



# Resposta em frequência de circuitos RC e RLC

## Experiência 6

Prof. Dr. Laisa Costa De Biase | Prof. Dr. Elisabete Galeazzo

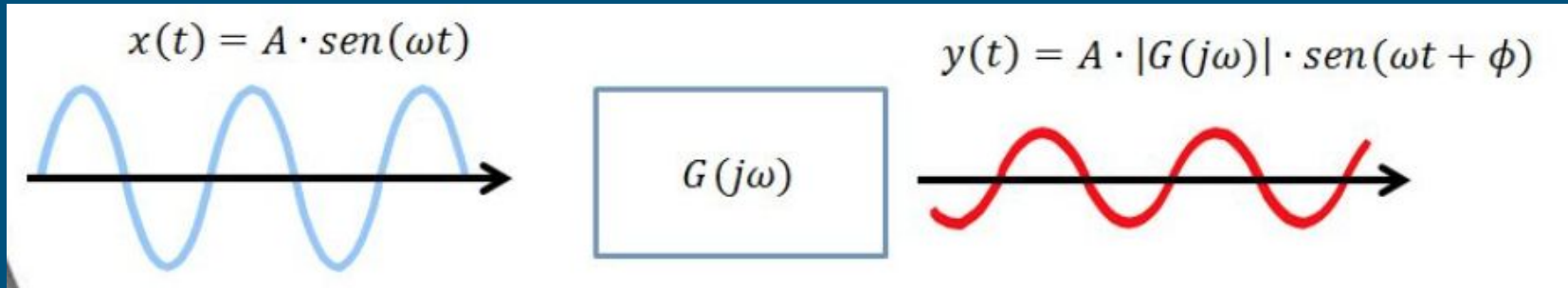


# Objetivo da experiência

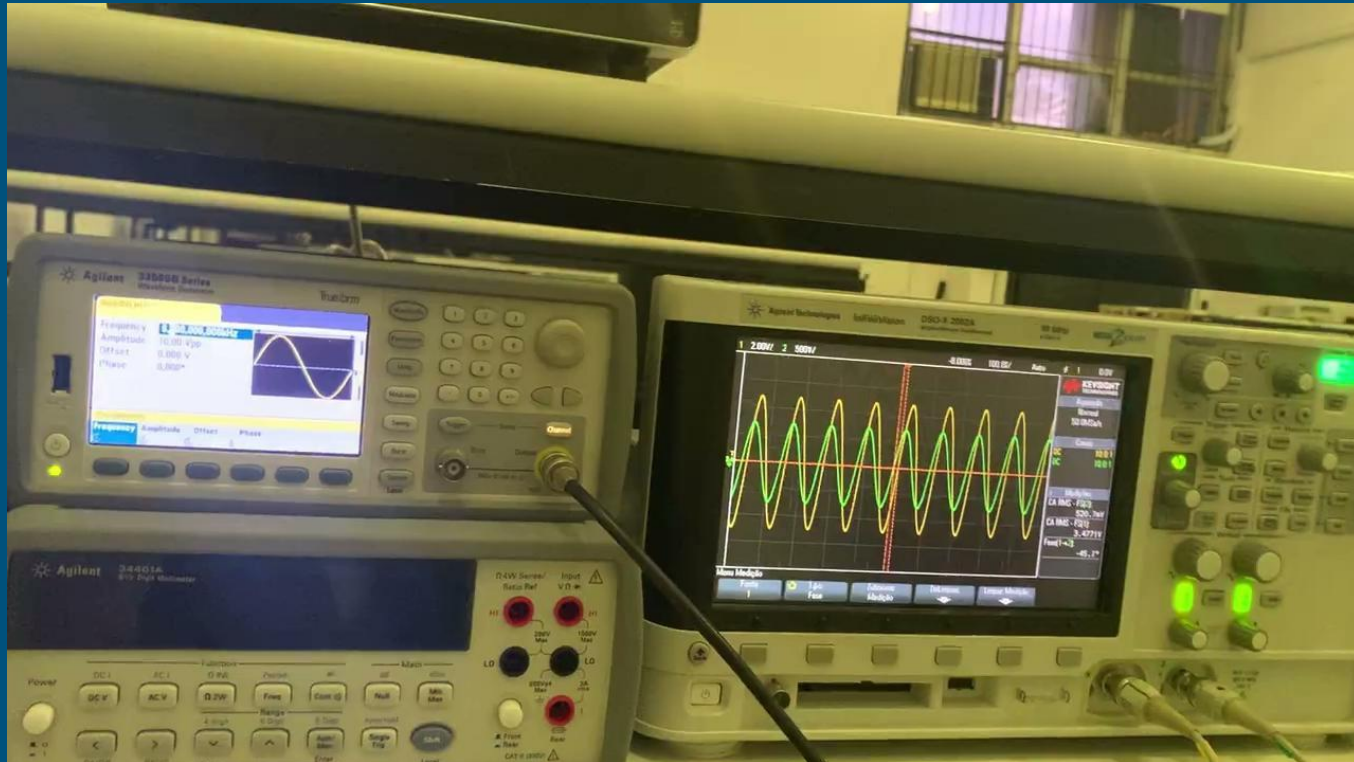
---

- Aprender a determinar a resposta em frequência de circuitos RC e RLC;
- Aprender a caracterizar a resposta em frequência de circuitos RC e RLC.

# Resposta em frequência

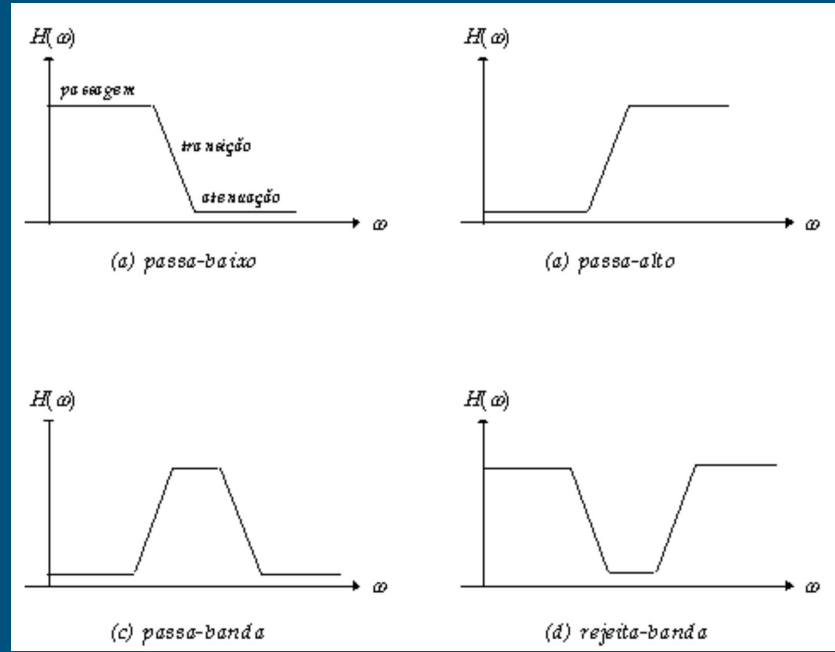


# Resposta em frequência

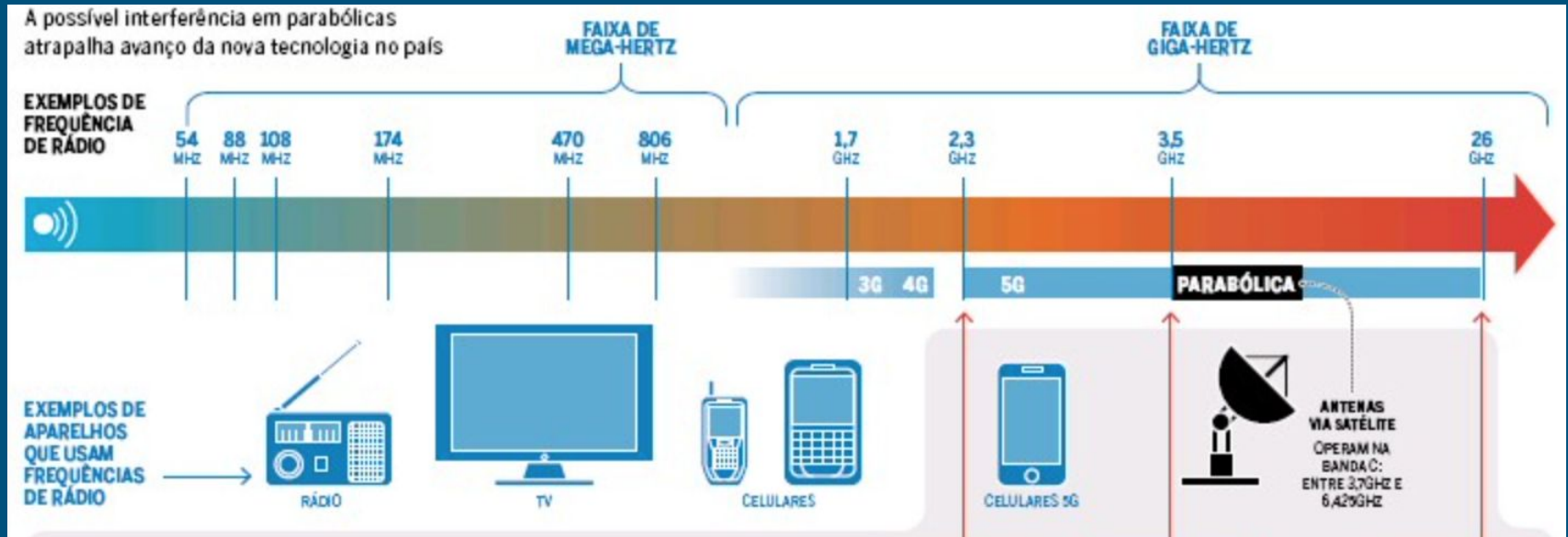


# Filtros

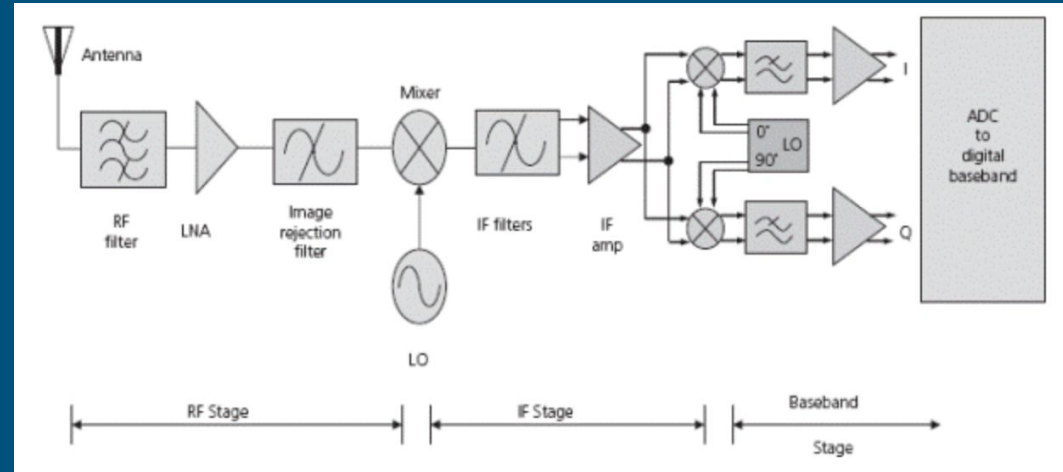
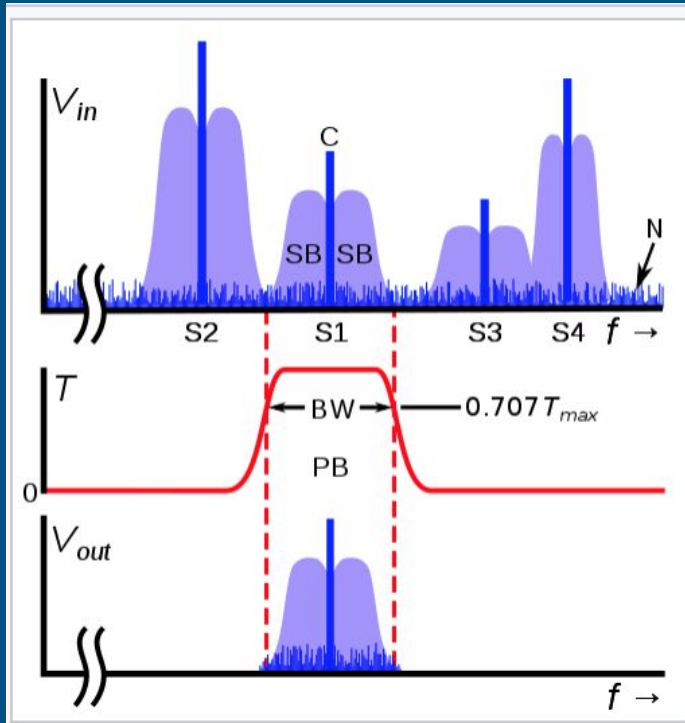
Realizam o tratamento de sinais por diminuição de ruídos, restauração de distorções, ou seleção de frequências.



# Exemplo de aplicação de filtro: Seleção de estação de rádio



# Exemplo de filtro: Seleção de estação de rádio



# Exemplo de aplicação de filtro: Distribuição de som em falantes

Som agudo de frequência  $f_1$



Som grave de frequência  $f_2$



$$f_1 > f_2$$





# Exemplo de aplicação de filtro: Distribuição de som em falantes

**SOM DE CINEMA**  
O sistema básico para se obter um áudio de alta fidelidade inclui ao menos sete componentes



**1** MIDBASS  
(alto-falante para frequências sonoras médias e baixas)

**2** TWEETER  
(frequências altas)

**3** DIVISOR DE FREQUÊNCIA

**4** ALTO-FALANTE COM MIDBASS E TWEETER INTEGRADOS

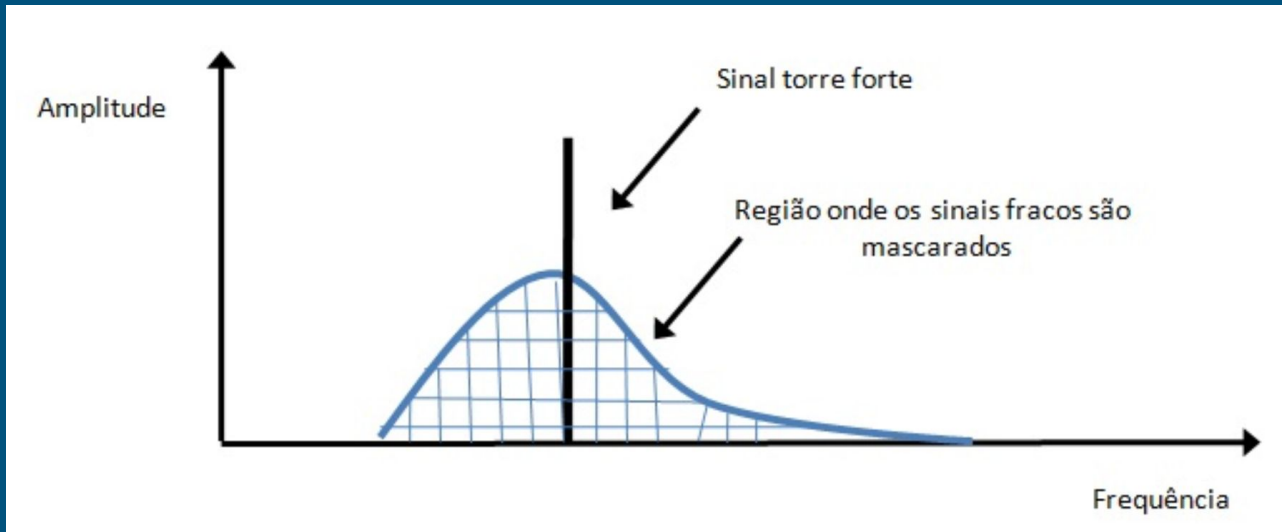
**5** SUBWOOFER  
(reforço para os graves)

**6** AMPLIFICADOR

**7** APARELHO DE SOM

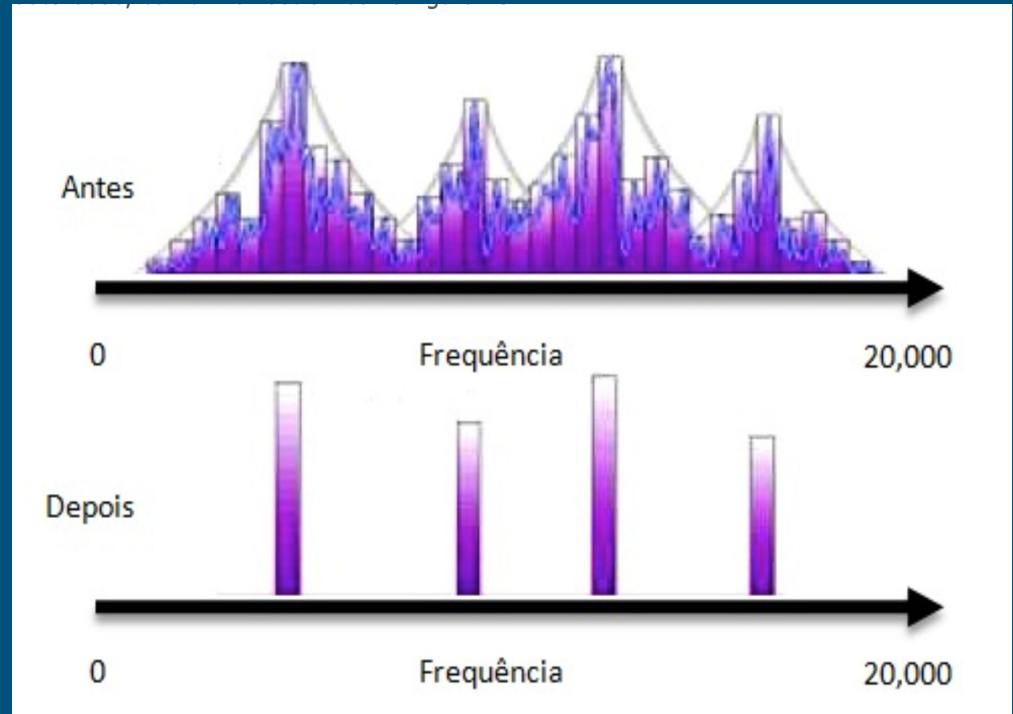
# Exemplo de filtro: Compressão de áudio

O padrão MPEG baseia-se no fenômeno de mascaramento de sinais fracos pelo ouvido humano para compressão de arquivos de áudio



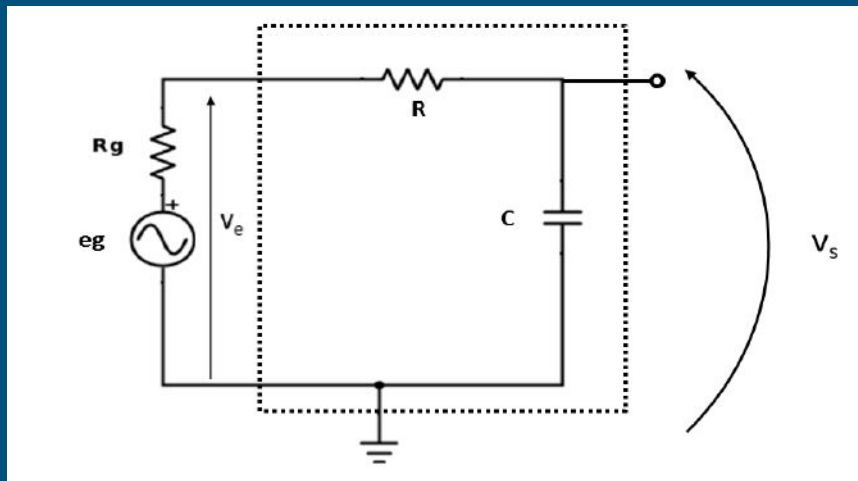
# Exemplo de filtro: Compressão de áudio

Transformada de Fourier e  
aplicação de filtro passa banda

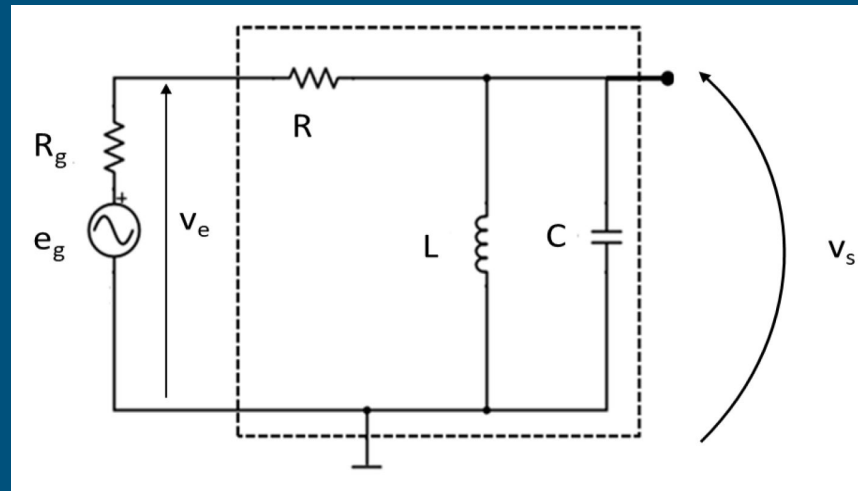


# Circuitos a serem estudados

Circuito RC (não ressonante)



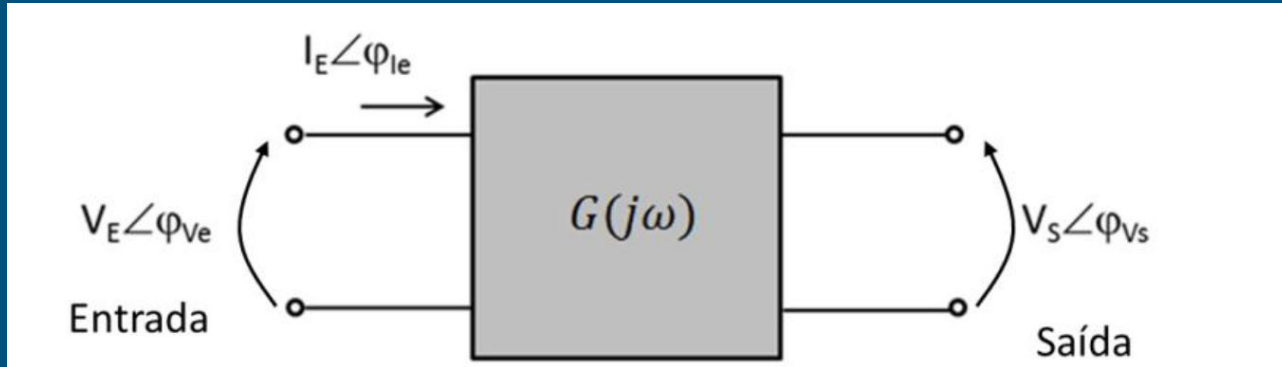
Circuito RLC (ressonante)





# Circuitos a serem estudados

Generalização como um quadropolo

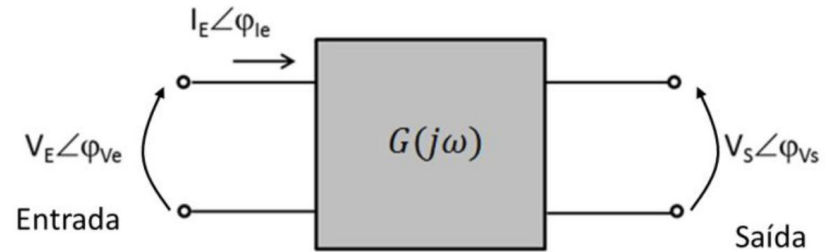




# Resposta em frequência

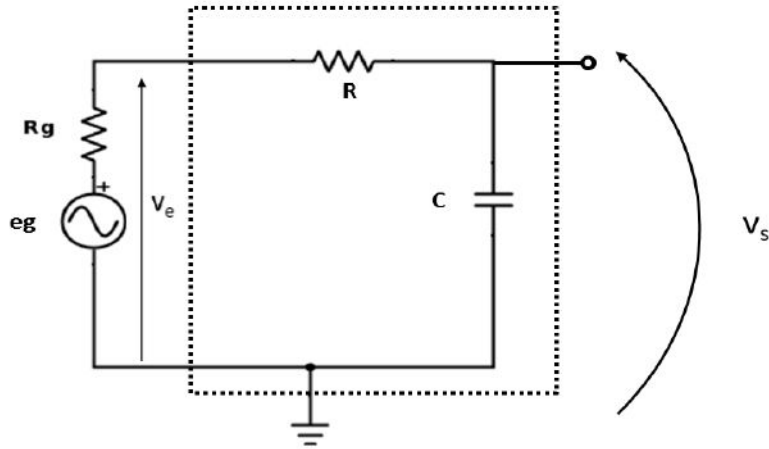
Ganho do circuito x frequência de operação

$$G(j\omega) = \frac{V_S \angle \varphi_{V_S}}{V_E \angle \varphi_{V_e}}$$



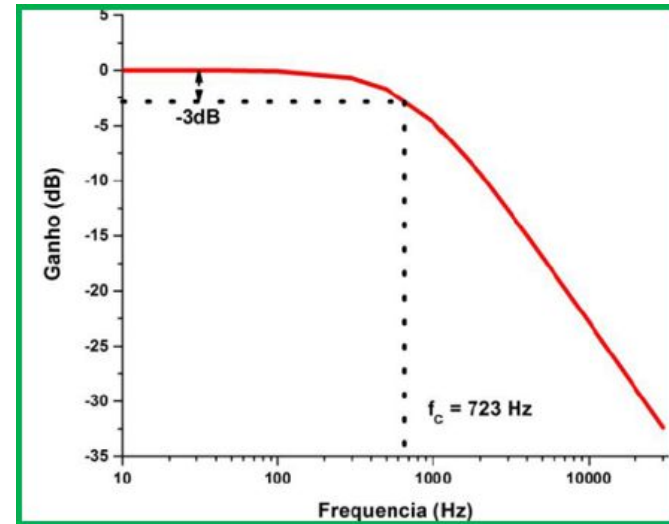
$$G(j\omega) = \left| \frac{V_S}{V_e} \right| \exp(j\varphi) = |G(j\omega)| \exp(j\varphi), \quad \text{onde} \quad \varphi = \varphi_{V_S} - \varphi_{V_e}$$

# Resposta em frequência: Circuito RC

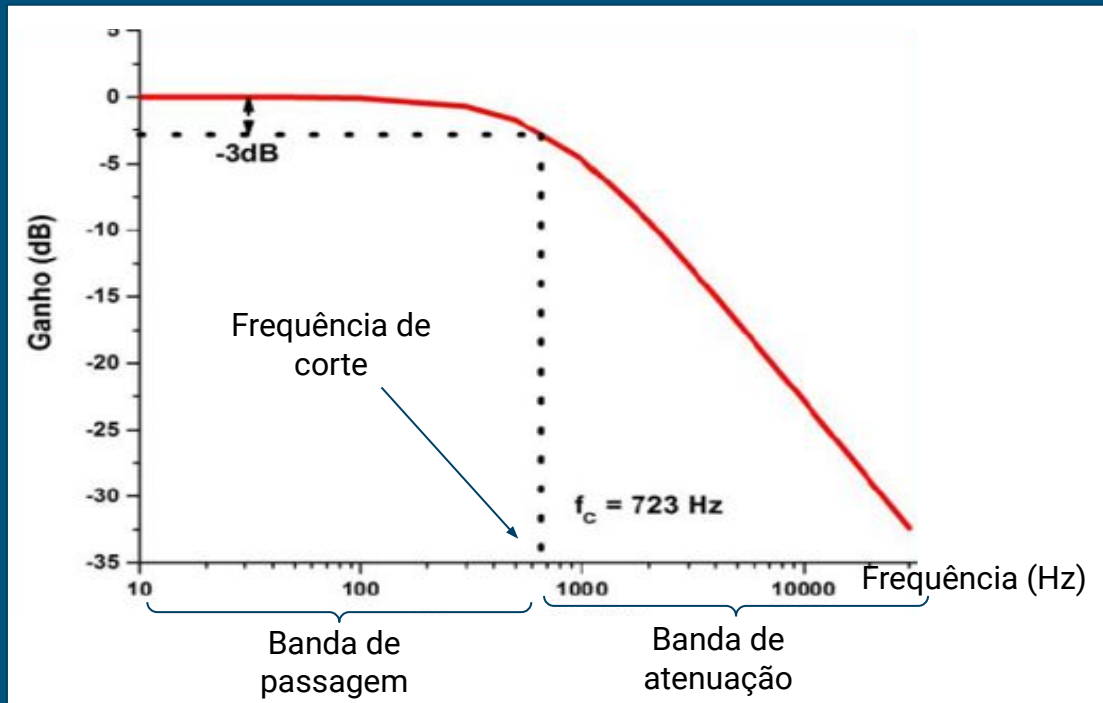


Alta frequências ->  $C \cong \text{curto} \rightarrow V_s=0$   
 Baixas frequências ->  $C \cong \text{aberto} \rightarrow V_s=V_e$

$$G(j\omega) = \frac{V_S \angle \varphi_{V_S}}{V_E \angle \varphi_{V_E}}$$



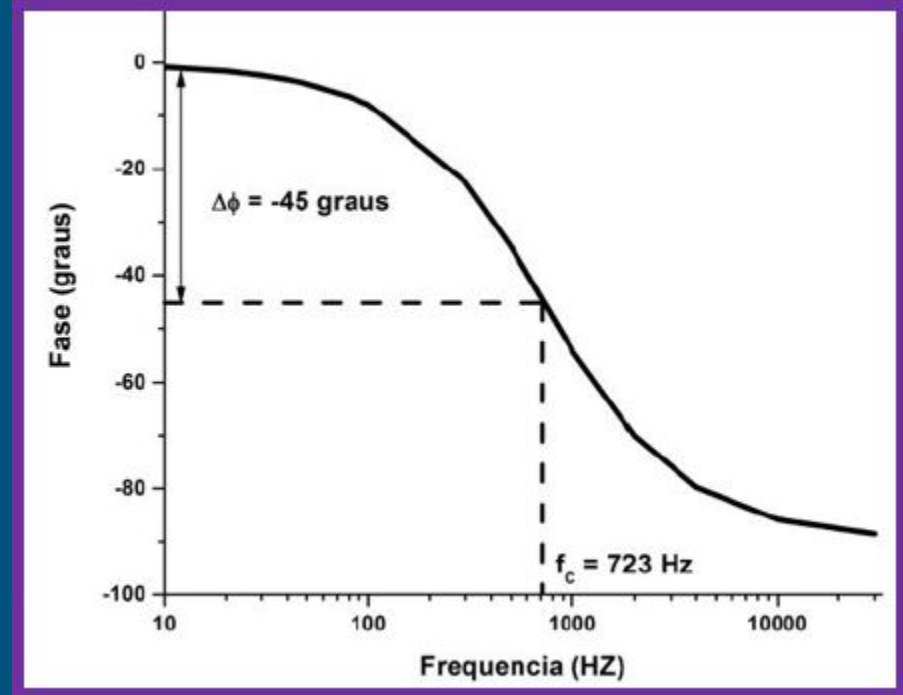
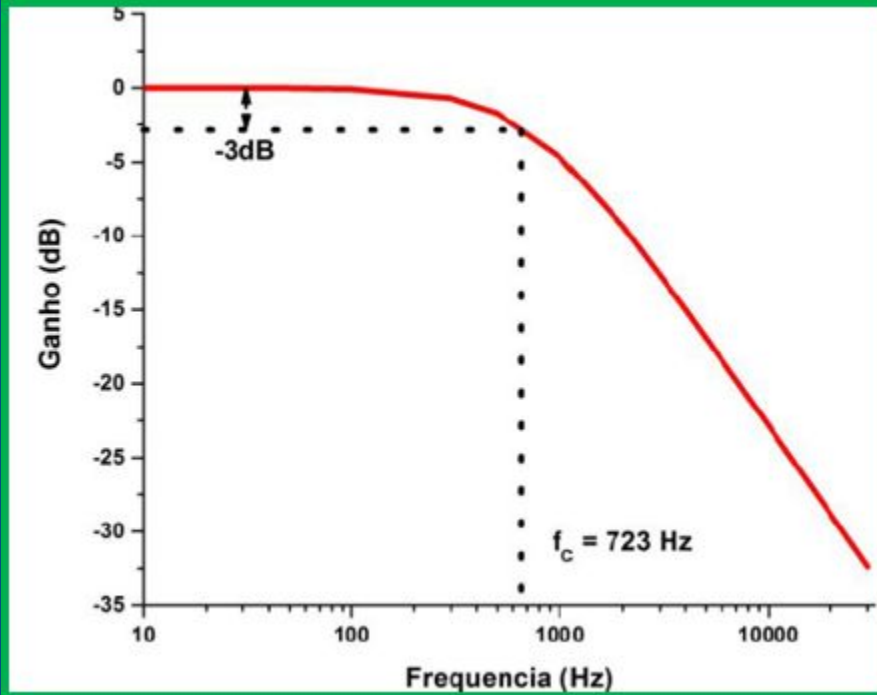
# Caracterização: sistemas não ressonantes



- Frequência de corte
- Banda de passagem
- Banda de atenuação

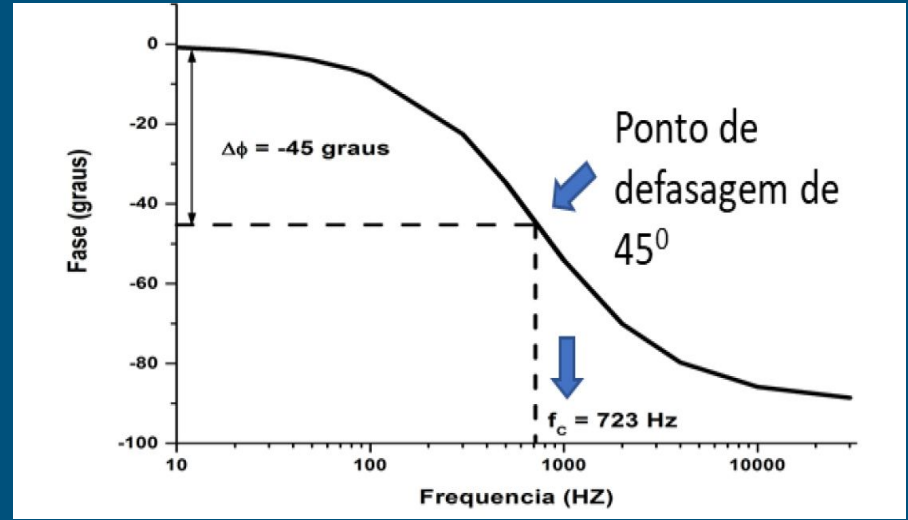
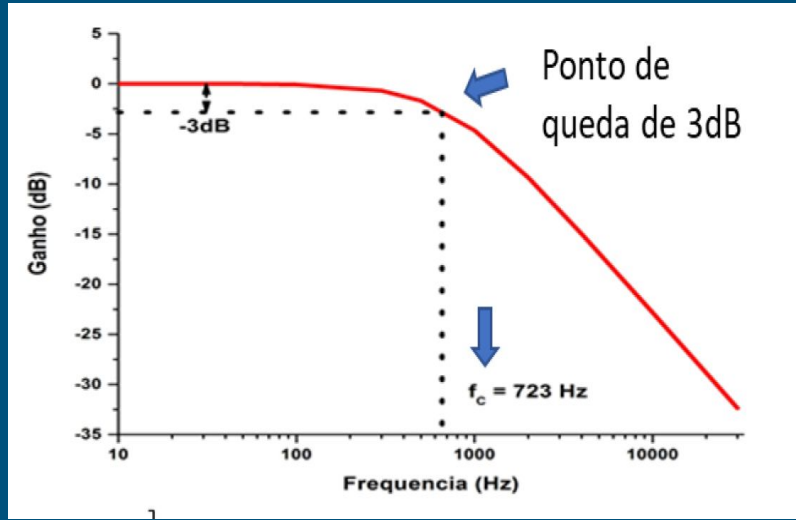


# Resposta em frequência: Circuito RC

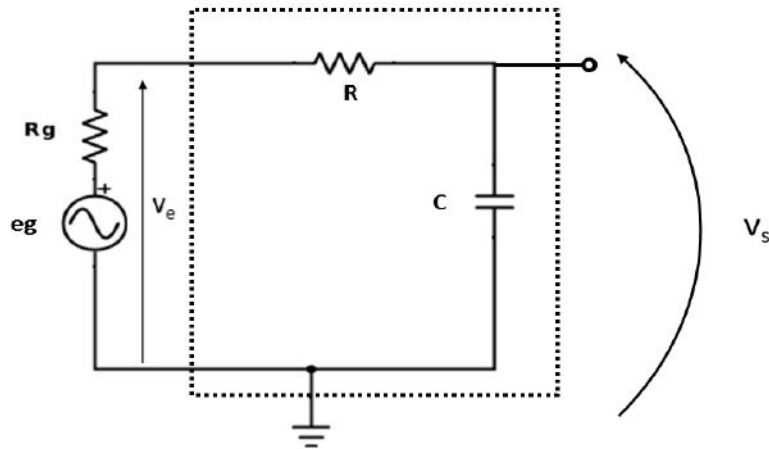


# Caracterização: sistemas não ressonantes

## Frequência de corte e Banda de passagem



# Resposta em frequência: Ganho do Circuito RC



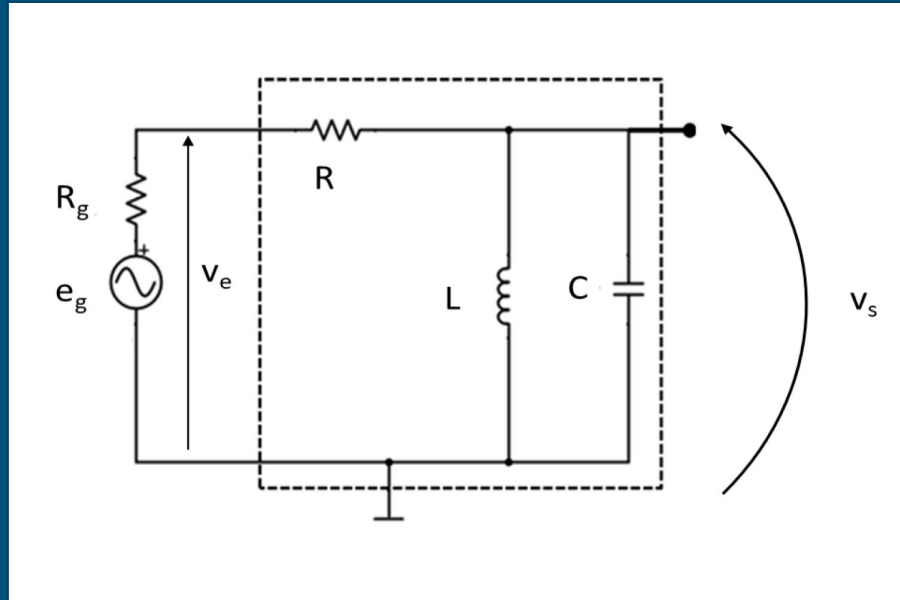
$$G(j\omega) = \frac{Z_C}{Z_C + R} = \frac{1}{1 + \omega RCj}$$

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}}$$

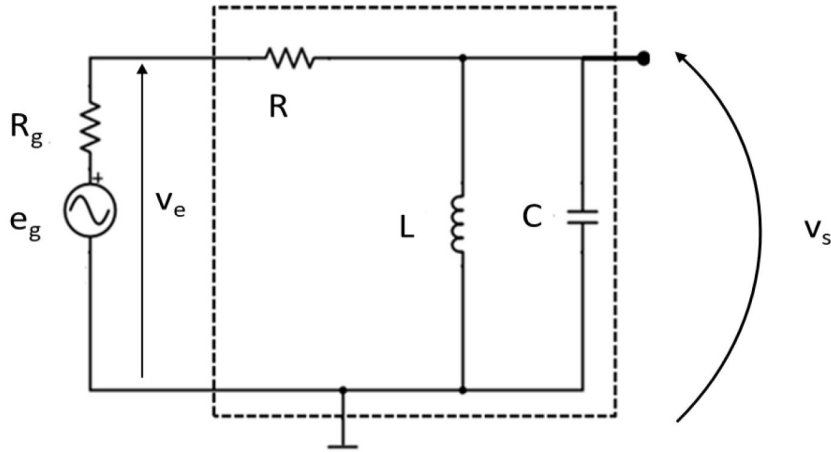
$$\varphi = -\text{artan}(\omega RC)$$

$$\omega_c = 1/RC$$

# Resposta em frequência: Circuito RLC



# Resposta em frequência: Circuito RLC



$$G(j\omega) = \frac{V_S \angle \phi_{V_S}}{V_E \angle \phi_{V_E}}$$

Alta frequências ->

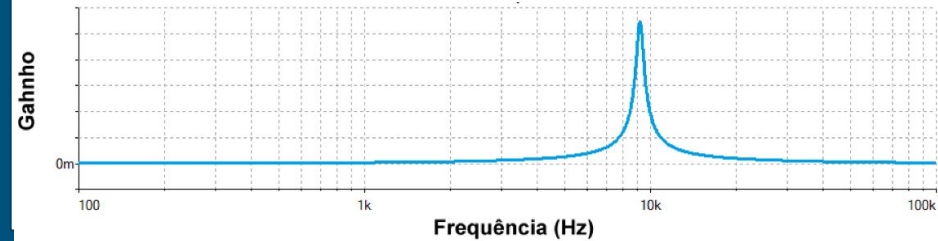
C curto  
L aberto

}  $V_S=0 \rightarrow |G|=0$

Baixas frequências ->

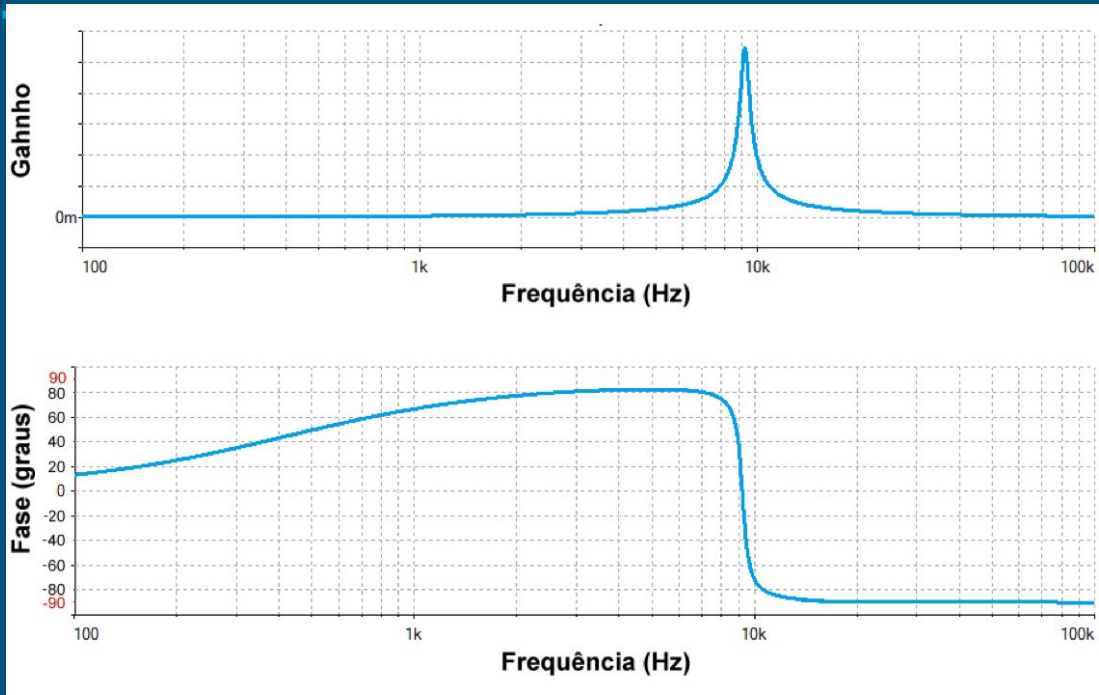
C aberto  
L curto

}  $V_S=0 \rightarrow |G|=0$





# Resposta em frequência: Circuito RLC -> ressonante

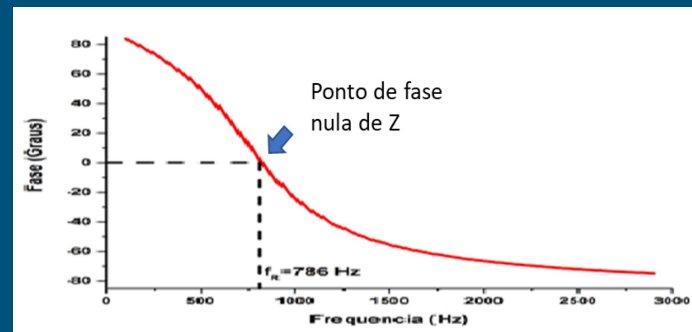
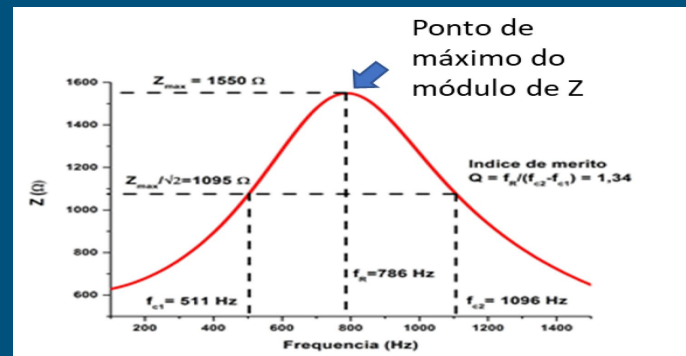


Circuitos ressonantes respondem com maior intensidade em determinada frequência.

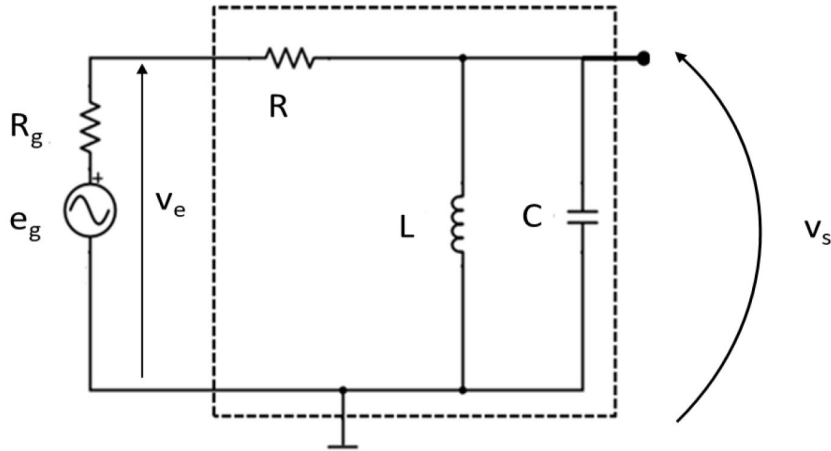
# Resposta em frequência: Caracterização de circuitos ressonantes

- Frequência de ressonância ( $f_R$ )
  - função de transferência assume seu valor máximo
  - fase da função de transferência é igual a zero.
- Frequência de corte inferior ( $f_{c1}$ ) e superior ( $f_{c2}$ )
  - módulo com queda de 3 dB (ou  $|G(j\omega)|/\sqrt{2}$ , ou  $Z_{max}/\sqrt{2}$ )
- Índice de mérito ou fator de qualidade (Q)

$$Q = \frac{f_R}{f_{c2} - f_{c1}}$$



# Resposta em frequência: Circuito RLC ideal



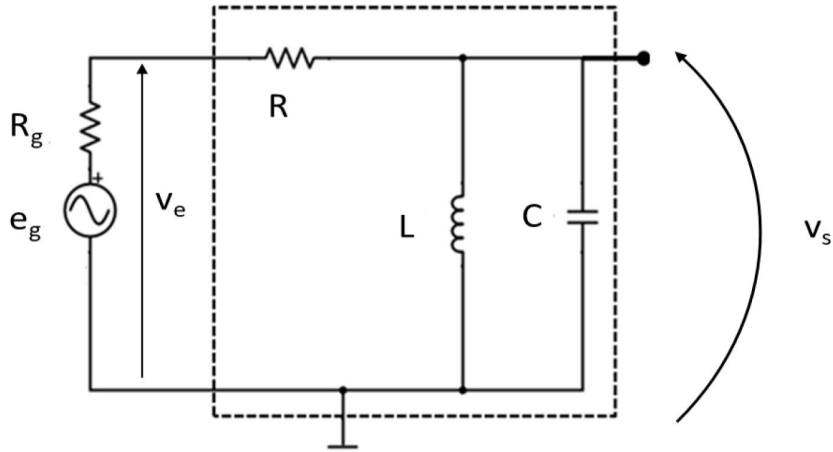
$$G(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{R}{\omega L} \left( \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right) j} \quad \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

$$|G(j\omega)| = \left[ \frac{1}{1 + \left( \frac{R}{\omega L} \right)^2 \left( 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right)^2} \right]^{1/2}$$

$$\varphi = \text{artan} \left[ \frac{R}{\omega L} \left( 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \right]$$



# Resposta em frequência: Circuito RLC com resistência parasitária



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

$$G(j\omega) = \frac{R_S + \omega L j}{R_S + R \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) + (\omega L + \omega R R_S C) j}$$

$$|G(j\omega)| = \left[ \frac{1 + \left(\frac{R_S}{\omega L}\right)^2}{1 + \left(\frac{R_S}{\omega L}\right)^2 \left(1 + \frac{2R}{R_S} + (\omega RC)^2\right) + \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2 \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2} \right]^{1/2}$$

$$\varphi = \text{artan} \left[ \frac{R}{\omega L} \left( \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \left(1 + \frac{R_S^2}{\omega^2 L^2}\right)}{1 + \frac{R_S(R_S + R)}{\omega^2 L^2}} \right) \right]$$



# Experiência

---



# Itens experimentais

1. Identificação e medição dos componentes
2. Resposta em frequência do circuito RC
3. Resposta em frequência de um circuito RLC paralelo
4. Análise com a função Sweep do gerador de funções
5. Resposta em frequência de voltímetros CA (opcional)



# Identificação e medição dos componentes

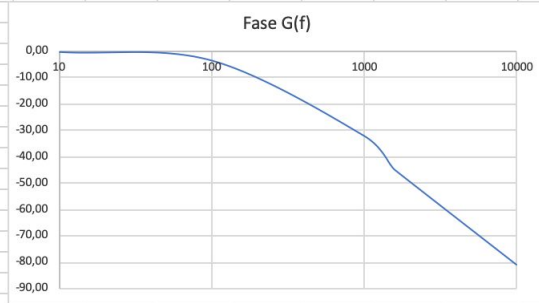
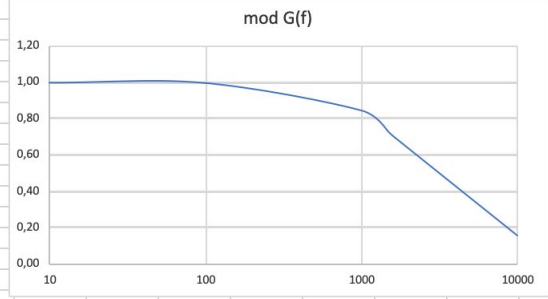
## Medidor RLC

- Dois tipos no laboratório (trocar de bancadas)
- Importância da calibração
- Calibrar conforme folha de instruções



# Levantamento da curva teórica de resposta em frequência do circuito RC: Tabela Excel

R	C[nF]	wc	fc [Hz]
1000	1,00E-07	1,00E+04	1591,549431
f	mod G(f)	mod G(f) dB	Fase G(f)
10	1,00	0,00	-0,36
100	1,00	-0,02	-3,60
1000	0,85	-1,45	-32,14
1500	0,73	-2,76	-43,30
1600	0,71	-3,03	-45,15
10000	0,16	-16,07	-80,96
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00
	1,00	0,00	0,00





# Levantamento da curva teórica de resposta em frequência do circuito RC: Tabela Excel

C[nF]	wc	fc [Hz]
10	1,00E-07	1,00E+04
1591,549431		

f	mod G(f)	mod G(f) dB	Fase G(f)
10	1,00	0,00	-0,36
100	1,00	-0,02	-3,60
1000	0,85	-1,45	-32,14
1500	0,73	-2,76	-43,30
1600	0,71	-3,03	-45,15
10000	0,16	-16,07	-80,96

Valores simulados				Cálculos a partir das tensões simuladas	Dados do item 1, <i>Preparação</i>	
				Resultado dos cálculos teóricos a partir dos parâmetros do circuito		
f (Hz)	$V_E$ (CA $V_{RMS}$ )	$V_S$ (CA $V_{RMS}$ )	Fase $\theta_{S \rightarrow E}$ $\varphi_{V_S, V_E}$ (°)	Ganho  G(f)	G(f)	Fase $\varphi$
10						
100						
1 k						
1,5 k						
1,6 k						
10 k						



# Preenchimento da Tabela 1: Levantamento da curva de resposta em frequência do circuito RC

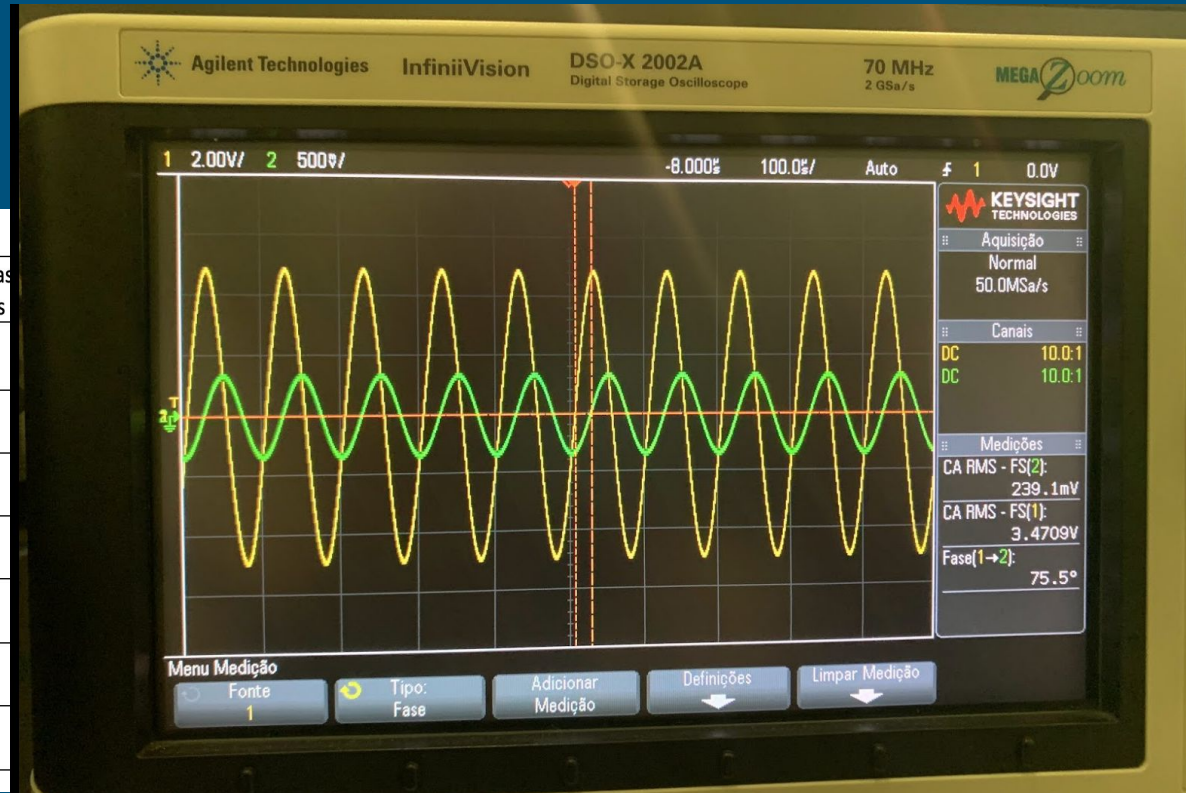
Valores simulados				Cálculos a partir das tensões simuladas	Dados do item 1, <i>Preparação</i>	
f (Hz)	$V_E$ (CA $V_{RMS}$ )	$V_S$ (CA $V_{RMS}$ )	Fase $\theta_{S \rightarrow E}$ $\varphi_{V_S, V_E}$ ( $^\circ$ )	Ganho $ G(f) $	$ G(f) $	Fase $\varphi$
10						
100						



# Preenchimento da Tabela 1:

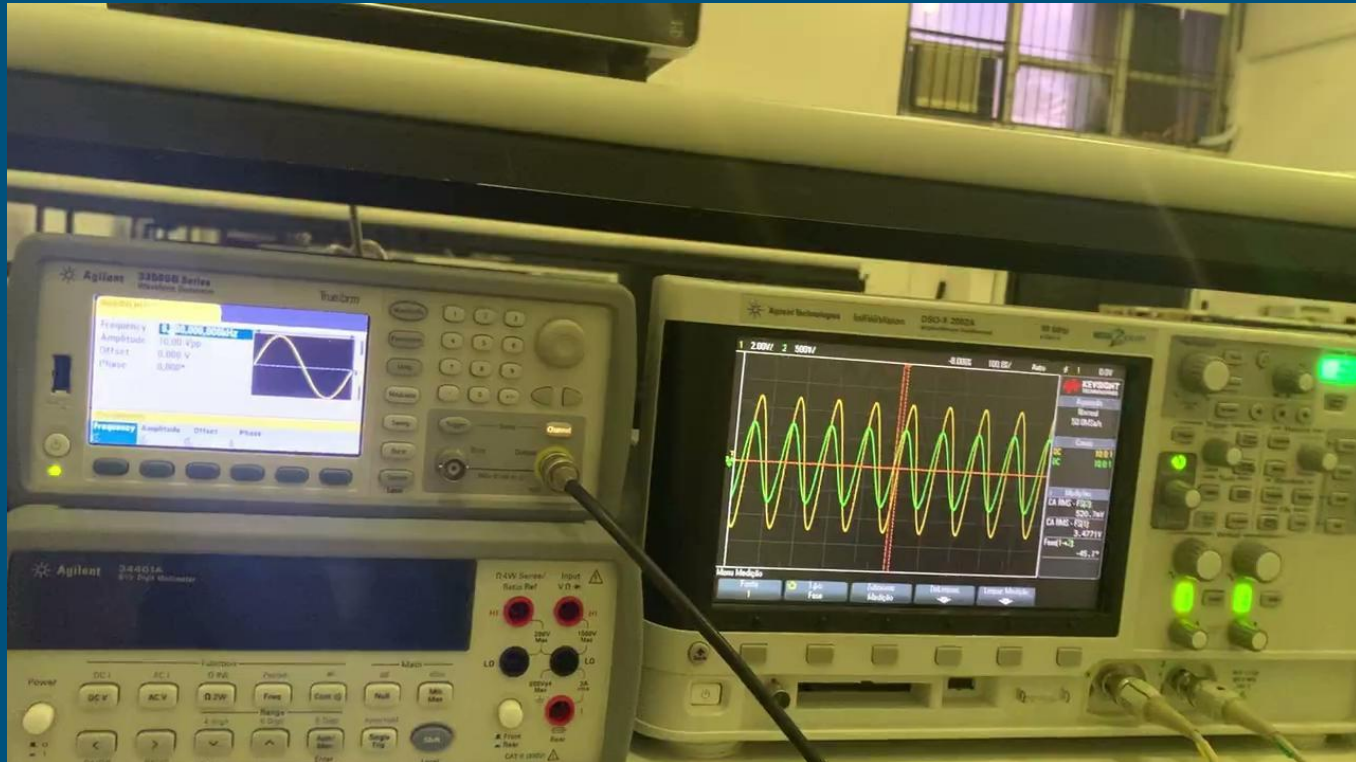
$$|G(j\omega)| = V_s/V_e$$

Valores simulados				Cálculos a partir das tensões simuladas
f (Hz)	$V_E$ (CA $V_{RMS}$ )	$V_S$ (CA $V_{RMS}$ )	Fase $\theta_{S \rightarrow E}$ $\varphi_{V_S, V_E}$ (°)	Ganho $ G(f) $
10				
100				
1 k				
1,5 k				
1,6 k				
10 k				

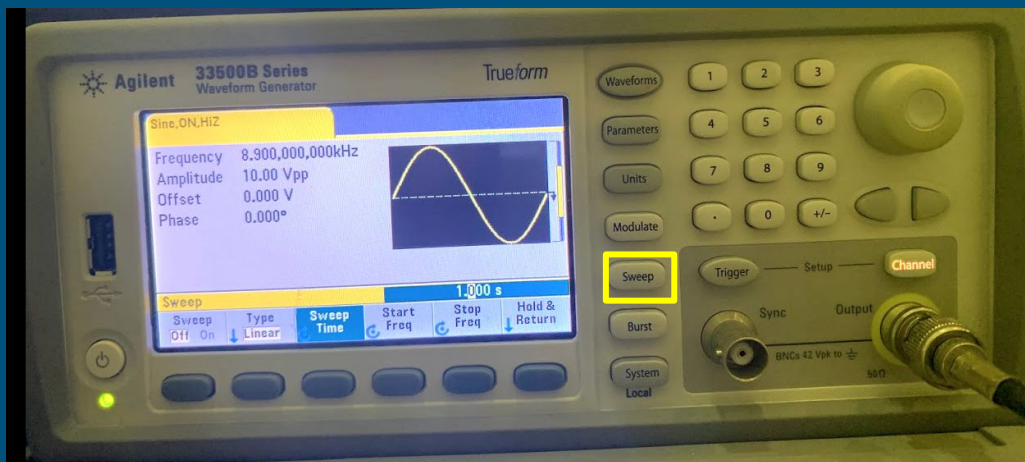




# Resposta em frequência



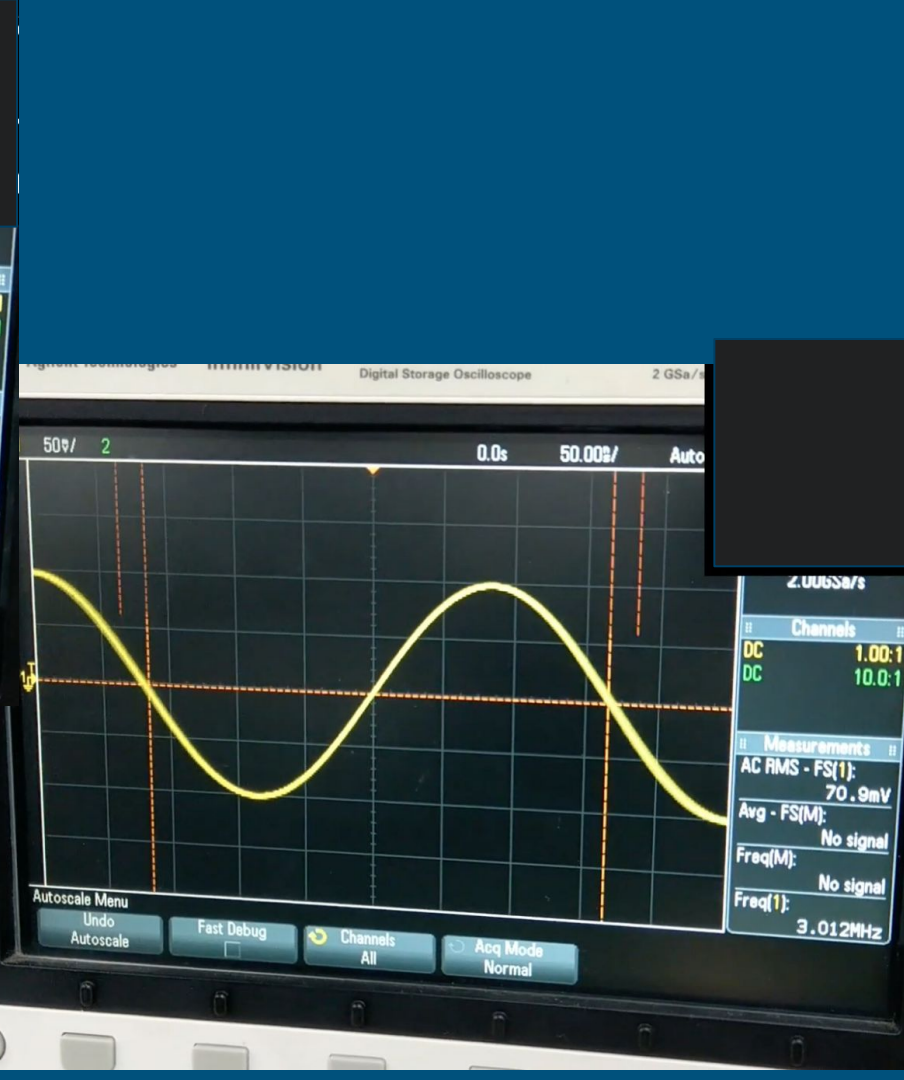
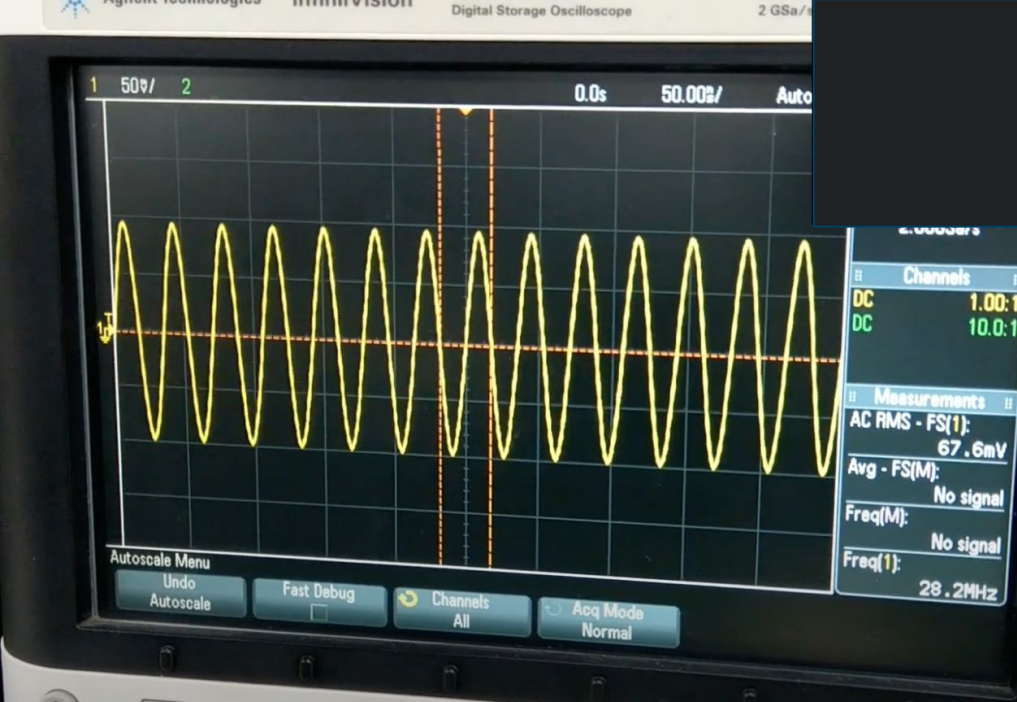
# Função Sweep do Gerador de Funções



Guia experimental:

STARTFREQ = 5 kHz,  
STOPFREQ = 15 kHz,  
SWEEPTIME = 100 ms,  
SWEEP TYPE = linear,  
SWEEP = ON.

10s



## Tensão de entrada no osciloscópio

# Uso da função Sweep

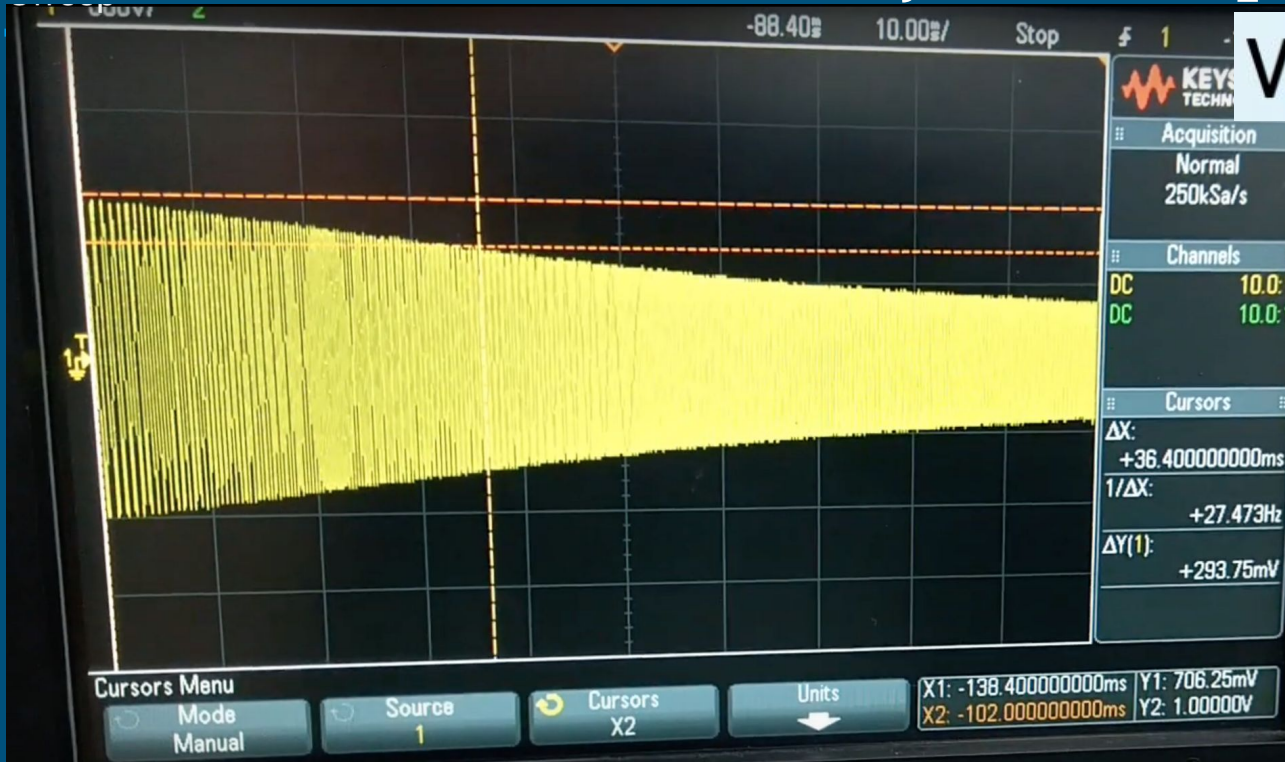
## Configurações do gerador

STARTFREQ = 5 kHz,  
STOPFREQ = 15 kHz,  
SWEEPTIME = 100 ms,  
SWEEP TYPE = linear,  
SWEEP = ON.

Tensão de saída no osciloscópio

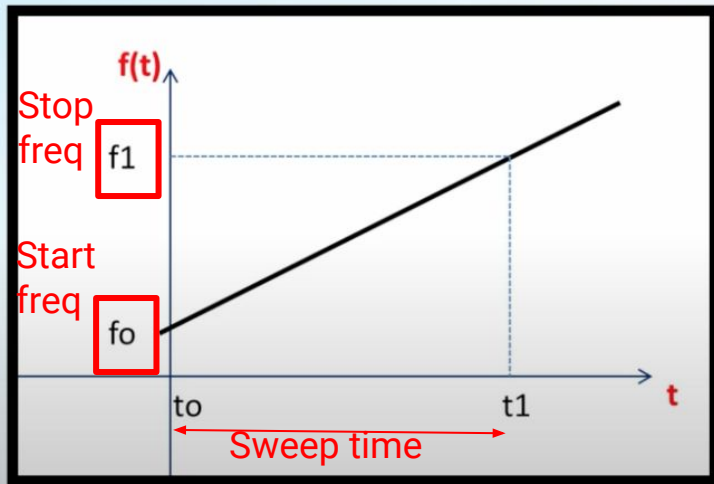


# Uso da função Sweep

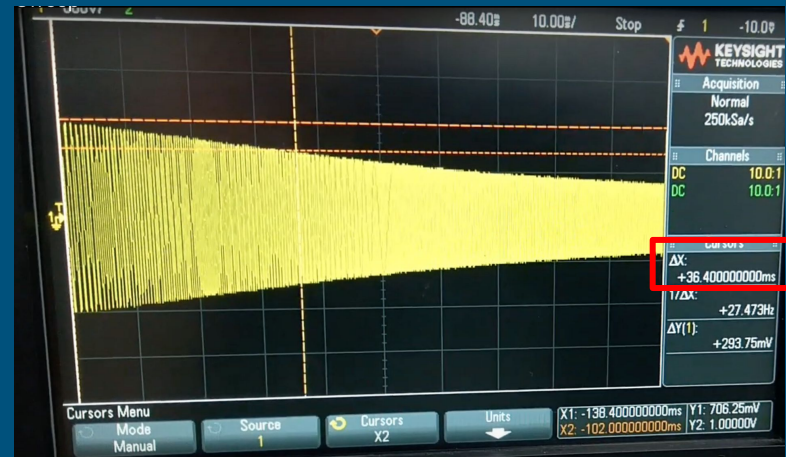


$$V_{out} = V_{in}/\sqrt{2}$$

# Uso da função Sweep

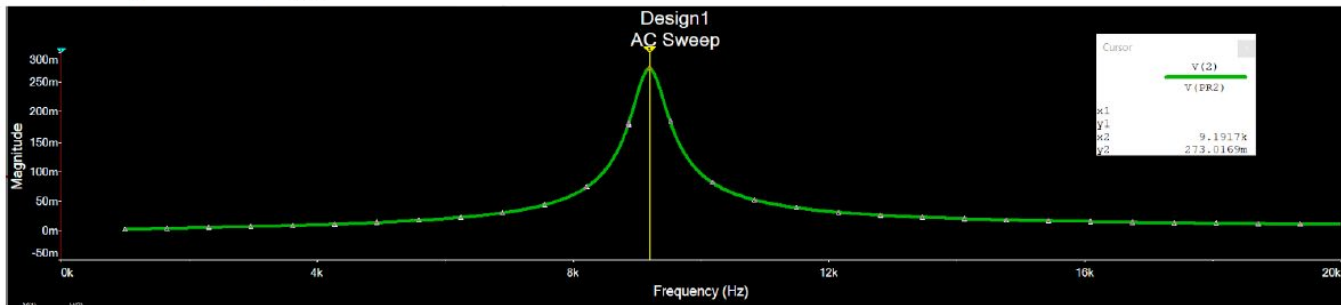


$$f = f_0 + (f_1 - f_0) * (t - t_0) / (t_1 - t_0)$$



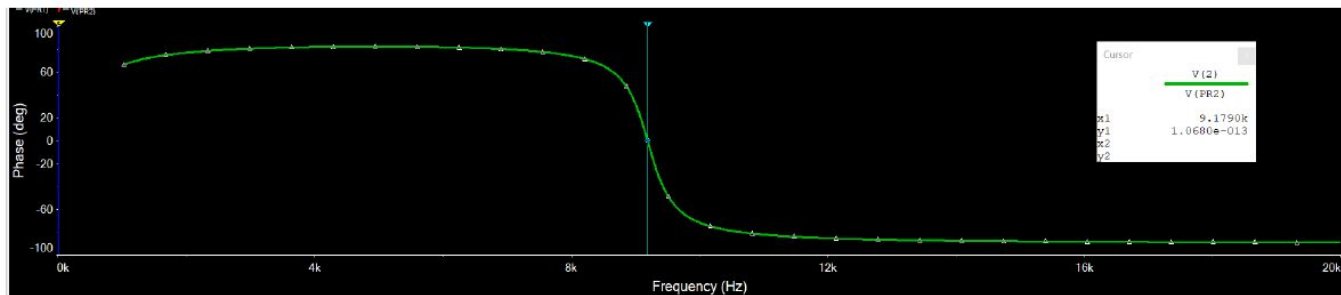
# Função AC Sweep no Multisim

i. O gráfico de  $|G(f)|$ ;



Ganho em escala linear

ii. O gráfico da fase ( $\phi_{VS,VE}$ ) em função da frequência,  $f$ .





# Obrigada!

---