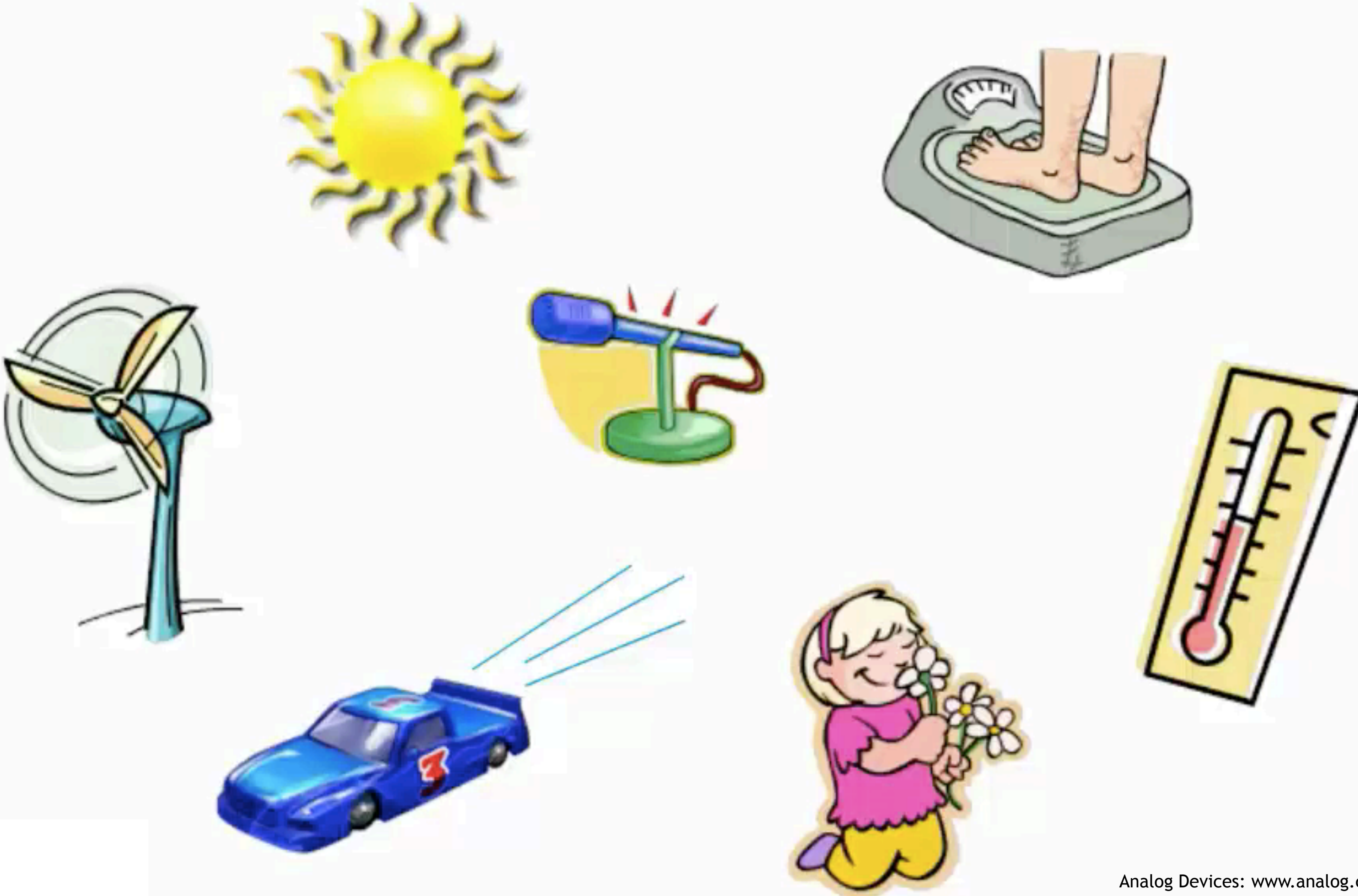
Eletrônica
(Introdução à filtros ativos)

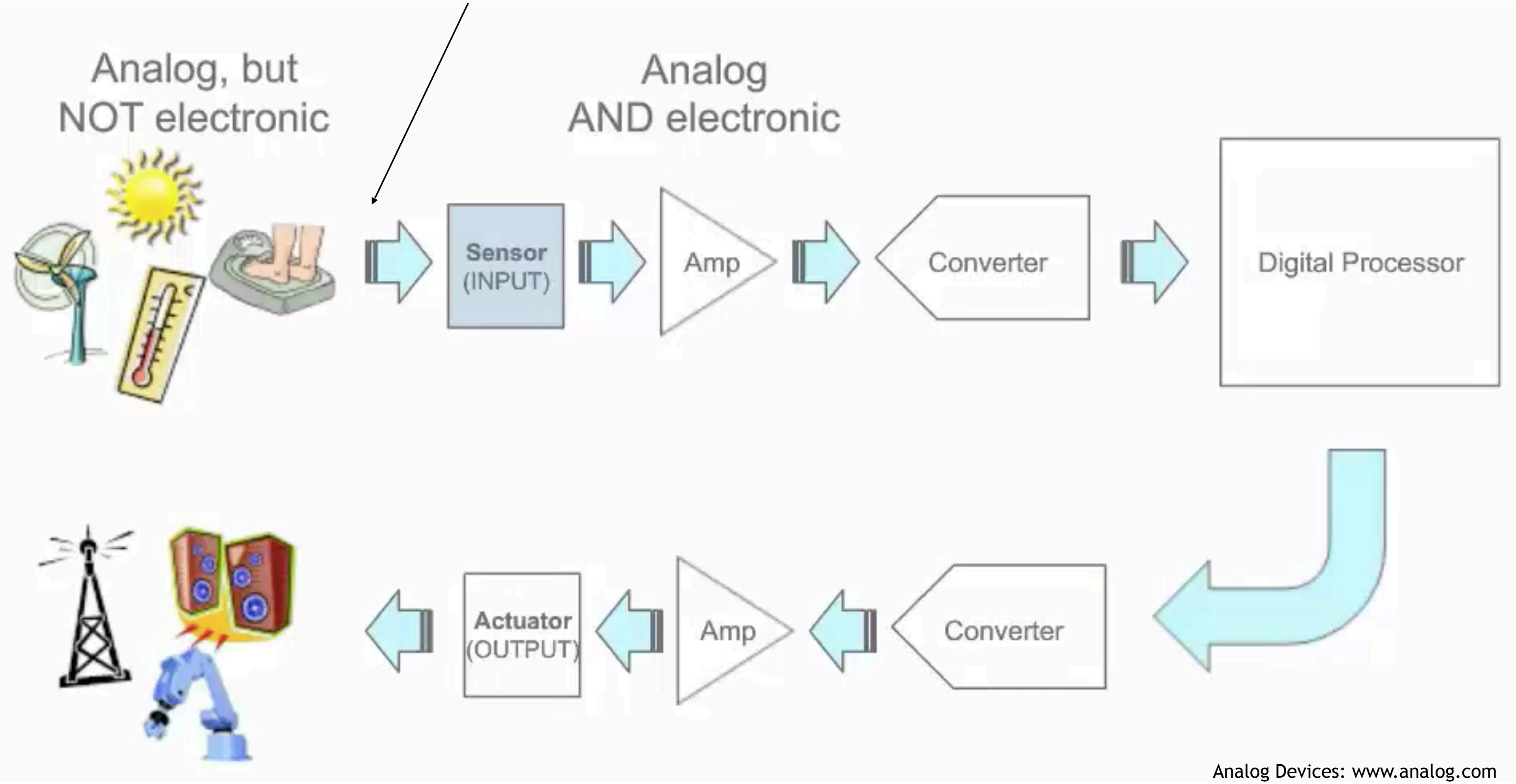
Prof. Manoel Eusebio de Lima

O Mundo real não é digital



Analog Devices: www.analog.com

Sinais de pequena intensidade sujeitos à interferências (ruídos)

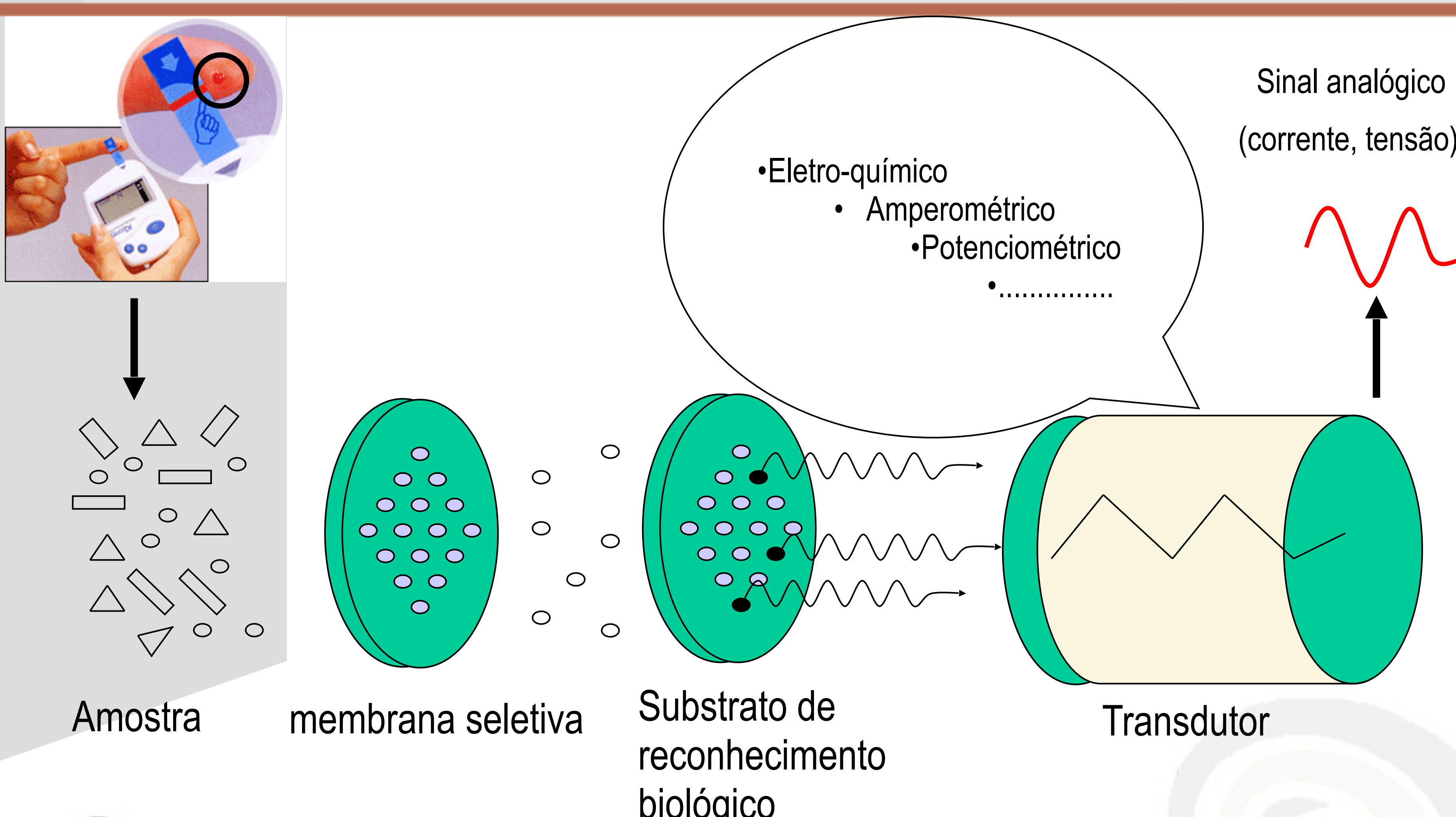


Analog Devices: www.analog.com

Sensores

Tipo de Sensor	Saída do Sensor
Termopar	Voltage
Foto-diodo	Corrente
Microfone	Capacitância
Antena	Indutância
Reação eletroquímica	Voltage/corrente
Touch botton	Gera carga elétrica
……………….	……………….

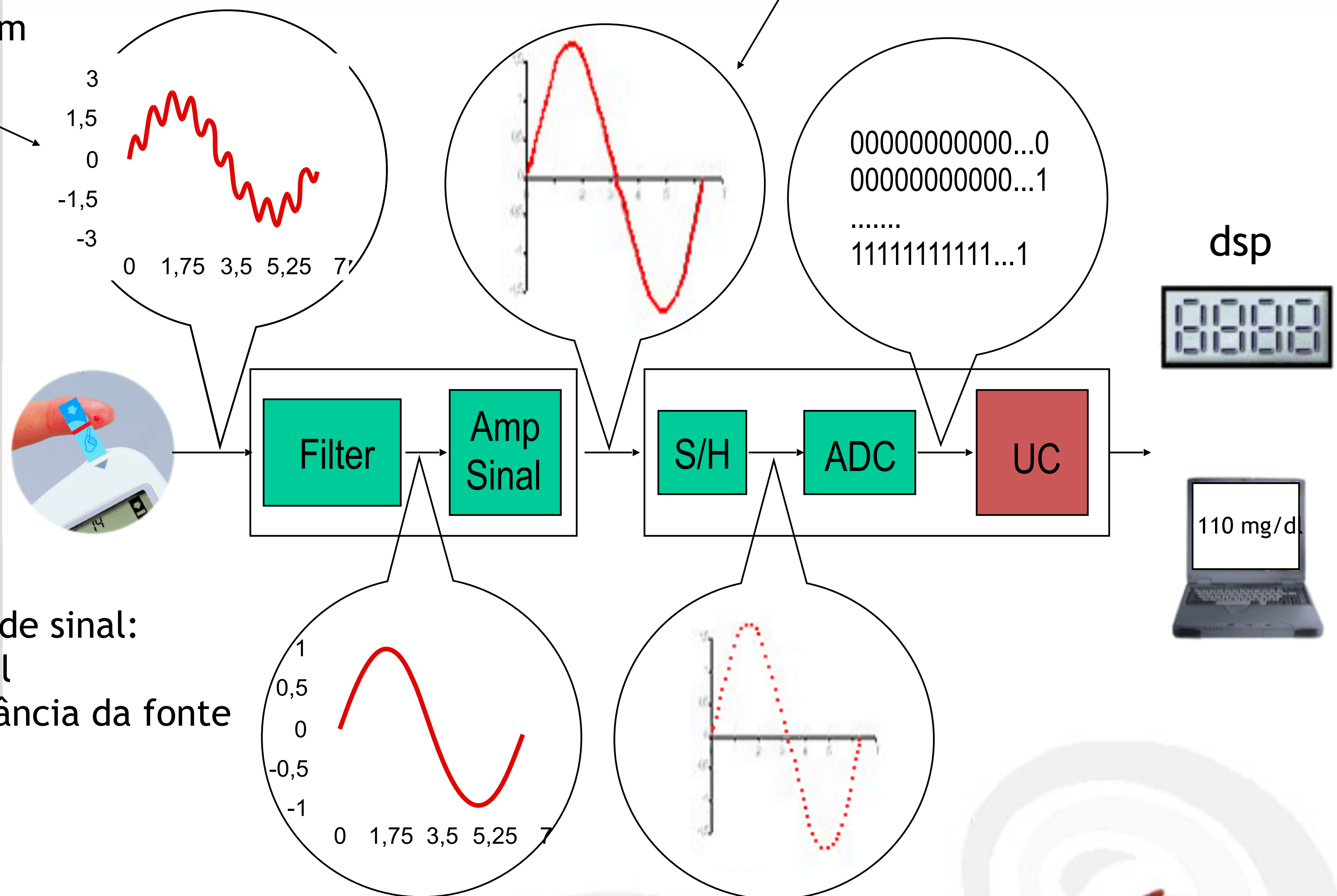
Sensor/Biossensor (exemplo)



Biosensor/arquitetura

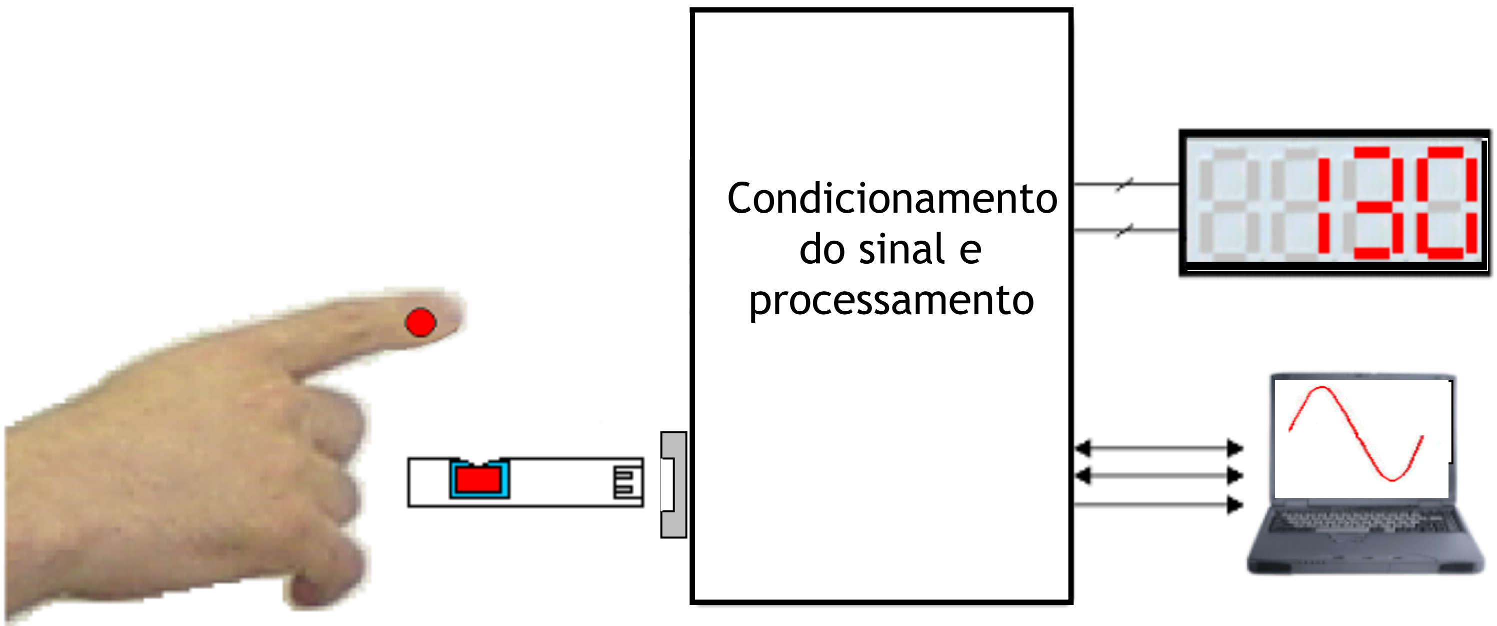
Sinal analógico limpo
(sem ruído)

Sinal analógico com
ruído



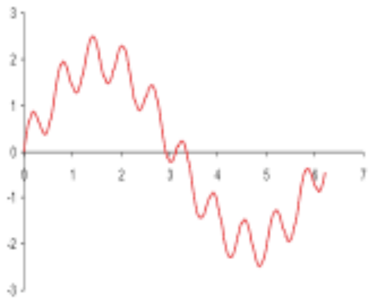
Condicionamento de sinal:
- Amplificar o sinal
- Reduzir a impedância da fonte
- Filtrar

Biosensor/exemplo-glicosímetro



Analog Devices: www.analog.com

Ruído



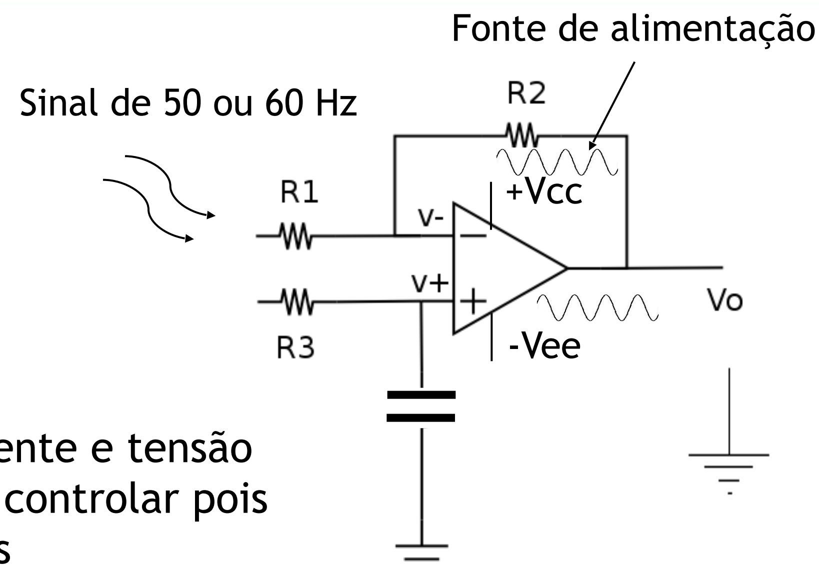
- Ruído é qualquer sinal não querido que interfira com o valor das medidas do sinal de interesse:
  - Este sinal pode ser DC ou AC
  - Intrínseco ou extrínseco
  - Randômico ou repetitivo
    - Ruídos randômicos interferem com a repetibilidade da medida
- Ruídos impõem limites nos sinais menores que se pode medir (sensibilidade)

Ruídos

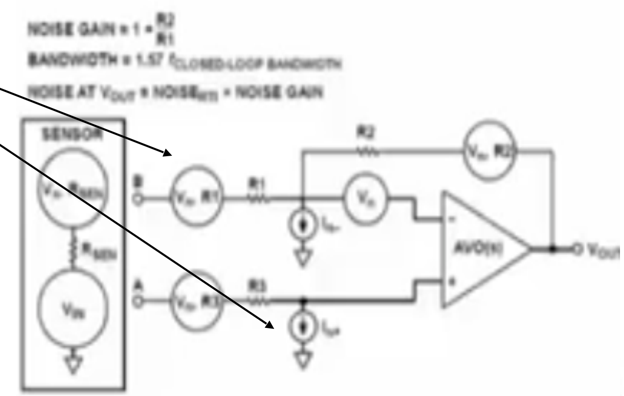
Ruído intrínseco:

- Gerado pelos componentes do próprio circuito (resistores, fontes etc.)

- Difícil de reduzir:
  - Ruído ocorre em várias frequências
  - Pode atingir valores similares aos que serão medidos pelo circuito.



Ruídos de corrente e tensão são difíceis de controlar pois são randômicos



Ruído extrínseco:

- Atinge o circuito a partir de fontes externas.

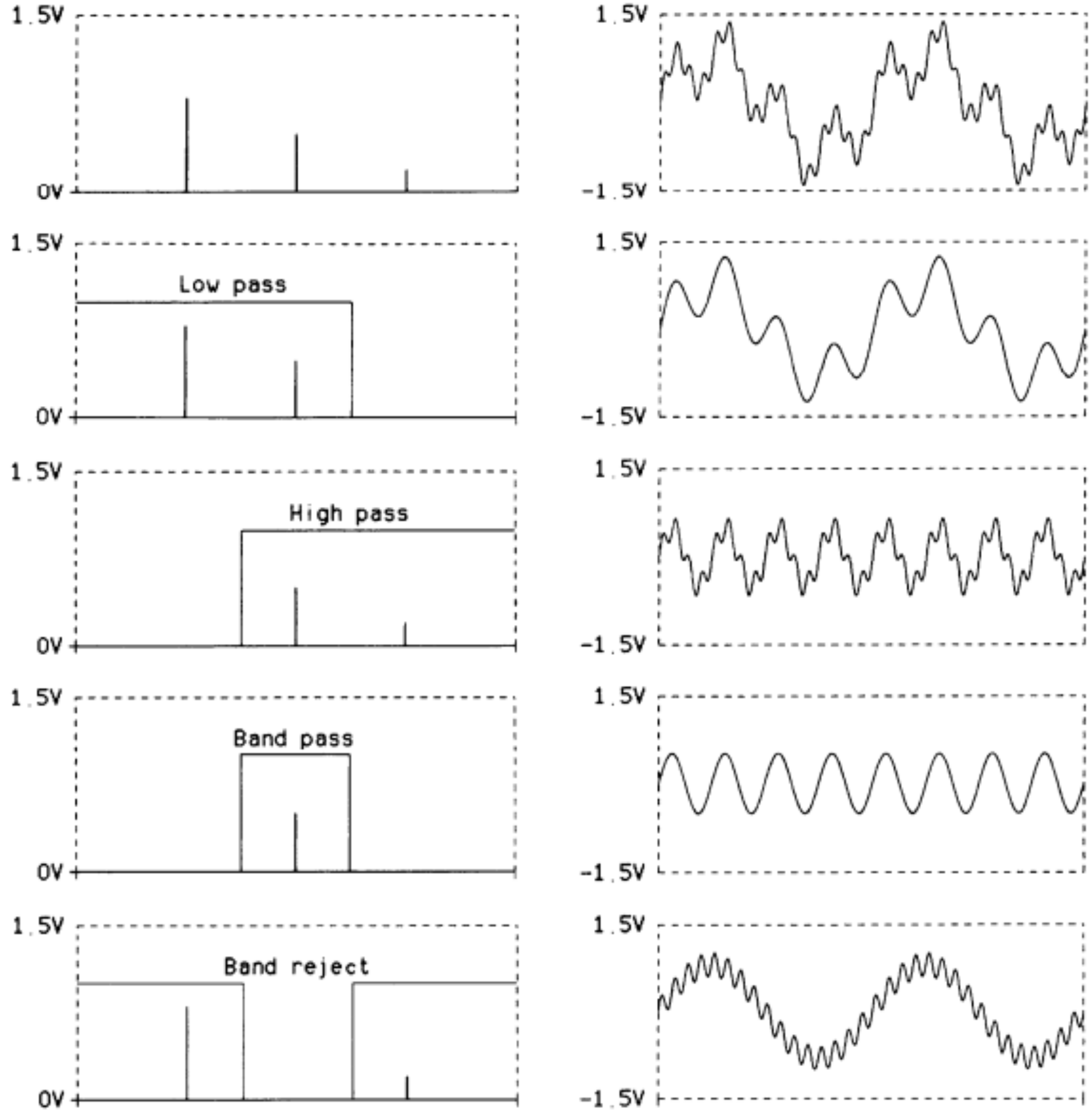
- Redução do ruído:
  - Bom aterramento, desacoplamento, um bom layout, blindagem adequada

Filtros

- Filtros são circuitos eletrônicos desenvolvidos para permitir, ou não, a passagem de um sinal eltrônico dentro de um espectro de frequência pré-estabelecido pelo projetista. Ou seja, extrair sinais indesejáveis ao processamento, entre eles, os ruídos.

- Os filtros podem ser:
  - Passsivos
    - São filtros constituídos de elementos passivos, tais como: capacitores, resistores e indutores.
  - Ativos
    - São filtros construídos a partir de elementos ativos, tais como: transistores, vávulas e amplificadores operacionais, associados a elementos passivos (capacitores, resistores, indutores).

Efeitos de filtragem de sinal



Senóide com ruídos

Filtro passa baixa

Filtro passa alta

Filtro passa faixa

Filtro rejeita faixa

Domínio da frequência

Domínio do tempo

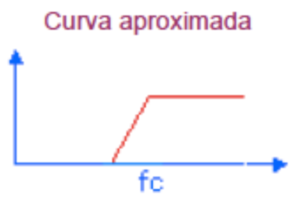
http://cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E22/L7-Active%20Filters.pdf

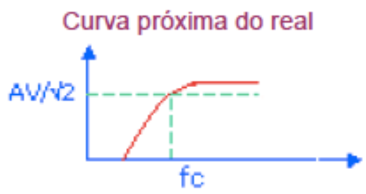
Filtros ativos

- Tipos de filtro ativos
  - Butterworth - Maximiza passagem plana, transição lenta para parar a banda.
  - Chebyshev - Transição rápida, mas com custo de ondulação na faixa de passagem.
  - Elíptica - Transição rápida, mas com custo de ondulação em todos os lugares.

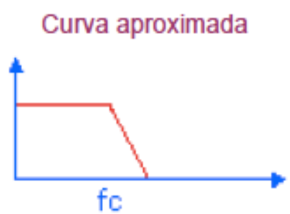
Filtros quanto ao espectro de passagem

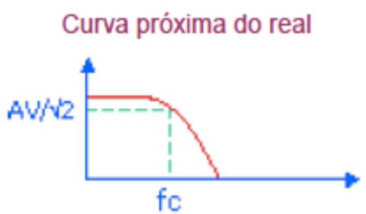
- Passa Alta
  - Permite a passagem de sinais, a partir, acima, de uma determindada frequência estabelecida e atenua frequências inferiores.





- Passa Baixa
  - Permite a passagem de sinais abaixo de um uma determinada frequência estabelecida a atenua altas frequências.





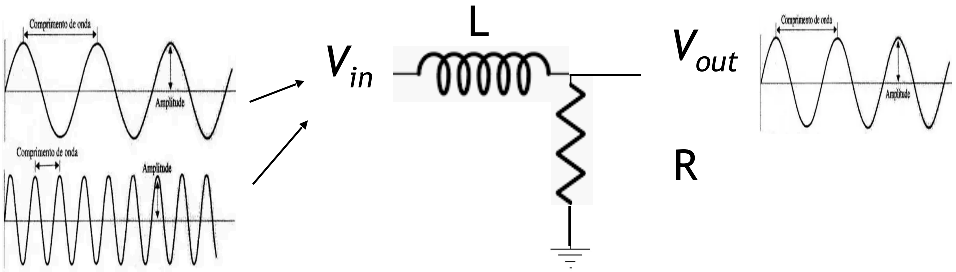
Filtros quanto ao espectro de passagem

- Passa faixa
  - Permite a passagem de sinais cujas frequências estejam dentro de uma faixa de frequência estabelecida.

- Rejeita faixa
  - Rejeita a passagem de sinais cujas frequências estejam dentro de uma faixa de frequência estabelecida.

Filtros passivos – Filtro Passa baixa

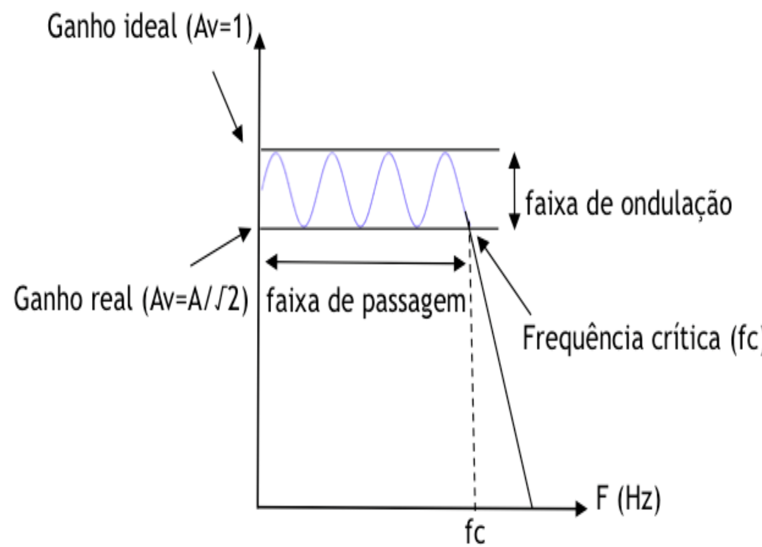
- Filtros com indutores e resistores
  - Comportamento de um indutor
    - Em alta frequência o indutor funciona como uma resistência, e em baixa frequência, como um curto circuito.
    - Lembre-se $X_L = 2\pi f L$ (reatância indutiva)
  - Exemplo de filtro passa baixa passivo



- Ganho de tensão do circuito é dado por:
  - $Av = V_{out}/V_{in} = R/Z = R/(\sqrt{(R^2+X_L^2)})$, considerando a mesma corrente em R e em L
- Ganho em decibéis:
  - $Av = 20.\log|Av|$

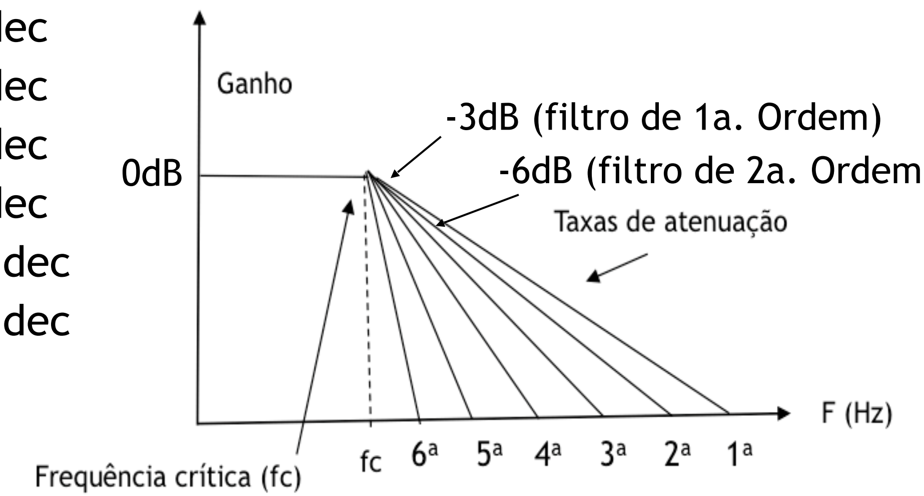
- Ganho ideal = 1 se X_L fosse zero (0Ω), ou seja, $Av = A_{max}$
- Em decibéis teremos:
  $Av\ (dB) = 20.\log(1) = 0\ dB$

- Porém, o ganho real fica em torno é 0,707, se considerarmos $X_L = R$.
  $Av = R/(\sqrt{(R^2+R^2)}) = 1/(\sqrt{2})$, na frequência crítica.
- Em decibéis teremos:
  $Av\ (dB) = 20.\log(Av)$
  $= 20.\log(0,707) = -3\ dB.$



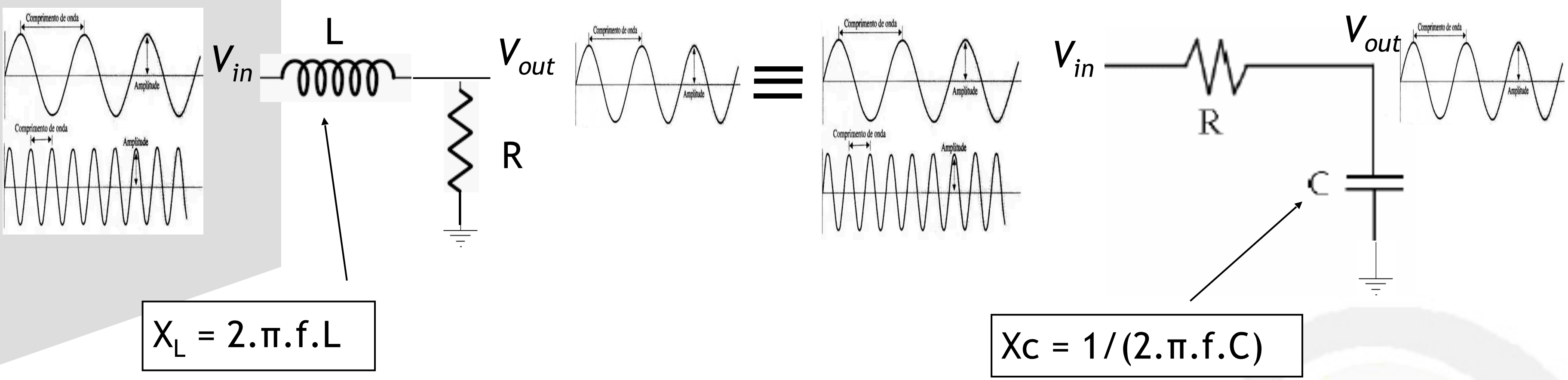
Filtros – Ordem (filtro passa-baixa)

- Em um mesmo filtro pode haver mais de um circuito de desvio aumentado sua taxa de atenuação, aproximando-se de um filtro ideal.
- Relação de ordem/taxa de atenuação:
  - 1a ordem -> 20 db/dec
  - 2a oderm -> 40 db/dec
  - 3a ordem -> 60 db/dec
  - 4a ordem -> 80 db/dec
  - 5a ordem -> 100 db/dec
  - 6a ordem -> 120 db/dec



Filtro passa baixa ativo de primeira ordem

- Este filtro permite que sinais acima de uma determinada frequência sejam atenuados. Como, em geral, os indutores ocupam muito espaço, usamos um circuito equivalente, utilizando capacitores, ajustando-se a arquitetura do circuito. O capacitor se comporta como “curto circuito" em altas frequências e como um “circuito aberto” em baixas frequências. Ou seja, em um filtro passa baixa, a frequência de trabalho deve ser inferior a frequência da corte ou crítica (fc), onde Xc = R.



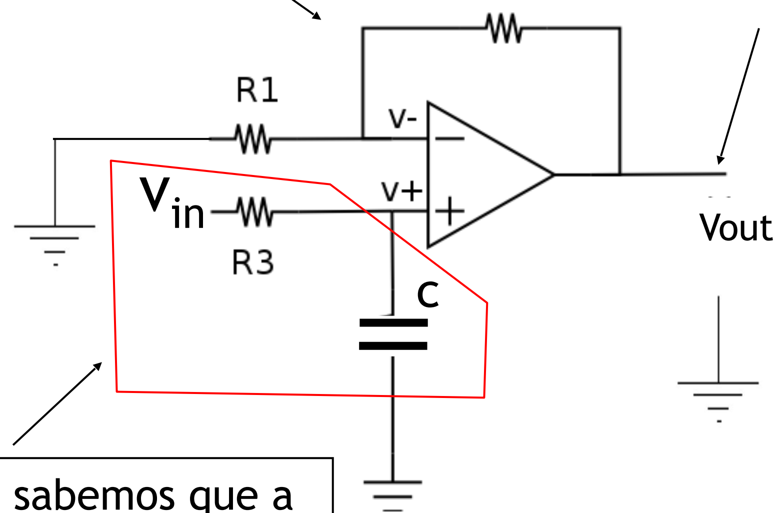
Filtro passa baixa ativo de primeira ordem

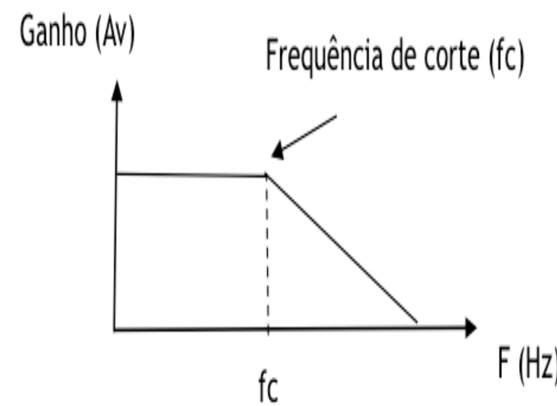
O ganho da banda de passagem do filtro dependerá dos valores dos resistor R1 e R2, e a freqüência de corte do filtro dependerá dos elementos R3 e C.

Ganho de tensão do circuito amplificador (Av) = (R2+R1)/R1

Função transferência

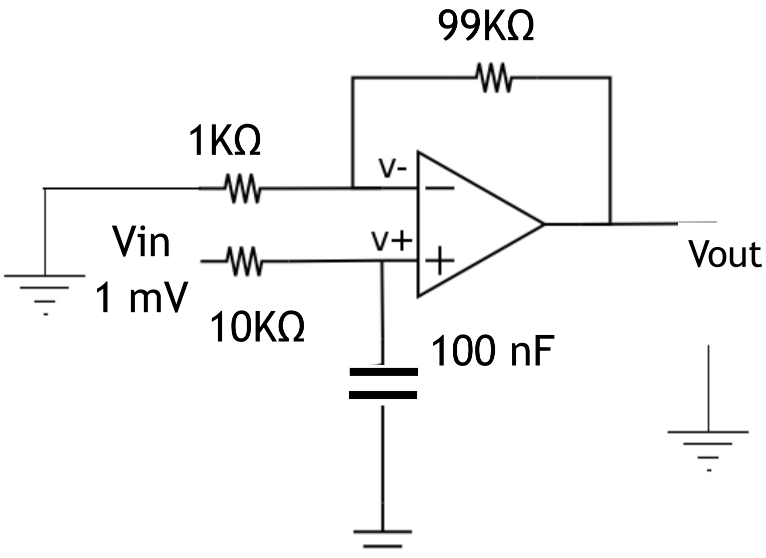
$Vo = Av.[Vin/(\sqrt{1+(fin/fc)^2})]$





Desde que Xc = 1/(2.π.f.C), sabemos que a frequência crítica ocorre quando Xc = R3, f_c= 1/(2.π.R3.C)

Exemplo de filtro passa baixa



Análise do Ganho de tensão:

1. Ganho em tensão (Av) do circuito:
   Av = (99KΩ+1KΩ)/1KΩ = 100
2. Ganho de tensão em dB do circuito
   $Av = 20 \log_{10}(100) = 40$ dB

Análise do comportamento em frequência:

1. Frequência de corte fc = 1/(2.π.R.C), como) (X_c=R)
   fc= 1/(2.π.10KΩ.100nF) = 159,23 Hz
2. Considerando tensão de saída para fin = 1 Hz
   Vo = Av.[Vin/(√1+(fin/fc)²)] =>
   Vo = 100.[1mV/(√1+(1/159,23)²] => Vout = 100 mV,
   logo, Av= 100mV/1mV = 100, assim, em db
   temos $Av = 20.\log_{10}(Vo/Vin) = 20.\log(100/1)= 40$dB
   Ou seja, não há atenuação, atenuação = 0dB

Análise em diferentes frequências:

1. Para frequência de entrada (fin) igual a de corte (fc), qual a tensão de saída?
   Vo = 100.[1mV/(√1+(159,23/159,23)²] = 70,71 mV
   $Av = 20.\log_{10}(Vout/Vin) = 20.\log_{10}(70,71/100)$ = -3db; atenuação de 3dB
2. Para frequência de entrada (fin) igual a 1592,3 Hz (uma década após fc), qual a tensão de saída?
   Vo = 100.[1mV/(√1+(1592,30/1592,3)²] = 9,95 mV;
   $Av = 20.\log_{10}(Vout/Vin) = 20.\log_{10}(9,95/100)$= -20 dB; atenuação de 20dB
3. Para frequência de entrada (fin) igual a 15923 Hz (duas décadas após fc), qual a tensão de saída?
   Vo = 100.[1mV/(√1+(15923/159,23)²] = 1 mV
   $Av = 20.\log_{10}(Vout/Vin) = 20.\log10(1/100)$ = -40 dB; atenuação de 40 dB

Filtro passa baixa

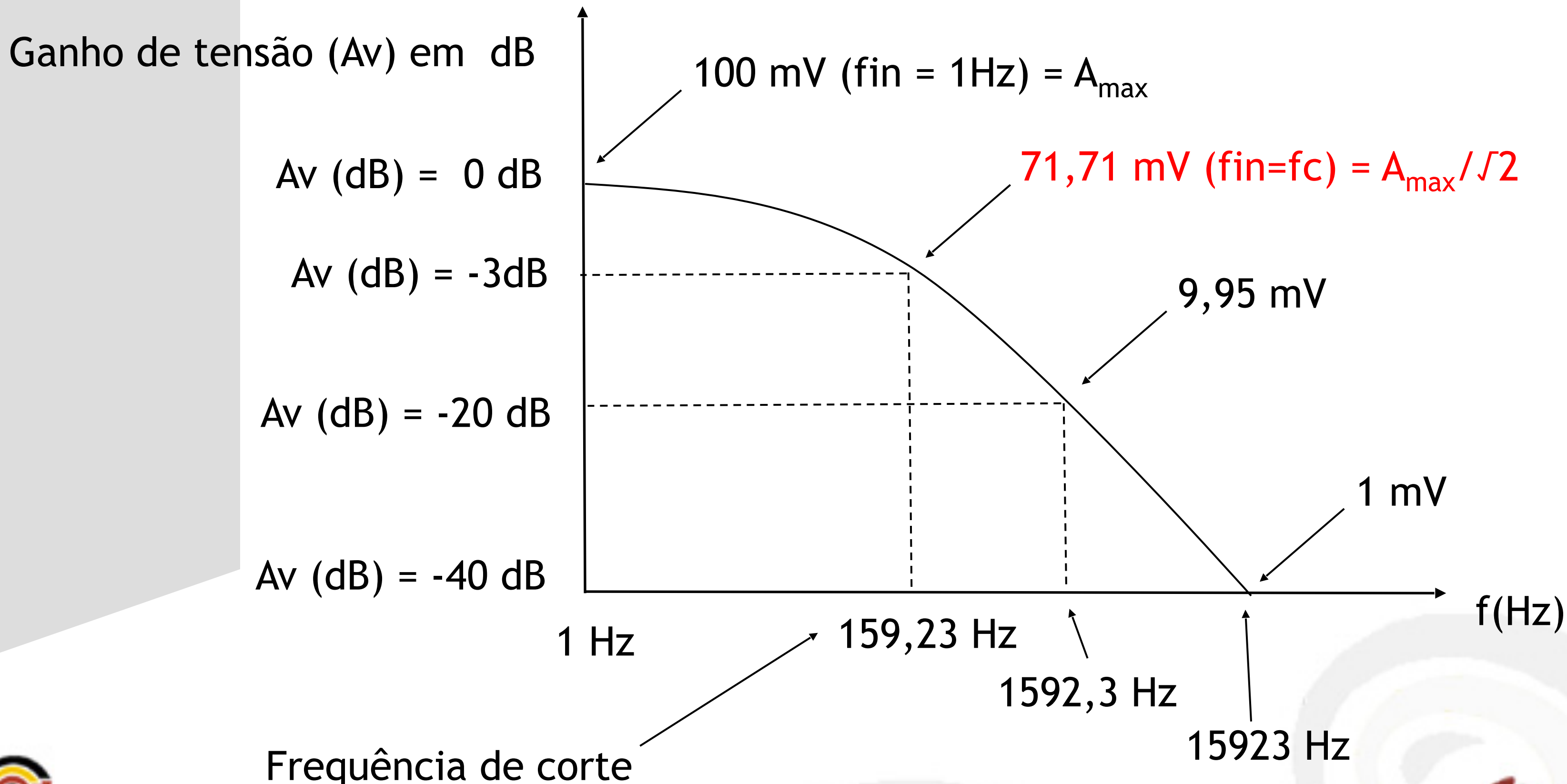
- Em freqüências mais altas acima a freqüência de corte, o ganho é menor que o ganho máximo (o ganho torna-se negativo).

$$(Vout/Vin) < A_{max}$$

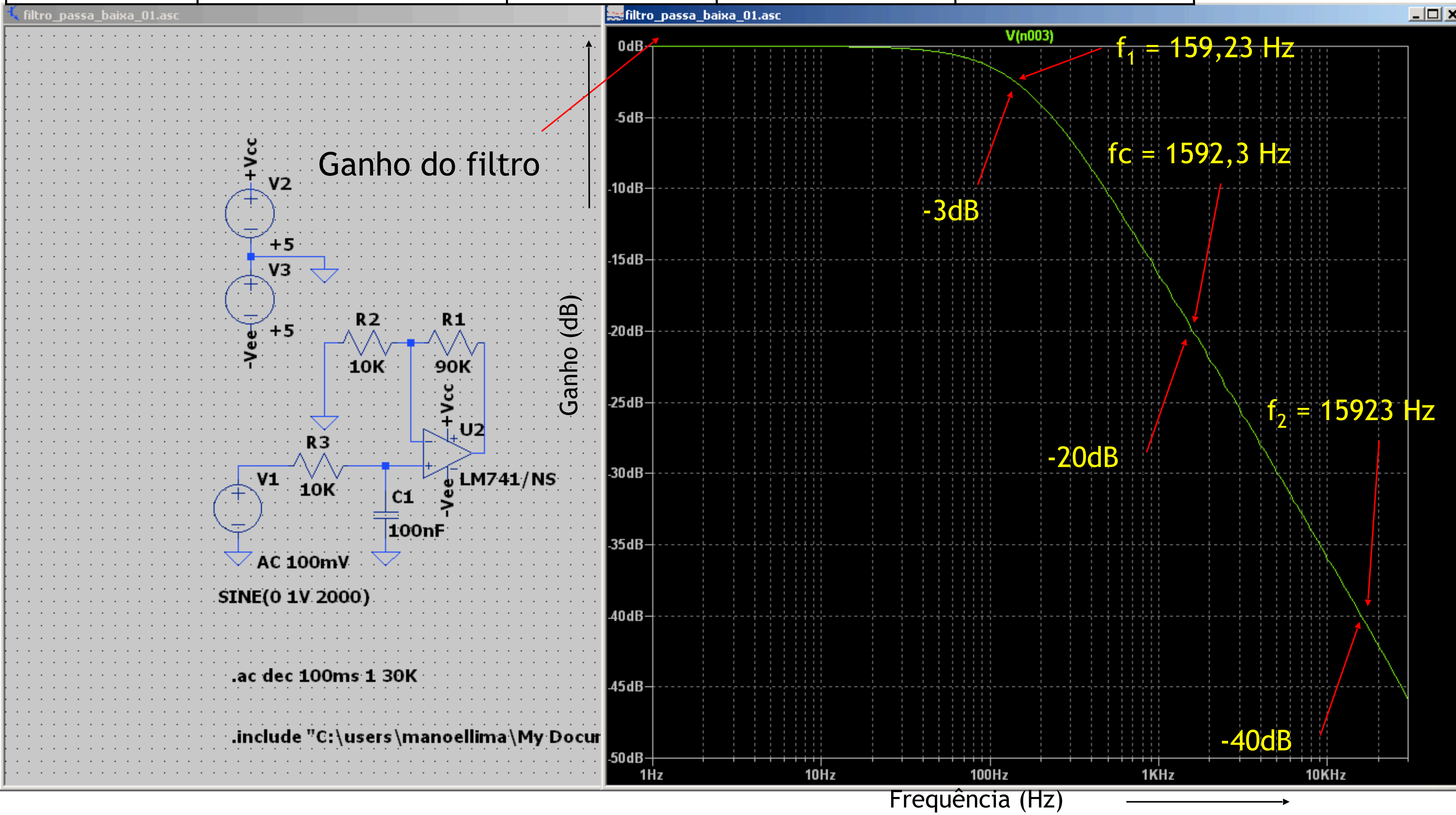
- Quando a freqüência de operação é igual à freqüência de corte, a função de transferência é igual a $A_{max}/\sqrt{2}$ e o ganho é de -3dB.
- A taxa de decréscimo no ganho em um filtro de primeira ordem é de 20dB/década ou 6dB/oitava.

Ganho x frequência

1. Em frequêncicas bem altas , $f > fc$ => $V_{out}/V_{in} < A_v$
2. Na frequência de corte, $f = fc$ => $V_{out}/V_{in} < A_f/\surd 2 = 0{,}707\ A_v$
3. Em frequências baixas, f >< fc => $V_{out}/V_{in} \cong A_v$



Vin (mV)	Frequência(Hz)	Vout (mV)	Ganho (dB)	Atenuação
1	1	100	40	0 db
1	159,23	71,71	-3	-3dB
1	1592,30	9,95	-20	-20dB
1	15923,00	1 mV	-40	-40dB



Filtro passa baixa

Função transferência

$Vo = Av.[Vin/(\sqrt{1+(fin/fc)2^{n}})]$

Onde n = número de pólos no circuito.
À medida que o valor do 'n', o número de pólos, aumenta, o nivelamento da resposta do filtro também aumenta.

Filtro passa baixa de 2a. Ordem

- A resposta de freqüência normalizada do filtro passa-baixa de segunda ordem é dada também por uma rede RC e é geralmente idêntica à do primeiro tipo de ordem. A principal diferença entre um filtro de baixa frequência de 1ª e 2ª ordem é que, no de 2ª ordem a banda de parada (corte) é duas vezes maior que a do filtro de 1a ordem, ou seja, 40dB/década (12dB/ oitava) conforme a frequência de operação aumenta acima da freqüência de corte *ƒ*c.
- O filtro passa-baixa de segunda ordem possui duas redes RC, R_1-C_1 e R_2-C_2, que dão suas propriedades de resposta de freqüência.
- O projeto do filtro é baseado em torno de uma configuração de op-amp não inversora, cujo ganho A é sempre maior que 1.
- Este tipo de filtro possui uma alta impedância de entrada, o que significa que ele pode ser facilmente cascateado com outro filtro ativo.
- O ganho do circuito depende dos valores de R_A e R_B.

Filtro passa baixa de 2ª. Ordem

Frequência de corte (fc):

$fc = 1/(2.\pi.\sqrt{}(R_1.R_2.C_1.C_2))$

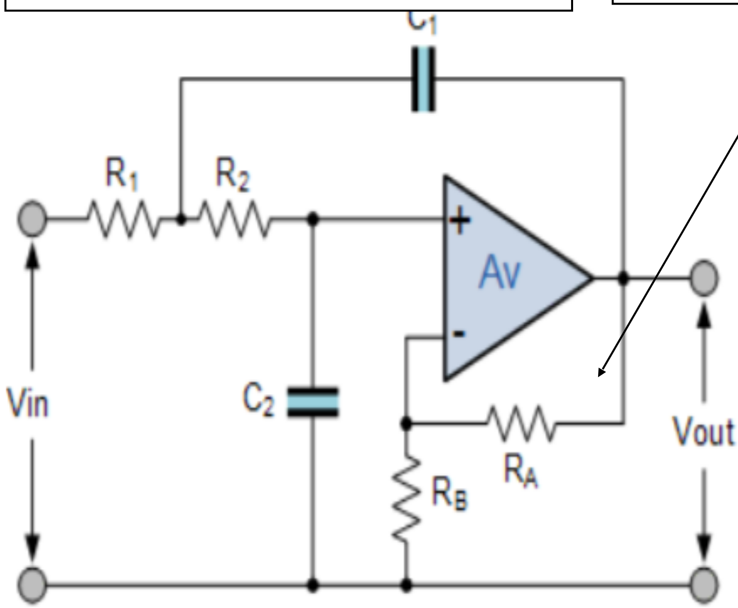
Se $R_1=R_2=R$ e $C_1=C_2=C$, então

$fc = 1/2.\pi.R.C$

Função transferência

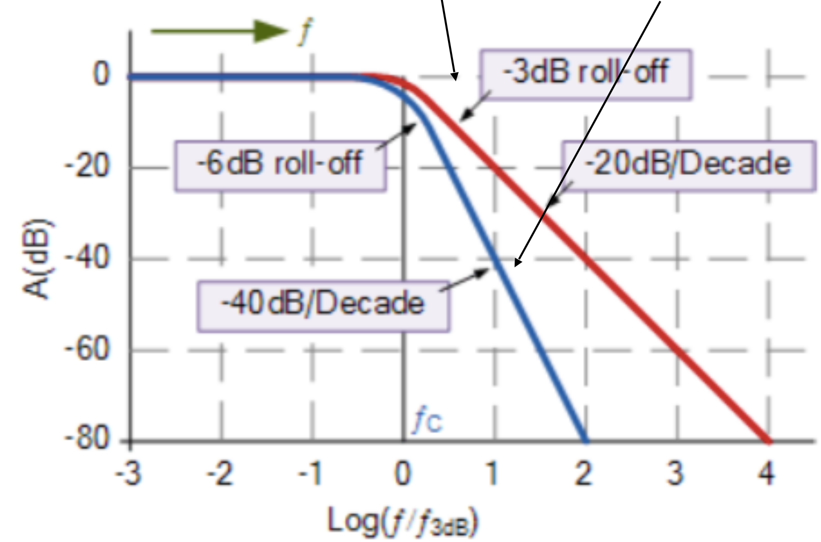
$Vo = Av.[Vin/\{\sqrt{}[1-(fin/fc)^2]^2+[2.(fin/fc)]^2\}$

Ganho (A) = $1+R_A/R_B$

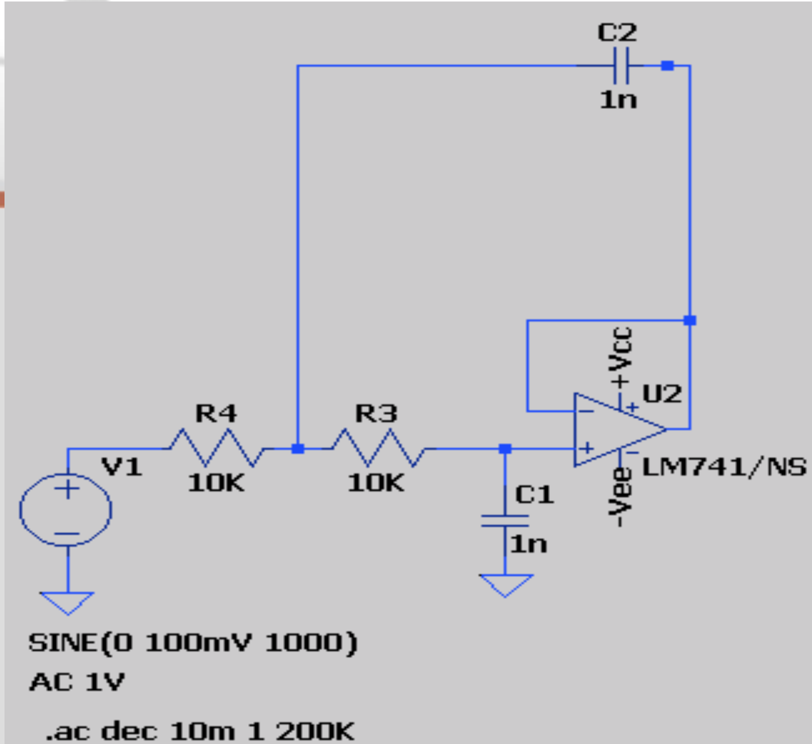


Filtro de 1ª ordem

Filtro de 2ª ordem



Filtro passa baixa de 2ª ordem



Análise de Ganho de tensão do circuito :

V_{in}=100mV

1. **Ganho de tensão**

   $A_v = V_{out}/V_{in} = 1$ (seguidor de tensão)

2. **Ganho em dB:**

   $A_v = 20 \log_{10}(V_{out}/V_{in}) = 20\log(1) = 0$ dB

Análise em frequência:

1. Função de transferência em função das frequências:

   $V_o = A_v.[V_{in}/\{\sqrt{[1-(f_{in}/f_c)^2]^2+[2.(f_{in}/f_c)]^2}\}$

2. Frequência de corte (fc), quando R=Xc:

   $X_c = 1/(2.\pi.f.C)$, logo, como $X_c = R$, temos:

   $f_c = 1/(2.\pi\sqrt{R3.R4.C1.C2}) = 15915,50$ Hz

Análise em frequências diferentes:

1. Para frequência de entrada (fin) igual a de corte (fc=15915,50Hz), a relação entrada/saída é dada por: (Vin=100mV (p-p))

   $V_o = A_v.[V_{in}/\{\sqrt{[1-(15915,50/15915,50)^2]^2+[2.(15915,50/15915,50)]^2}\} \cong 1.V_{in}/2 = 50$mV.

   $A_v(f) = -20.\log_{10}\{[\sqrt{1-(f_{in}/f_c)^2}]^2-(f_{in}/f_c)^2\} = -20.\log_{10}2 = -6,0$ dB

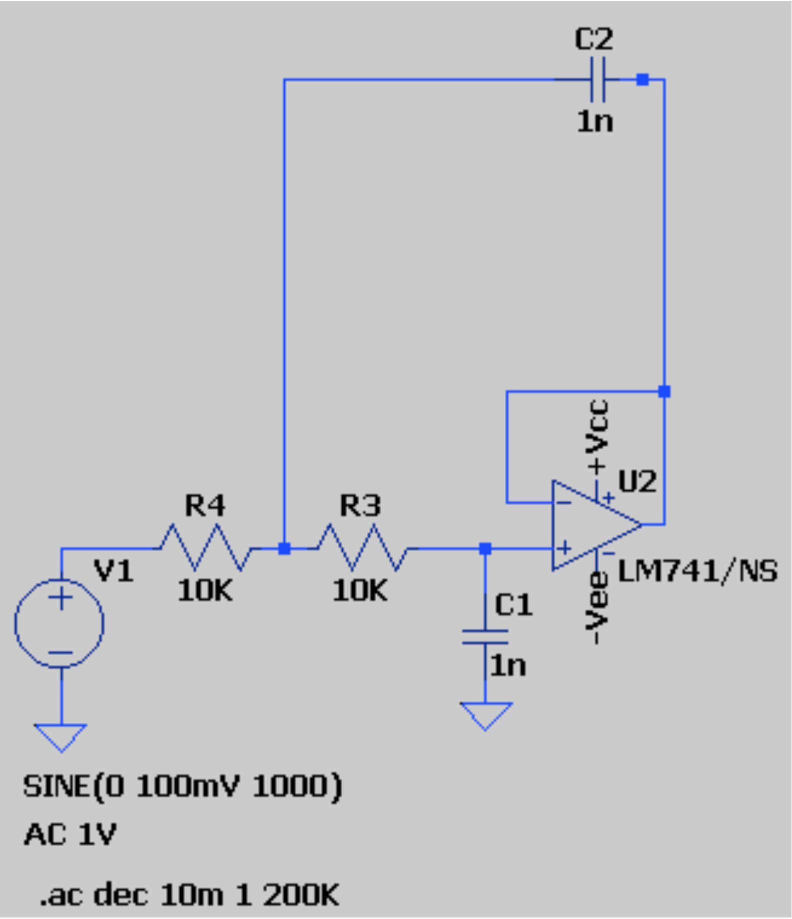
3. Para frequência de entrada (fin) igual 159155,0KHz, a relação entrada/saída é dada por:

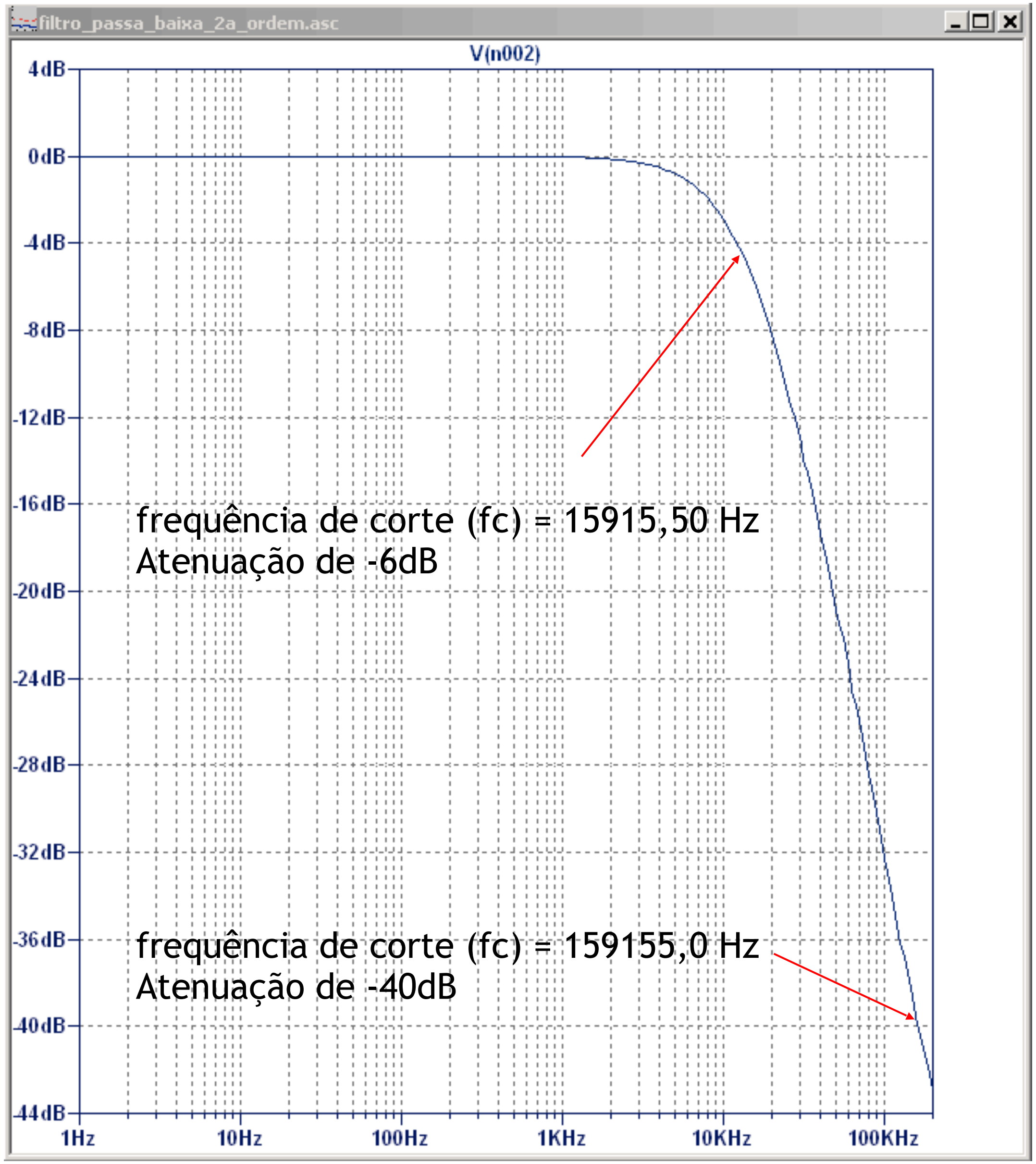
   $V_o = A_v.[V_{in}/\{\sqrt{[1-(10^*f_c/f_c)^2]^2+[2.(10^*f_c/f_c)]^2}\} = 1$mV.

   $A_v = -20.\log_{10}\{[\sqrt{1-(f_{in}/f_c)^2}]^2+[2.(f_{in}/f_c)]^2\} = -40,08$ dB.

Filtro passa baixa de 2a. ordem

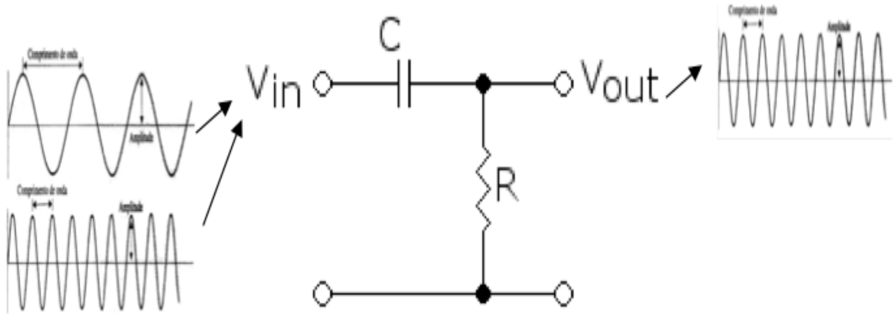
Exemplo:
Frequência de corte (fc) =15915,50Hz, escolhendo R_4 = R_3 = 10K, e considerando C_1=C_2= 1nF.





Filtros passivos – Filtro passa alta

- Filtros com capacitores e resistores
  - Comportamento de um capacitor
    - Em alta frequência um capacitor funciona como um curto circuito e em baixa como uma chave aberta ($R \cong \infty$).
    - Lembre-se $X_C = 1/2\pi fC$ (reatância capacitiva)
  - Exemplo de filtro passa alta passivo

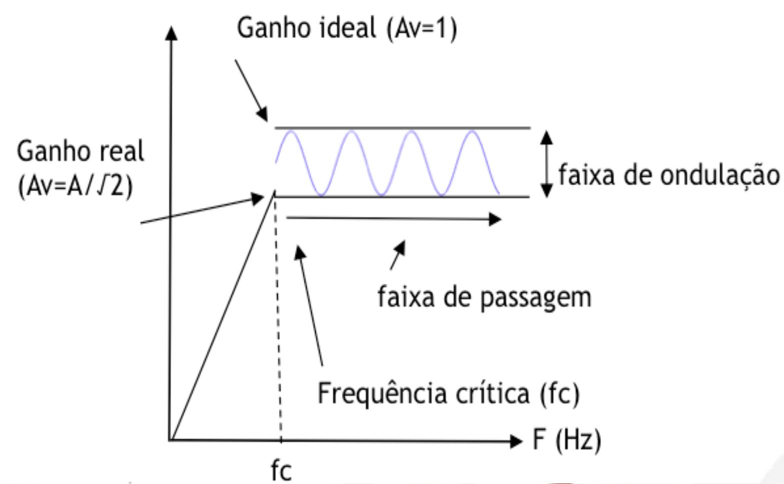


- Ganho de tensão do circuito é dado por:
  - $Av = R/[\sqrt{(R^2+X_C^2)}]$
- Ganho em decibéis:
  - $Av = 20.\log |Av|$

- Ganho ideal = 1, se $Xc = 0\Omega$, ou seja, $Av=A_{max}$.
- Em decibéis teremos:
  $Av\ (dB) = 20.\log(1) = 0\ dB$

- Porém o ganho real deve ser em torno de 0,707, quando $R=X_c$, $Av = R/(\sqrt{(R^2+R^2)}= 1/(\sqrt{2})$
- $Av\ (dB) = 20.\log(Av)$
  $= 20.\log(0{,}707) = -3\ dB.$

- A frequência crítica deste filtro ocorre quando $R=X_C$



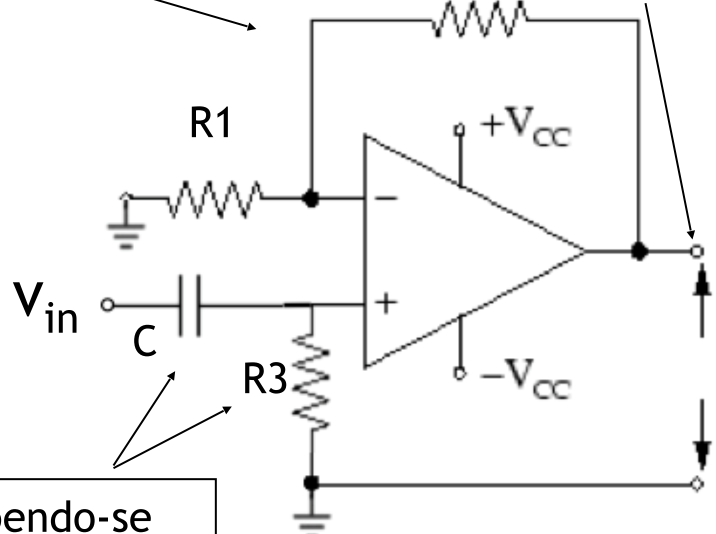
Filtro passa alta de primeira ordem (filtro Butterworth)

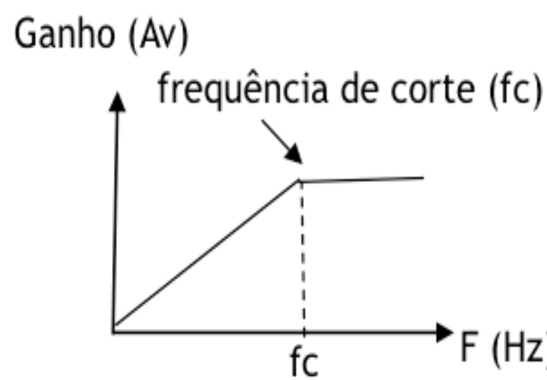
- Este filtro atenua sinais com frequência abaixo de um determinado valor. Em altas frequências o capacitor se comporta como um "curto circuito". Ou seja, a frequência de trabalho deve ser superior a uma dederminada frenquência da corte (fc).

Ganho de $\text{tensão}_{\text{máx}}$ (Av) = (R2+R1)/R1

Função transferência

Vo = Av.(fin/fc)[Vin/(√1+(fin/fc)²)]

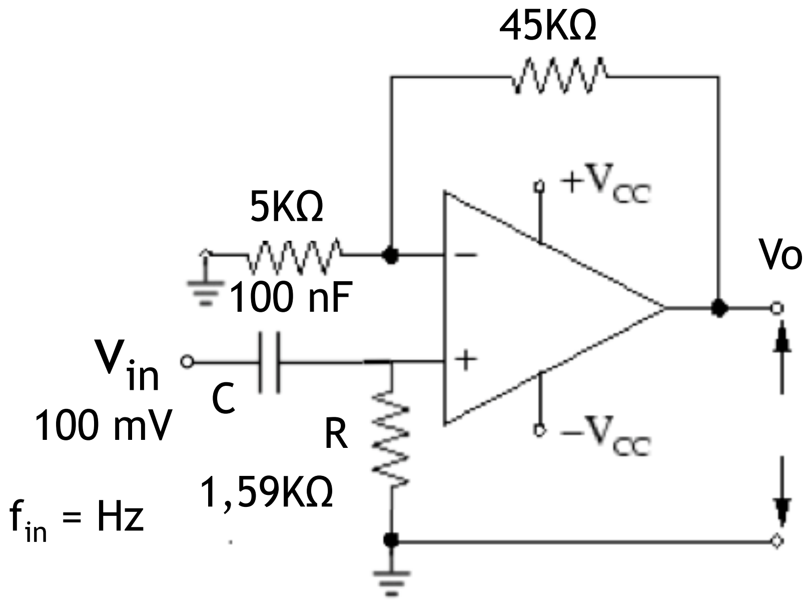




O ganho da banda de passagem do filtro dependerá dos valores dos resistor R1 e R2, e a freqüência de corte do filtro dependerá dos elementos R3 e C.

Desde que Xc = 1/(2.π.f.C) e sabendo-se que a frequência de corte ocorre quando Xc = R3, daí f_c= 1/(2.π.R3.C)

Exemplo: Filtro passa alta



Análise de Ganho de tensão do circuito

1. Ganho de tensão

Av = (R1+R2)/R1 = (45+5)KΩ/5KΩ=10

2. Ganho em dB:

Av = 20 $\log_{10}$(10) = 20log(10)= 20 dB

Análise em frequência:

1. Função de transferência em função das frequências:

   Vo = Av. [(fin/fc)/(√1+(fin/fc)²)].Vin

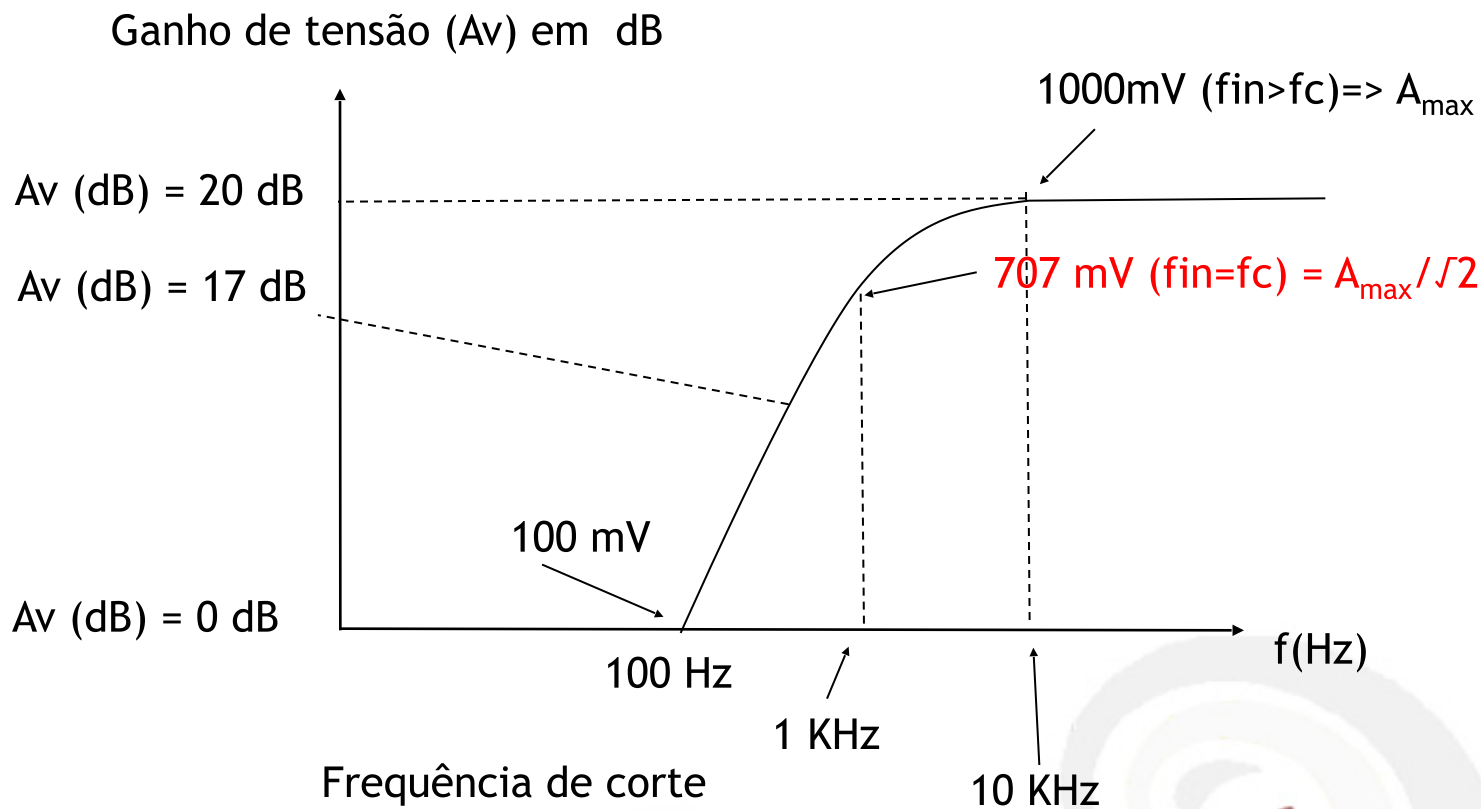
2. Frequência de corte (fc) ocorre quando R=Xc. Assim, como Xc = 1/(2.π.f.C), temos que fc = 1/(2.π.1,59KΩ.100nF) = 1 KHz

Observações:

1. Para frequência de entrada (fin) igual a 100Hz, a relação entrada/saída é dada por:
   Vo/Vin = Av. [(fin/fc)/(√1+(fin/fc)²)] = 10.[100/1000/[√1+(100/1000)²] = 1 ; ou seja, com Vin = 100mV, Vo = 100 mV, 20log(1) = 0 dB. (sem ganho)
2. Para frequência de entrada (fin) igual a de corte (fc=1KHz), a relação entrada/saída é dada por:
   Vo/Vin = Av. [(fin/fc)/(√1+(fin/fc)²)] = 10.[(1000/1000)/[√1+(1000/1000)²] = 7,07; ou seja, com Vin = 100mV, Vo = 707 mV, 20log (7,07) = 17 dB.
3. Para frequência de entrada (fin) igual 10KHz, a relação entrada/saída é dada por:
   Vo/Vin = Av. [(fin/fc)/(√1+(fin/fc)²)] = 10.{10000/1000/[√1+(10000/100)²] = 10 ; ou seja, com Vin = 100mV, Vo = 1000 mV, 20 log(10) = 20 dB.

Ganho x frequência – filtro passa alta

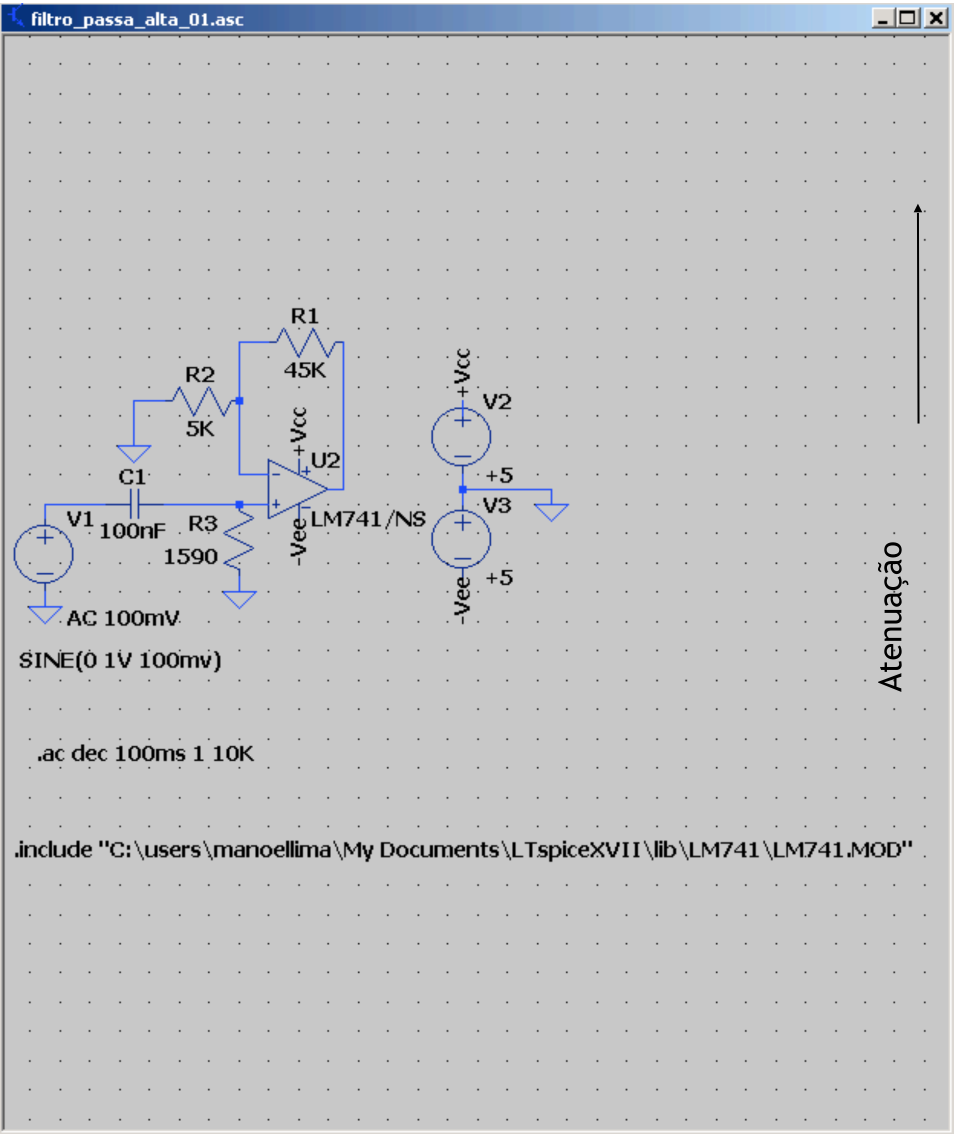
1. Em frequêncicas bem baixas , $f < fc$ => $V_{out}/V_{in} < A_v$
2. Na frequência de corte, $f = fc$ => $V_{out}/V_{in} < A_f/\sqrt{2}=0,707\ A_v$
3. Em frequências elevadas, $f > fc$ => $V_{out}/V_{in} \cong A_v$

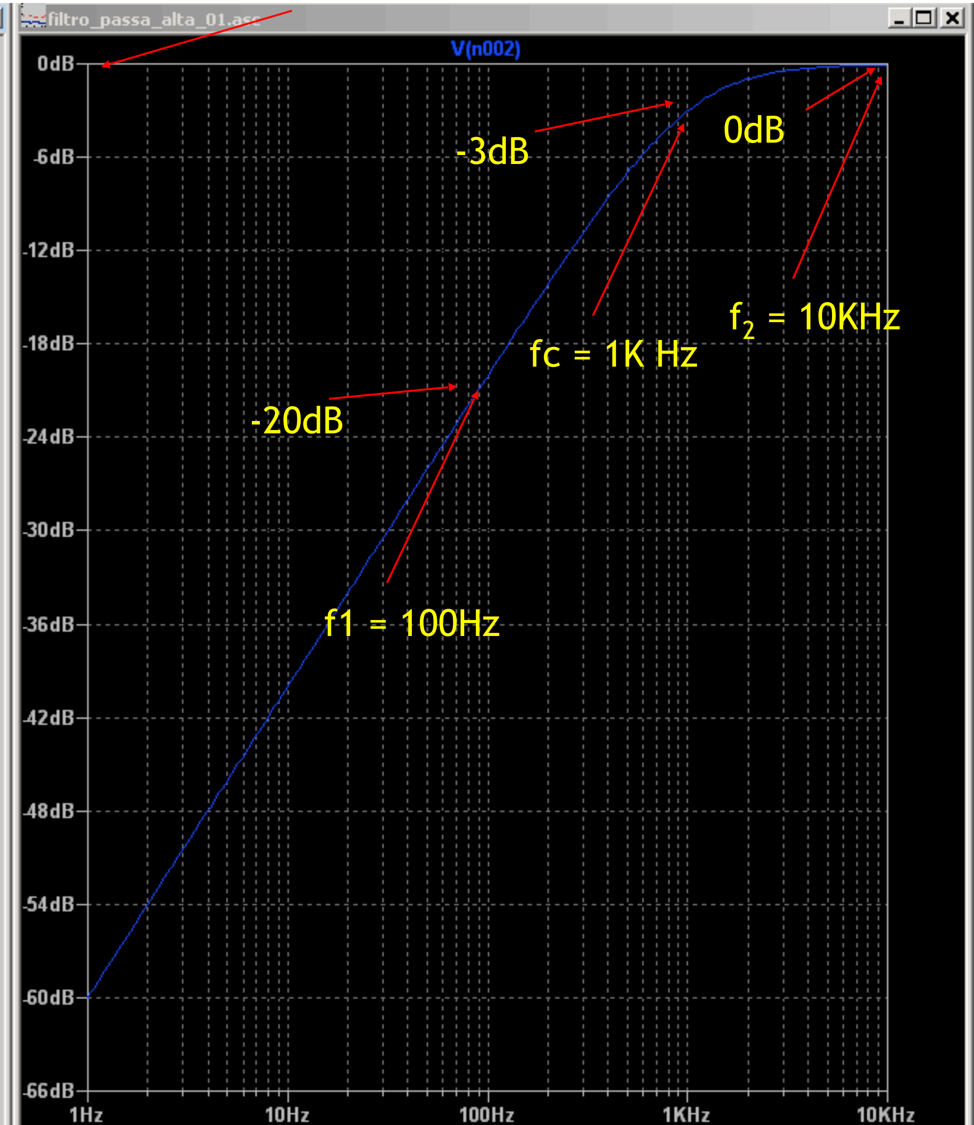


Vin (mV)	Frequência(Hz)	Vout (mV)	Ganho (dB)	atenuação
100	100	100	0	-20 dB
100	1000	707	17	-3dB
100	10000	1000	20	0dB

Filtro passa alta

Ganho do filtro (20 dB)





Frequência (Hz)

Frequência de operação de alguns tipos de sensores

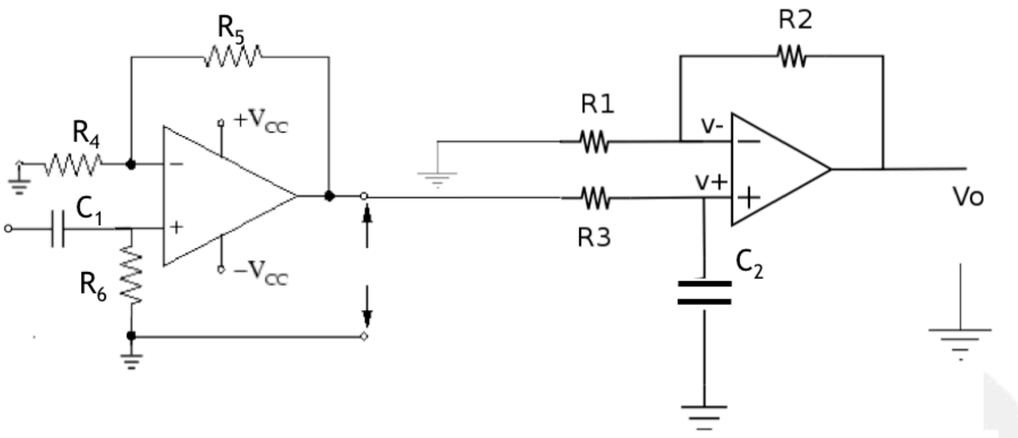
Parâmetros médicos comuns (impôem restrições aos equipamentos).

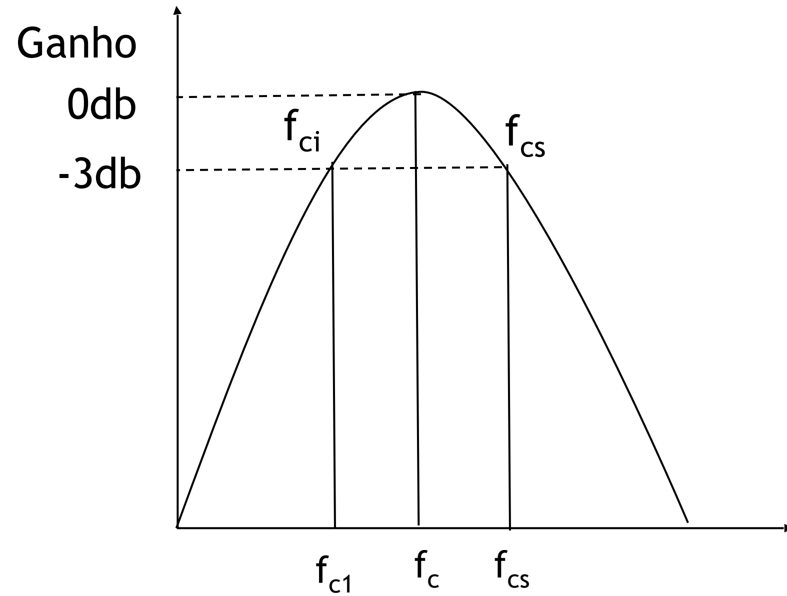
Measurement	Range	Signal Frequency, Hz	Sensor Method
Blood flow	1 to 300 mL/s	0 to 20	Electromagnetic or ultrasonic
Blood pressure	0 to 400 mmHg	0 to 50	strain gage
Cardiac output	4 to 25 L/min	0 to 20	dye dilution
Electrocardiography	0.5 to 4 mV	0.05 to 150	Skin electrodes
Electroencephalography	5 to 300 μ V	0.5 to 150	Scalp electrodes
Electromyography	0.1 to 5 mV	0 to 10000	Needle electrodes
Electroretinography	0 to 900 μ V	0 to 50	Contact lens electrodes
pH	3 to 13 pH units	0 to 1	pH electrode
pCO_2	40 to 100 mmHg	0 to 2	pCO_2 electrode
pO_2	30 to 100 mmHg	0 to 2	pO_2 electrode
Pneumotachography	0 to 600 L/min	0 to 40	Pneumotachometer
Respiratory rate	2 to 50 breaths/min	0.1 to 10	Impedance
Temperature	32 to 40 °C	0 to 0.1	Thermistor

Filtro passa faixa

- Este tipo de filtro permite a passagem de sinais apneas dentro de uma certa banda de ferquência e rejeita todos os sinais for a desta banda.
- Este filtro pode ser construído a partir de um filtro passa alta e um passa baixa.

Filtro passa alta (f_{ci}) Filtro passa baixa(f_{cs})





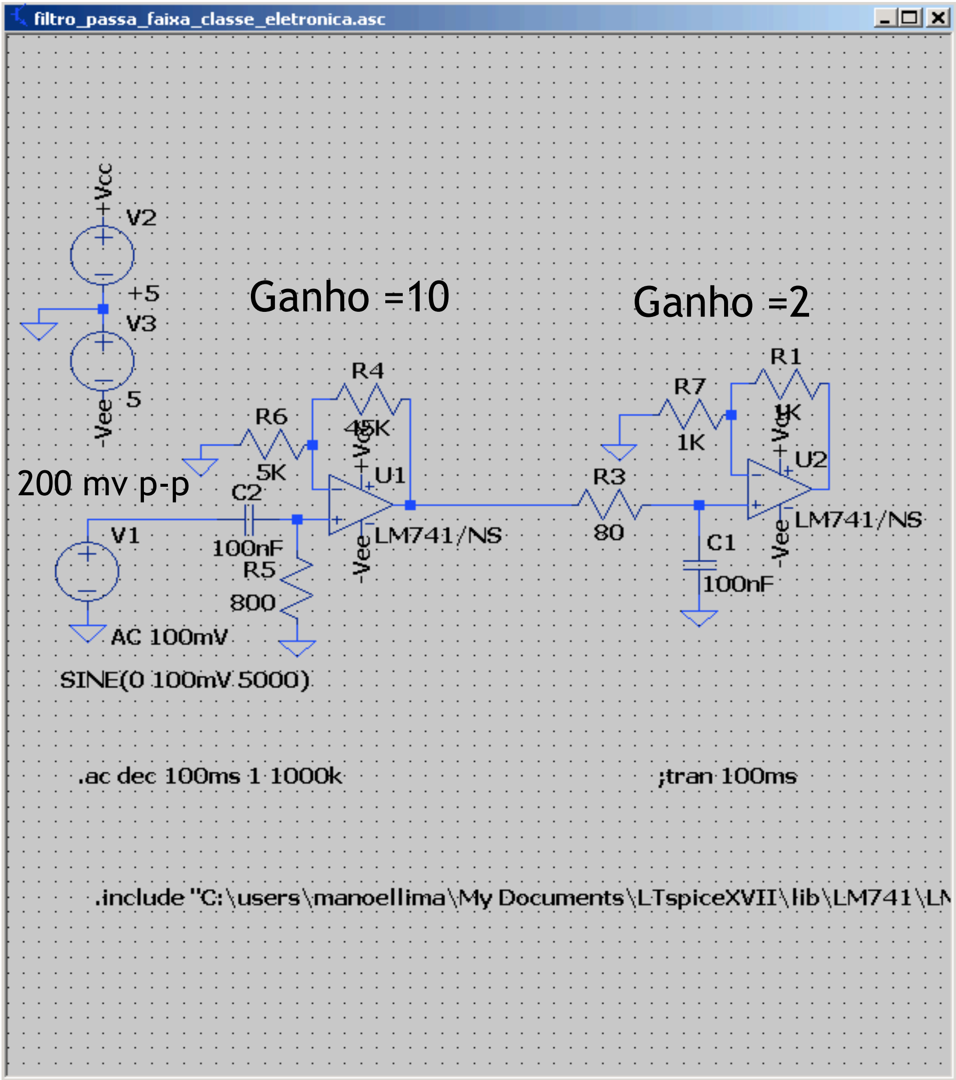
Filtro passa faixa

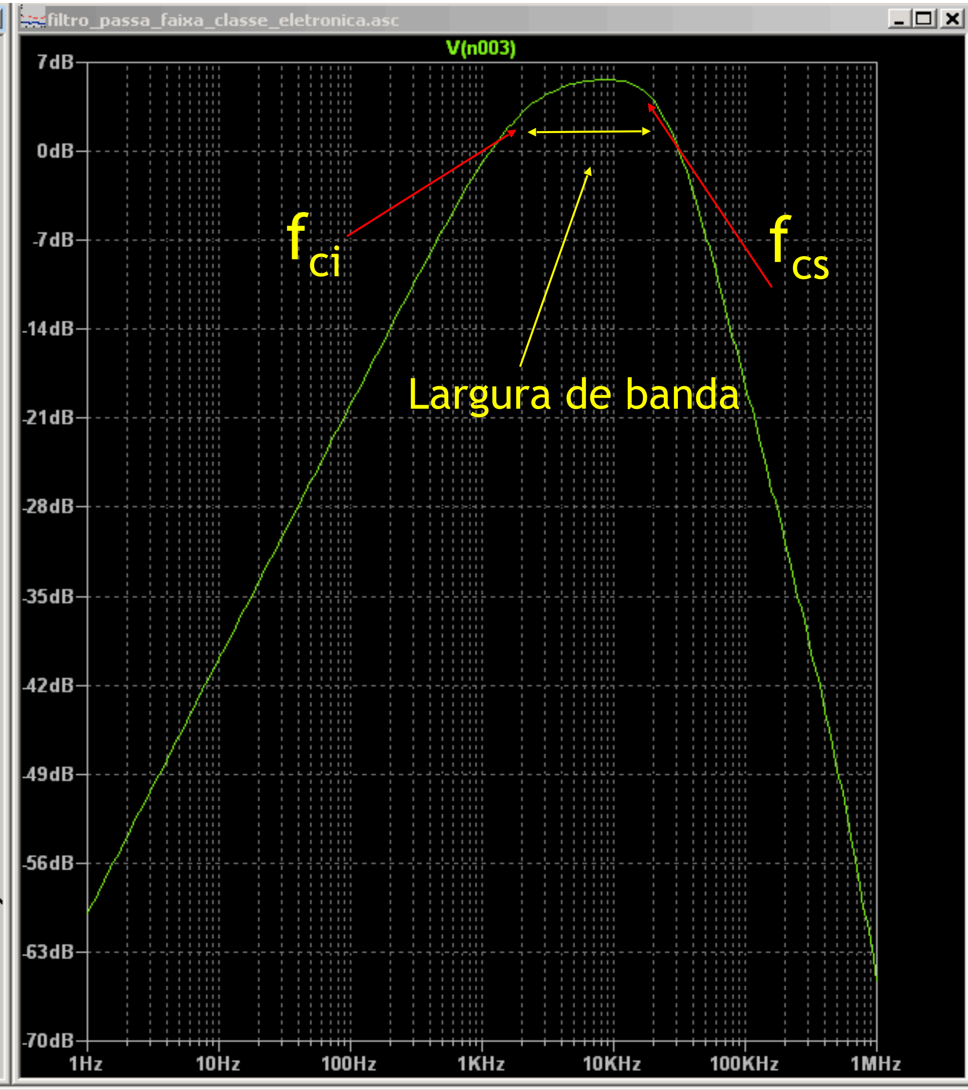
Exemplo:

f_{ci} = 2 KHz (frequência de corte inferior)

f_{cs} = 20 KHz (frequência de corte superior)

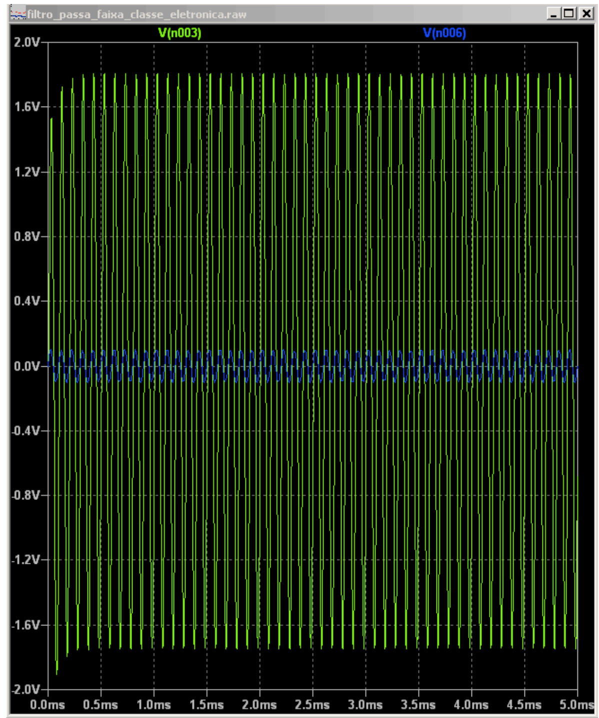
Ganho total do circuito em tensão ≅ 20



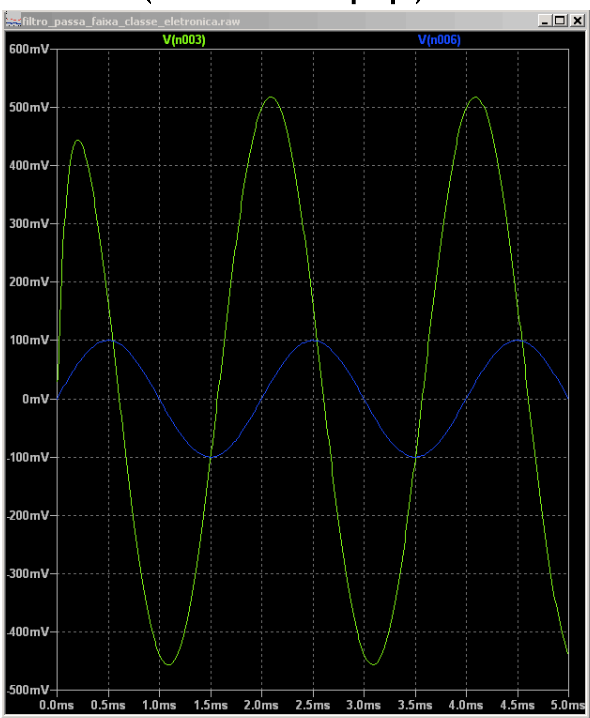


Filtro passa faixa

10 KHz (ganho ≅ 7dB)
Frequência do sinal dentro da banda de passagem
(≅ 4 V p-p)

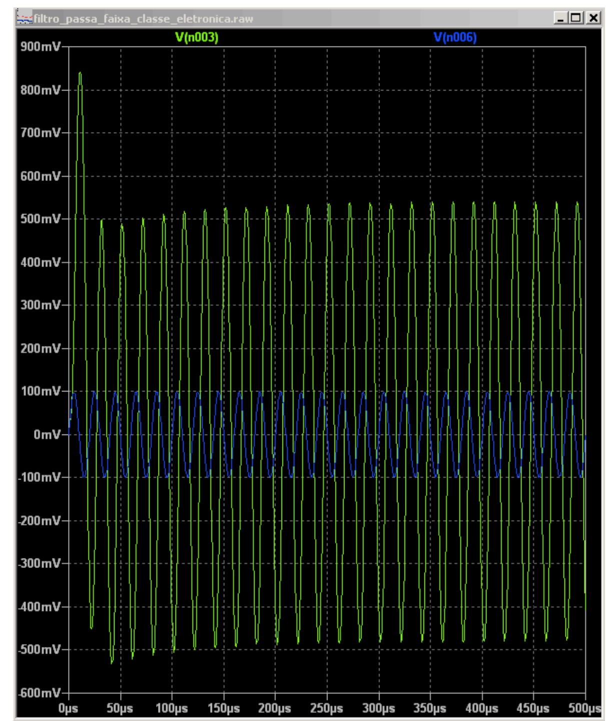


500 Hz (atenuação ≅ -6,30 dB)
Frequência do sinal inferior a da faixa de passagem
(≅ 800 mV p-p)



Ganho= 7dB

50 KHz (atenuação ≅ -7dB)
Frequência do sinal superior a da faixa de passagem
(≅ 1 V p-p)



Soluções GrecO

Filtros Butterworth

- Os filtros Butterworth de ordem mais alta são obtidos em cascata por filtros Butterworth de primeira e segunda ordem:

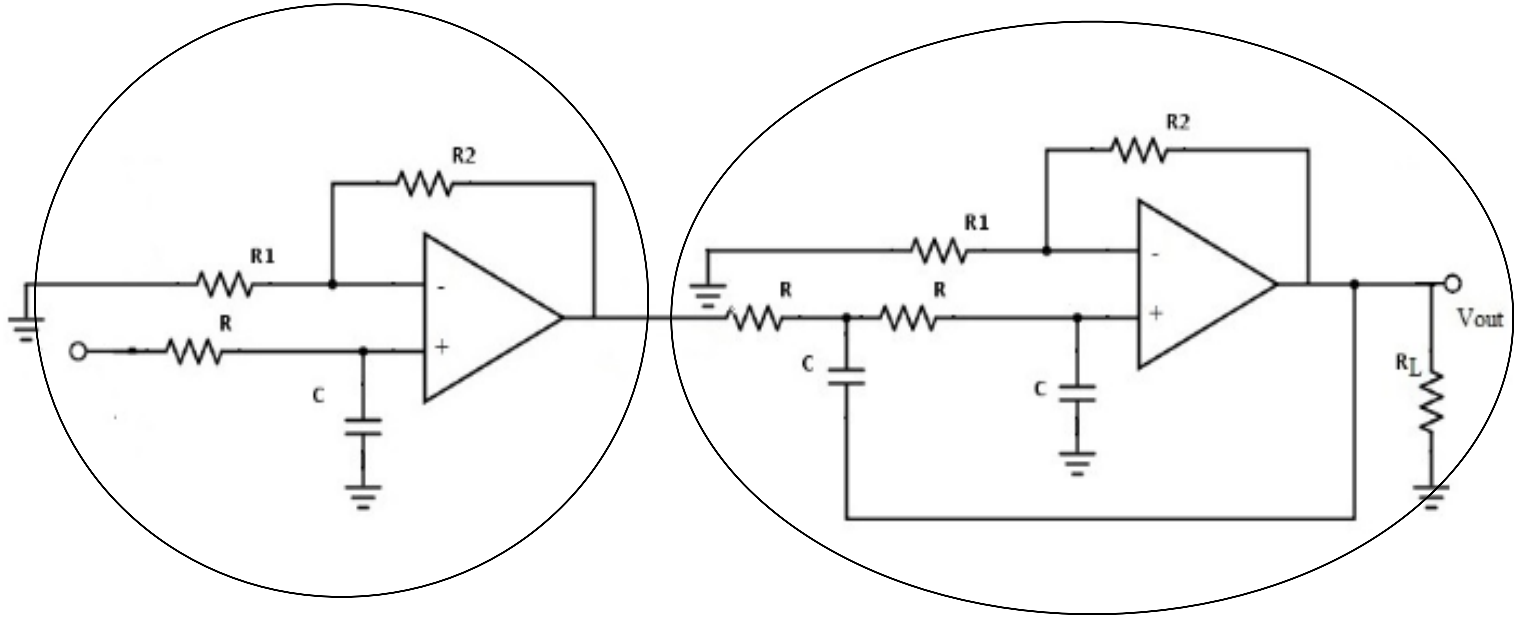
Primeira ordem	Primeira ordem a_1		
Segunda ordem	Segunda ordem a_1, b_1		
Teceira ordem	Primeira ordem a_1	Segunda ordem a_2, b_2	
Quarta ordem	Segunda ordem a_1, b_1	Segunda ordem a_2, b_2	
Quinta ordem	Primeira ordem a_1	Segunda ordem a_2, b_2	Segunda ordem a_3, b_3
Sexta ordem	Segunda ordem a_1, b_1	Segunda ordem a_2, b_2	Segunda ordem a_3, b_3

- Onde a_n e b_n são coeficientes de filtro pré-determinados e estes são usados para gerar as funções de transferência necessárias.

Filtro passa baixa Butterworth de Terceira ordem

Filtro de primeira ordem

Filtro de segunda ordem



Filtros

- Referências:
  - Sedra, Smith, 5a. Edição, 2007.
  - Clube da Eletrônica, Clodoaldo Silva, Amplificadores operacionais como filtros, rev. 2007