a corrente irá diminuir, mas cada vez mais lentamente, indo a zero de forma assintótica.

- A mesma coisa ocorrerá com a tensão no capacitor, que tenderá ao valor da tensão da fonte de forma assintótica.

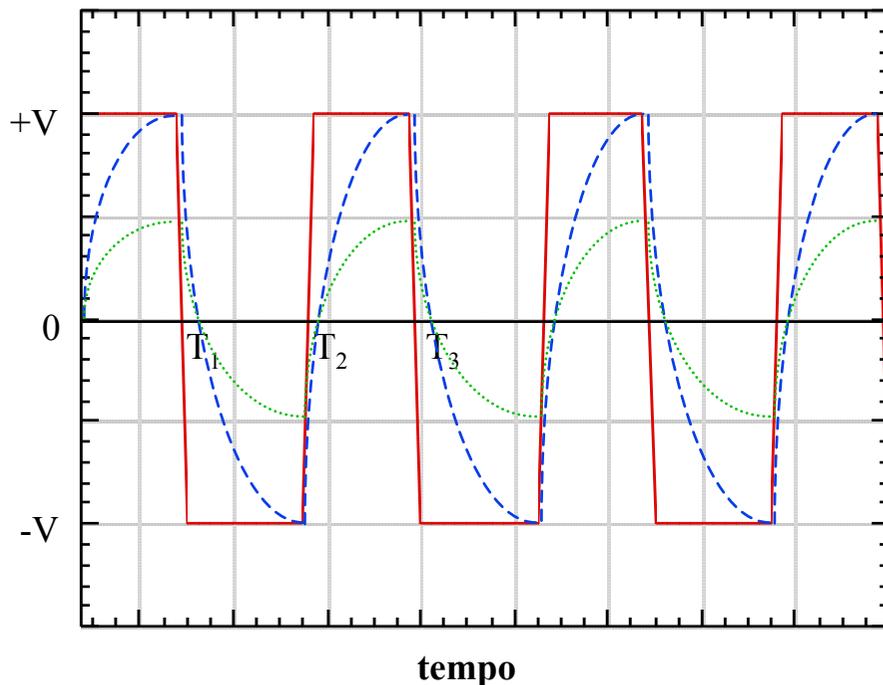


- Esta etapa é *transitória*. Após um curto intervalo de tempo não há mais corrente no circuito. Após este intervalo, o capacitor funciona como um *circuito aberto*.



Resposta a uma Onda Retangular

- Circuitos com capacitor (cont.)
 - O capacitor se torna mais interessante quando a fonte de alimentação não é contínua.
 - Por exemplo, considere uma fonte de tensão *retangular*.



- A questão básica é: *Existe tempo suficiente em cada ciclo para o capacitor se carregar/descarregar completamente?*
- Isto dependerá da relação entre o período de V_F , R e C. Veremos os detalhes mais tarde.
- No momento vamos imaginar que a resposta à questão acima é positiva.
 - ✓ Nesse caso, a tensão no capacitor seguirá a curva azul tracejada no gráfico à esquerda.
- Por outro lado, se o período da fonte for muito menor, i.e., sua frequência for muito maior, não haverá tempo do capacitor /carregar/descarregar e
 - ✓ a tensão seguirá a curva verde pontilhada à esquerda.

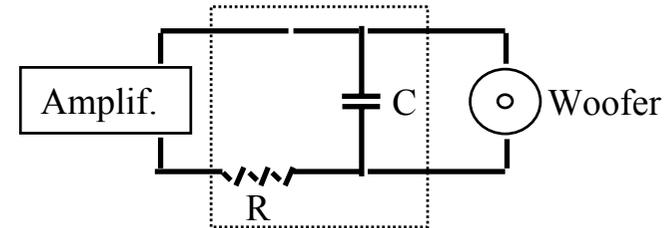


Resposta de Frequência

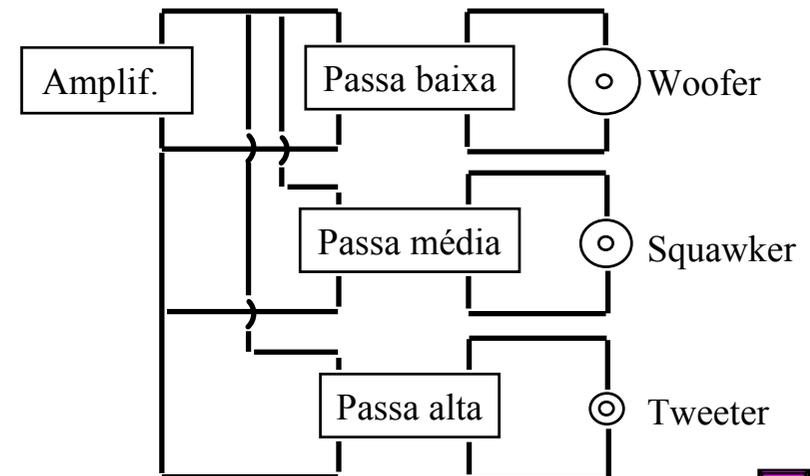
● O circuito RC como filtro

- Dá para notar que a amplitude da tensão V_C dependerá da frequência da fonte. Quanto maior a frequência menor é V_C .
- Este efeito pode ser usado como um *filtro* que deixa passar baixas frequências e rejeita altas frequências - *passa baixa*.
- Por exemplo, imagine que a tensão V_C é gerada por um amplificador de som. Neste caso V_C será composta por inúmeras frequências na faixa audível (30-15000 Hz). O filtro RC pode ser usado para alimentar o alto-falante de baixas frequências, o woofer.

- Para isso o nosso circuito ficaria mais ou menos assim



- Para alimentar os alto-falantes de médias e altas-frequências (squawker e tweeter) é necessário usar outros circuitos que vão ser filtros *passa-faixa* e *passa-alta*.



Filtros Passivos

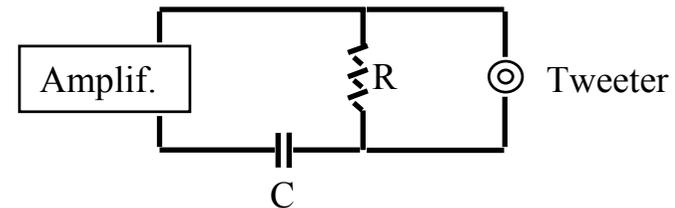
● Filtros

- Na prática, os circuitos usados em caixas de som, *os divisores de frequência*, são bem mais complexos, gerando uma separação mais precisa entre as diversas faixas de frequência.
- Neste curso nós vamos ver apenas os circuitos mais simples que podem funcionar como filtros.
- Uma maneira muito simples de obter um filtro passa-alta é utilizar o circuito RC e usar como *saída* a tensão sobre o resistor V_R . Como $V_F = V_C + V_R$, se V_C é passa-baixa então V_R tem que ser passa-alta.

➤ Sabemos que

- ✓ p/ f baixa, $V_C \approx V_F \Rightarrow V_R \approx 0$
- ✓ p/ f alta, $V_C \approx 0 \Rightarrow V_R \approx V_F$

➤ O circuito ficaria assim



- Outra maneira de obter filtros passa-baixa e passa-alta é utilizar um circuito com um resistor e um indutor - RL.
- Veremos mais adiante, que para obter um circuito *passa-faixa*, que serviria para alimentar o alto-falante de médios, utilizaremos um circuito LC ou RLC.



Circuitos com Indutores

● Circuito RL

➤ O indutor é basicamente uma bobina. A passagem de corrente na bobina gera um campo magnético.

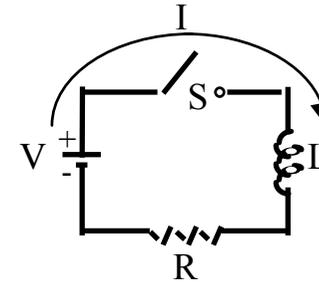
➤ O funcionamento do indutor em um circuito depende do seguinte fato: *um indutor reage a qualquer variação do campo magnético B , gerando uma tensão (e uma corrente) que se opõe a esta variação.*

➤ Como esta variação de B advém de uma variação de I podemos escrever a tensão induzida como

$$V_L = L \frac{dI}{dt}$$

➤ onde L é a *indutância*.

➤ Considere agora o circuito abaixo



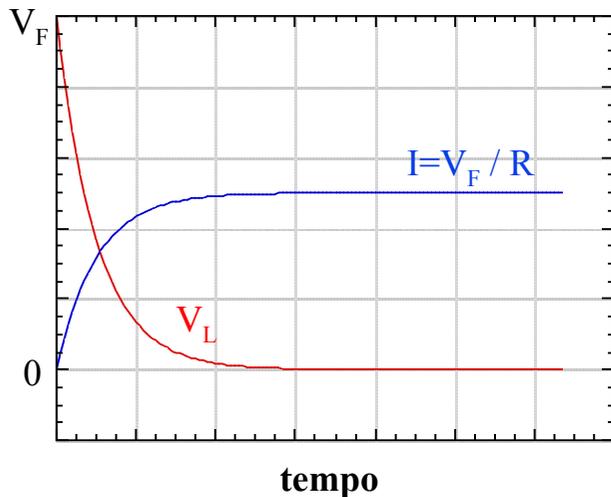
➤ No momento que a chave se fecha, a fonte “tenta” gerar uma corrente no circuito. Esta variação brusca no tempo induz uma tensão no indutor que se opõe à tensão da fonte. Desta forma, em $t=0$, $V_L = V_F$ e $I=0$.

➤ Desta forma, o indutor consegue, momentaneamente, impedir a passagem de corrente. Em consequência, dI/dt se reduz, implicando numa redução de V_L , o que, por sua vez, permite a passagem de uma pequena corrente

Resposta Transitória

● Circuito RL (cont.)

- Assim, paulatinamente, a tensão no indutor vai caindo e a corrente vai crescendo até que V_L vale zero e a corrente vale V_F/R .



- Em outras palavras: *dado tempo suficiente, o indutor passa a se comportar como um curto-circuito, não influenciando mais o circuito.*

- Analogamente ao capacitor, o indutor terá efeito mais interessante quando a fonte de tensão variar no tempo.
- Assim, para frequências baixas, que é o caso do gráfico à esquerda, a tensão no indutor é próxima de zero.
- Ao contrário, para frequências altas, não haverá tempo de V_L cair substancialmente antes da fonte se inverter. Desta forma, V_L se manterá em valor alto, próximo a V_F .
- Sendo assim, *o circuito RL com a saída no indutor é um circuito passa-alta. Quando a saída é no resistor é um circuito passa-baixa.*
- O circuito RL é simétrico ao circuito RC.



Equações Temporais

- Equações para o circuito RC.

- Lembrando que

- ✓ $V_C = Q/C$

- ✓ $I = dQ/dt$

podemos escrever

$$V_F = V_C + V_R = Q/C + R dQ/dt$$

que é uma equação diferencial de primeira ordem para a carga Q.

- A solução para esta equação é

$$Q(t) = CV_F [1 - \exp(-t/RC)]$$

- Ou resolvendo para V_C

$$V_C(t) = V_F [1 - \exp(-t/RC)]$$

- Ou para a corrente no circuito

$$I = (V_F / R) \exp(-t/RC)$$

- Equações para o circuito RL.

- Lembrando que

$$V_L = L dI/dt$$

podemos escrever

$$V_F = V_L + V_R = L dI/dt + RI$$

que é uma equação diferencial de primeira ordem para a corrente I.

- A solução para esta equação é

$$I(t) = (V_F / R) [1 - \exp(-tR/L)]$$

- Ou resolvendo para V_L

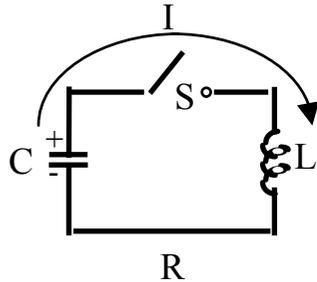
$$V_L = V_F \exp(-tR/L)$$



O Circuito LC

● O circuito LC sem fonte

- Seja o circuito abaixo formado por um capacitor carregado com carga Q_0 e um indutor L .



- Quando a chave se fecha o capacitor começa a se descarregar, gerando uma corrente no circuito. O indutor reage criando uma tensão V_L que se opõe a V_C . A corrente neste instante é zero.
- Aos poucos, V_C diminui, aumentando a corrente no circuito até que o capacitor tem carga nula.

- Neste momento, como não há mais carga no capacitor a corrente tenderia a decair. No entanto, o indutor novamente reage a esta queda na corrente, gerando agora uma tensão que *tenta preservar a corrente no sentido positivo*.
- Isto fará com o que o capacitor se carregue ao contrário, criando uma tensão que se opõe ao fluxo de corrente no sentido positivo.
- Neste momento, a corrente irá a zero, as tensões V_C e V_L terão se invertido em relação ao início e a sequência se repete ao contrário, com corrente negativa, até que o capacitor se recarrega e o sistema volta ao estado inicial e mais um ciclo começa.



Circuito LC e Oscilações

- O circuito LC sem fonte (cont.)

- Dá para notar que este sistema irá *oscilar*.
- A maneira mais fácil de entender isto é escrever as equações para V_L e V_C .
- Simplesmente $V_L = -V_C$
- Assim

$$LdI/dt = -Q/C, \text{ com } I = dQ/dt$$

$$d^2Q/dt^2 = -Q/LC$$

que tem solução

$$Q = Q_0 \sin(\omega t + \phi)$$

$$dQ/dt = \omega Q_0 \cos(\omega t + \phi)$$

$$d^2Q/dt^2 = -\omega^2 Q_0 \sin(\omega t + \phi)$$

$$\Rightarrow \omega^2 = 1/LC$$

$$\Rightarrow \omega = 1/\sqrt{LC}$$

- Assim, o circuito tem uma *frequência natural de oscilação*.

- Além disso, como $Q(t=0) = Q_0$,

$$Q_0 = Q_0 \sin(0 + \phi) \Rightarrow \phi = \pi/2$$

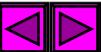
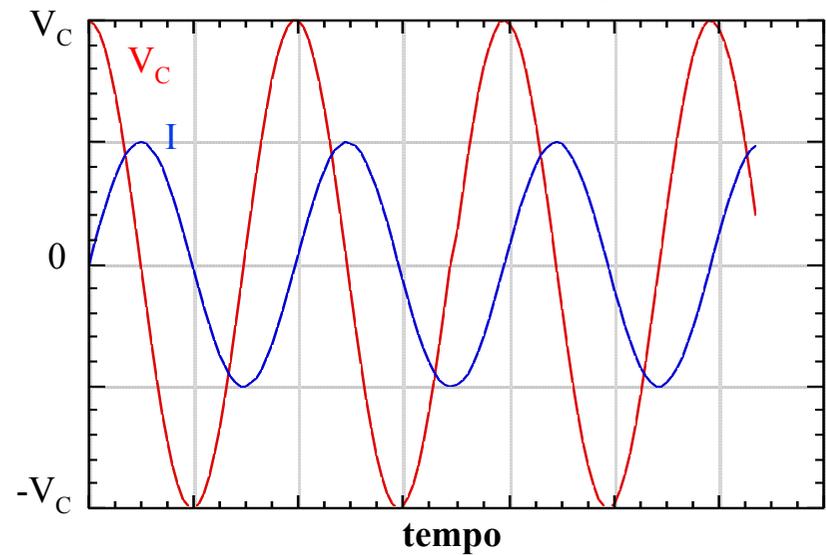
$$Q = Q_0 \cos(\omega t)$$

$$V_C = (Q_0/C) \cos(\omega t)$$

$$I = -\omega Q_0 \sin(\omega t)$$

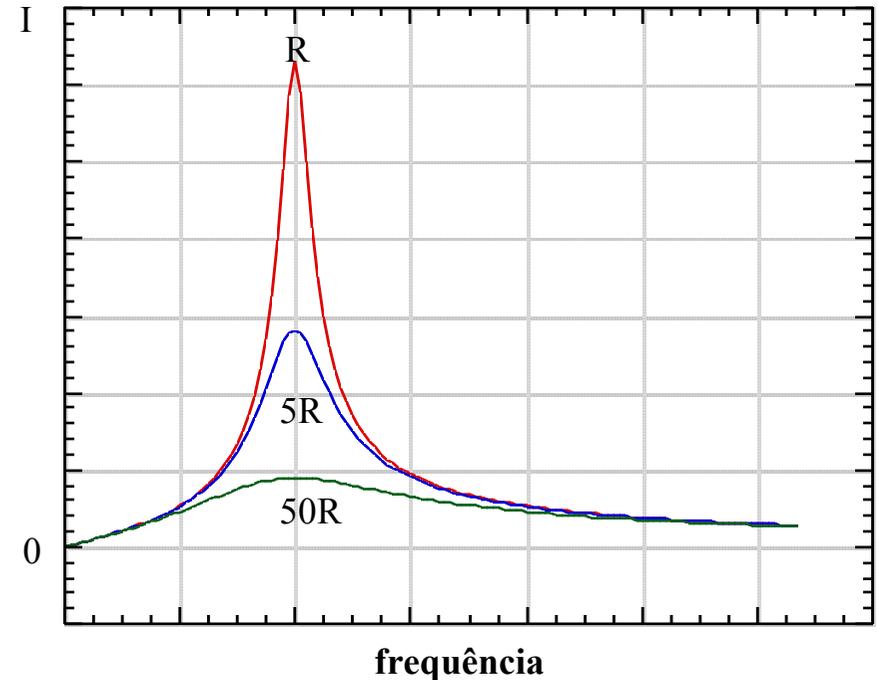
$$V_L = -\omega^2 Q_0 L \cos(\omega t) =$$

$$= -(Q_0/C) \cos(\omega t) = -V_C \quad \text{q.e.d.}$$



Ressonância

- O circuito LC com fonte
 - Como todo sistema físico que tem uma frequência natural de oscilação, o circuito LC apresentará *ressonância*.
 - Isto quer dizer que o circuito responderá fracamente a uma excitação elétrica com frequência muito menor ou muito maior do que a frequência natural, e responderá muito fortemente quando excitado na frequência natural.
 - A resposta de frequência do circuito LC (ou RLC) terá a seguinte forma



- Ou seja, na frequência de ressonância a corrente é máxima e a largura do pico depende da resistência do circuito.
- Isto quer dizer que este circuito responde como um filtro *passa-faixa*, centrado na frequência de ressonância.



Números Complexos

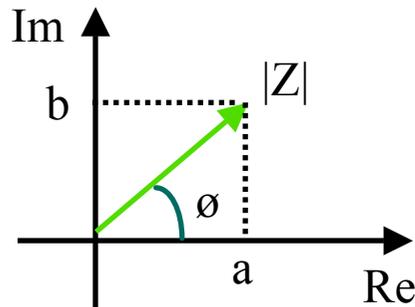
● Revisão de números complexos

- $Z = a + ib$
 - ✓ a é a parte real de Z ($\text{Re}(Z)$)
 - ✓ b é a parte imaginária de Z ($\text{Im}(Z)$)
- Z também pode ser escrito como

$$Z = |Z|(\cos\vartheta + i\sin\vartheta)$$
 onde

$$|Z| = \sqrt{a^2 + b^2}$$
 é o módulo de Z

$$\text{tg}(\vartheta) = b/a$$
, ϑ é a fase de Z
- Outra notação para Z na sua forma polar é $Z = |Z|\angle\vartheta$



● Aritmética

- Se

$$Z_1 = a + ib = |Z_1| \angle\vartheta_1$$

$$Z_2 = c + id = |Z_2| \angle\vartheta_2$$
 então

$$Z_1 + Z_2 = (a + c) + i(b + d)$$

$$Z_1 - Z_2 = (a - c) + i(b - d)$$

$$Z_1 * Z_2 = (ac - bd) + i(ad + bc) =$$

$$= |Z_1||Z_2| \angle(\vartheta_1 + \vartheta_2)$$

$$Z_1 / Z_2 = |Z_1|/|Z_2| \angle(\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

● Exponencial complexa

- $\exp(Z) = e^a[\cos(b) + i\sin(b)]$
- $\exp(ib) = \cos(b) + i\sin(b)$ (exponencial imaginária)
- $Z = |Z|(\cos\vartheta + i\sin\vartheta) \Rightarrow Z = |Z|e^{i\vartheta}$



Impedância

- A noção de impedância

- Lembrando que

- ✓ $V_R = RI$

- ✓ $V_L = LdI/dt$

- ✓ $V_C = Q/C = 1/C \int Idt$

podemos notar que se I é uma função seno, então V_L será um cosseno e V_C será um -cosseno.

- Em outras palavras

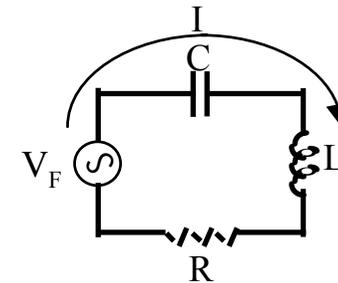
- ✓ No resistor, corrente e tensão estão em fase.

- ✓ No indutor e no capacitor, corrente e tensão *estão defasadas de $\pm\pi/2$* .

- Além disso, nós sabemos que indutores e capacitores *tem uma resposta que depende da frequência*.

- Nosso interesse agora, é encontrar uma forma geral para representar estas diferentes características.

- Considere o circuito RLC abaixo



excitado por uma *tensão alternada*
 $V_F = V_0 \cos(\omega t)$

- Podemos escrever

- ✓ $V_F = V_R + V_L + V_C$

- ✓ $V_F = RI + LdI/dt + 1/C \int Idt$

- ✓ $dV_F/dt = RdI/dt + Ld^2I/dt^2 + I/C$

- Já sabemos que a corrente no circuito terá forma análoga a V_F .



Impedância (cont.)

- A noção de impedância (cont.)

- Apenas do ponto de vista matemático, podemos escrever que $V_0 \cos(\omega t)$ é a parte real de $V_0 e^{i\omega t}$.
- Assim, podemos usar o truque matemático de imaginar que a fonte de tensão aplica uma tensão complexa, resolver as equações e depois pegar a parte real como o verdadeiro resultado físico.
- Escrevendo então a equação final da página anterior teremos

$$i\omega V_0 e^{i\omega t} = (i\omega R - \omega^2 L + 1/C) I_0 e^{i(\omega t + \phi)}$$

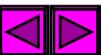
e dividindo por $i\omega$ encontramos

$$V_0 e^{i\omega t} = (R + i\omega L + 1/i\omega C) I_0 e^{i(\omega t + \phi)}$$

$$V(t) = Z I(t)$$

onde $Z = R + i\omega L + 1/i\omega C$ é a *impedância* total de um circuito em série contendo um resistor, um indutor e um capacitor.

- A impedância é uma grandeza complexa formada de uma parte real que corresponde à resistência R e uma parte imaginária formada por dois termos: *uma reatância indutiva e uma reatância capacitiva*.
- A parte imaginária apenas indica o fato de que a corrente não está em fase com a tensão aplicada no capacitor e no indutor.
- As regras de combinação para resistências em série/paralelo podem ser aplicadas diretamente com as reatâncias e impedâncias.



Impedância: Módulo e Fase

● A noção de impedância (cont.)

- A impedância é uma extensão do conceito de resistência para incluir
 - ✓ a mudança de fase entre voltagem e corrente e
 - ✓ a dependência da frequência nas respostas do indutor e capacitor.

➤ Em geral $V = ZI$

✓ Resistência $Z = R$ - independe de f

✓ Indutor

$$Z_L = i\omega L \Rightarrow V = i\omega LI$$

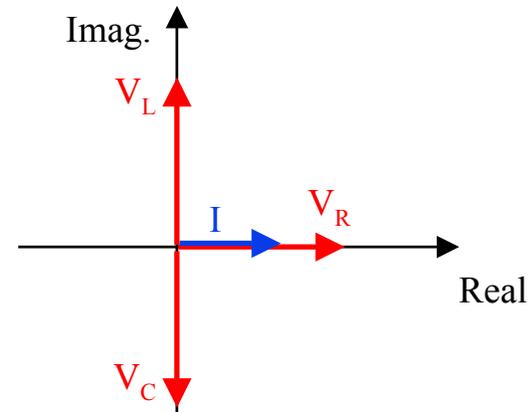
quanto maior f , maior a tensão – passa alta.

✓ Capacitor

$$Z_C = -i/(\omega C) \Rightarrow V = (-i/(\omega C))I$$

- quanto maior f , menor a tensão - passa-baixa.

- O efeito da mudança de fase pode ser representado num gráfico no plano complexo.



- Assim nota-se que

✓ I e V_R estão em fase,

✓ V_L está adiantado $\pi/2$ em relação a I e

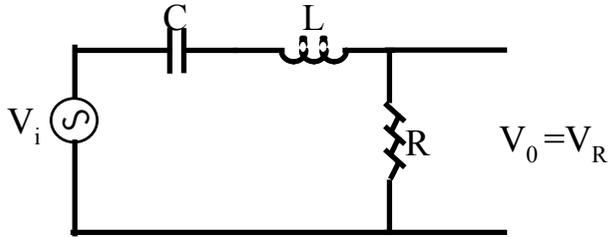
✓ V_C está atrasado $\pi/2$ em relação a I .



Função de Transferência $H(f)$

- A função de transferência $H(f)$

- Considere o circuito RLC série



com entrada V_i e saída V_o .

- A relação entre a tensão de saída, V_o e a tensão de entrada V_i , deve levar em conta
 - ✓ a dependência de seu módulo com a frequência: isto dará a *amplitude de V_o em função de f* .
 - ✓ a dependência de sua fase com a frequência: isto dará a *fase de V_o em função de f* .

- A função de transferência $H(f)$ é definida como

$$H(\omega) = V_o(\omega)/V_i(\omega)$$

- Esta função é um número complexo que depende da frequência e que pode ser escrito em termos do seu módulo e sua fase

$$H(\omega) = |H(\omega)|e^{i\phi} \text{ onde}$$

$$\checkmark |H(\omega)| = \sqrt{(\text{Re}(H))^2 + (\text{Im}(H))^2}$$

$$\checkmark \phi(\omega) = \text{arctang}[\text{Im}(H)/\text{Re}(H)],$$

- No nosso circuito, como

$$V_o(\omega) = RI(\omega) \text{ e } I(\omega) = V_i(\omega)/Z(\omega)$$

podemos escrever

$$H(\omega) = R/Z(\omega)$$

$$|H(\omega)| = R/|Z(\omega)|$$

$$\angle H(\omega) = \angle R - \angle Z(\omega) = -\angle Z(\omega)$$



H(ω) para o Circuito RLC

- A função de transferência H(f)
 - Retornando ao RLC série temos

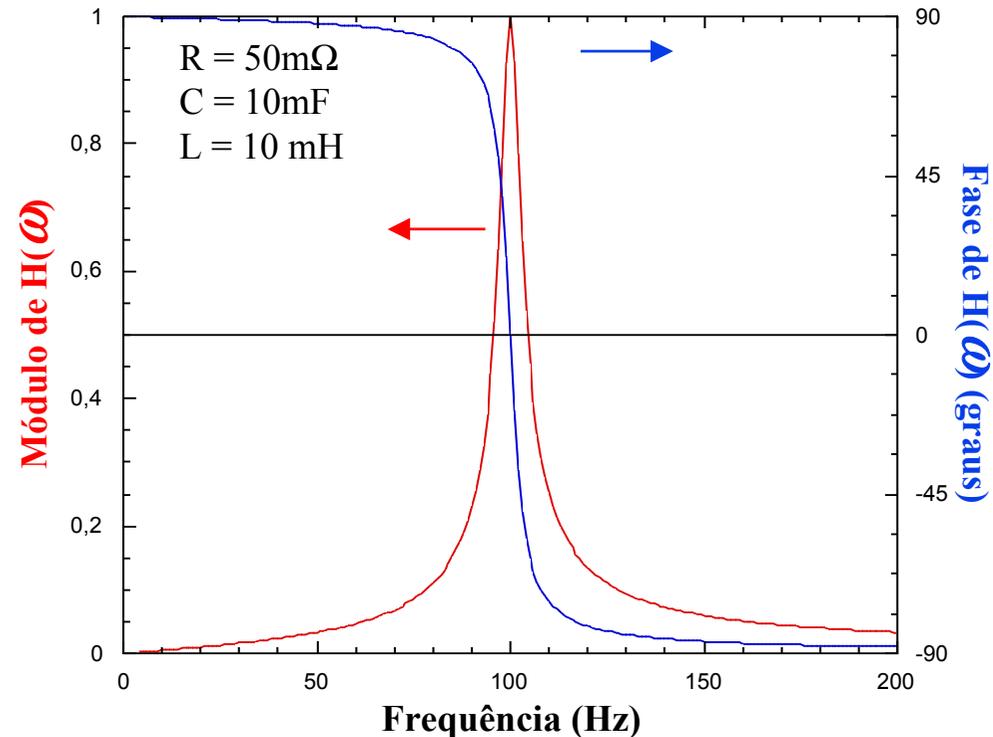
$$Z = R + i\omega L + 1/i\omega C$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$$
 e assim

$$|H(\omega)| = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$
 - Também

$$\angle Z(\omega) = \arctang[(\omega L - 1/\omega C) / R]$$

$$\angle H(\omega) = -\arctang[(\omega L - 1/\omega C) / R]$$
 - O módulo e a fase de H(ω) estão plotados no gráfico à direita para valores específicos de R,L e C.



H(ω) para o Circuito RLC (cont.)

- Para este circuito a ressonância $\omega_0 = 100\text{Hz}$. Nesta frequência a fase vale zero e o módulo de H(ω) vale 1.
- Para $\omega < \omega_0$, a fase é positiva indicando que V_o está adiantado em relação a V_i . Para $\omega = 0$ V_o está 90° a frente de V_i .
- Para $\omega > \omega_0$, V_o está atrasado em relação a V_i .

- Fator de qualidade Q

- Quando a função de transferência apresenta a forma de um pico é comum que se esteja interessado em saber a faixa de frequência, em torno do valor máximo, na qual o sinal de entrada será transmitido ao ponto em questão. Define-se assim o fator de qualidade Q como,

$$Q = \omega_0 / \Delta\omega$$

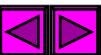
- Q do circuito RLC série

- lembrando que

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

podemos escrever

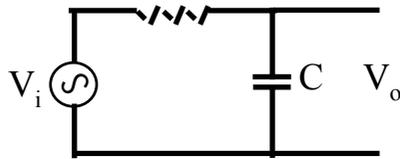
$$|H(\omega)| = R / [\sqrt{R^2 + (L/\omega)^2(\omega - \omega_0)^2}]$$



H(f) para o Circuito RC

● Voltando aos circuitos RC e RL

- A resposta de frequência dos circuitos RC e RL pode ser obtida de forma simples usando o conceito de função de transferência.
- Circuito RC



$$H(\omega) = (1/i\omega C) / (R + 1/i\omega C) = 1 / (1 + i\omega CR)$$

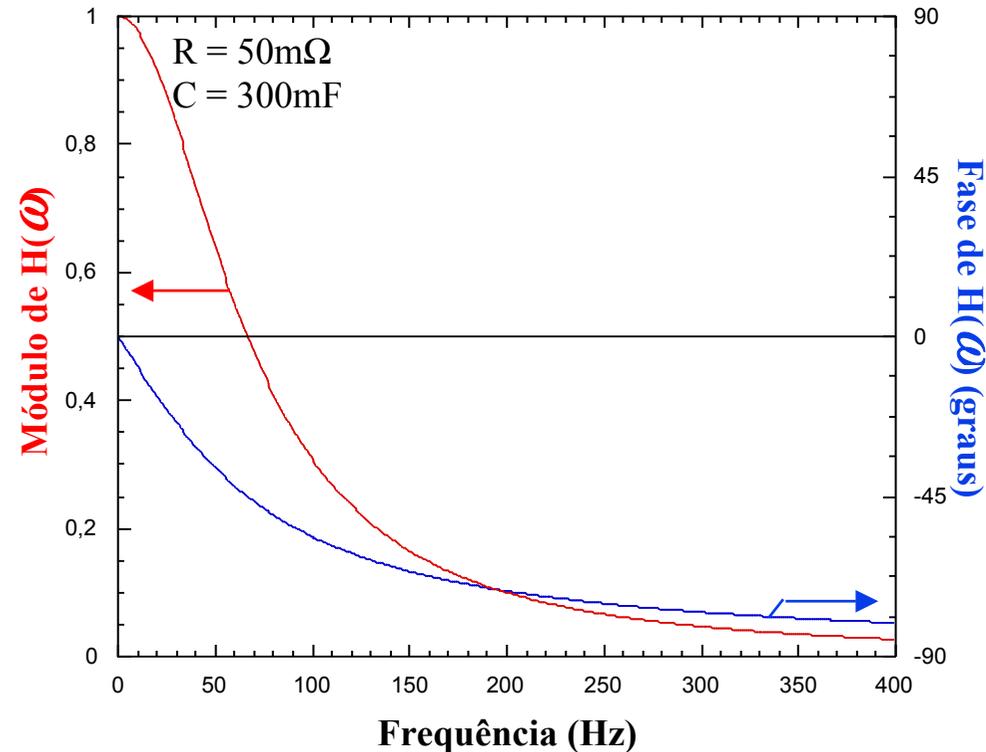
$$|H(\omega)| = 1 / (1 + (\omega CR)^2)$$

$$\angle H(\omega) = -\arctang[\omega CR]$$

- Ou seja, para

- ✓ $\omega \rightarrow 0$, $|H(\omega)| = 1$, $\angle H(\omega) = 0$
- ✓ $\omega \rightarrow \infty$, $|H(\omega)| = 0$, $\angle H(\omega) = -90^\circ$

- Isto caracteriza um filtro passa-baixa, conforme ilustrado no gráfico abaixo



- O circuito RL ficará para a lista de exercícios.



Transformadores

- O elemento passivo que faltava
 - Transformadores são elementos passivos que reduzem ou aumentam a amplitude de tensões alternadas.
 - Os transformadores são formados por pelos menos dois indutores acoplados através de seu campo magnético
 - ✓ Quando ocorre uma variação de tensão no indutor (ou enrolamento) de entrada (ou primário), seu campo magnético também varia.
 - ✓ Como este campo magnético atravessa também o enrolamento secundário, sua variação irá induzir uma corrente e uma tensão neste enrolamento.
 - Dependendo da relação entre o número de espiras do primário e do secundário, a voltagem no secundário será maior (transformador elevador) ou menor (transformador abaixador) do que no primário.
 - Os transformadores podem ter mais do que uma bobina no secundário, permitindo gerar diversas tensões diferentes, ou saídas no meio da bobina secundária (taps) que terão tensão menor do que a tensão total de saída.
 - Transformadores são fundamentais para alimentar uma grande variedade de dispositivos que trabalham com tensões menores do que a da rede elétrica.



Alimentação Elétrica

● Geração e transmissão de energia

- Em todo o mundo, a energia elétrica é obtida a partir da conversão de outras formas de energia tais como Energia Gravitacional (hidroelétricas), Energia Térmica (usinas termo-elétricas convencionais ou nucleares), Energia dos Ventos (Usinas Eólicas), Energia Luminosa (Células Solares), Energia das Marés
- Atualmente os métodos mais usados para gerar energia em grandes quantidades são as usinas hidroelétricas e termo-elétricas. No entanto outras fontes como eólica e solar vêm aumentado sua participação no “mix” de energia.

- Estes processos de geração em geral usam turbinas que são movidas pela água em queda, ou vapor d'água em expansão.
- Estas turbinas giram, em alta velocidade, grandes magnetos que estão próximos a enormes bobinas. A oscilação do campo magnético gera uma tensão elétrica induzida, também oscilante, com uma frequência fixa (60 Hz).
- Esta tensão elétrica é, então, conduzida por linhas de transmissão de alta voltagem e corrente, até subestações.
- Nas subestações a tensão é reduzida até cerca de 13.8kV, e é então conduzida até transformadores localizados nas ruas.
- Estes transformadores, finalmente, geram a tensão alternada que alimenta nossas casas.

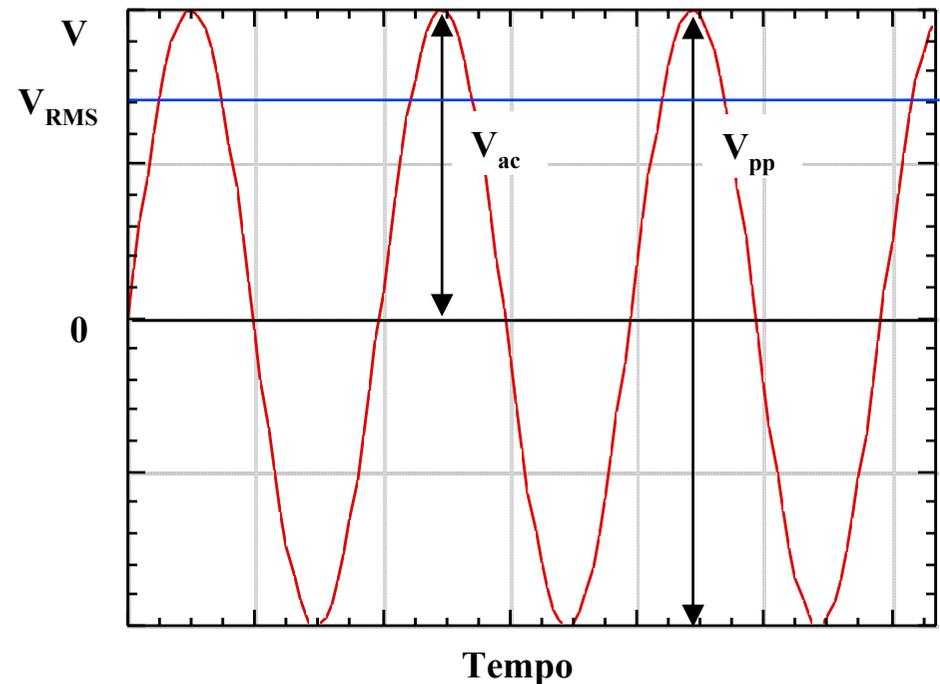


A Rede Elétrica Padrão

● Valor RMS

- Os transformadores das ruas reduzem a tensão para o valor típico de 110V, encontrado nas tomadas das residências.
- Mas que valor é esse ?
- Lembrando que a tensão elétrica é uma forma de onda senoidal, com frequência definida, o valor de 110V corresponde a uma tensão contínua cuja potência efetiva (a integral da energia no tempo) seja igual à potência efetiva da tensão senoidal.
- Este é o valor RMS - Root Mean Squared, da tensão da rede, e é o valor sempre citado quando nos referimos a alimentação alternada.

- Conforme veremos, o valor RMS de um sinal alternado com amplitude V_{ac} é $V_{RMS} = V_{ac} / \sqrt{2}$



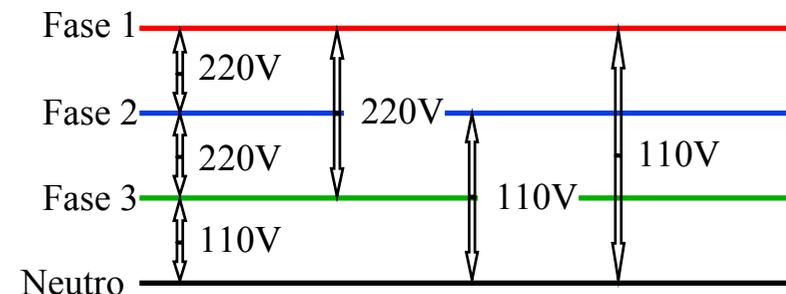
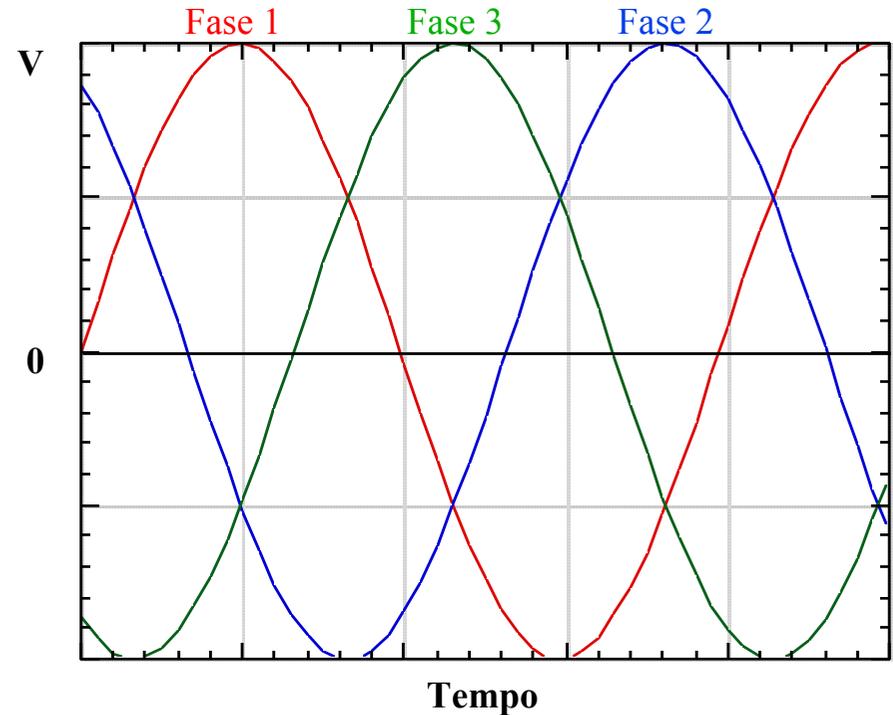
- Se $V_{RMS} = 110V$ então $V_{ac} = 110 * \sqrt{2} = 156V$



Sistema Trifásico

● A origem das fases

- Na geração elétrica, para cada ciclo de rotação, tensões são induzidas em diferentes bobinas, aproveitando assim mais eficientemente o processo.
- As tensões nas diversas bobinas estarão, portanto, defasadas entre si.
- No sistema padrão de alimentação, denominado sistema trifásico, utiliza-se tres fases com tensões senoidais idênticas mas defasadas de 120 e 240 graus em relação a uma tensão de referência.
- A tensão RMS entre cada fase e um fio denominado neutro, é de 110V.
- A tensão RMS entre fases é de 220V.



Introdução à Eletrônica Analógica



Dispositivos semicondutores

● Semicondutores e condutividade

- Os materiais semicondutores, basicamente Si e Ge, tem uma propriedade fundamental para sua utilização em dispositivos eletrônicos:
 - ✓ Sua condutividade elétrica é fortemente alterada pela presença de impurezas em baixíssimas concentrações.
- Sendo assim, controlando o tipo e a concentração destes dopantes, é possível alterar o semicondutor intrínseco para que ele tenha uma condutividade sob medida para as necessidades de um circuito qualquer.

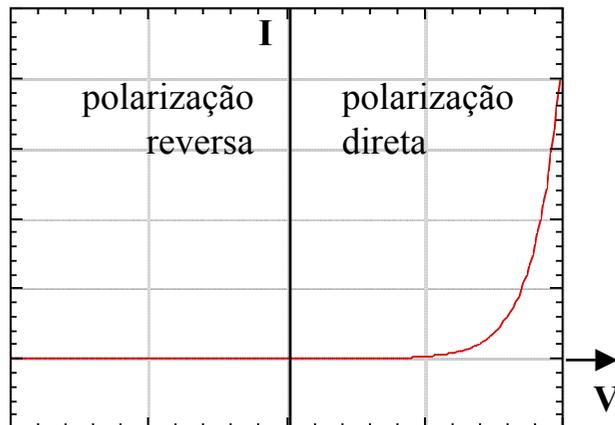
● Tipos de dopantes

- Existem dois tipos básicos de impurezas em função do número de elétrons em sua última camada atômica :
 - ✓ Impurezas doadoras, ou tipo n, que possuem um elétron a mais do que o Si.
 - ✓ Impurezas aceitadoras, ou tipo p, que possuem um elétron a menos do que o Si.
- As impurezas doadoras fornecem elétrons em excesso que, por estarem essencialmente livres, são os principais portadores da corrente elétrica.
- As impurezas aceitadoras geram “buracos”, onde elétrons podem se alojar, propiciando também a condução elétrica.

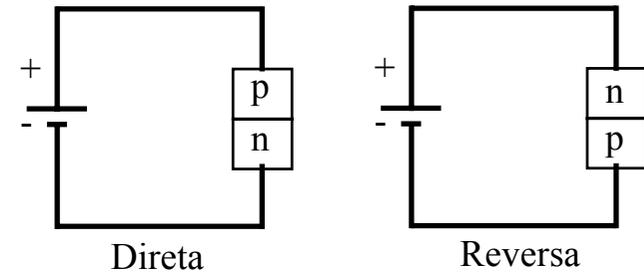


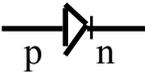
O Diodo

- Uma junção de materiais
 - Ao realizar uma junção entre um semicondutor tipo n com um tipo p, uma junção pn, cria-se o primeiro dispositivo semicondutor: o diodo.
 - Para os objetivos deste curso, não analisaremos o funcionamento detalhado do diodo mas apenas a sua curva Tensão-Corrente (V-I), indicada abaixo.



- Pelo gráfico, nota-se que o diodo funciona de forma muito diferente para polarização direta e reversa.
- Estas configurações são representadas abaixo:



- Ou seja, para polarização direta o diodo permite a passagem de corrente com um comportamento exponencial.
- Para polarização reversa o diodo simplesmente não permite a passagem de corrente.
- O símbolo do diodo indica esta situação através de uma seta. 



Conversão AC-DC

● Retificadores

- A primeira, e extremamente útil, utilização do diodo é em circuitos para retificar uma tensão alternada, tornando-a contínua.
- Existem basicamente três tipos de circuito retificador simples
 - ✓ O retificador de 1/2 onda.
 - ✓ O retificador de onda inteira.
 - ✓ O retificador em ponte.
- Estes circuitos serão avaliados em função do valor RMS da tensão contínua gerada e da quantidade de oscilação residual, ou “ripple” apresentada.
- O retificador em ponte será o vencedor nestes quesitos.

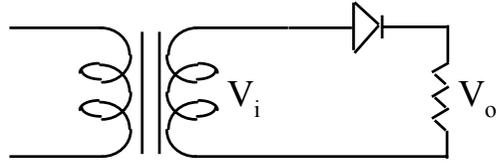
● O circuito de entrada

- Vamos montar um circuito com um transformador de entrada, normalmente um abaixador, que reduz a amplitude da tensão da rede, e alimenta nosso retificador.
- Este mesmo circuito será utilizado nos tres tipos de retificadores, permitindo uma comparação entre as eficiências de conversão AC-DC.
- Este cicuito estará alimentando uma carga, que pode ser apenas um resistor ou um circuito eletrônico qualquer com uma impedância equivalente.

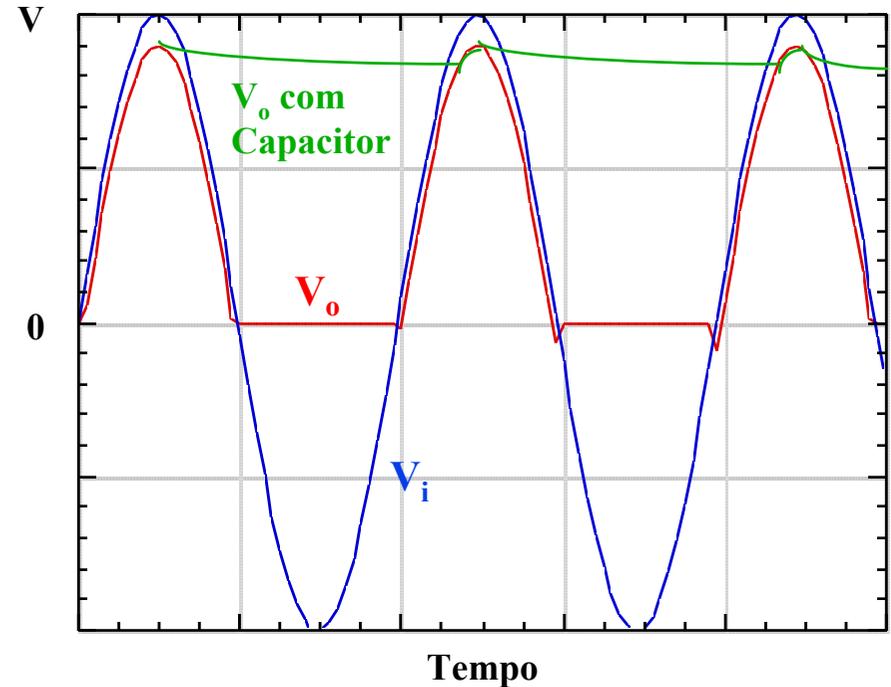


Retificador de 1/2 onda

- Considere o circuito abaixo



- Tomando como referência a saída de baixo do transformador, podemos notar que quando V_i for positiva, o diodo estará polarizado diretamente, haverá fluxo de corrente e aparecerá uma voltagem $V_o - V_i$ na carga R (a menos de uma pequena queda de potencial no próprio diodo).
- No entanto, quando $V_i < 0$, o diodo estará com polarização reversa e não haverá passagem de corrente no circuito, conforme indicado no gráfico ao lado.



- A curva vermelha acima claramente não corresponde a uma tensão contínua. Para eliminar as oscilações positivas que restam, costuma-se colocar um capacitor em paralelo com a carga, gerando-se a forma de onda indicada em verde.



Retificador de 1/2 onda (cont.)

● Ripple

- Pode-se notar, no gráfico da página anterior, que pode haver uma oscilação residual, mesmo com a presença do capacitor.
- Este ripple, dependerá da relação entre a constante de tempo do circuito, RC , e o período da onda senoidal, que vale $1/60$ s.
- Assim, para minimizar o ripple, o valor do capacitor deve ser calculado em função da carga apresentada pelo circuito a ser alimentado, de maneira que a condição $RC \gg 16.6$ ms seja satisfeita.

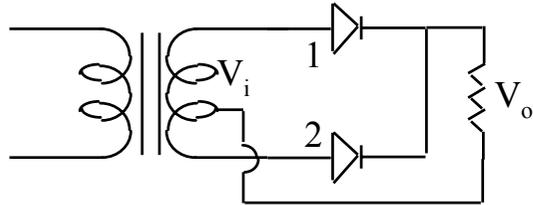
● Eficiência

- É fácil notar que este circuito não é eficiente. Apenas metade dos ciclos da tensão de entrada é aproveitada.
- Isto implica que a potência da fonte é desperdiçada, gerando uma tensão de saída com baixo valor RMS.
- Como veremos a seguir, este circuito pode ser melhorado substancialmente.

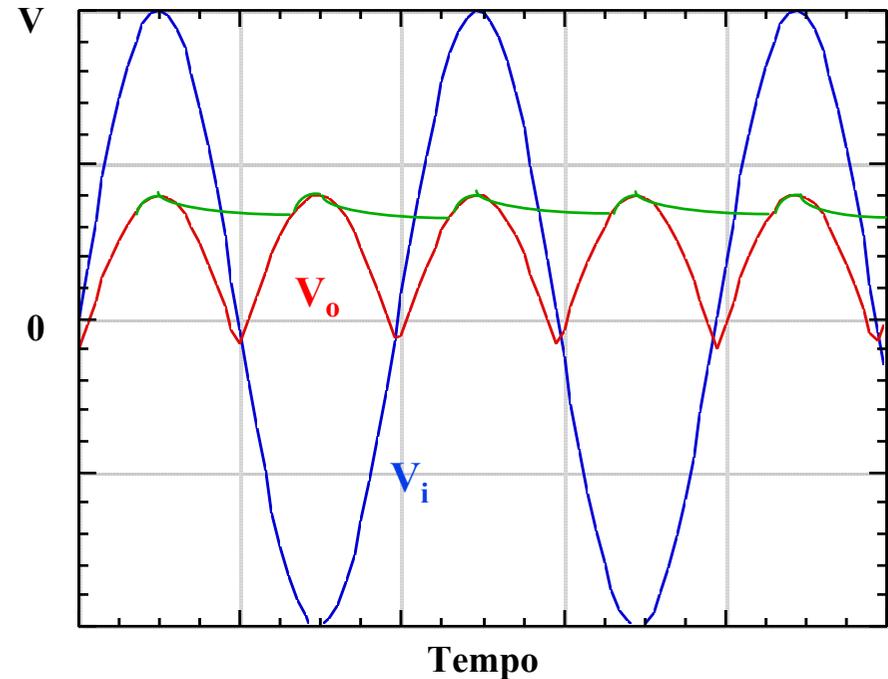


Retificador de Onda Inteira

- Considere o circuito abaixo



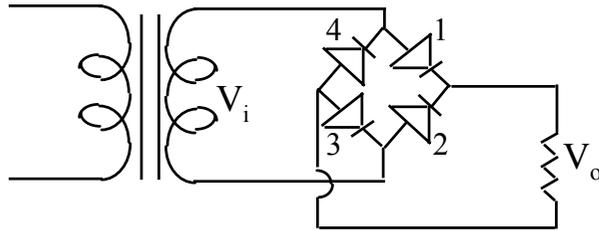
- Tomando como referência o “tap” do transformador, podemos notar que quando $V_i > 0$, o diodo 1 estará polarizado diretamente, e o diodo 2 estará polarizado reversamente. Assim, aparecerá uma voltagem $V_o = V_i/2$ na carga R.
- Quando $V_i < 0$, a situação dos diodos se inverte, mas como ambos estão ligados no mesmo ponto, teremos $V_o = -V_i/2$.



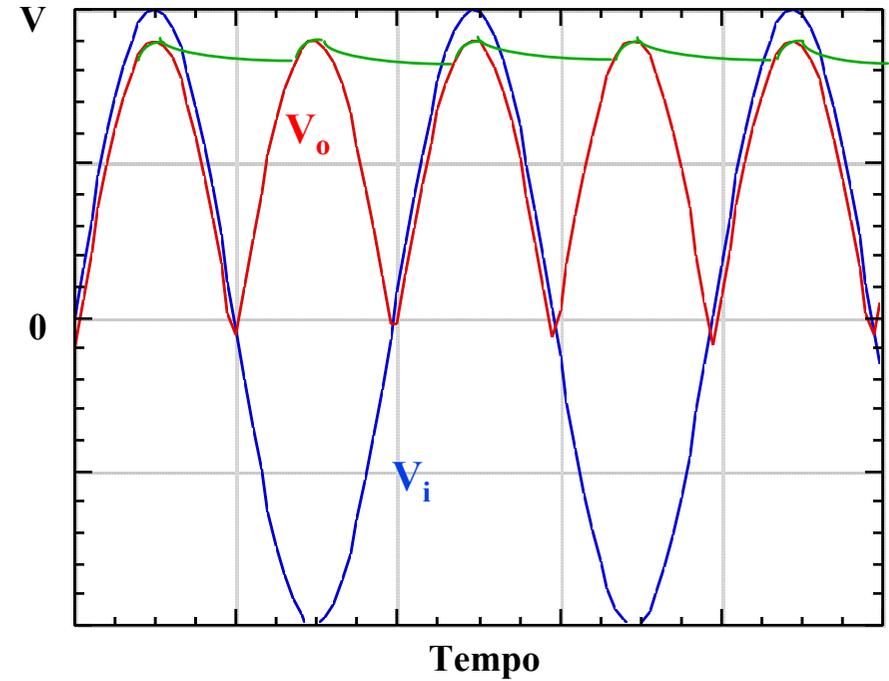
- Novamente, a presença de um capacitor em paralelo, gera a forma de onda em verde.
- Agora, o intervalo de tempo em que o capacitor deve manter a carga é metade do anterior, permitindo uma redução do valor de C ou a alimentação de um circuito com maior impedância

Retificador em Ponte

● Considere o circuito abaixo



- Para o ciclo positivo, os diodos 1 e 3 conduzem, enquanto 2 e 4 estão abertos. $V_o = V_i$ (a menos da queda de tensão em dois diodos)
- Para o ciclo negativo, os diodos 2 e 4 conduzem, enquanto 1 e 3 estão abertos. $V_o = -V_i$ (a menos da queda de tensão em dois diodos)
- Desta forma, a tensão na saída é sempre positiva e de amplitude próxima a tensão de entrada.



- Este circuito terá ripple idêntico ao de meia onda, mas será mais eficiente porque pode usar a tensão total do secundário do transformador.
- O retificador em ponte é o tipo efetivamente usado no dia a dia.



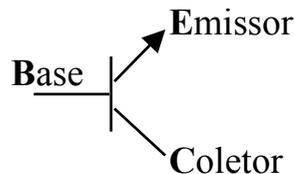
Transistores

● Junções pnp e npn

- Um transistor é, basicamente, formado por duas junções pn conforme os esquemas abaixo.



- Independente do esquema, este é o primeiro dispositivo não bipolar apresentado até agora. O transistor é tripolar e seu símbolo está representado abaixo.



- Na configuração mais simples, a tensão na base define se a corrente do coletor irá ou não passar para o emissor.

- Assim, o transistor pode funcionar como uma chave que permite ou não a passagem de corrente.
 - ✓ Se $I = 0$ diz-se que o transistor está cortado.
 - ✓ Se $I = I_{MAX}$
 - ✓ diz-se que o transistor está saturado.
- Este chaveamento entre ligado e desligado é base dos circuitos digitais, como veremos mais adiante. Quanto mais rápido o chaveamento mais veloz será o circuito.
- No entanto, o transistor é muito utilizado na sua região linear, onde pequenas oscilações de corrente no coletor são amplificadas no emissor.
- Neste modo, o transistor é utilizado como um amplificador.



Amplificadores

● O transistor na região linear

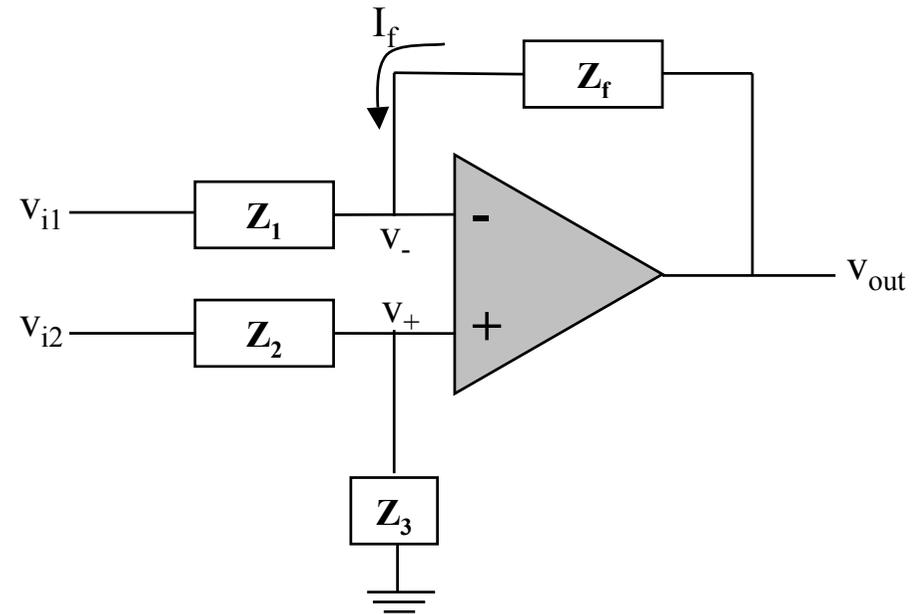
- Para o transistor trabalhar na região linear, é necessário ajustar as tensões e correntes DC aplicadas nos seus polos. Este processo é denominado polarização do transistor.
- Quando a polarização está correta, uma tensão AC aplicada sobre os valores DC terá sua amplitude multiplicada entre o coletor e o emissor.
- A amplitude AC deve satisfazer a condição de pequenos sinais, ou seja, deve ser pequena quando comparada com os valores DC da polarização.
- Se a tensão AC tiver amplitude fora desta faixa, o transistor estará cortado para valores muito baixos e saturado para valores muito altos, causando distorção na forma de onda.
- A outra limitação deste modo de operação está associada à resposta de frequência do amplificador. O fator de amplificação, denominado ganho, irá em geral decair para frequências mais altas.
- A resposta de frequência está associada a características físicas básicas do dispositivo e tem a ver com a facilidade com que os portadores de corrente podem se movimentar no material, denominada mobilidade.
- Atualmente, existem transistores que respondem até dezenas de gigahertz.



Amplificadores Operacionais

- Um sistema já polarizado
 - Os problemas associados à polarização de transistores foram resolvidos através de circuitos integrados denominados Amplificadores Operacionais (OpAmp), que já contém todo o circuito de polarização e se aproximam de características ideais.
 - O OpAmp é facilmente utilizado para amplificar, com altos ganhos, sinais AC e DC.
 - A análise do funcionamento dos amplificadores operacionais é simplificada se algumas condições ideais são consideradas.

- O circuito fundamental



- As regras
 - 1 - A ddp entre os dois terminais de entrada é zero
 - 2 - A corrente que entra nos terminais de entrada é zero



Análise de OpAmp's

● Dedução da Equação Geral

- Usando o divisor de tensão temos que

$$v_+ = v_{i2} \left(\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \right)$$

- Da regra 1, v_- tem este mesmo valor.
- A corrente em Z_1 é a ddp a que está submetido dividida por Z_1

$$\frac{1}{Z_1} (v_{i1} - v_-) = \frac{1}{Z_1} \left[v_{i1} - v_{i2} \left(\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \right]$$

- Da regra 2, esta corrente tem que anular a corrente I_f onde

$$\begin{aligned} i_f &= \frac{1}{Z_f} (v_{out} - v_-) = \frac{1}{Z_f} \left[v_{out} - v_{i2} \left(\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \right] = \\ &= -\frac{1}{Z_1} \left[v_{i1} - v_{i2} \left(\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \right] \end{aligned}$$

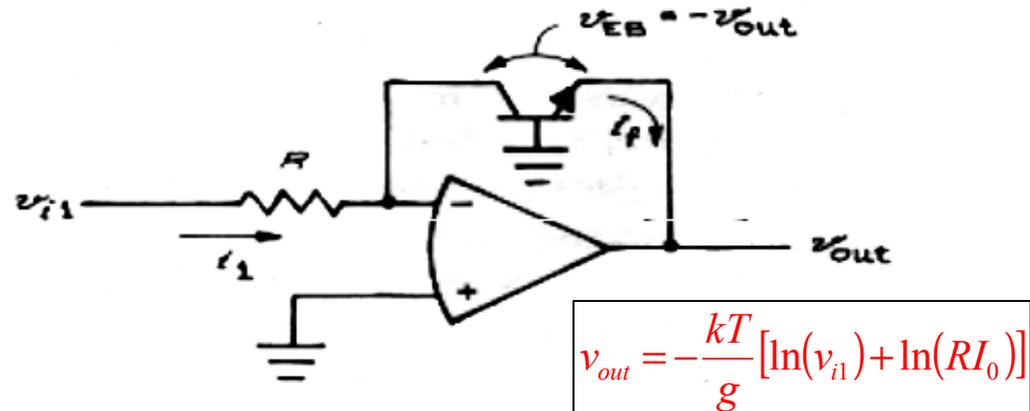
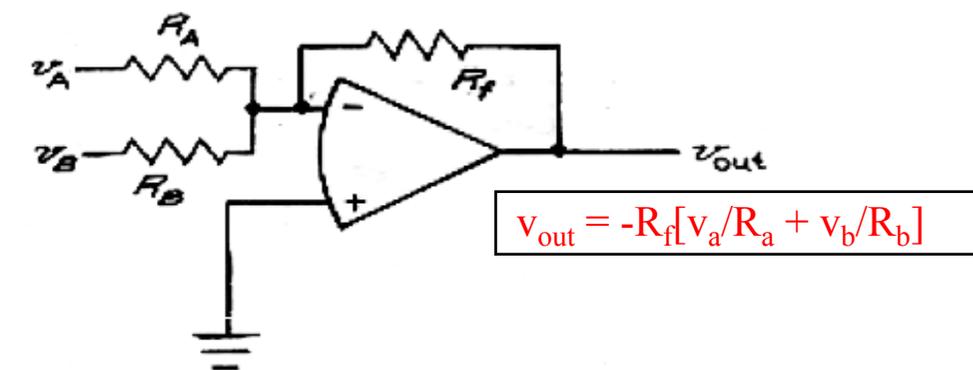
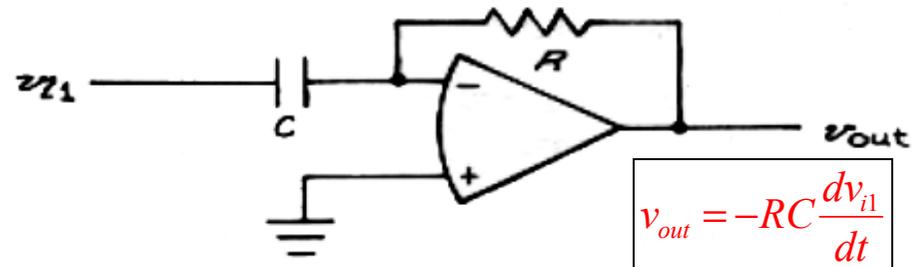
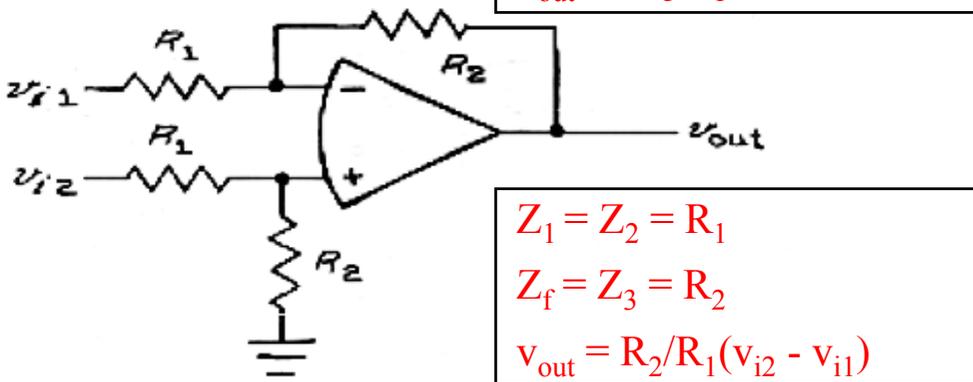
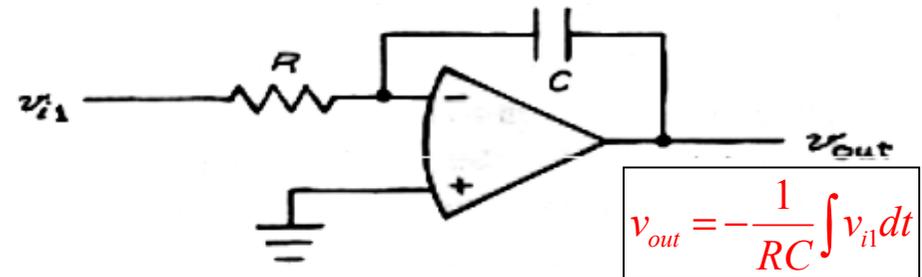
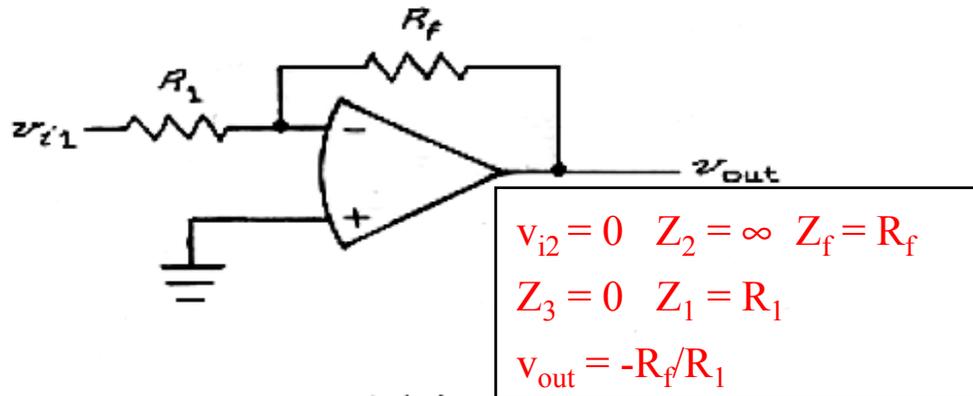
- Resolvendo para v_{out} temos

$$v_{out} = -v_{i1} \frac{Z_f}{Z_1} + v_{i2} \left(\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \left(1 + \frac{Z_f}{Z_1} \right)$$

- Esta equação pode ser utilizada para obter o valor da tensão de saída em função das tensões de entrada em qualquer configuração.
- Alguns exemplos são dados a seguir



Exemplos de Circuitos



Instrumentação



Transdutores

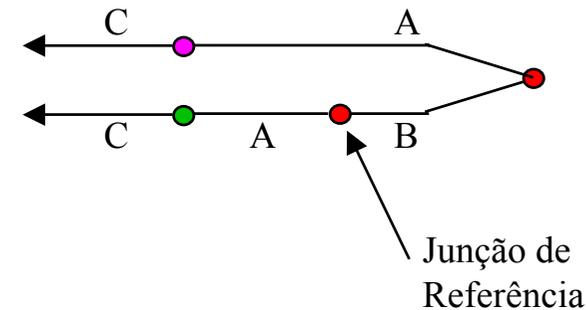
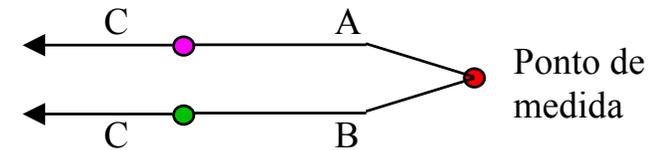
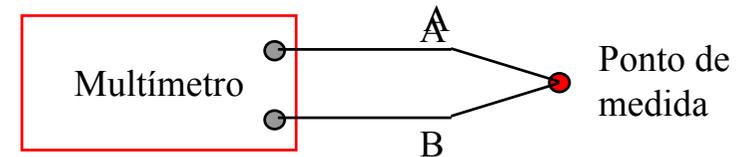
- Vamos analisar as características elétricas de duas classes de transdutores: termopares e extensômetros resistivos (strain Gauges)
- Estes foram escolhidos devido à gama de aplicações de ambos em diversas áreas da engenharia.
- Não serão apresentados detalhes de calibração ou qualquer discussão cuidadosa sobre níveis de incerteza, mas apenas uma visão de como se obtém uma medida prática que pode ser integrada em um instrumento.
- As características elétricas que serão discutidas a seguir deixam claro a necessidade de amplificar sinais elétricos obtendo, a partir de pequenos sinais fornecidos pelos elementos sensores, valores fáceis de serem medidos por instrumentos de baixo custo, normalmente encontrados em laboratórios.



Termopares

● Termopares

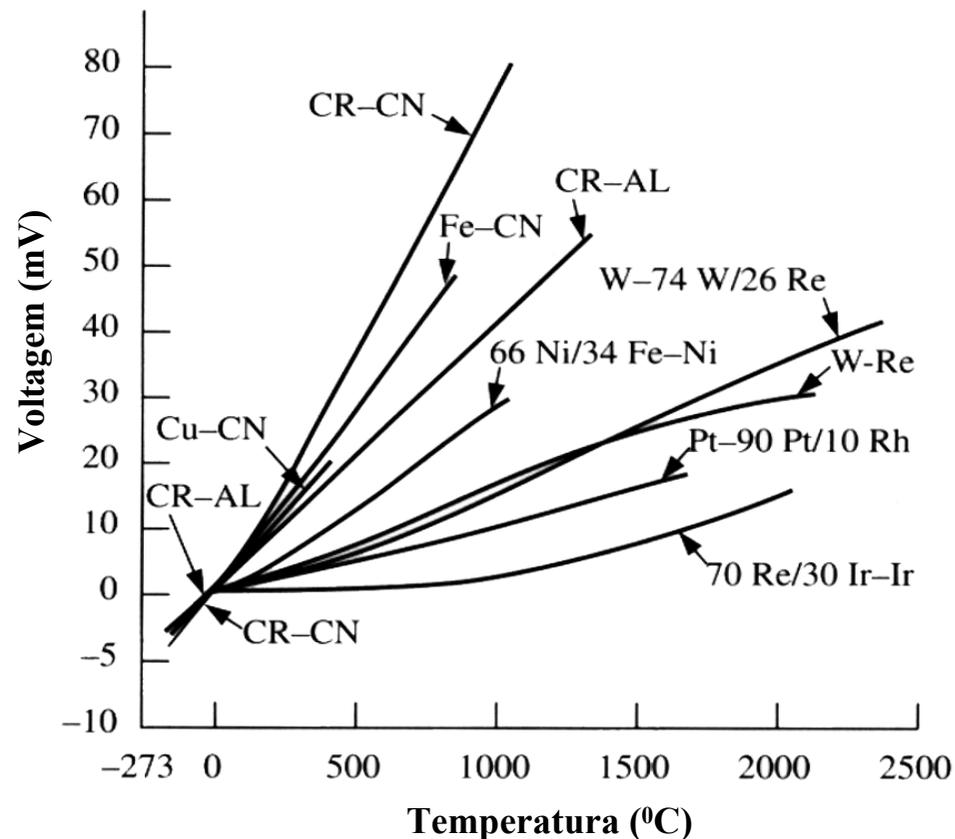
- são formados pela junção de elementos metálicos distintos que, devido às suas características eletrônicas, geram uma diferença de potencial. Esta diferença de potencial depende da temperatura e está tabelada para diversos pares de metais (termopares).
- Para se realizar uma medida deve-se ter uma junção em temperatura conhecida e outra no ponto onde se pretende medir.



Termopares (cont.)

- Com o auxílio de uma tabela ou da expressão analítica da voltagem em função da temperatura, encontra-se a informação desejada.

➤ Tipicamente obtêm-se sinais da ordem de $40\mu\text{v}/^\circ\text{C}$.



- Pelo que foi exposto, se desejamos medir temperaturas com exatidão próxima a $0,1^\circ\text{C}$, é necessário medir voltagens com exatidão de, pelo menos, $5\mu\text{v}$.

➤ A forma de evitar o uso de voltímetros, ou outros sistemas de leitura, com a exatidão apresentada acima, pode ser o uso de amplificadores que transformem o sinal de saída em valores mais fáceis de serem medidos.

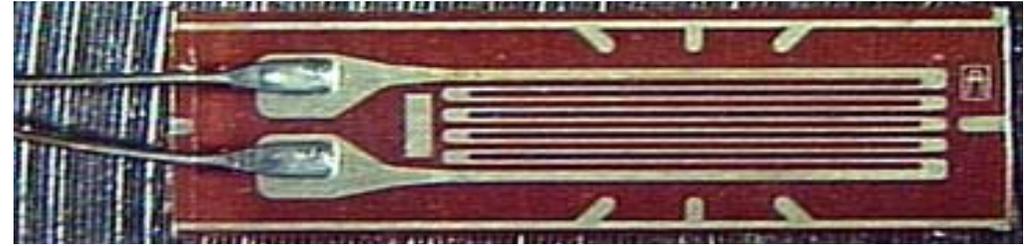
Letra	Metais	Faixa ($^\circ\text{C}$)
K	Chromel/Alumel	-200 a 1250
J	Ferro/Constantan	0 a 750
E	Chromel/Constantan	-200 a 900



Extensômetro (Strain Gauge)

- Extensômetro Resistivo (Strain Gauge)
 - Trata-se de um sensor de deformação que pode ser usado diretamente em peças na avaliação de deformações superficiais ou em diversos sistemas mecânicos, compondo assim transdutores para grandezas como: pressão, força, aceleração etc.
 - Seu funcionamento baseia-se na variação da resistência de um material metálico depositado sobre um polímero o qual pode ser colado na superfície sob análise.

- ao se deformar longitudinalmente, o valor da resistência varia de forma conhecida, indicando assim a deformação da superfície



- Existem dois valores padronizados de resistência 120 Ω e 350 Ω .

Extensômetro (cont.)

- Qual a variação da resistência esperada em função da deformação?

- $R = L\rho/A$

- ✓ R = resistência

- ✓ L = comprimento

- ✓ A = área da seção reta

- ✓ ρ = resistividade elétrica

e assim

- $dR/dL = \rho (1/A - L/A^2 dA/dL)$

- Considerando o volume do material resistivo constante temos

- ✓ $V = A.L = (A+\delta A).(L+ \delta L)$

- ✓ $A \delta L = -L \delta A$, ou $-A/L = \delta A/ \delta L$

- Desta forma,

- $dR = (2\rho/A).dL$

- Como estamos interessados em valores relativos,

- $dR/R = 2dL/L$

- Este fator 2 é chamado de fator de Gauge e seu valor exato deve ser especificado pelo fabricante do extensômetro.

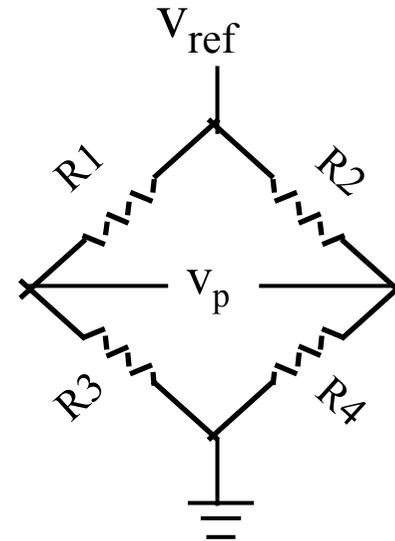


Ponte de Wheatstone

- Na maioria das aplicações busca-se medir deformações desde poucas ppm até alguns milhares de ppm. Isto significa que deve-se ter a capacidade de medir o valor da resistência do sensor, ou pelo menos variações dela, com sensibilidade da ordem ppm.

- Ponte de Wheatstone**

- o circuito apresentado a seguir pode ser montado com um ou mais de seus resistores sendo Strain Gauges, de forma que se possa obter uma voltagem V_p que indique a deformação imposta ao sensor.



- $i_1 = v_{ref}/(R_1+R_3)$
- $i_2 = v_{ref}/(R_2+R_4)$
- $v_p = i_1 R_1 - i_2 R_2 =$
 $= v_{ref} \cdot (R_1/(R_1+R_3) - R_2/(R_2+R_4))$



Ponte de Wheatstone (cont.)

- Desta forma obtém-se o “equilíbrio” da ponte ($V_p = 0$) quando $R_1/(R_1+R_3) = R_2/(R_2+R_4)$
 - ou seja,

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$
 - A forma de utilizar este circuito é ajustando $V_p = 0$ para uma situação conhecida de deformação e medir as variações a partir deste ponto.
 - A análise que se segue é válida para a montagem em 1/4 de ponte onde usa-se apenas um extensômetro na ponte.

- Consideremos que R_4 representa o sensor. Queremos conhecer V_p para pequenas variações de R_4 a partir do equilíbrio.

$$v_p = v_{\text{ref}} \cdot (R_1/(R_1+R_3) - R_2/(R_2+R_4+\delta R_4)) \\ = v_{\text{ref}} \cdot R_1 \delta R_4 / (R_1+R_3)(R_2+R_4)$$

- usando a condição de equilíbrio

$$v_p = v_{\text{ref}} \cdot R_2 \delta R_4 / (R_2+R_4)^2$$

- Podemos agora escolher o valor de R_2 que garanta a máxima sensibilidade

$$d v_p / d R_2 = 0$$

- nos fornece a condição

$$R_2 = R_4$$



Ponte de Wheatstone (cont.)

- A condição anterior significa que a ponte mais sensível terá todos os resistores iguais ao valor do extensômetro e sua saída será

$$v_p = v_{\text{ref}} \cdot \delta R_4 / 4R_4$$

- usando o fator de gauge temos finalmente a deformação dada por

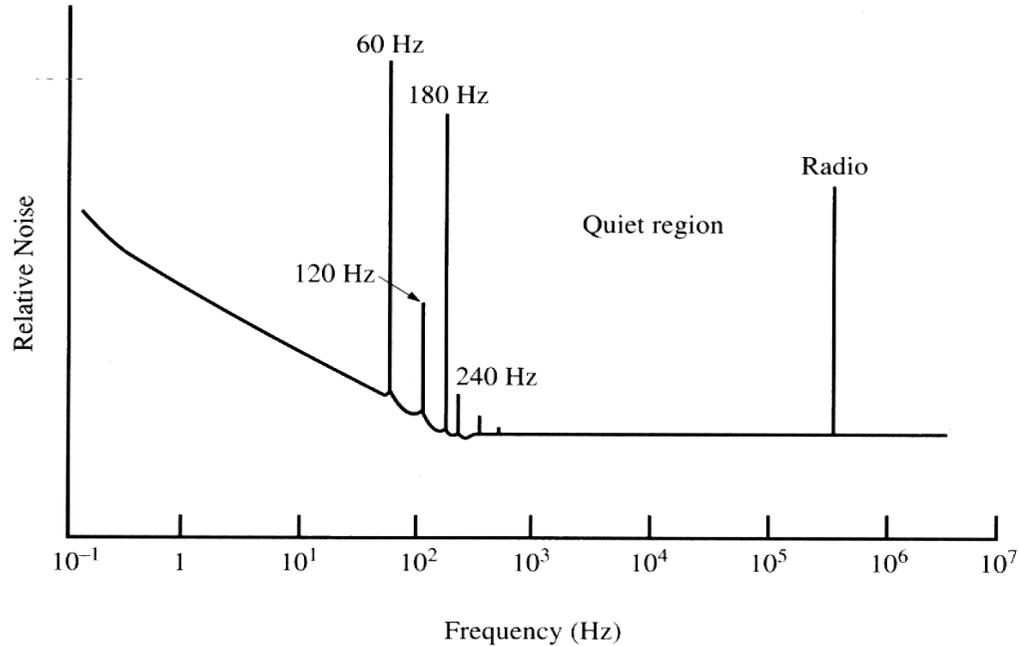
$$\delta L / L = \delta R_4 / 2R_4 = 2v_p / v_{\text{ref}}$$

- Tipicamente v_{ref} será poucos volts de forma a não danificar o sensor, isto fará com que v_p seja de poucos μV por ppm de deformação. Mais uma vez será interessante amplificar este sinal para tornar mais fácil sua medição.



Ruído

- Chama-se ruído a todo sinal indesejado que interfere em uma medida, limitando sua exatidão.
 - Alguns termos utilizados aqui, como, faixa de medição, exatidão, resolução etc. estão definidos de forma precisa do ponto de vista metrológico e podem ser encontrados no dicionário de metrologia fornecido pelo INMETRO.
- Tipos de ruídos
 - Aleatório - De origem térmica ou quântica, é gerado dentro do equipamento
 - Interferência - captação, pelo transdutor, de sinais externos que podem ter, ou não, origem na mesma grandeza física que se deseja medir.
 - ✓ Ex.: Ao se tentar medir vibrações em uma máquina, pode haver interferência na medida devido a outras vibrações sobre o sistema de leitura, devido a variações térmicas do ambiente, ou indução eletromagnética no circuito elétrico de medida.



Ruído (cont.)

- Caracterização do ruído
 - Espectro de frequência
 - Mecanismos físicos causadores
 - Por se tratar de algo aleatório, a média do ruído no tempo é nula. Deve-se portanto utilizar seu valor RMS para quantificá-lo
- Relação Sinal Ruído (S/R)
 - Em geral o que mais interessa não é o valor absoluto do ruído mas sim seu valor percentual em relação ao sinal que se pretende medir
 - O valor de S/R pode aparecer em escala linear mas é muitas vezes apresentado na forma logarítmica, ou seja, em decibéis (dB)
 - Se realizamos medidas em volts, define-se o valor em dB como
 - $S/R \text{ em dB} = 20 \log S/R$
 - Caso o mensurando seja diretamente em energia utiliza-se
 - $S/R \text{ em dB} = 10 \log S/R$



Ruído Térmico

● Ruído Johnson, Branco ou Térmico

- Se deve ao movimento aleatório das cargas em qualquer resistor.
- Distribuição em frequência é plana; daí o nome branco
- Seu valor RMS é dado pela expressão
- $V_{rt} = (4kTRB)^{1/2}$
- onde
 - ✓ $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K (cte. de Boltzman)
 - ✓ T = temperatura em Kelvin
 - ✓ B = faixa de frequência considerada em Hz

- Note que seu valor independe da corrente ou tensão medida, o que o torna tão mais importante quanto menor for o valor medido.
- Exemplo
 - ✓ $T = 293$ K
 - ✓ $R = 1$ MW
 - ✓ $B = 10$ kHz
 - ✓ $V_{rt} = 12,7$ mV
- Portanto, quanto mais rápido o sinal a ser medido pior será a qualidade da medida



Ruído Shot

● Ruído Shot ou Quântico

- Se deve à natureza quântica da passagem de elétrons em junções de materiais.
- Neste caso o valor do ruído depende da presença de uma corrente elétrica.
- O valor absoluto cresce com a corrente mas em termos relativos se torna menos relevante com o aumento do valor a ser medido

- Seu valor RMS é dado por

$$I_{rs} = (2qIB)^{1/2}$$

- ✓ $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C (carga do elétron)
- ✓ B = faixa de frequência em Hz
- ✓ I = corrente a ser medida expressa em Ampère
- ✓ Observe que este também é um ruído branco e que, para se ter um valor de voltagem, deve-se saber o valor do resistor pelo qual está passando a corrente de interesse

- Exemplo

- ✓ $I_{dc} = 1 \text{ nA}$
- ✓ $R = 1 \text{ M}\Omega$
- ✓ $B = 10 \text{ kHz}$
- ✓ $V_{rs} = 1,8 \text{ mV}$



Ruído $1/f$ e IEM

● Ruído $1/f$ ou Flicker

- Na realidade não se trata de uma fonte bem definida de ruído e sim uma combinação de fatores não controláveis que podem variar lentamente.
- Está incluído nele o envelhecimento dos componentes, variações de umidade e outras condições ambientais entre muitos outros fatores.
- Pode-se dizer que a deriva não previsível em equipamentos de medição, que leva à necessidade de recalibração periódica, se deve a este tipo de ruído.

● Interferência Eletromagnética (IEM)

- Todo circuito eletrônico é influenciado pelos campos EM a que estamos permanentemente expostos.
- Além da captação de radiação, podem ser induzidos sinais através dos sistemas de alimentação de circuitos.
- De maneira geral, embora difícil, é sempre possível aprimorar o sistema de blindagem de um circuito para reduzir os efeitos de IEM.



Ruído de Digitalização

● Ruído de Digitalização

- Também chamado de ruído de quantização, se deve ao fato de que ao representarmos um valor analógico na forma digital teremos um número finito de níveis disponíveis.

- A diferença entre dois níveis consecutivos é o valor do ruído de digitalização e será

$$R_d = F/2^n$$

- onde

- ✓ F = faixa de trabalho do sistema de conversão A/D
- ✓ n = número de bits disponíveis para representação digital

● Técnicas para melhorar a Relação S/R

- Existem técnicas implementáveis no nível do hardware (circuitos analógicos e digitais) e outras efetuadas por software (programas de tratamento do sinal digitalizado)

● Cuidados Básicos

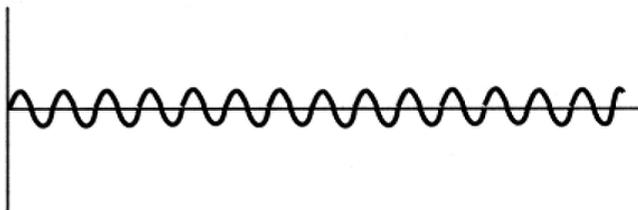
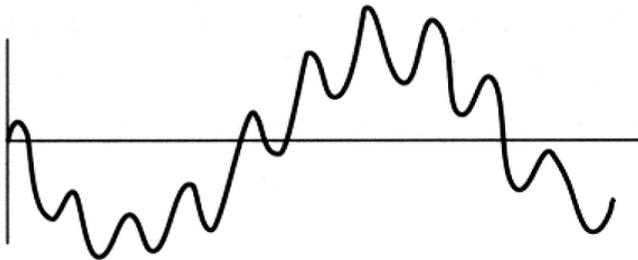
- Aterramento cuidadoso de todas as partes dos circuitos de medição, evitando a circulação de correntes de aterramento, especialmente próximo a resistores de valor alto
- Cabos curtos
- Blindagem metálica



Ruído e Filtragem

- Filtragem Analógica

- Circuitos analógicos como os discutidos anteriormente no curso e montados no laboratório, possibilitam separar sinais de frequências diferentes.
- Isto permite que apenas a faixa de frequência relevante para o fenômeno de interesse chegue ao instrumento de medida.



- Uso de Portadora

- Para evitar as flutuações de baixa frequência ($1/f$) pode-se, em alguns casos, introduzir um sinal de alimentação alternado sobre o qual atuará o mensurando de interesse.
- Desta forma a informação passa a estar contida na amplitude da onda dita portadora. Pode-se então filtrar esta frequência e, com um retificador, obter a informação desejável

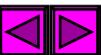
Filtragem Lock-in

- Amplificadores Sensíveis à Fase (Lock-in)

- Um passo adiante na técnica de uso de portadora, é a comparação da fase do sinal recebido com a da fonte geradora da portadora.
- Nesta técnica, após filtrado em frequência, o sinal é multiplicado pelo sinal de referência permitindo que apenas a parcela que se mantém em fase seja detectada.

- Software

- Diversas técnicas matemáticas podem ser utilizadas para separar dos dados coletados a parcela que não se deseja medir.
- A mais simples, quando desejamos observar sinais lentos, é a execução de médias de várias medidas sucessivas realizadas dentro do período em que se supõe que o mensurando não tenha se alterado significativamente (moving average).
- Pode-se também efetuar numericamente operações semelhantes às que foram descritas no caso analógico. Nestes casos é comum que o software execute a transformada de Fourier para poder retirar as contribuições de frequências indesejadas.



Eletrônica Digital

● Princípios básicos

- Desde o século XIX já se tinha a noção de que diversas operações aritméticas e lógicas podiam ser realizadas a partir de uma base binária, que utiliza apenas dois valores 0 e 1. Em particular, George Boole construiu uma álgebra para simplificar operações lógicas.
- A Álgebra Booleana é a base de todas as operações realizadas pelo computador.
- Com a invenção do transistor percebeu-se que era possível implementar sistemas eletrônicos que assumiam apenas dois valores de voltagem (normalmente zero e 5V) e que podiam “chavear” entre estes dois níveis com grande velocidade.
- A partir daí, houve um colossal desenvolvimento nesta área de conhecimento.



Representação Binária

● Bits & Bytes

- Os computadores armazenam toda informação como um conjunto de unidades, os bits (de *binary digit*), que podem assumir os valores 0 ou 1 (também referidos como False e True).
- Normalmente, se utiliza pelo menos um conjunto de 8 bits, o *byte*, como célula mínima de armazenamento de dados.
- Como veremos, será necessário utilizar mais do que um byte para representar números. Um conjunto de dois bytes é denominado *word*.

● Números decimais e binários

- Qualquer número decimal inteiro pode ser escrito na notação binária. Basta lembrar que dispomos de apenas dois algarismos, 0 e 1, e que ao deslocar para a esquerda em um número o algarismo dobra de peso, em vez de decuplicar como na base decimal.
- Exemplos

Peso	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	
	0	0	0	1	1	0	1	1	= 27D
	1	1	0	0	1	0	0	1	= 201D

- O maior número inteiro que pode ser representado com n bits é 2^n .
- Mas o que fazer com números não inteiros e informação não numérica ?



Representação Binária (cont.)

● Notação Hexadecimal

- É fácil notar que os números binários começam a ficar confusos e ilegíveis quando o número de bits cresce muito.
- Para simplificar a notação binária utiliza-se a notação hexadecimal, em base 16. Nesta notação utiliza-se os 10 algarismos decimais (0 a 9) e 6 letras (A a F) para representar os dezesseis valores possíveis de um algarismo.
- Exemplo: A seqüência
 - ✓ 0,1,2,3,.....,9,10,11,....,15 em decimal será representada como 0,1,2,3,.....,9,A,B,C,D,E,F em hexadecimal.

- Qual é a vantagem ? É que para cada 4 bits gasta-se apenas um algarismo hexadecimal. Assim as palavras binárias ficam reduzidas por um fator de quatro.

- Exemplo

0	0	0	1	1	0	1	1	=27D
1				B				=1BH

1	1	0	0	1	0	0	1	=201D
C				9				=C9H

- A notação hexadecimal é vastamente utilizada.



Representação Binária (cont.)

● Representando números inteiros

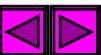
- Inteiro, 1 byte, sem sinal
0 a 255
- Integer, 1 byte, com sinal
-127 a 128
- Integer, 2 bytes, sem sinal
0 a 65.535 (2^{16} valores)
- Integer, 4 bytes, sem sinal
0 a 4.294.967.295

● Representando números reais

- Utiliza um padrão denominado *floating point* (ponto flutuante) que utiliza uma mantissa e um expoente.
- Float, 4 bytes
faixa $\pm 3.4 \times 10^{38}$
menor valor 1.5×10^{-45}
- Float, 8 bytes
faixa $\pm 1.7 \times 10^{308}$
menor valor 5×10^{-324}

● Representando Caracteres

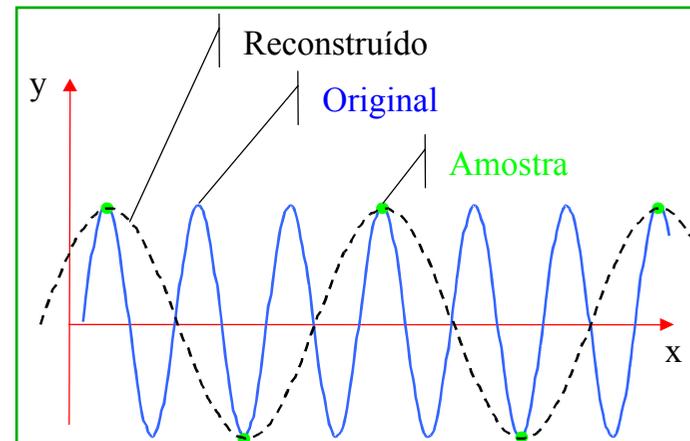
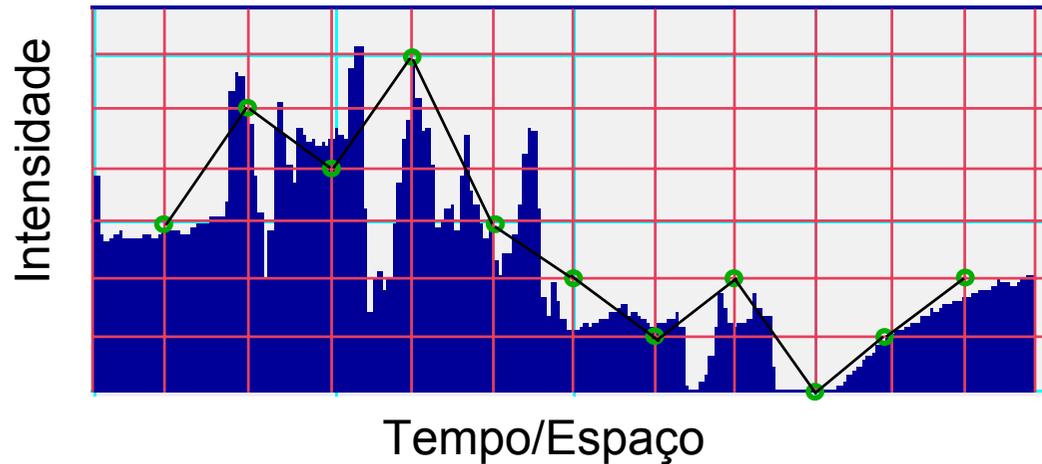
- A representação mais básica para caracteres (letras, números, símbolos) é baseada no código ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*)
- O ASCII padrão usa apenas 7 bits, permitindo um total de apenas 128 caracteres distintos.
- Posteriormente criou-se o ASCII estendido, que usa 8 bits e representa até 256 caracteres.
- Exemplos
 - ✓ A letra “A”
 $01000001 = 65D = 41H$
 - ✓ A letra “a”
 $01100001 = 97D = 61H$
 - ✓ O símbolo “μ”
 $11100110 = 230D = E6H$



Digitalização e Amostragem

● O que é ?

- Conversão da informação contida em um sinal da forma análoga para a forma digital
- É um problema de amostragem
 - ✓ Amostra-se a intensidade de um sinal que varia no tempo ou no espaço.
- **Resolução**
- **Quantização**
- **Aliasing**
 - ✓ $\text{Freq.}(\text{Sinal}) \times \text{Freq.}(\text{Amostragem})$
 - ✓ Teorema de Nyquist
 - A frequência de amostragem ideal é duas vezes a frequência máxima do sinal amostrado.



Digitalização

- É cada vez mais freqüente processar e armazenar sinais elétricos em sistemas baseados em computadores. Isto só é possível se o sinal for convertido em informação digitalizada. A forma de se fazer isto é através de um conversor A/D.
- Basicamente o que um A/D faz é medir (amostrar) periodicamente o sinal elétrico de interesse e gerar a representação binária do valor lido. Este valor digitalizado pode então ser usado pelo computador, por exemplo, com o auxílio de programas em LabView.
- Se desejamos acompanhar a evolução temporal de um sinal elétrico devemos medi-lo em intervalos menores do que o tempo para qual se esperam mudanças significativas de seu valor. A taxa com que se repetem as medidas é chamada de taxa ou freqüência de amostragem F_a .
- Qual o valor ideal da taxa de amostragem?
- Segundo o teorema de Nyquist, a freqüência mínima de amostragem deve ser duas vezes a maior freqüência contida no seu sinal.
 - $F_a > 2F_m$



Frequência de Amostragem

- Esta frequência não garante uma reprodução exata do sinal mas garante que alguma indicação da presença do sinal será obtida e também que não ocorrerá o fenômeno de aliasing.
- Aliasing ocorre quando a taxa de amostragem está abaixo da frequência mínima indicada. Ao se reconstruir o sinal amostrado nota-se a presença de frequências que não estavam presentes no sinal original, adulterando a medida.
- É importante notar que, mesmo que não se esteja interessado em valores de frequência acima de um determinado valor, estas componentes devem ser filtradas analogicamente antes de digitalizarmos o sinal pois, através do aliasing, ruído de alta frequência será convertido em ruído de baixa frequência, piorando assim a qualidade da medida nas frequências de interesse.
- Como regra prática deve se usar, sempre que possível, F_a da ordem de 10 vezes a F_m .



Quantização

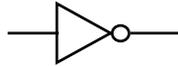
- Cada amostra digitalizada é representada por um número de bits que depende do sistema em uso. Atualmente, dependendo da aplicação, são comuns sistemas de 8, 12, 16 e até 24 bits.
- O número de bits, n_b , define o número de níveis distintos, N_n , disponíveis para representar o valor analógico medido.
 - $N_n = 2^{n_b}$
- Os N_n níveis estarão distribuídos dentro da faixa de trabalho do A/D.
- Normalmente as faixas de trabalho são simétricas em torno do zero (valores positivos e negativos) ou de zero a um valor máximo.
- A amplitude típica das faixas (AF) vai de 100 mv a 10 v.
- Sabendo-se o número de bits e a amplitude da faixa de trabalho teremos a resolução das medidas digitalizadas pelo sistema, que será
 - $\Delta v = AF / N_n = AF / 2^{n_b}$
 - Ex. AF = 10 v
 - $n_b = 12$ bits
 - $\Delta v = 2,44$ mv



Operações Lógicas

Os operadores básicos

- Sejam dois bits A e B
- O primeiro operador é o de inversão (NÃO/NOT) também representado pelo símbolo



✓ é um operador unário

- Existem tres operadores binários básicos

✓ OU/OR 

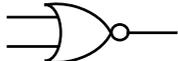
✓ E/AND 

✓ OU EXCLUSIVO/XOR 

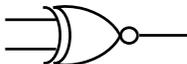
A	B	A OR B	A AND B	A XOR B
0	0	0	0	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	0
Símbolo		A+B	AB	A⊕B

Os operadores invertidos

- O uso dos operadores básicos seguidos de um inversor é bastante comum.
- A nomenclatura passa a ser

✓ NÃO OU/NOR 

✓ NÃO E/NAND 

✓ NÃO OU EXCLUSIVO/XNOR 

A	B	A NOR B	A NAND B	A XNOR B
0	0	1	1	1
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1



Aplicações dos Operadores

- Tomada de Decisão
 - Um sistema de monitoração poderá usar portas lógicas para tomar decisões em função de sinais digitais gerados a partir de sensores e transdutores.
 - Ex: Ignição de um carro - IG
 - ✓ Motorista e passageiros ? (MO, P1, P2, ...)
 - ✓ Cintos de segurança ? (CM, CP1, ...)
 - ✓ Motorista sóbrio ? (MS)
 - ✓ Portas trancadas ? (PT1, PT2, etc...)
 - ✓ Marcha engrenada ? (ME)
 - Deve-se definir os diversos sinais binários que representam cada uma das condições e construir um circuito lógico que toma a decisão.
- Equação lógica
- A ignição só pode ocorrer se o motorista está no carro, sóbrio, com o cinto de segurança, as portas estão trancadas e a marcha não está engrenada.
- Além disso, se houver passageiros, eles devem estar com o cinto de segurança.



Operações Aritméticas

● Soma

- números binários com 1 bit

$$0 + 0 = 0, 0 + 1 = 1, 1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 0 \text{ e vai } 1 \text{ (Carry)}$$

A	B	SOMA	Carry
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

- Assim deve-se gerar um circuito para calcular o bit de soma e outro circuito para o bit de Carry.

- Neste caso,

$$S_i = A_i \text{ XOR } B_i = A \oplus B$$

$$C_i = A_i \text{ AND } B_i = AB$$

- Números binários com dois bits

$$\begin{array}{r} 01 \\ + 11 \\ \hline 100 \end{array}$$

- A soma e o carry do bit de ordem $i+1$ dependem do carry do bit de ordem i .
- A tabela verdade neste caso é

C_i	A_{i+1}	B_{i+1}	S_{i+1}	C_{i+1}
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	1

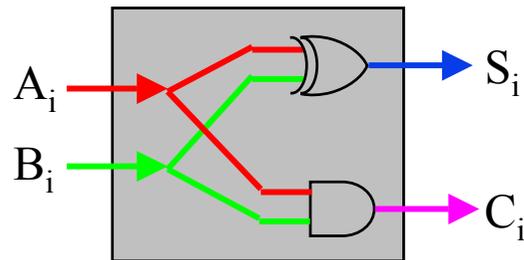
- Como implementar esta tabela ?



“Half Adder e Full Adder”

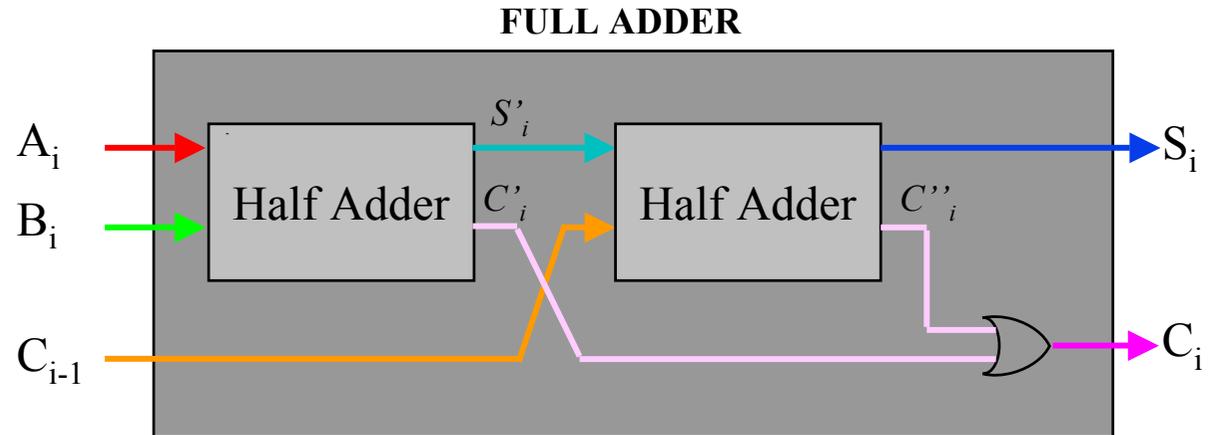
● Half Adder

- O somador parcial, para números de um bit, tem 2 entradas (A_i , B_i) e 2 saídas (S_i , C_i).
- É realizado com as portas XOR e AND.



● Full Adder

- O somador completo, para números com qualquer número de bits, usa “half adders” concatenados e lógica adicional.



$$S_i = (A_i \oplus B_i) \oplus C_{i-1}$$

$$C_i = A_i B_i + (A_i \oplus B_i) C_{i-1}$$



Outros Circuitos Básicos

● Gerador de Paridade

- O controle de paridade é uma técnica de detecção de erros em dados binários.
- A partir de um conjunto de bits, gera-se um bit extra que identifica se o número de 1's é par ou ímpar.

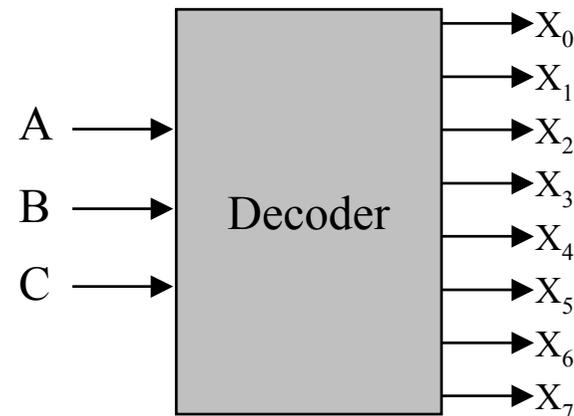
A	B	C	P
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

- Na leitura dos dados, compara-se os bits de dados e o bit de paridade. Assim pode-se identificar erros de um bit.

● Decodificador

- A partir de um código de entrada de n bits ativa uma saída de um total de 2^n saídas.

A	B	C	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1

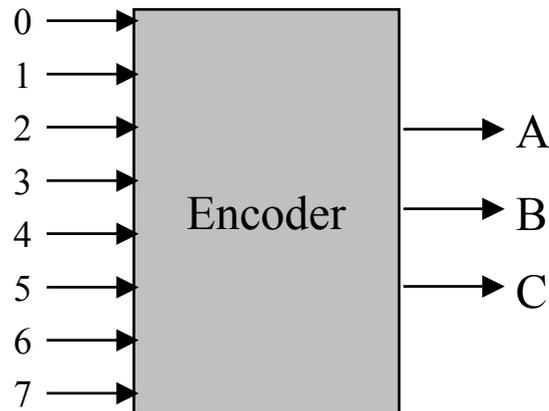


Outros Circuitos Básicos

● Codificador

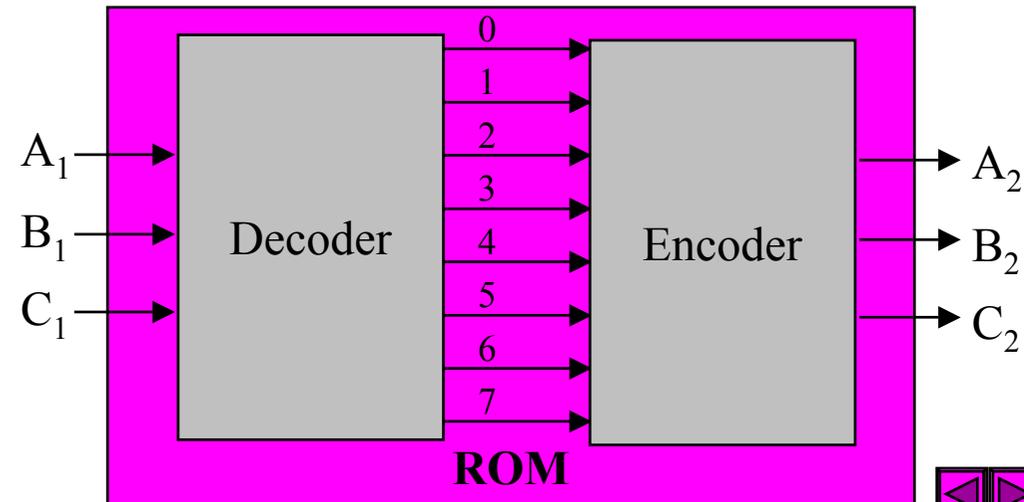
- A partir da ativação de uma dentre 2^n entradas, um código de n bits é gerado na saída.

E n t r a d a	C	B	A
0	0	0	0
1	0	1	1
2	1	0	1
3	1	1	0
4	0	0	1
5	0	1	0
6	1	0	0
7	1	1	1



● ROM - Read Only Memory

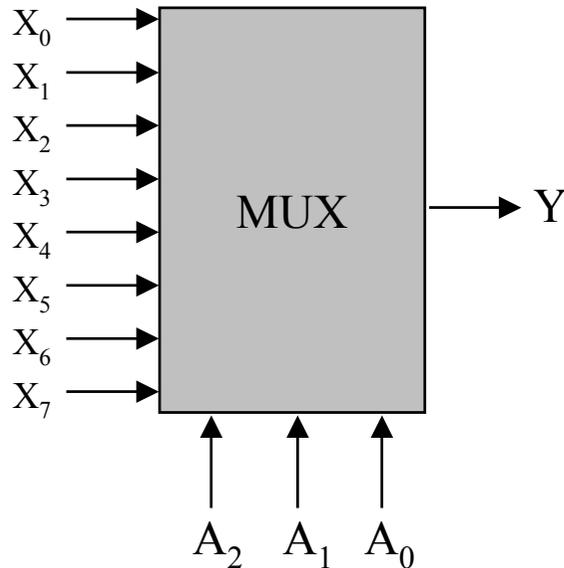
- A linha ativada na entrada do encoder pode ser entendida como um **endereço** no qual está armazenado um código.
- Neste sentido um encoder é entendido como uma memória.
- Para **endereçar** a memória usa-se uma palavra binária que passa por um decoder e gera a linha de entrada ativa de um encoder.



Outros Circuitos Básicos

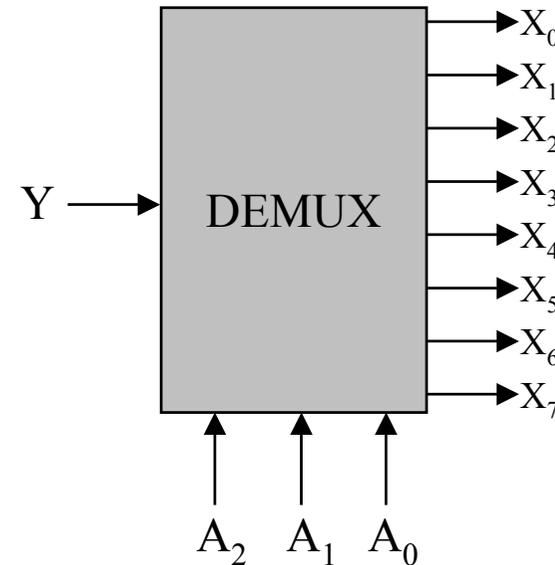
● Multiplexador

- Em função de um código de n bits, uma dentre 2^n linhas de entrada é conectada a uma única saída.



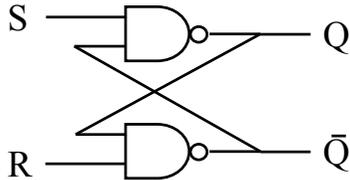
● Demultiplexador

- Em função de um código de n bits, uma única entrada é conectada a uma dentre 2^n linhas de saída.



Circuitos Sequenciais

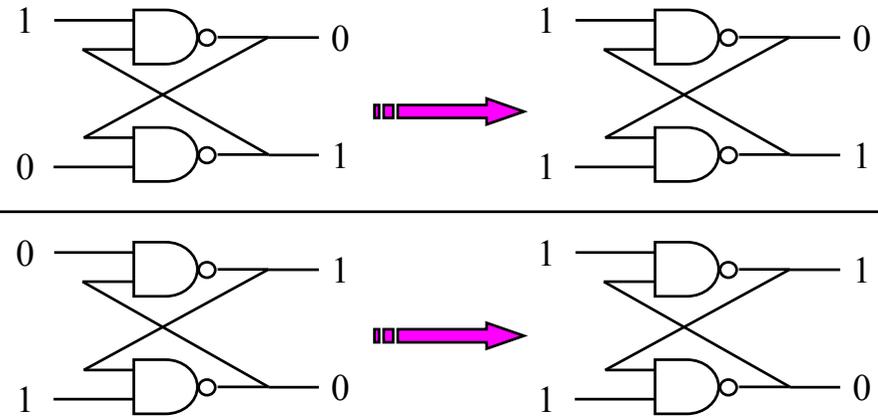
- Considere o circuito abaixo



- Qual é a tabela verdade ?
- Relembrando a tabela da porta NAND

A	B	A NAND B
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

- Vamos verificar quais configurações de entrada e saída são compatíveis.



- Ou seja, a mesma entrada produz saídas diferentes, dependendo da entrada anterior => **memória**
- Este circuito é denominado FLIP-FLOP do tipo SR - Set/Reset
- Vamos entender melhor seu funcionamento.



FLIP-FLOP SR

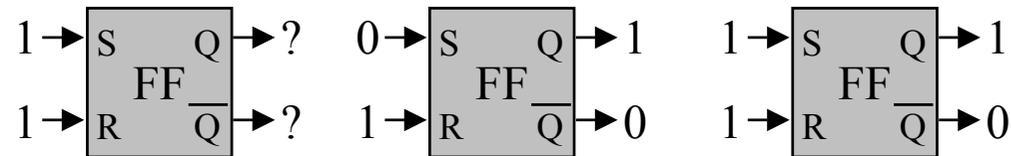
● Análise sequencial

➤ Estado inicial

✓ $S=R=1$, Q e \overline{Q} desconhecidos

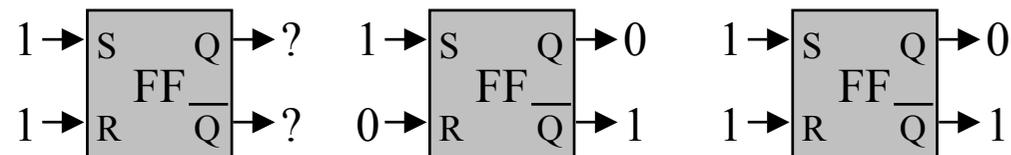
➤ “Setando” o FF

✓ O FF é “setado” levando a linha S a 0 e retornando a 1.



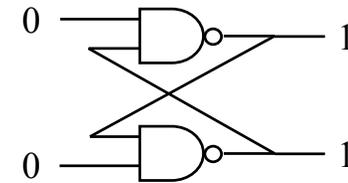
➤ “Resetando” o FF

✓ O FF é “resetado” levando a linha R a 0 e retornando a 1.



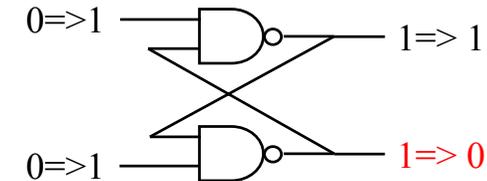
● A última entrada possível

➤ O que acontece com a entrada $S=R=0$?

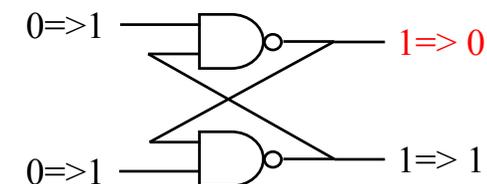


➤ Se agora a entrada muda para $S=R=1$ o que acontece ?

✓ Se \overline{Q} muda antes



✓ Se Q muda antes



Evoluindo os Flip-Flop's

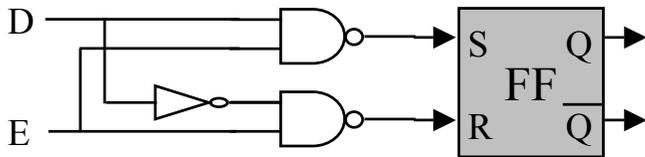
● Sintetizando o FF SR

S	R	Q_{n+1}	\overline{Q}_{n+1}
0	0	X	X
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	Q_n	\overline{Q}_n

→ Proibido

● O FF tipo Data/Enable

- Para evitar a possibilidade da entrada proibida, adiciona-se uma lógica de controle

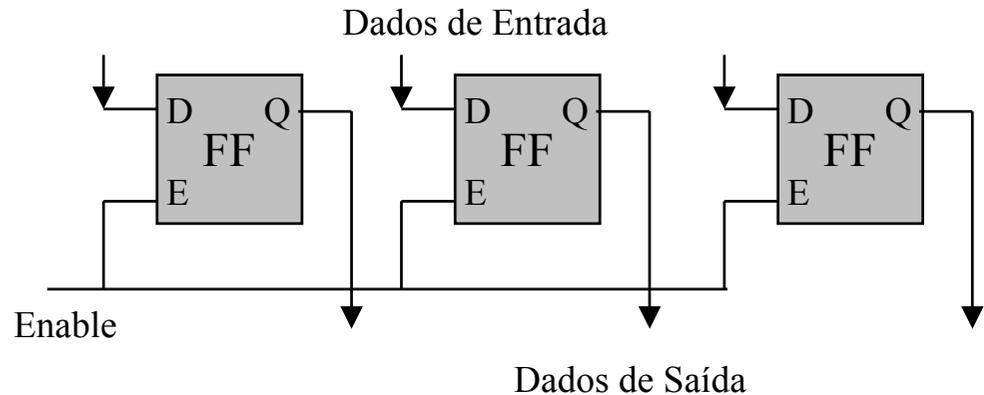


- Quando $E=1$ $R=D$ e $S=D$

✓ Neste caso o valor de D é armazenado no em Q . A linha de entrada Enable, permite que o armazenamento aconteça.

- Quando $E=0$, $S=R=1$ e não ocorre mudança na saída.

● O Registro Paralelo



- Quando $E=1$, os tres bits são armazenados nos tres FF's (tb. conhecidos como "latches")

- Agora a pergunta é:

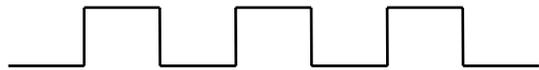
Quem controla a linha de Enable ?



O Clock

- A necessidade de sincronização

- Para controlar quando e por quanto tempo os dados são armazenados, usa-se uma linha de enable que oscila entre 0 e 1 de forma periódica.

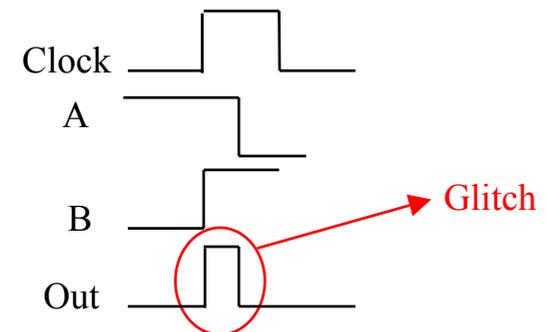
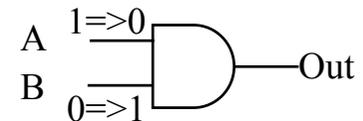


- A esta linha dá-se o nome de clock e sua frequência define a taxa com que os dados são armazenados e modificados.

- ✓ Quando o clock vale vai de 0 para 1 “as coisas acontecem”.
- ✓ Quando o clock vale vai de 1 para 0 “as coisas param”.

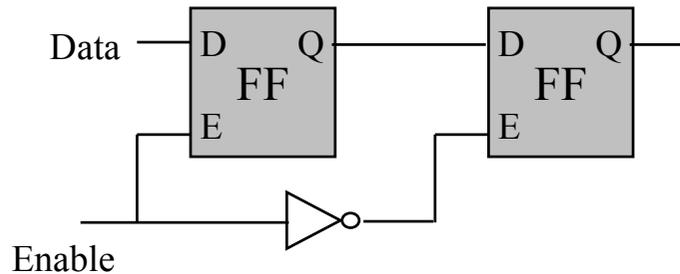
- O Problema do “Glitch”

- Apesar do clock servir para sincronizar todas as transições, podem ocorrer problemas denominados “glitches”, pulsos espúrios que podem gerar erros.
- Os glitches acontecem porque sinais podem se atrasar devido a tempos de propagação diferentes em fios diferentes.
- Exemplo



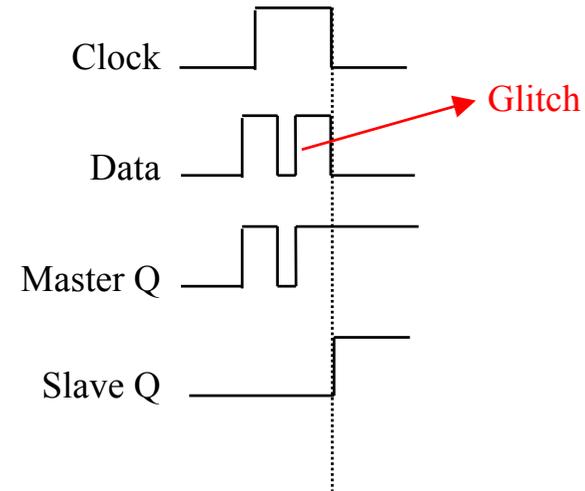
O Flip-Flop Master Slave

● A solução para o “Glitch”



- A inversão do clock no segundo FF, faz com que os dados que chegam no primeiro FF só apareçam na saída na descida do clock.
- Isto elimina glitches que durem menos do que meio pulso de clock.

● Análise Temporal

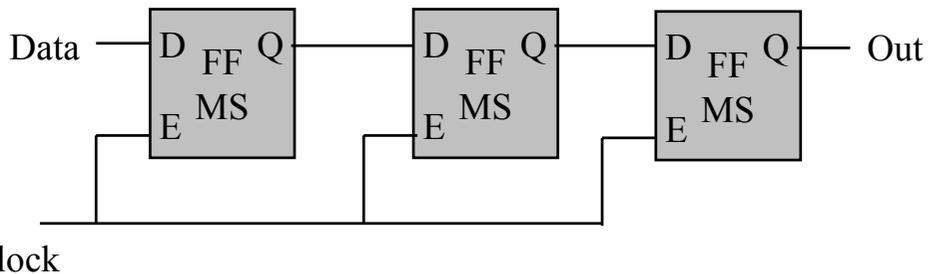


- À combinação dos dois FF's tipo D nesta configuração dá-se o nome de FF “master-slave” (mestre-escravo).

Registrador de Deslocamento

● O “Shift-Register”

- Conectando-se vários FF’s Master-Slave



- A cada pulso de clock os bits vão se deslocando da esquerda para a direita.

✓ Exemplo - o “nibble” 1101

1			
0	1		
1	0	1	
1	1	0	1

- Os registradores de deslocamento são utilizados na comunicação serial e na conversão paralelo-série e série-paralelo.

➤ Conversão série-paralelo

- ✓ Um conjunto de N bits é fornecido serialmente a um “shift-register” de N posições.
- ✓ Após N pulsos de clock, os N bits estão armazenados nos FF’s e podem ser lidos em paralelo, simultaneamente.

➤ Conversão paralelo-série

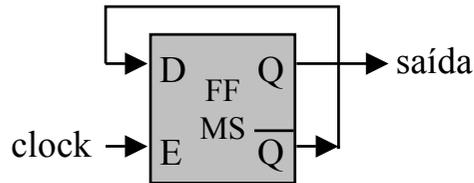
- ✓ Os N bits são armazenados diretamente nos FF’s.
- ✓ Em seguida, para cada pulso de clock, um bit é disponibilizado, serialmente, na saída do registrador.



Contadores

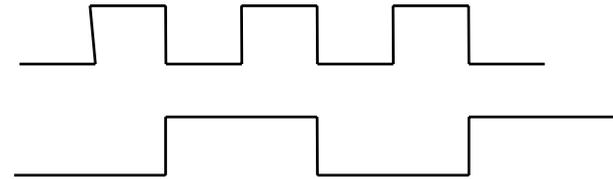
● O Flip-Flop tipo “Toggle”

- Considere o seguinte circuito com a saída invertida ligada na entrada de dados



- No estado inicial $D=0$
- Quando o clock vai a 1, o dado se propaga para Q ($=0$) e \overline{Q} vira 1. Neste momento D recebe 1 ($=\overline{Q}$)
- Quando o clock volta a zero o novo valor de $D=1$ se propaga para Q, que portanto reverte.
- A este FF se dá o nome de flip-flop tipo T (Toggle = alterna)

● Diagrama Temporal



- Ou seja, a frequência da saída é a metade da frequência da entrada.

