Física Experimental IV – FAP214

Notas de aula: www.fap.if.usp.br/~hbarbosa

LabFlex: www.dfn.if.usp.br/curso/LabFlex

Aula 3, Experiência 1
Circuitos CA e Caos

Prof. Henrique Barbosa
hbarbosa@if.usp.br
Ramal: 6647
Ed. Basílio Jafet, sala 100

TAREFAS SEMANA PASSADA

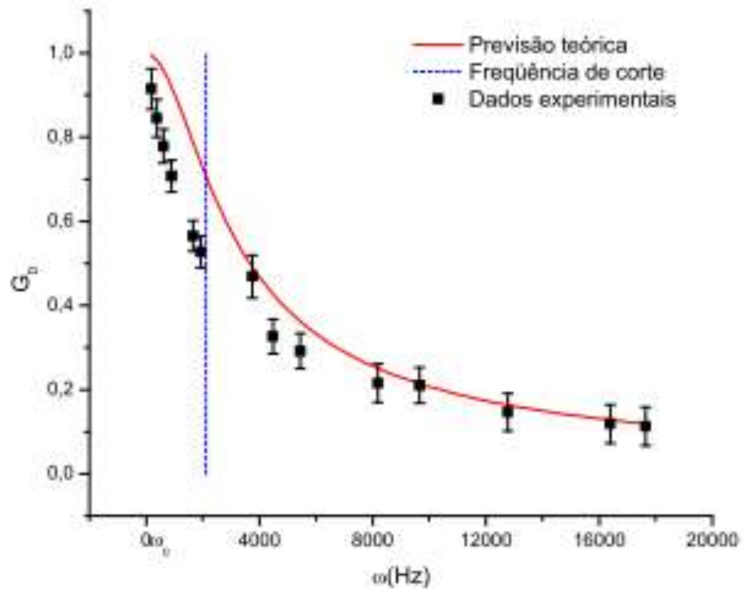
Comparar Medidas e Teoria

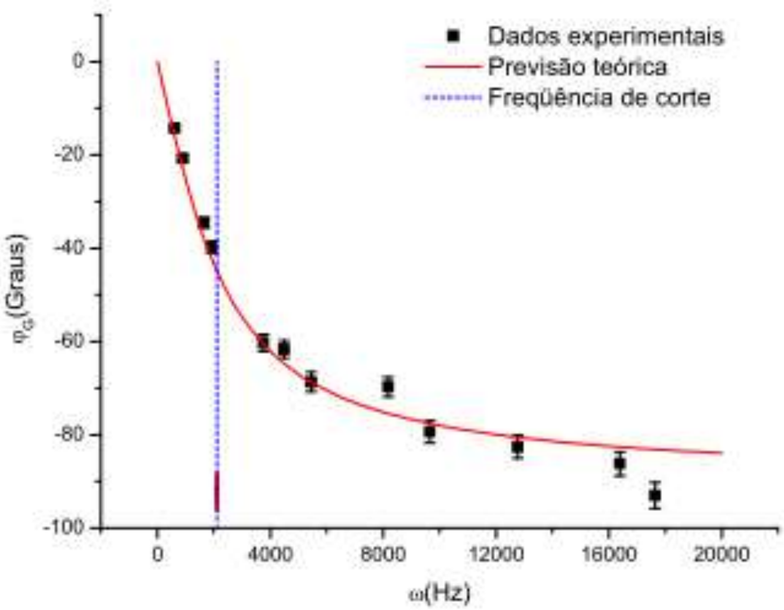
Filtro RC

- Gráfico de G_0 em função de ω
  - Comparar com o esperado teoricamente

O que significa comparar com a teoria ?

Será que uma comparação visual é suficiente ?

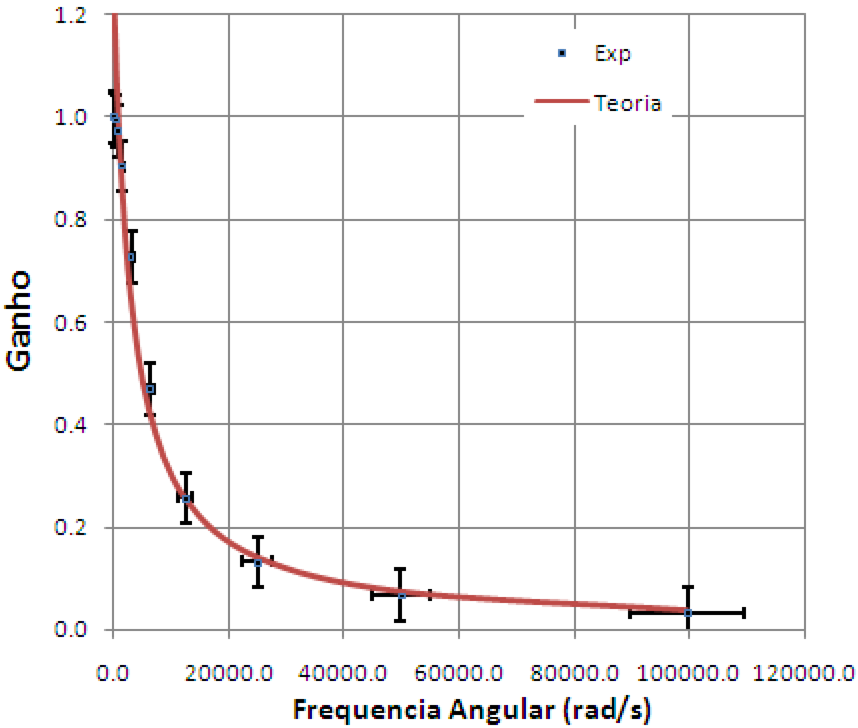


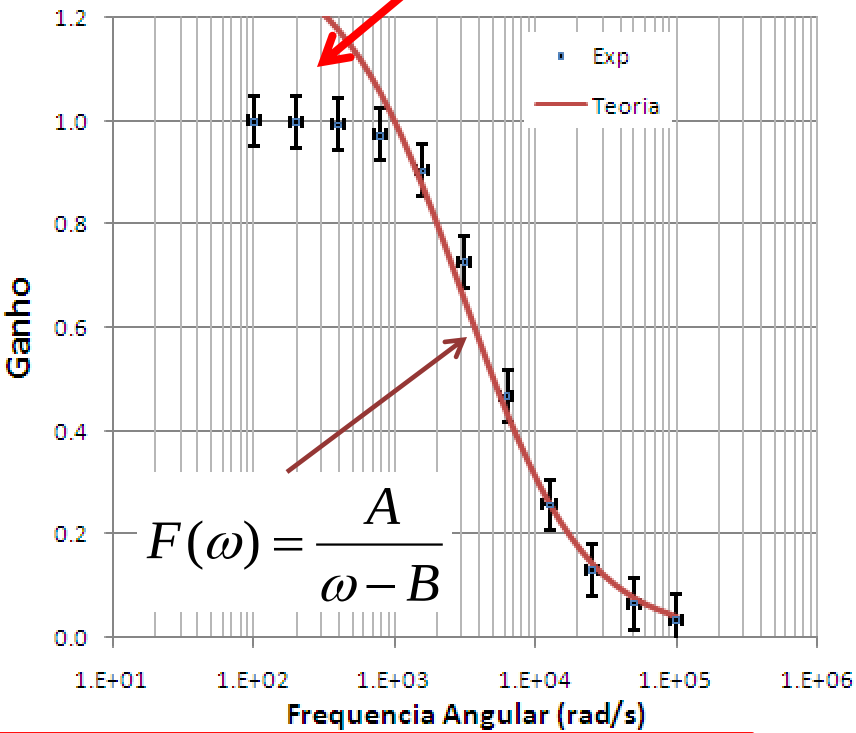


Comparação Visual

- Este ajuste está:
  - Bom ?
  - Muito bom ?
  - Perfeito?

Mesmo gráfico mas na escala apropriada. Completamente errado para baixas freqüências!





Que outros métodos aprendemos nos lab1, 2 e 3 ?

Comparar Medidas e Teoria

- Ajusto os dados à função desejada
  - Comparo o valor experimental de ω_c com aquele esperado teoricamente

$$\omega_c^{exp} \text{ é compatível com } \omega_C = \frac{1}{RC} \quad ??$$

- Para a comparação fazer sentido, o erro em ω_c^{exp} deve ser pequeno. Como assegurar isso?
  - Tomada de dados $\Rightarrow$ Escolher como fazer as medidas
  - Quantos pontos? Em que região medir? Porque?

Mínimos Quadrados

- Neste caso, nossa função só tem M=1 parâmetros:

$$G_0(\omega) = \left(1 + (\omega/\omega_C)^2\right)^{-1/2}$$

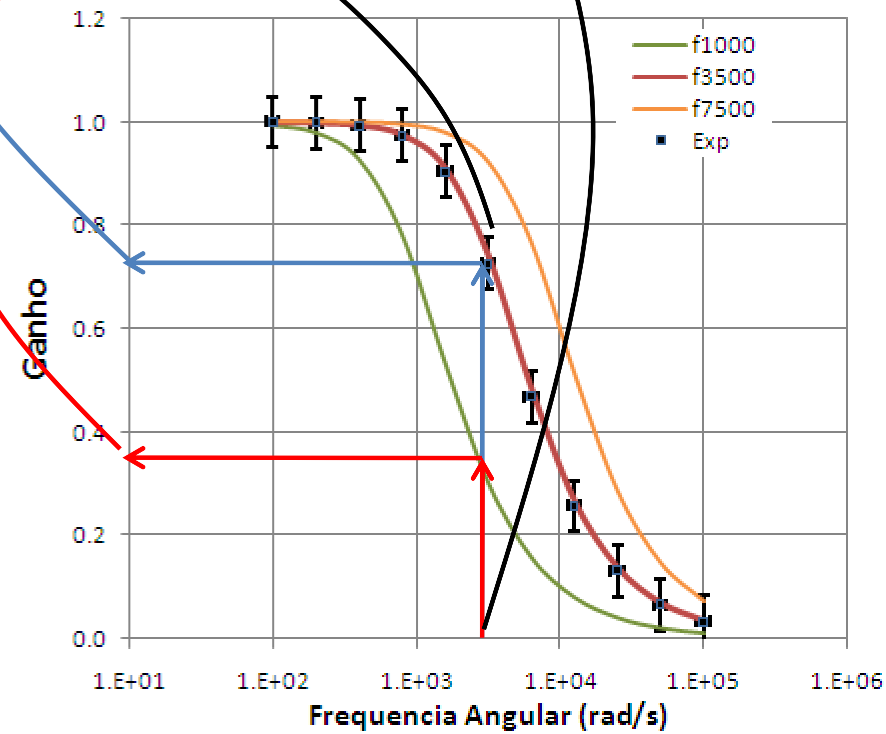
- Portanto o χ^2 também:

$$\chi^2(\omega_c) = \frac{1}{N-M}\sum_{i=1}^{N}\frac{(y_i - f_i(x_i,\omega_c))^2}{\sigma_i^2}$$

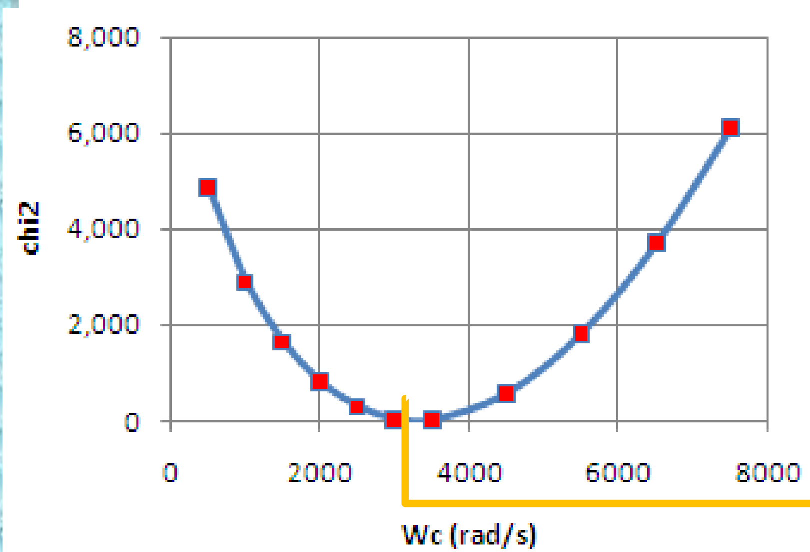
- Além disso, como χ^2 depende dos erros σ_i, ele também é uma variável aleatória. O interessante é que sua média vale 1 e sua variância vale 2.
  - **Os erros precisam ser gaussianos e independentes!**

Analisando X^2

$$\chi^2(\omega_c) = \frac{1}{N-M}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(y_i - f_i(x_i,\omega_c)\right)^2}{\sigma_i^2}$$

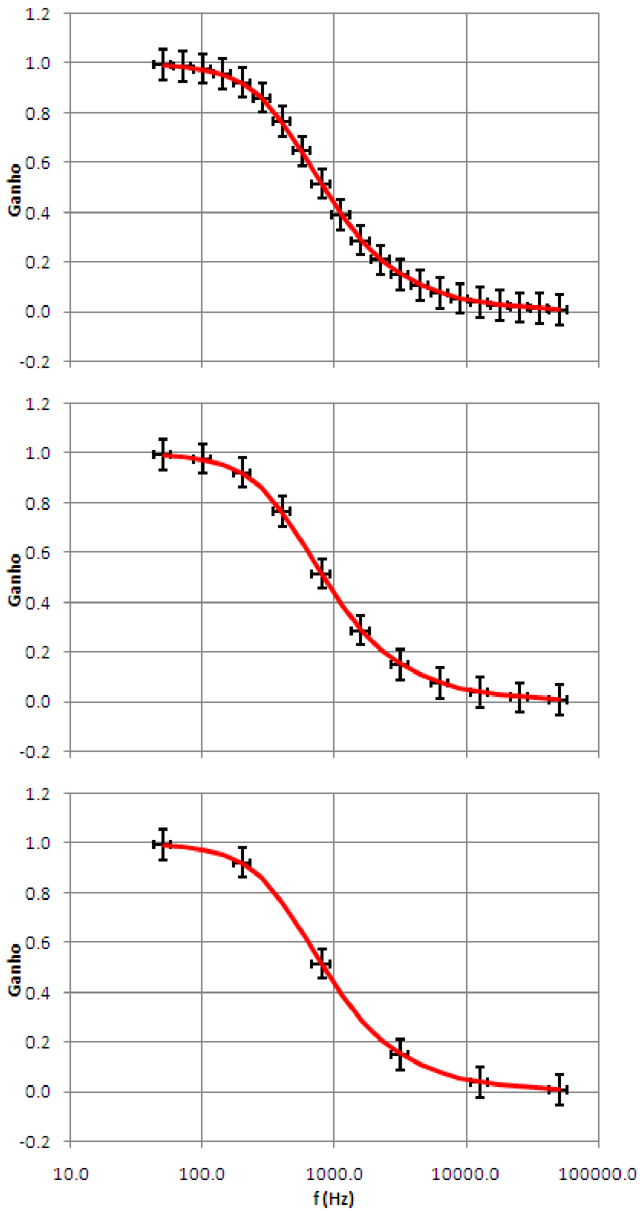


Repetindo o processo para vários valores diferentes de ω_c, podemos construir um gráfico de χ^2 x ω_c.

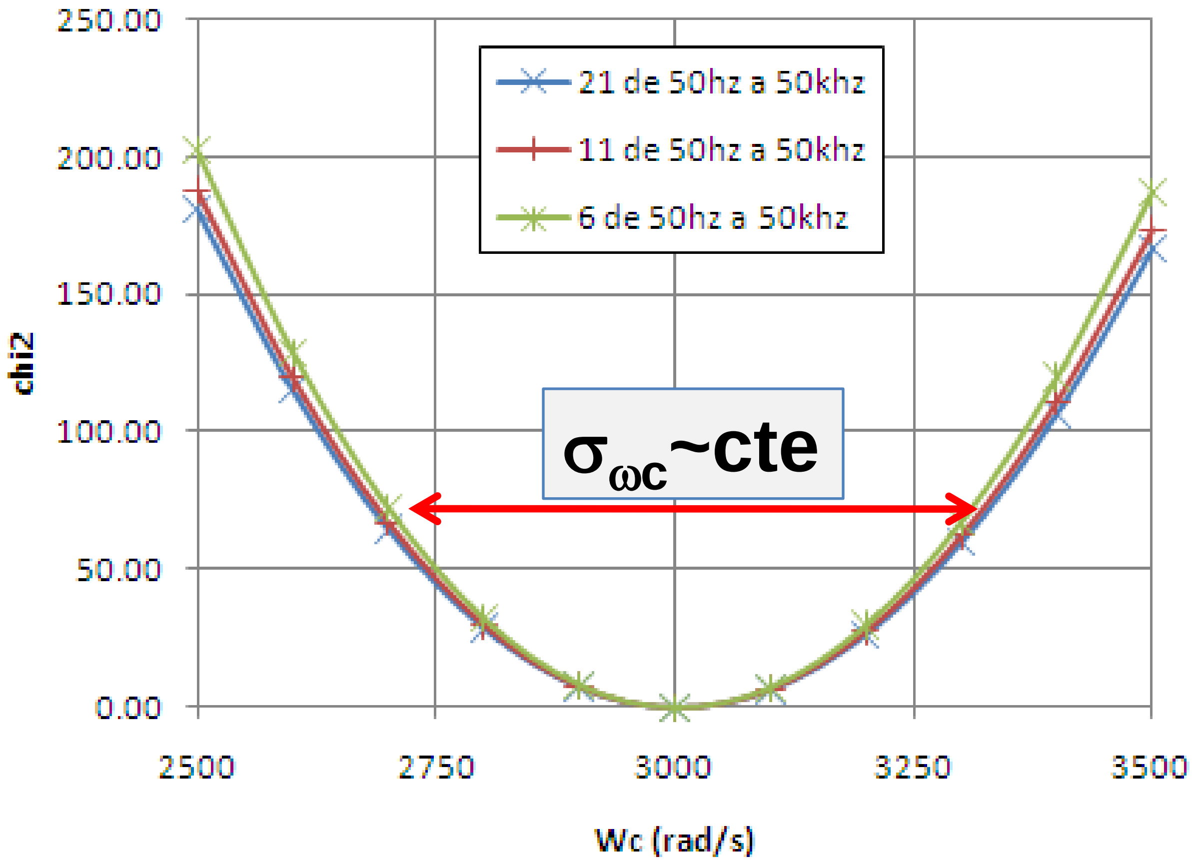


Escolhemos o ω_c que minimiza o χ^2

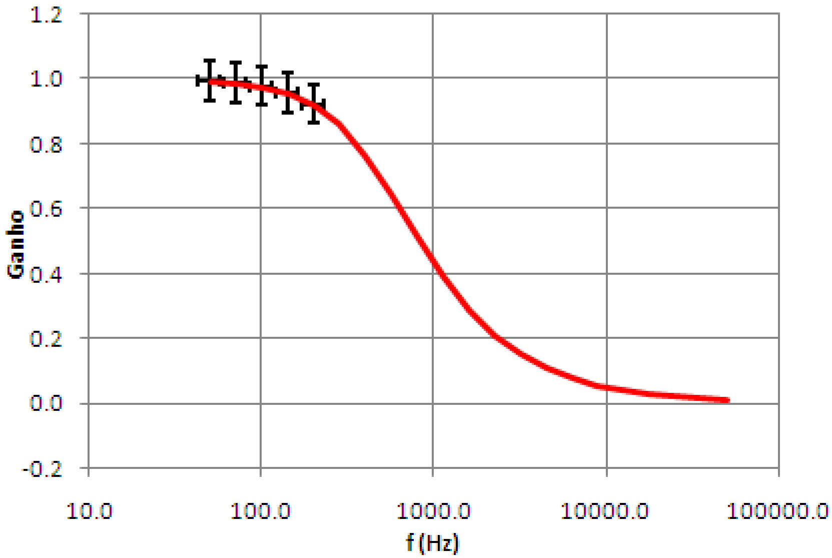
Número de Pontos?

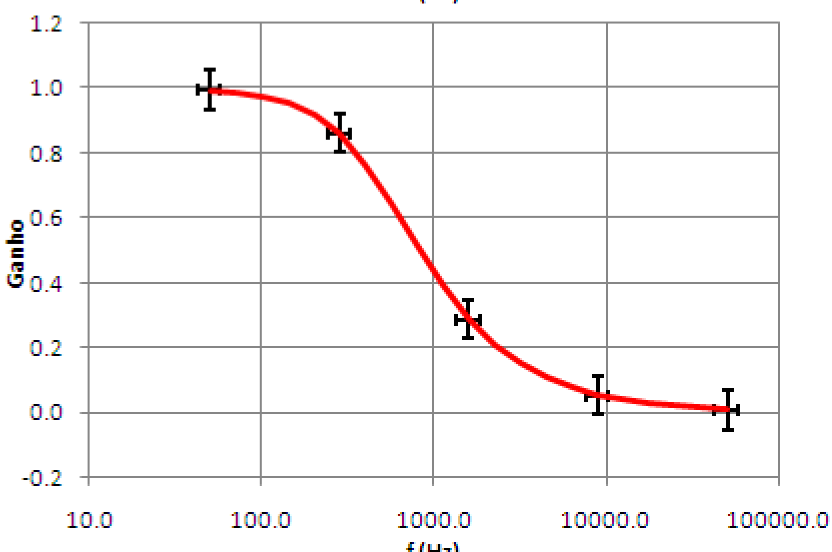


Pode-se tomar poucos pontos, desde que eles estejam suficientemente distribuídos ao longo da região em que a função varia!

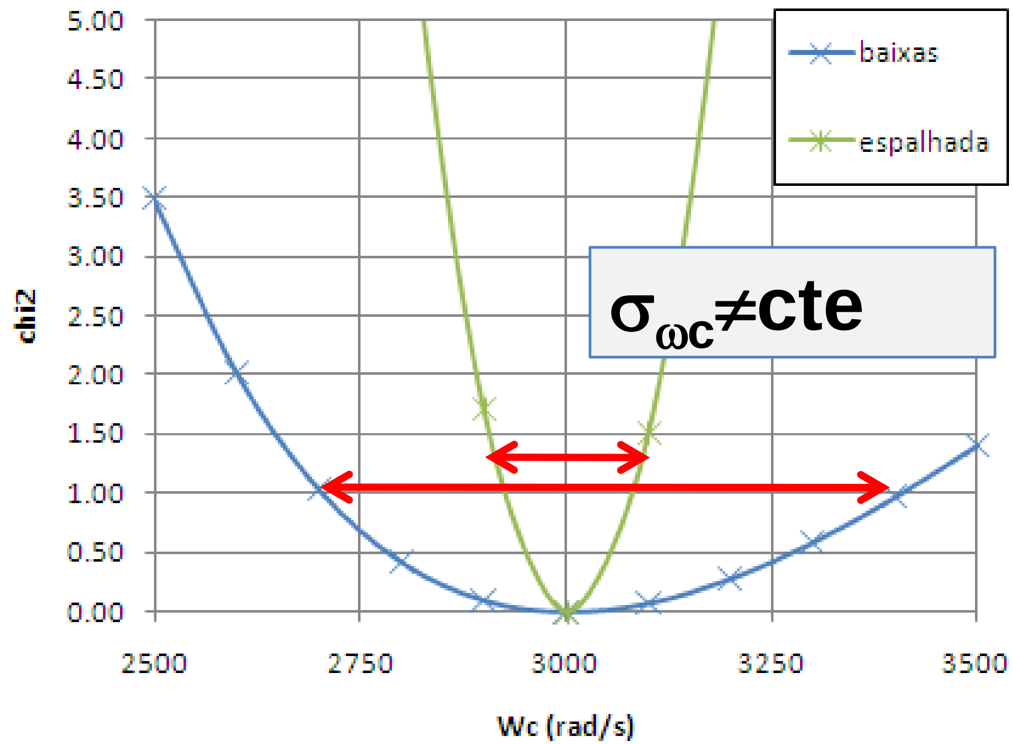


Que região medir?





Analisando a distribuição X^2 pode-se determinar que região medir e como espaçar os dados coletados!

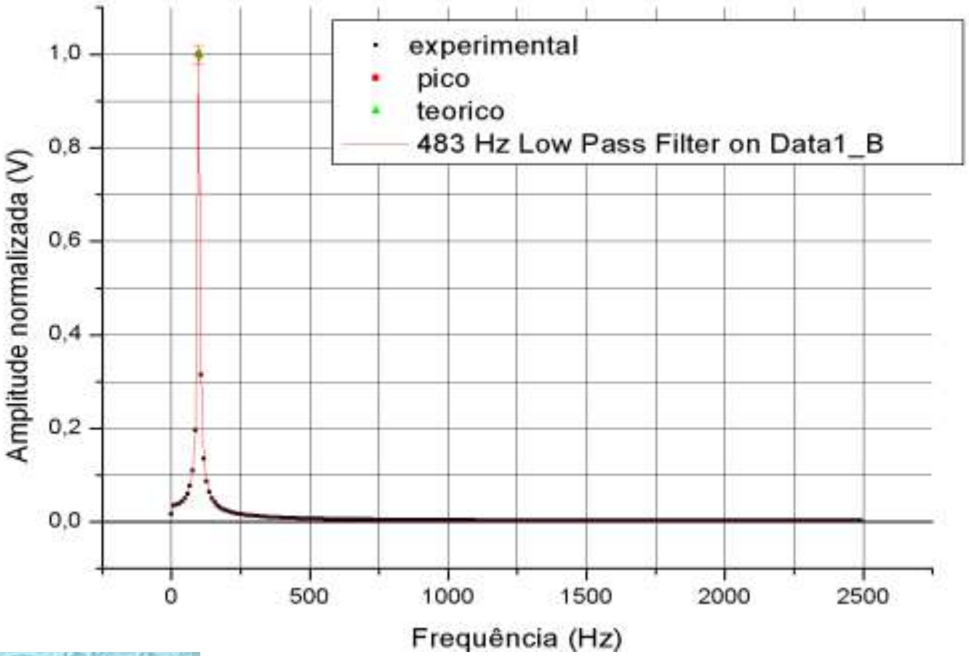


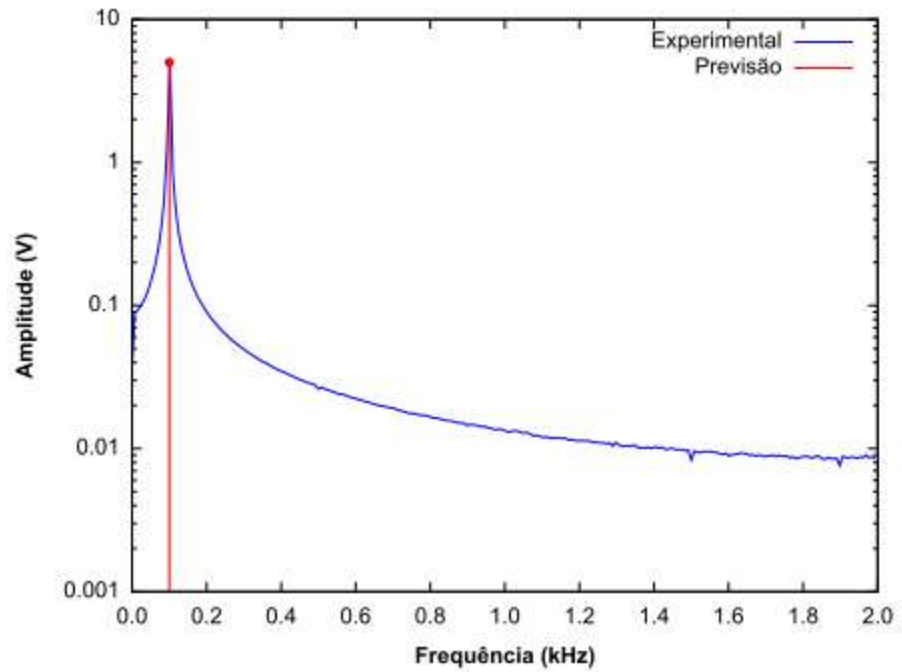
TAREFAS SEMANA PASSADA

Atividades da Semana 1

- Fazer analise de Fourier experimental usando o sinal do DataStudio
    - Onda senoidal
    - Onda quadrada
    - Onda triangular
  - Obter as amplitudes das freqüências que compõem o sinal e comparar quantitativamente com previsão teórica
    - Gráfico de $A(f)$ x f

Senoidal





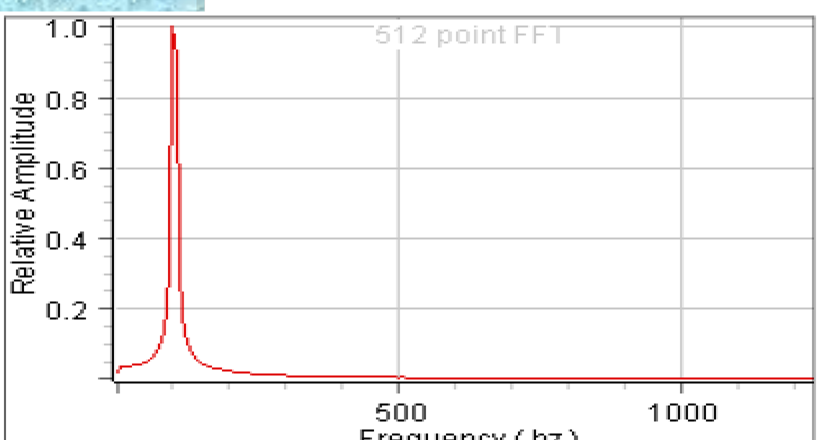
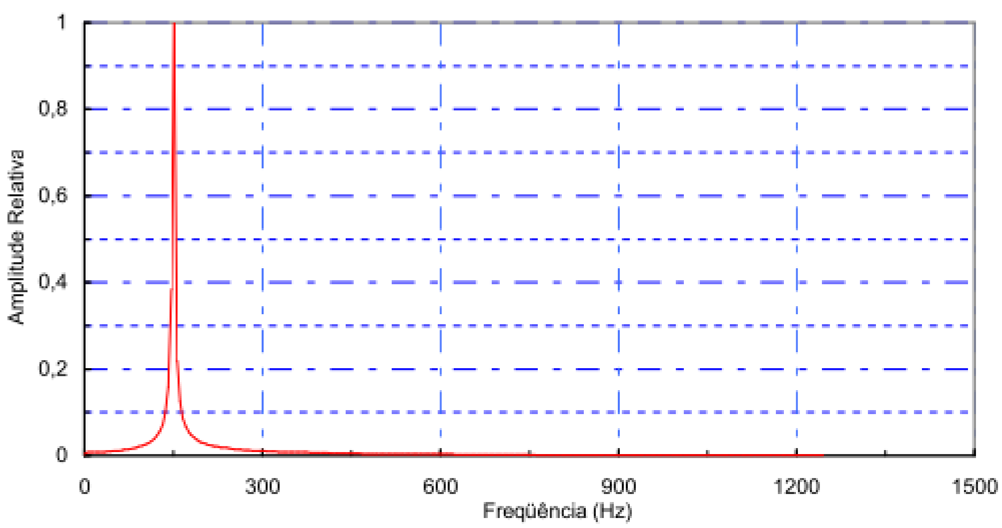


Figura 3: Transformada de Fourier do sinal senoidal;



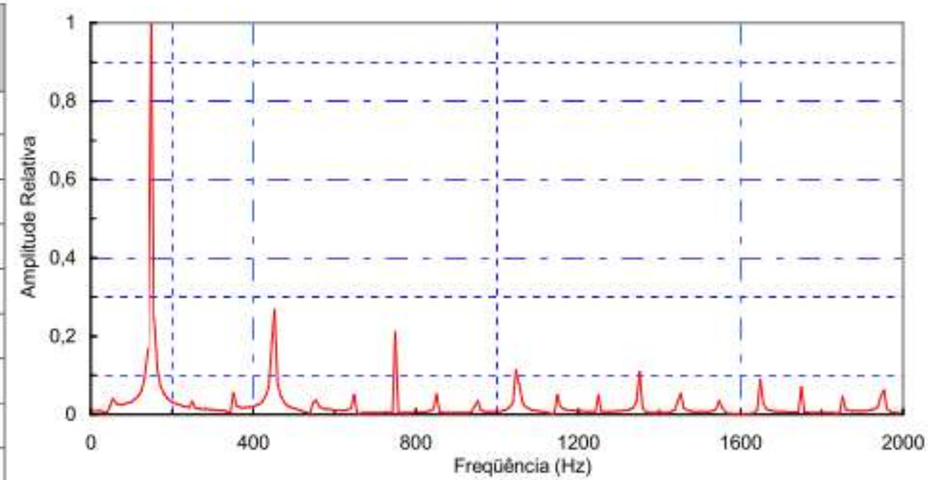
Quadrada

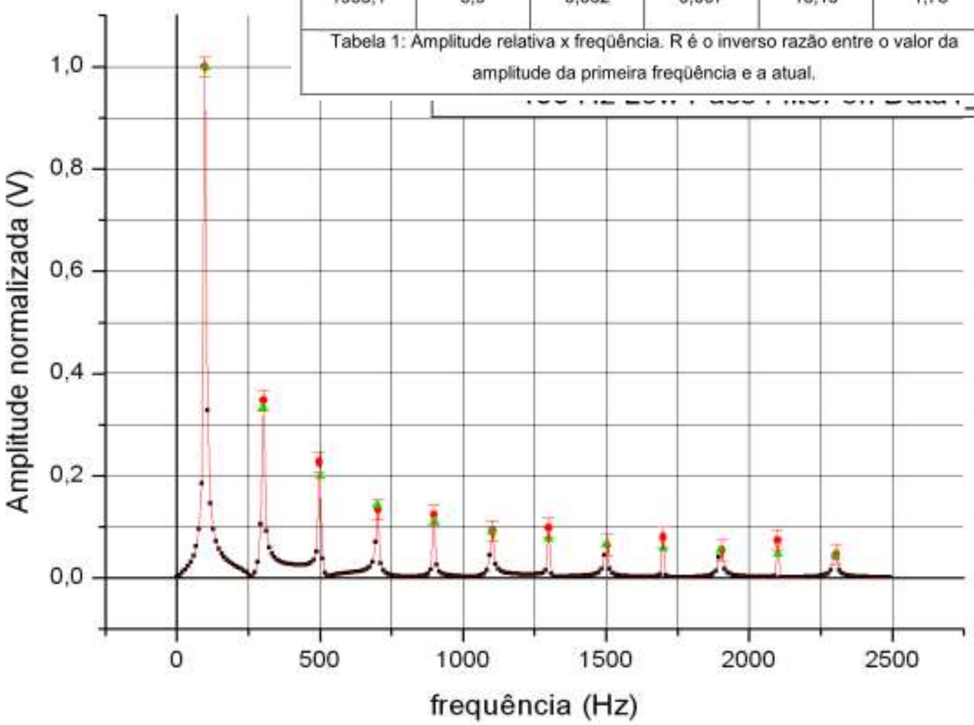
$$y(t) = \frac{4}{\pi} A \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\text{sen}\left[(2k-1)\omega t\right]}{2k-1} = \frac{4}{\pi} A \left[\text{sen}(\omega t) + \frac{1}{3}\text{sen}(3\omega t) + \frac{1}{5}\text{sen}(5\omega t) + \cdots\right]$$

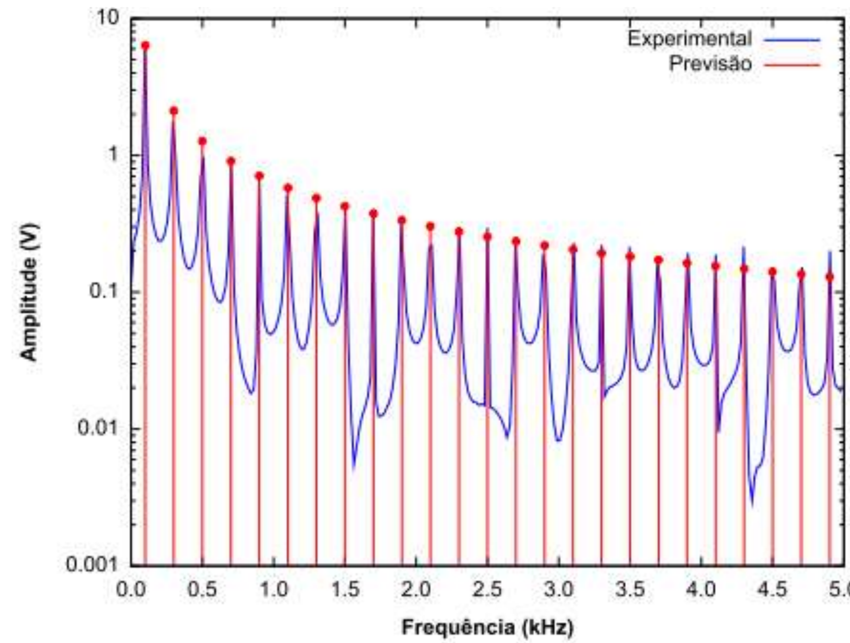
TABELA 1: Amplitude relativa x Freqüência – Onda quadrada

f(Hz)	σf (Hz)	Amplitude Relativa	σamp	R	Sr
148,4	3,9	1,000	0,035	1,000	0,035
453,1	3,9	0,269	0,013	3,72	0,18
750,0	3,9	0,211	0,011	4,74	0,25
1046,9	3,9	0,115	0,008	8,695652	0,64
1351,6	3,9	0,109	0,008	9,17	0,70
1648,4	3,9	0,090	0,008	11,11	0,95
1953,1	3,9	0,062	0,007	16,13	1,78

Tabela 1: Amplitude relativa x freqüência. R é o inverso razão entre o valor da amplitude da primeira freqüência e a atual.

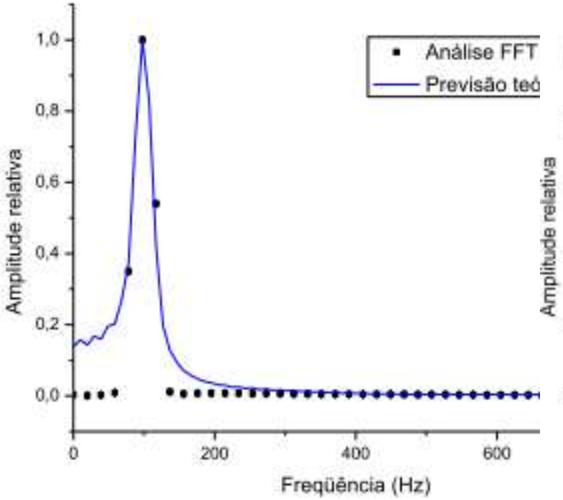


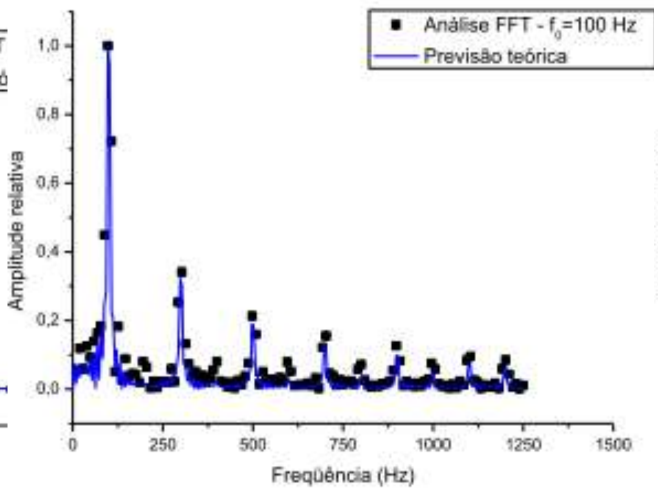


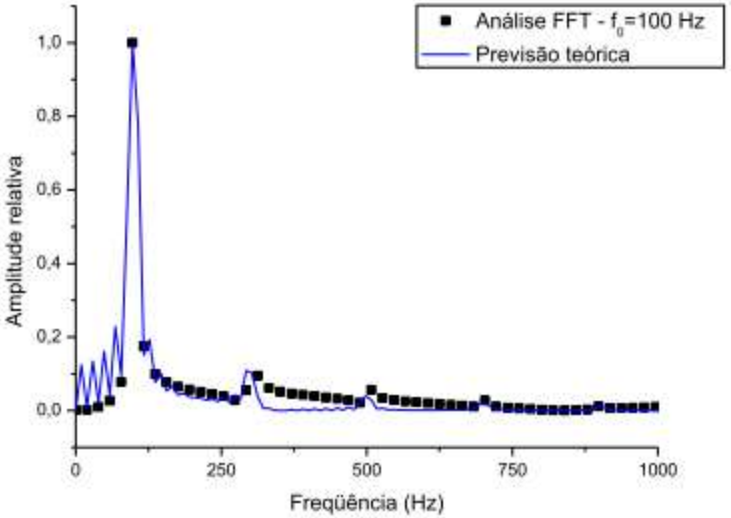


Interessante

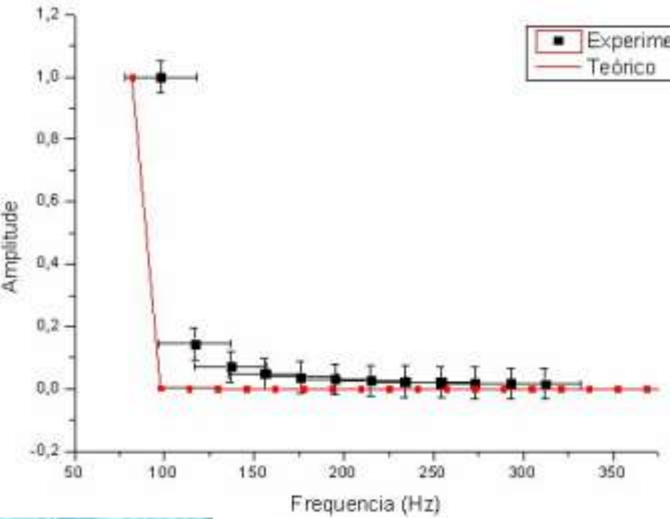
Para as ondas quadrada e triangular foi feito um gráfico teórico a partir da freqüência básica utilizada no experimento (f_0), com 100 termos cada, com o auxílio do de um programa em linguagem C. Tivemos, então, uma tabela *V x t* teórica, que foi usada no Origin para obtermos sua FFT (Transformada de Fourier). interessante

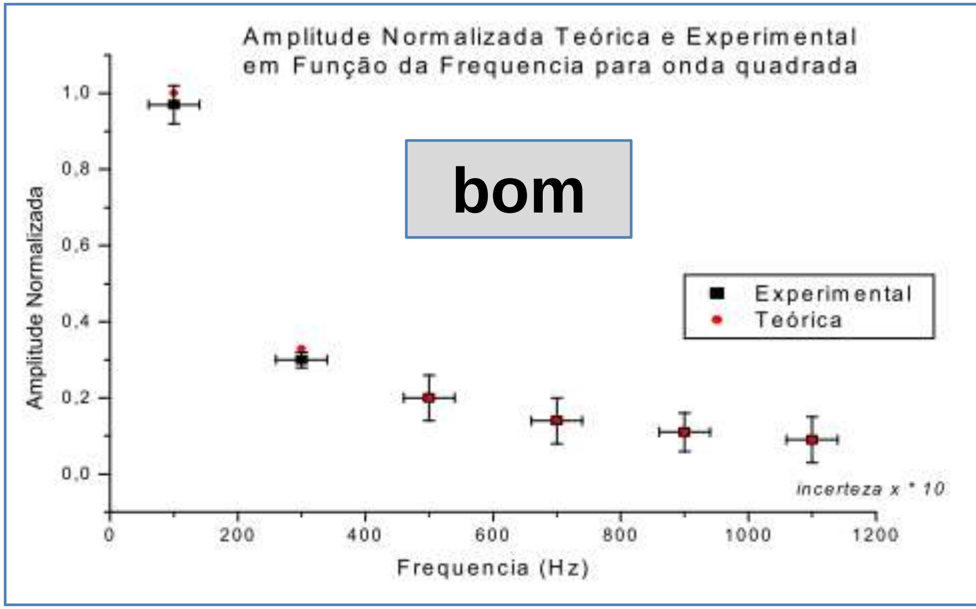


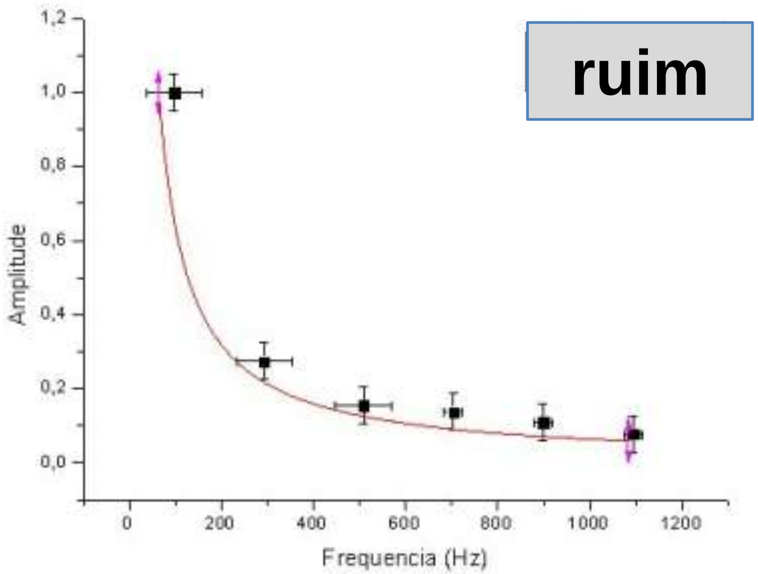


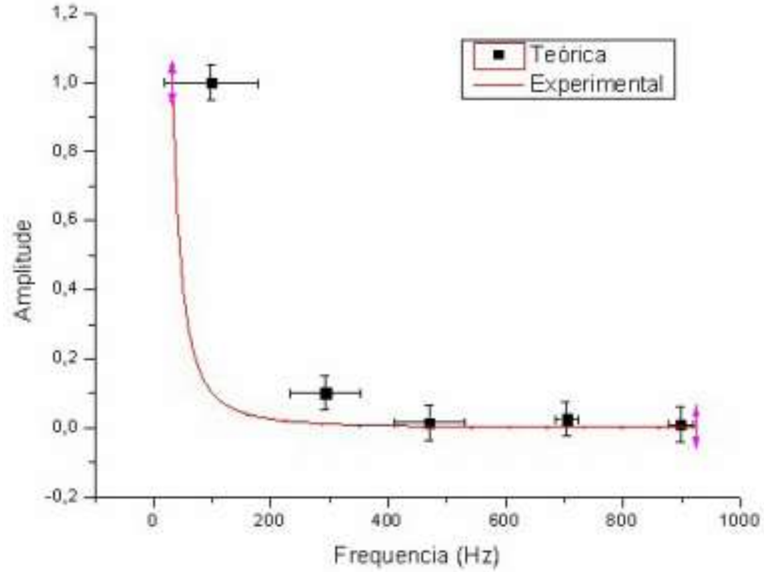


Erros e Acertos



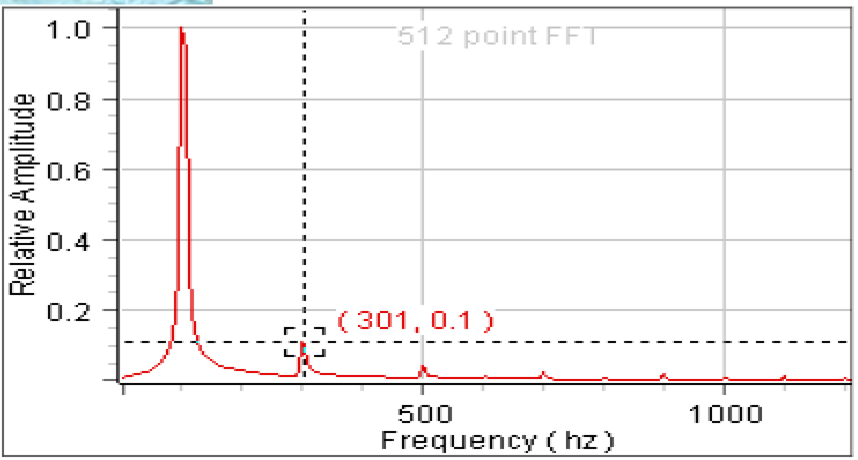


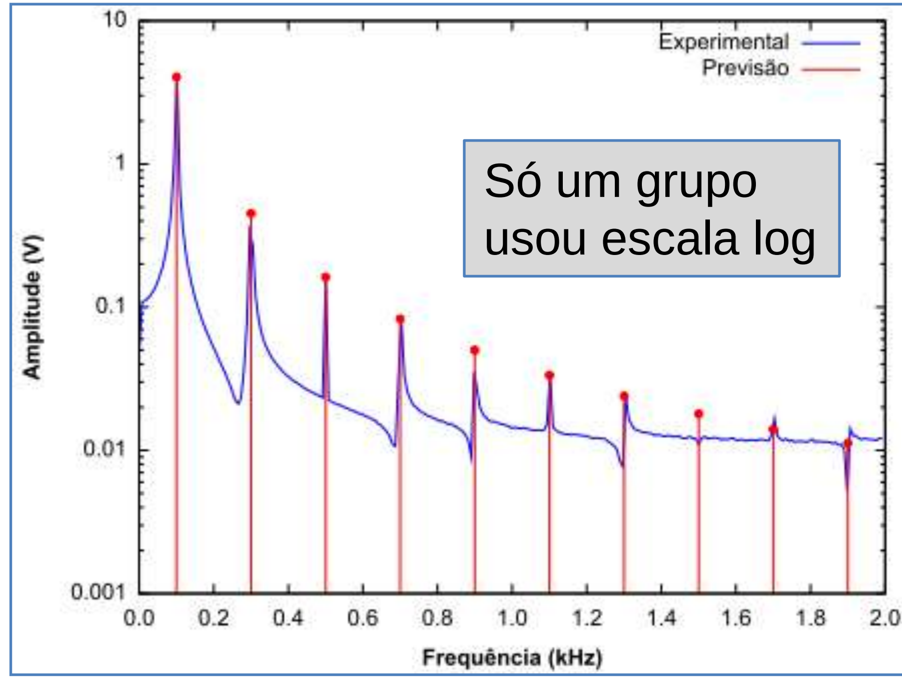


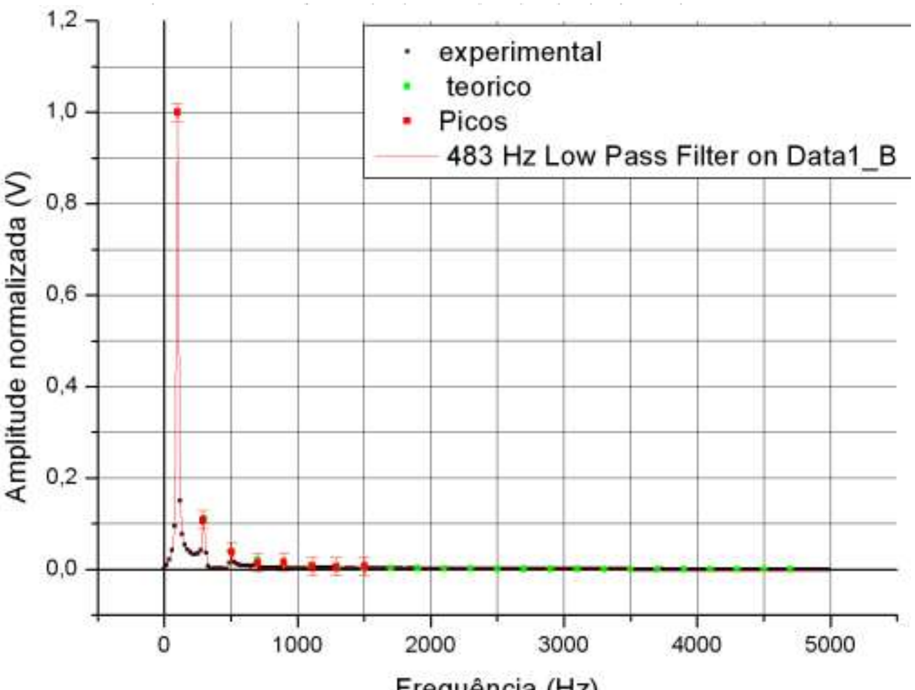


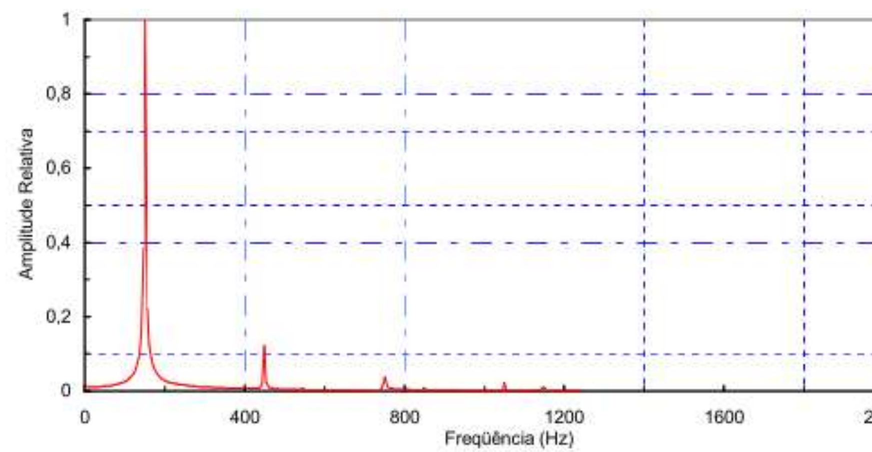
Triangular

$$y(t) = \frac{8}{\pi^2} A \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\text{sen}\,[(2k-1)\omega t]}{(2k-1)^2} = \frac{8}{\pi^2} A \left[\text{sen}(\omega t) - \frac{1}{9}\,\text{sen}(3\omega t) + \frac{1}{25}\,\text{sen}(5\omega t) - \cdots \right]$$





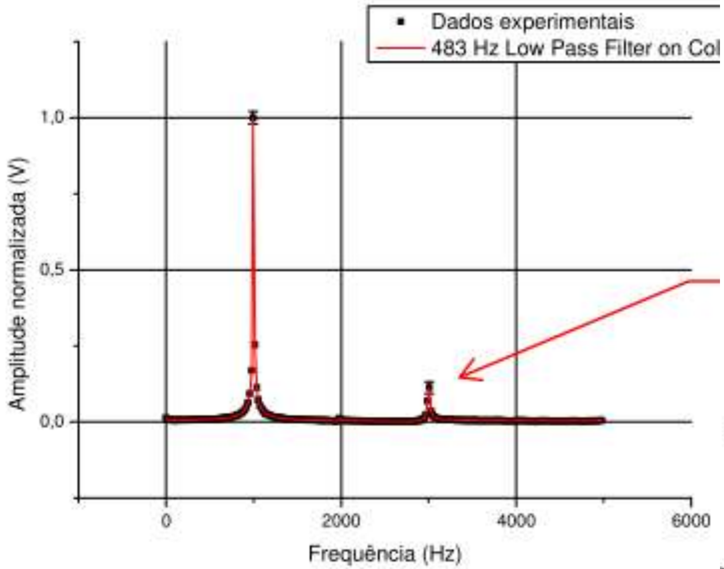


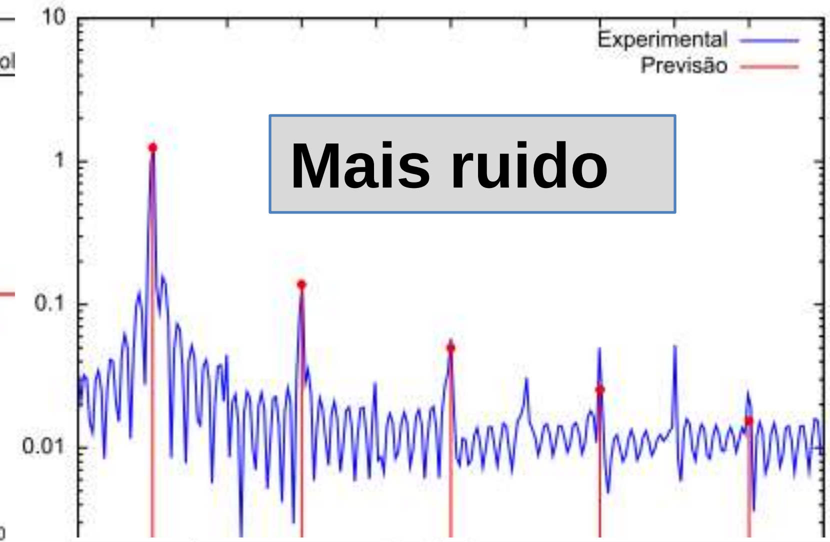


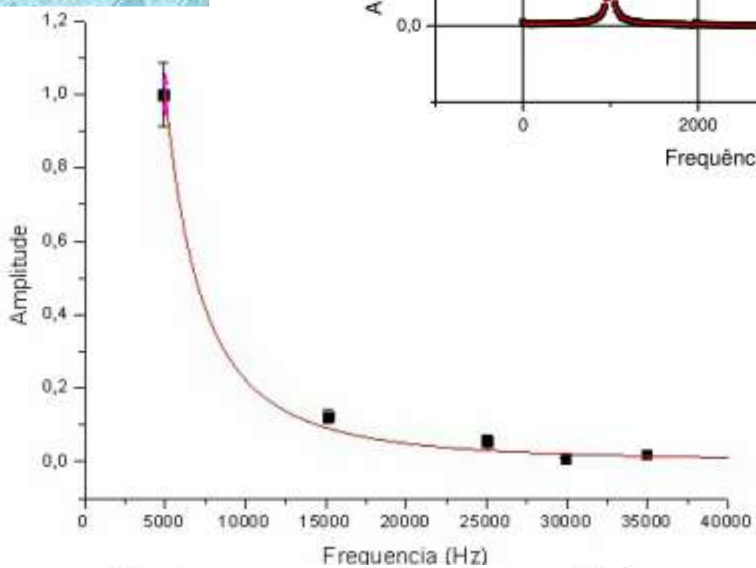
Atividades da Semana 2

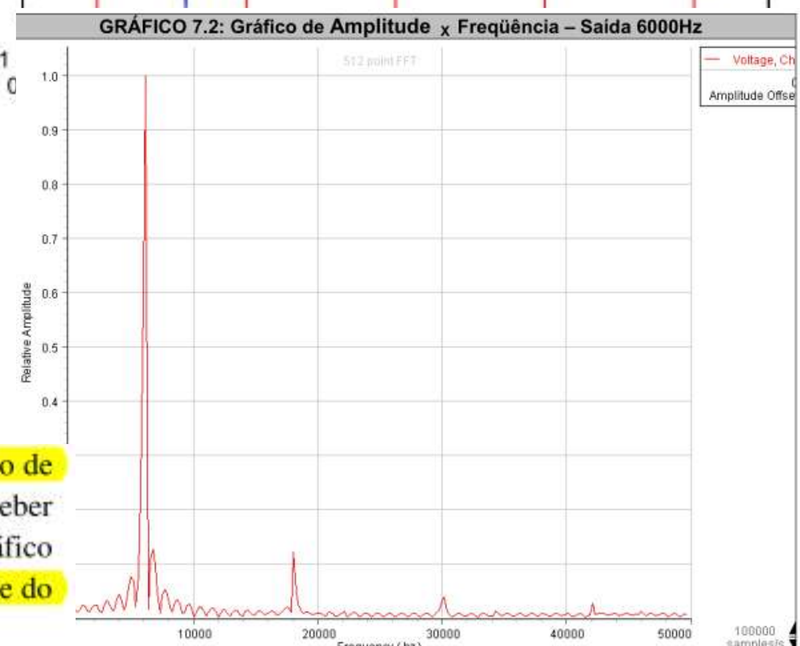
- Fazer análise de Fourier experimental usando o sinal de saída do filtro RC:
  - Onda triangular (alta freq.)
    - Obter as amplitudes das freqüências que compõem o sinal e comparar quantitativamente com previsão teórica
      - Gráfico de *A(f) x f, comparando com dados anteriores e teoria.*
- Obter a curva de ganho (baixa freq.)
  - Fazer a FFT do sinal de entrada e de saída, ao mesmo tempo, e obter a curva de ganho do circuito RC
    - comparar com previsão teórica
  - DICA: Para uma boa curva, escolha a freqüência como sendo ~1/3 de *fc*. *Explique porque no relatório.*
      - Gráfico de *G x f, comparando com dados anteriores e teoria.*

Triangular do Fitro RC / Integrador



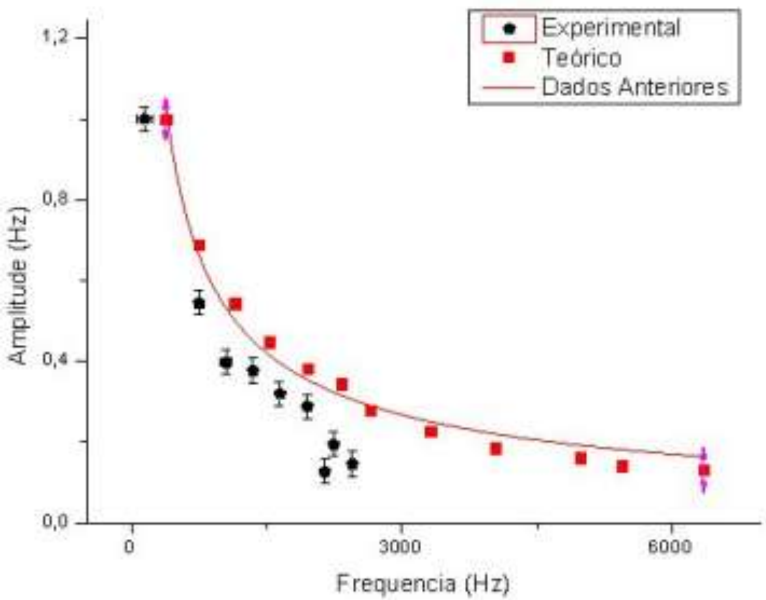


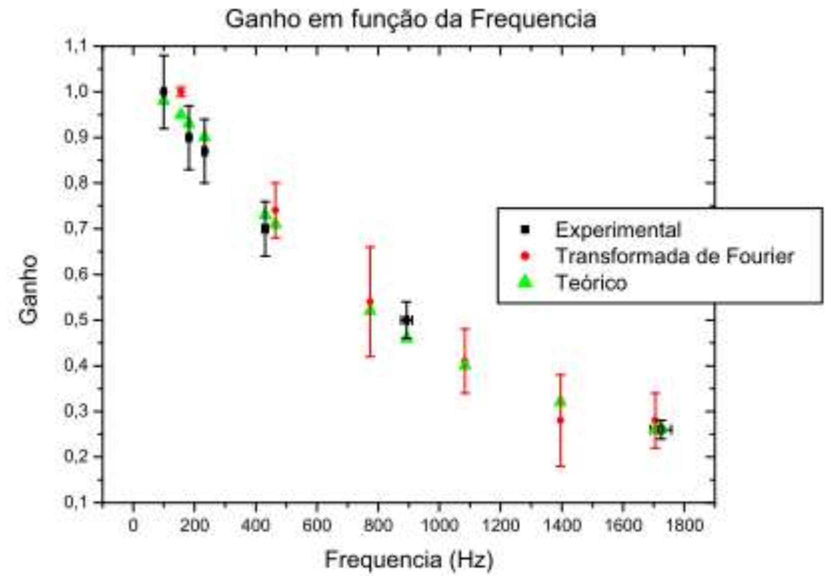


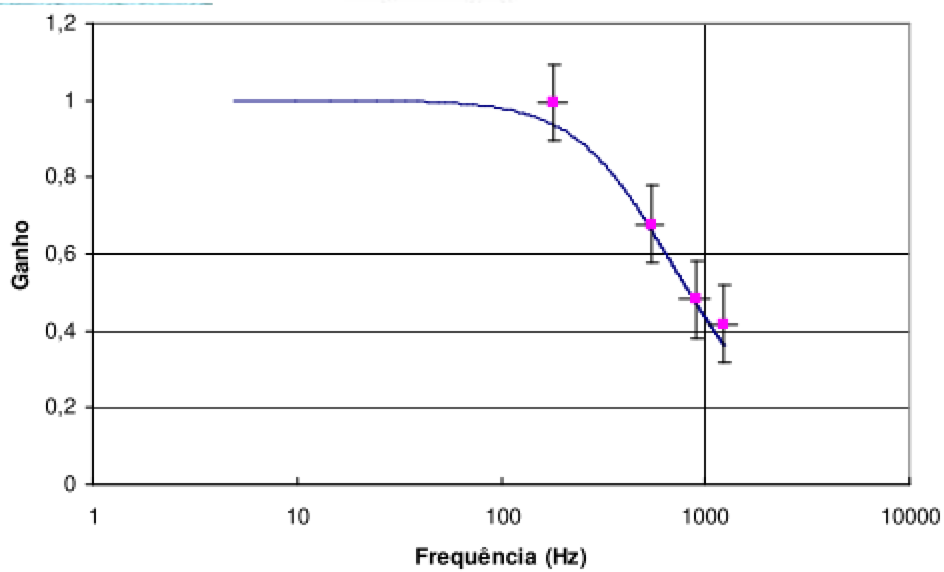


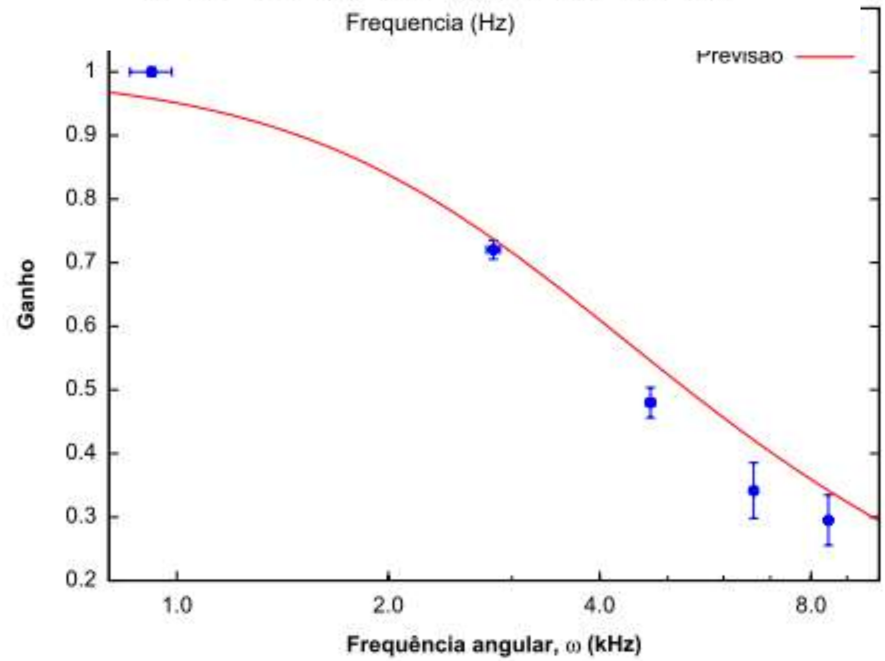
Percebemos que os dados são compatíveis com o modelo teórico. Com esse tipo de medida indireta, o nível de ruído é menor, interferindo menos nos dados. Podendo perceber isso com o valor das incertezas, que por serem pequenas não se fazem visíveis no gráfico apresentado. Concluindo que é mais eficiente estudar uma onda triangular indiretamente do que diretamente.

Ganho do Filtro RC



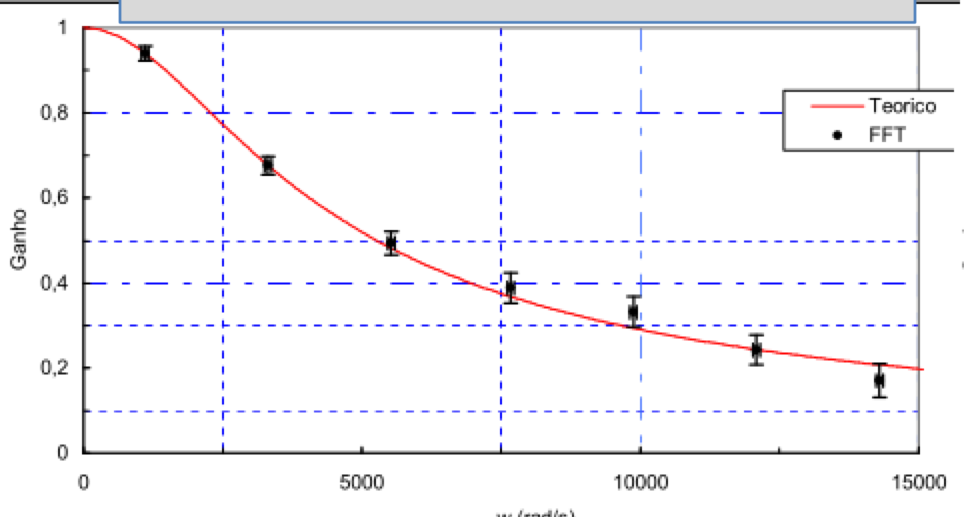




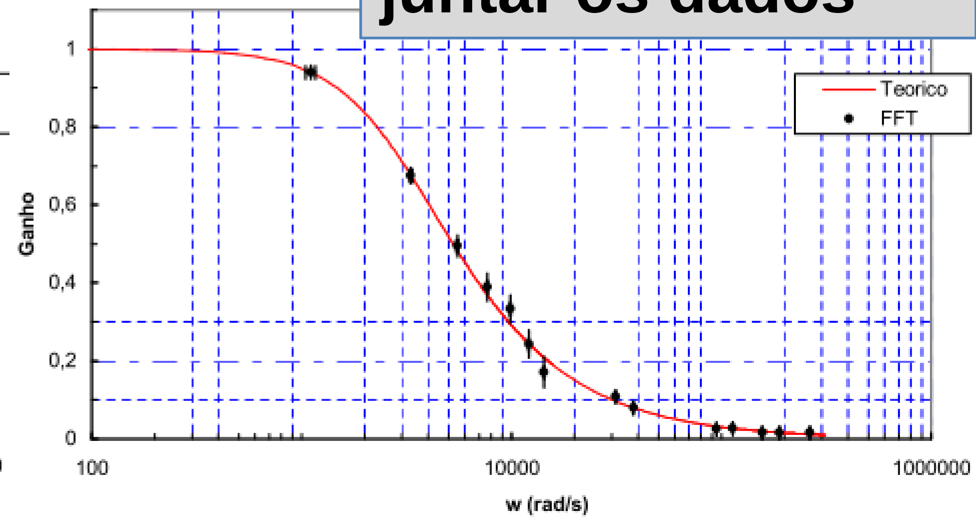


Interessante

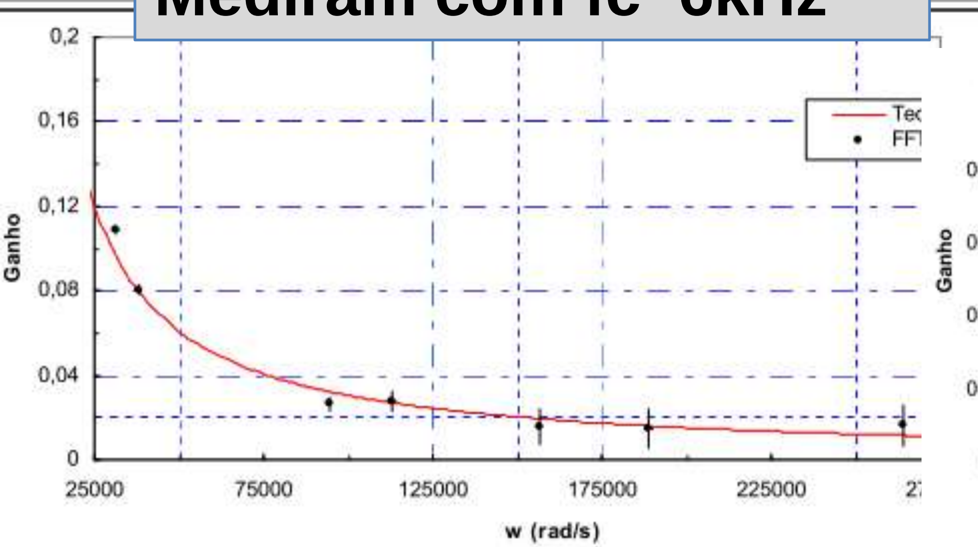
Mediram com fc~175Hz



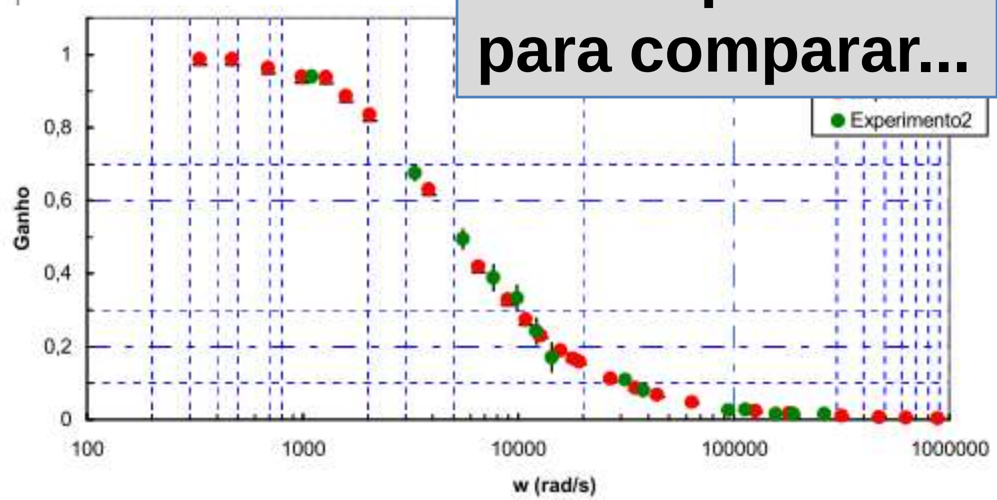
Normalização para juntar os dados



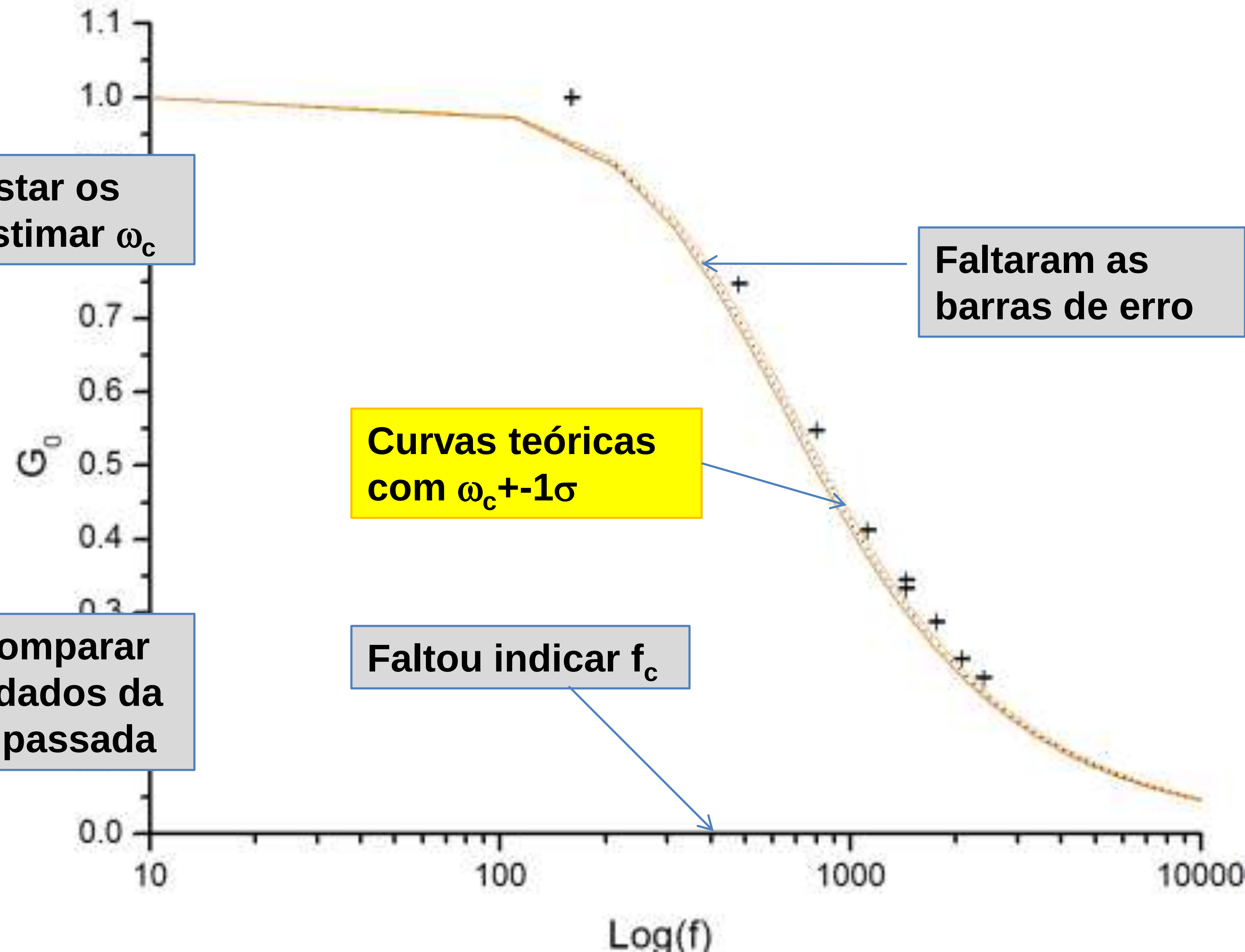
Mediram com fc~6kHz



Muitos pontos para comparar...



Mesmo quem acerta erra...



Faltou ajustar os dados e estimar ω_c

Faltaram as barras de erro

Curvas teóricas com ω_c+-1σ

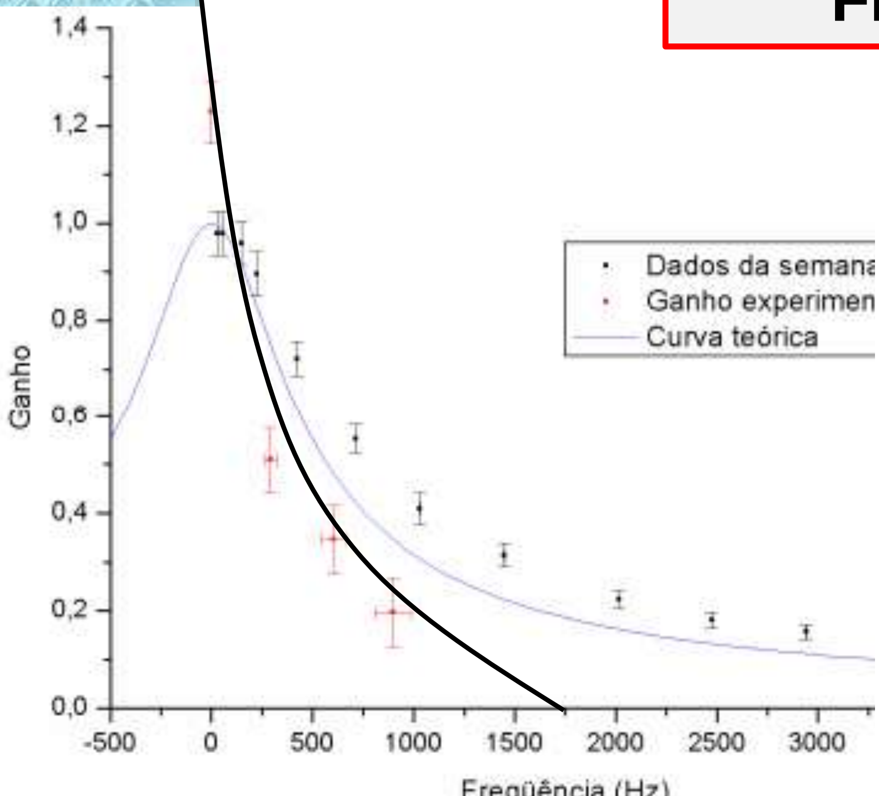
Faltou comparar com os dados da semana passada

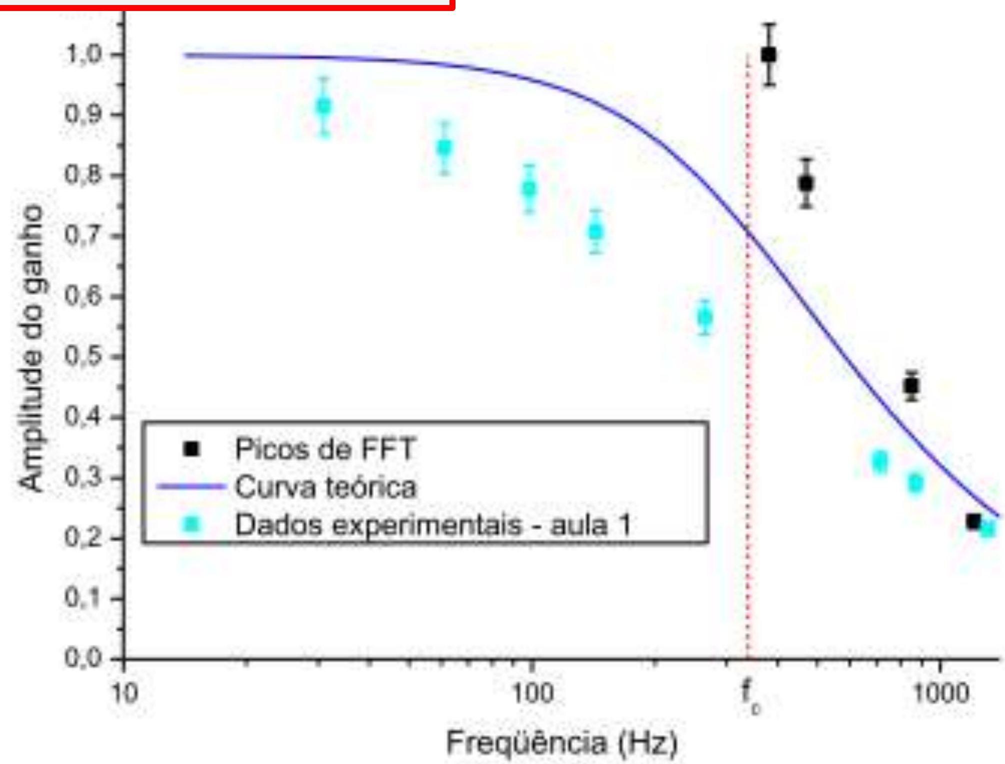
Faltou indicar f_c

Problemas

A curva do ganho foi obtida através da FFT do quociente de $V_s(t)$ e $V_e(t)$ feita em Origin. O resultado, no entanto, é uma curva com uma série de vales. Os picos

Ganho = FFT(Vs)/FFT(Ve)





Circuito Diferenciador

Como vimos na síntese anterior, a corrente no circuito e a tensão de entrada complexas são relacionadas por

$$\hat{I} = \frac{\hat{V}_E}{R + 1/i\omega C}$$

Para $\omega \ll \omega_c = \frac{1}{RC}$, temos $R \ll \dfrac{1}{\omega C}$. Dessa forma,

$$\hat{I} \approx \frac{\hat{V}_E}{1/i\omega C} \quad \text{ou} \quad \hat{V}_E = \frac{\hat{I}}{i\omega C}$$

Como a tensão no capacitor é $\hat{V}_C = \hat{Z}_C \hat{I}$ e $\hat{Z}_C = 1/i\omega C$, segue que $\hat{V}_C = \hat{I}/i\omega C$, ou seja, a tensão no capacitor é igual à tensão de entrada.

Como $\hat{I} = C\dfrac{\mathrm{d}\hat{V}_C}{\mathrm{d}t}$, e lembrando que $\hat{V}_C = \hat{V}_E$, temos

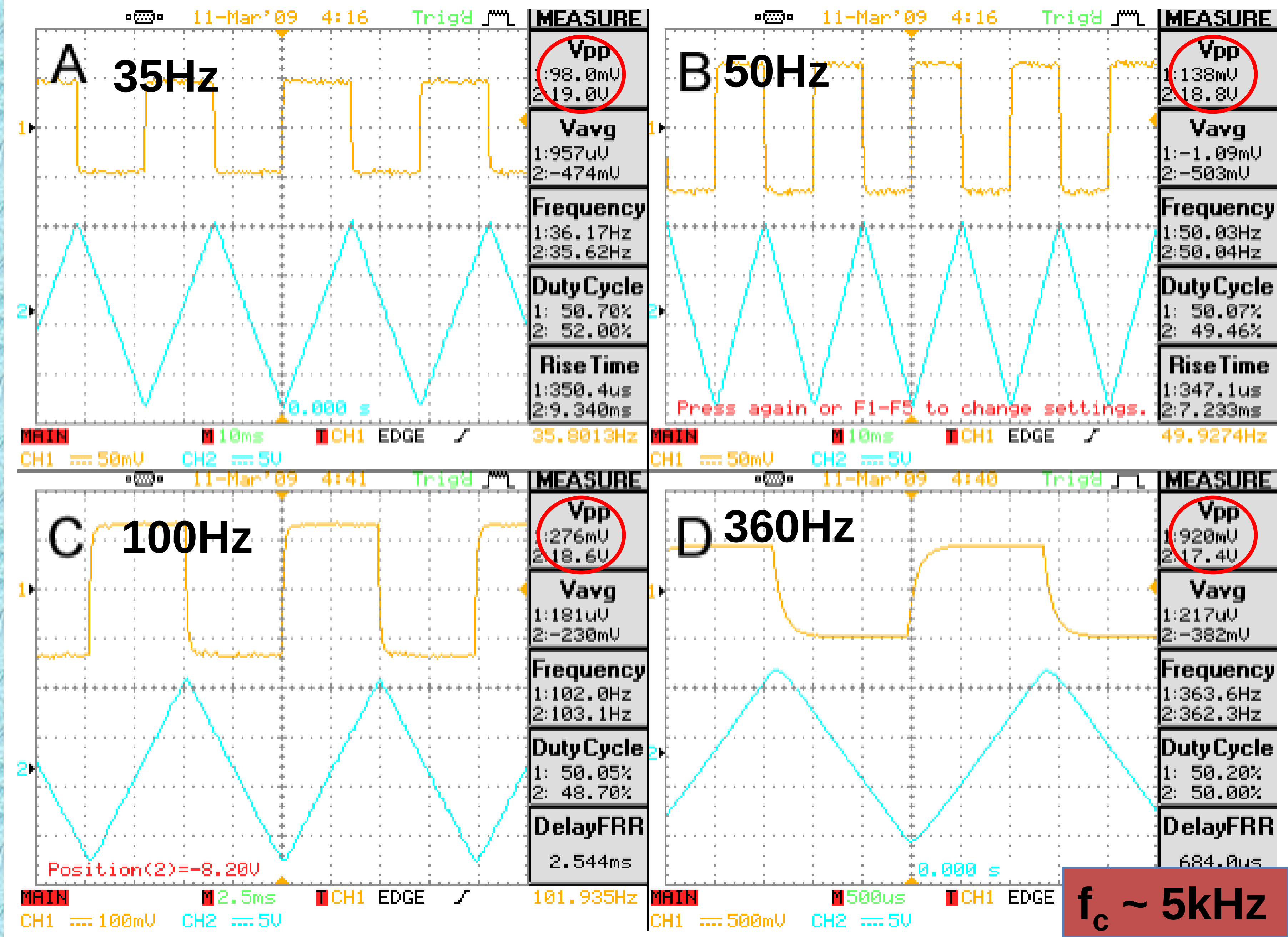
$$\hat{V}_R = R\hat{I} = RC\frac{\mathrm{d}\hat{V}_E}{\mathrm{d}t}$$

Ou seja, a tensão de saída (tensão no resistor) é proporcional à derivada da tensão de entrada para frequências muito menores que a frequência de corte.

Para verificar isso experimentalmente, utilizamos um capacitor de 0,987 (25) μF e uma resistência de 33,0 (7) Ω; dessa forma, temos $\omega_c = 30{,}7\,(10) \cdot 10^3$ rad/s ou $f_c = 4{,}89\,(16)$ kHz. Como sinal de entrada utilizamos diferentes frequências e formatos de onda.

f_c ~ 5kHz

Resultados para Ve = triangular



$f_c \sim 5kHz$

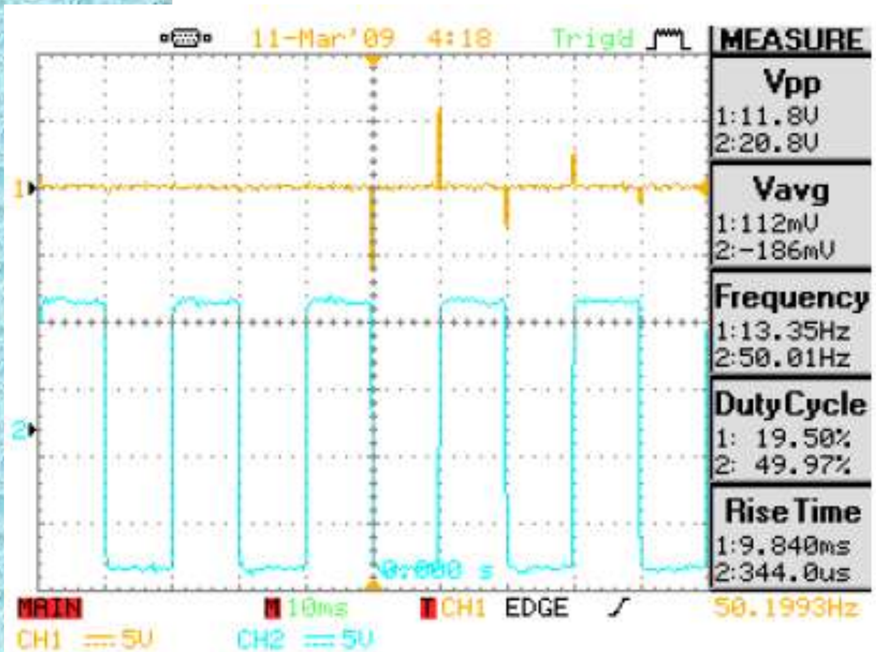
Resultados

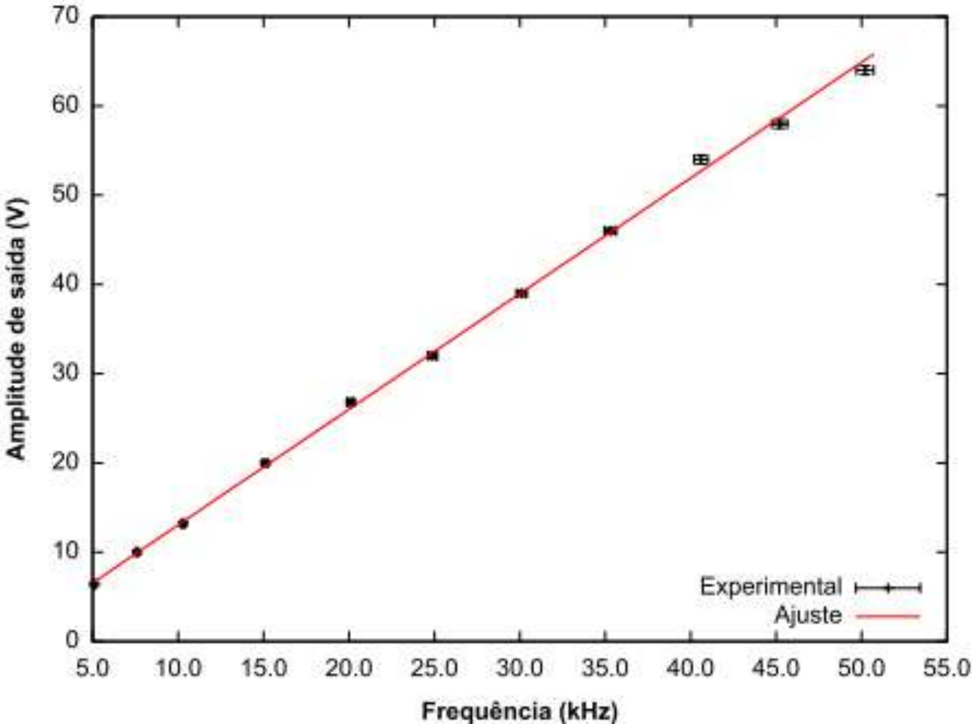
Para testar se a amplitude da saída corresponde ao valor esperado, variamos a frequência do sinal de entrada e medimos a amplitude do sinal de saída, para uma amplitude de entrada constante. Como a inclinação do sinal triangular é dada por $\mu = \frac{V_{Epp}}{T/2} = 2fV_{Epp}$ e a tensão de saída é dada por $V_{Sp} = RC\mu$, devemos então ter

$$V_{Sp} = 2RCV_{Epp}f$$

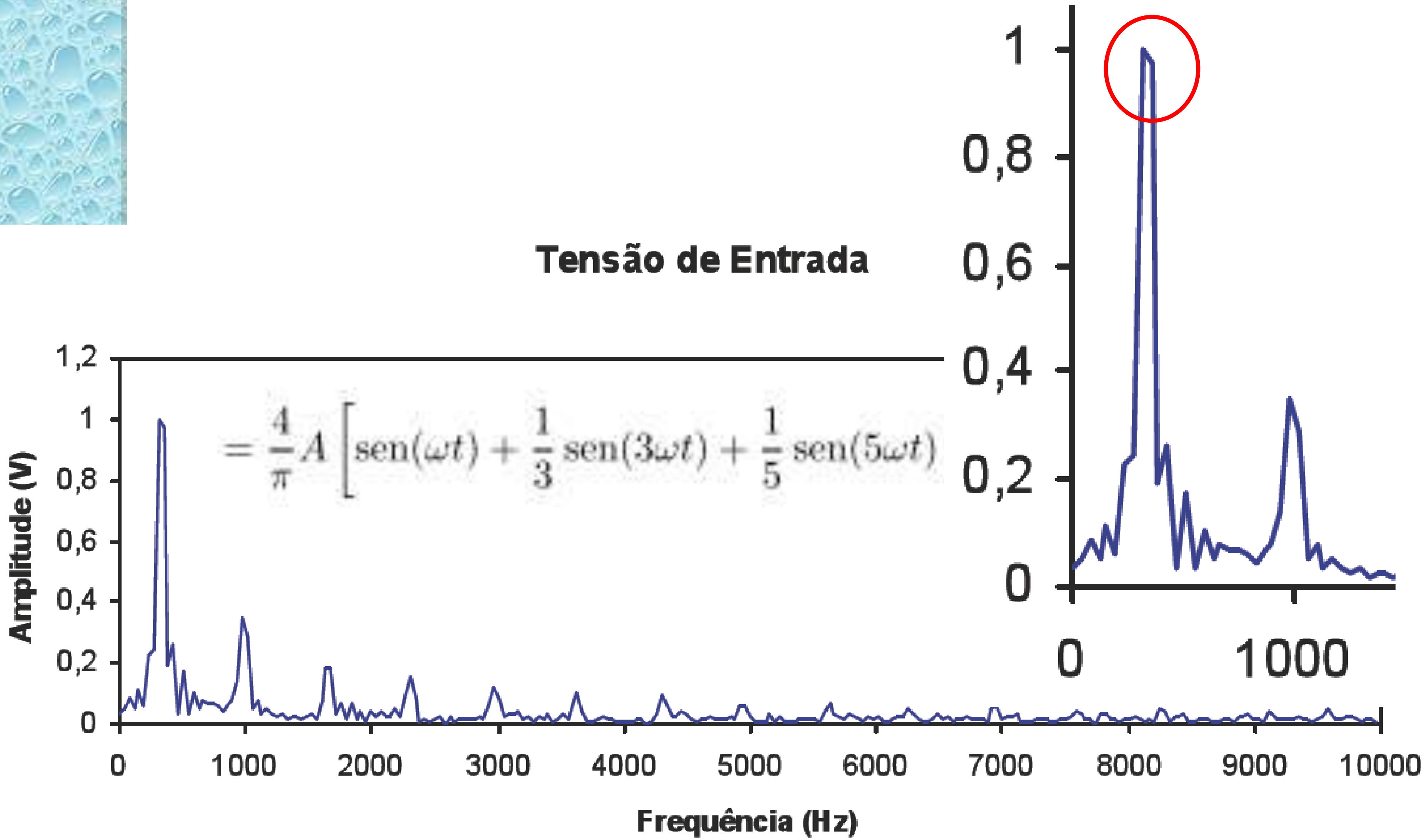
Na entrada, foi utilizada uma tensão de pico a pico $V_{Epp} = 18{,}60\,(20)\ V$, ou seja, esperamos para o gráfico $V_{Sp} \times f$ um coeficiente angular compatível com $1{,}212\,(43)$ mV · s.

Ve = quadrada



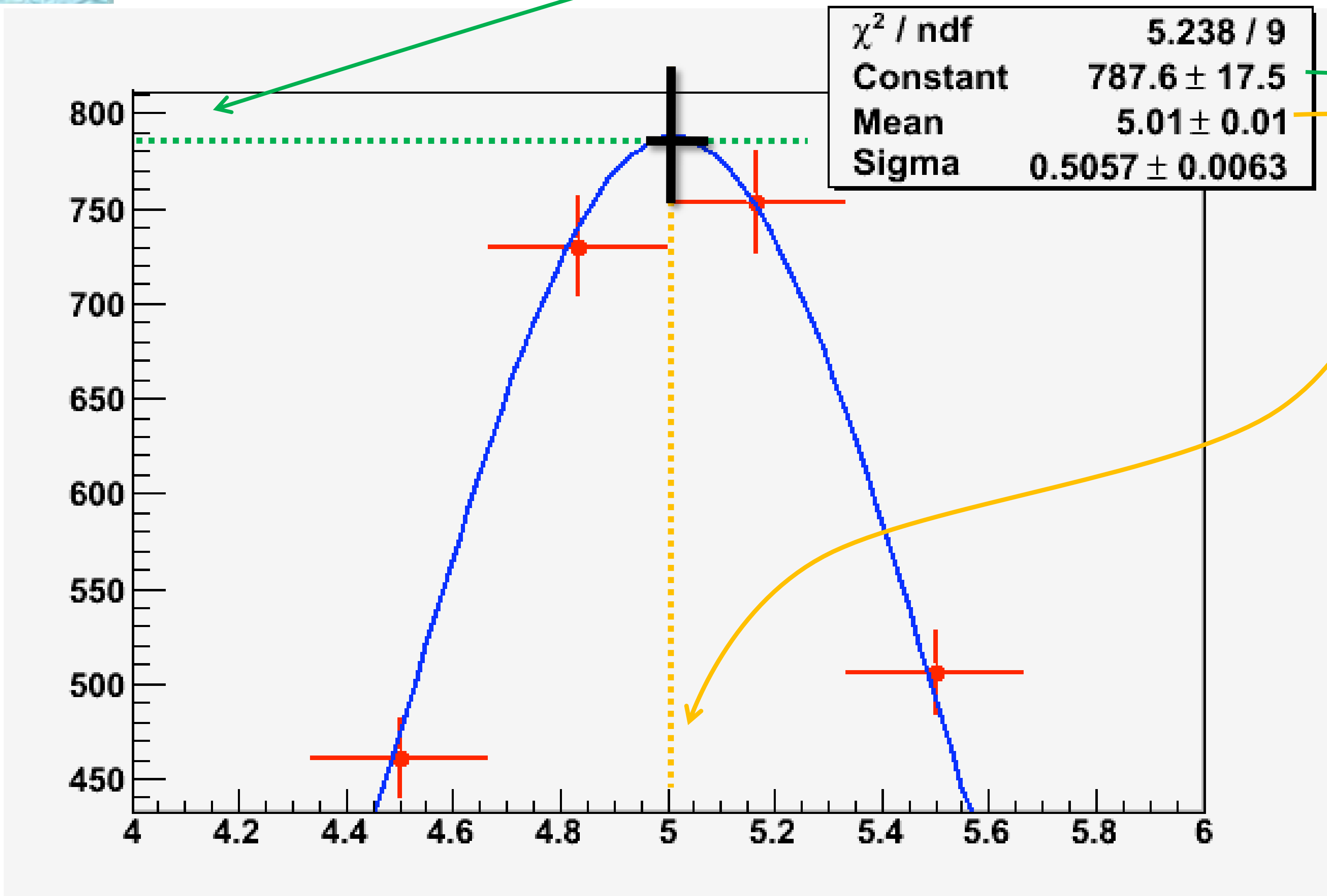


Indo além do óbvio...



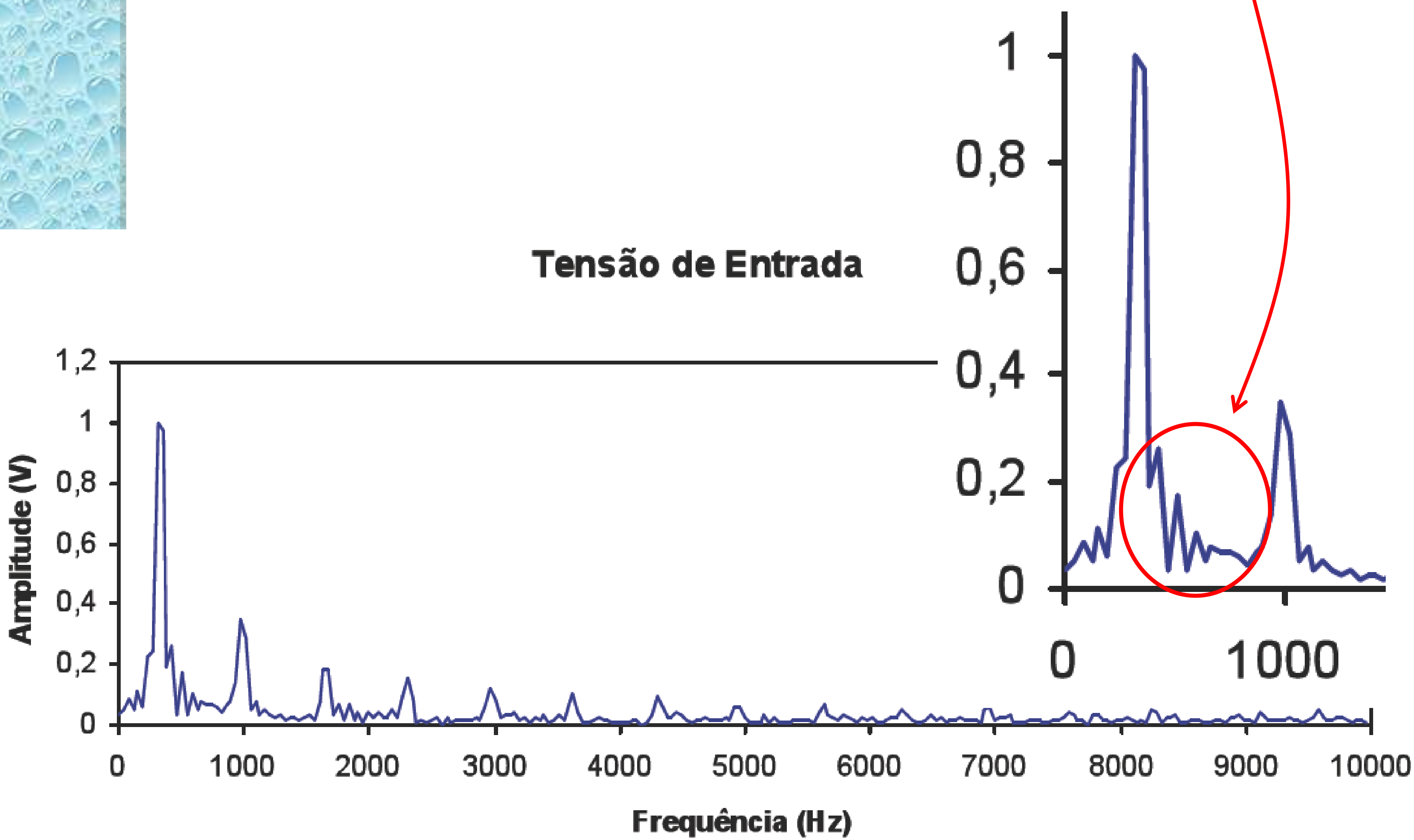
A.A.P. Suaide & M. Tabacniks (Lablfex, 2008)

Como medir os picos



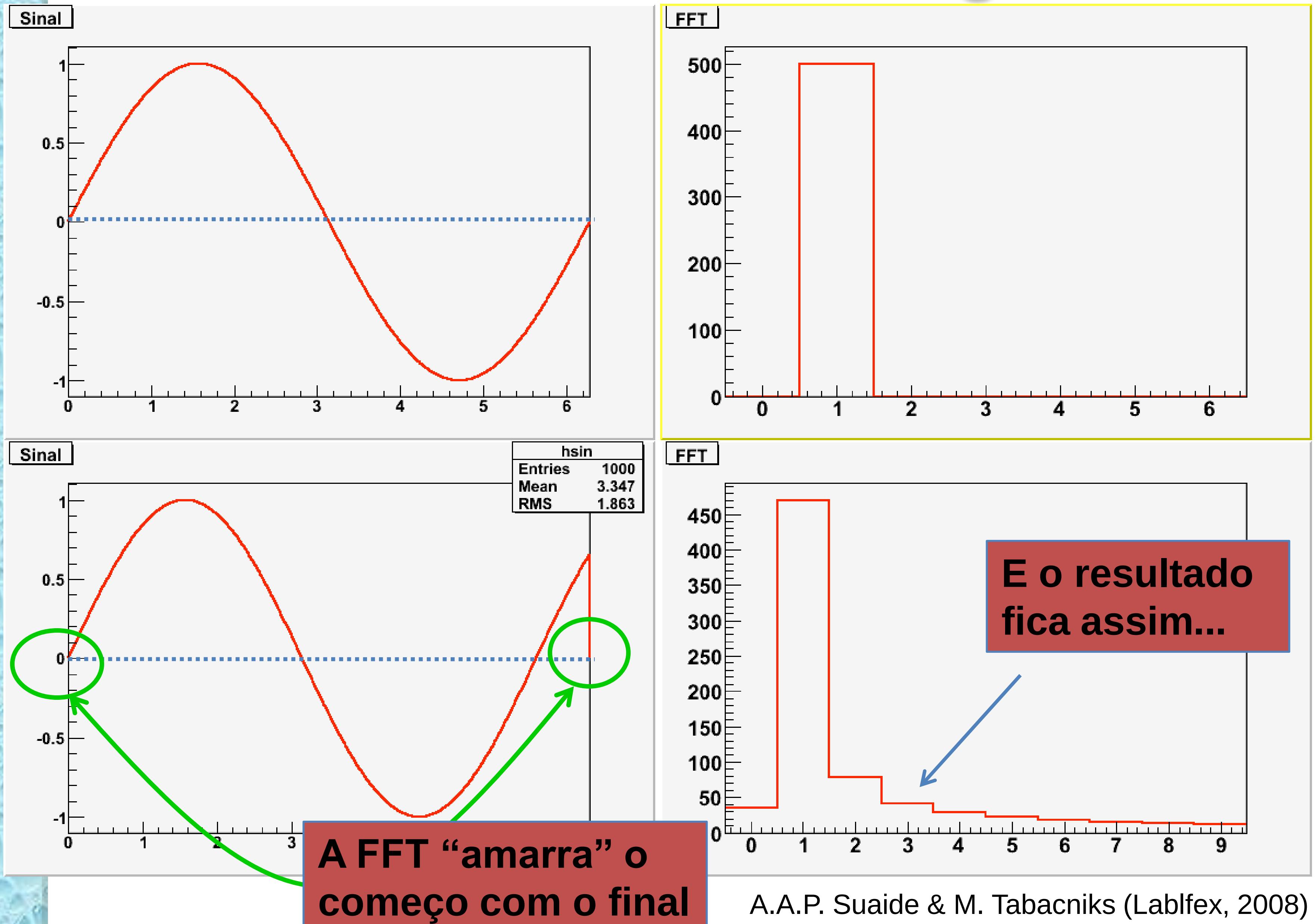
A.A.P. Suaide & M. Tabacniks (Lablfex, 2008)

Mas porque a FFT tem tanto ruído?



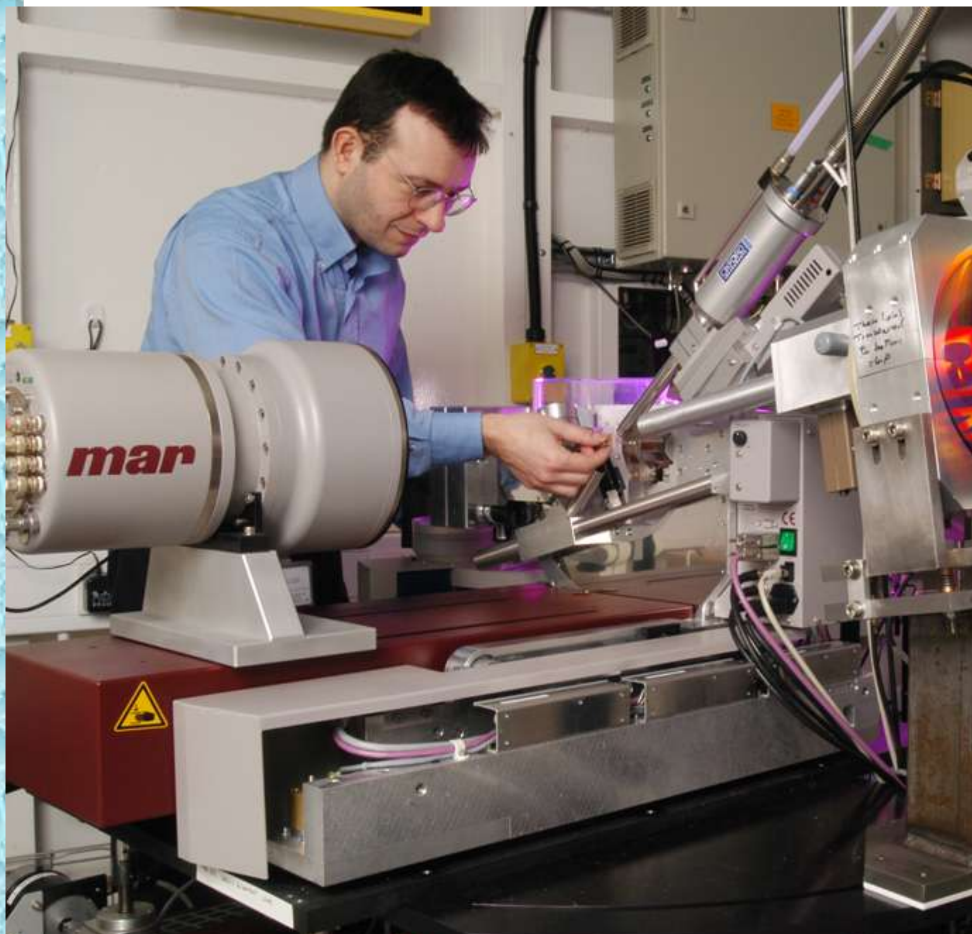
A.A.P. Suaide & M. Tabacniks (Lablfex, 2008)

O Intervalo de Amostragem



A.A.P. Suaide & M. Tabacniks (Lablfex, 2008)

Esta Semana...



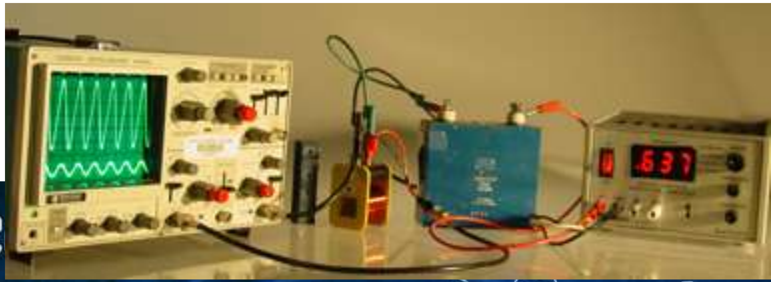
Vamos complicar nosso circuito, introduzindo uma indutância!

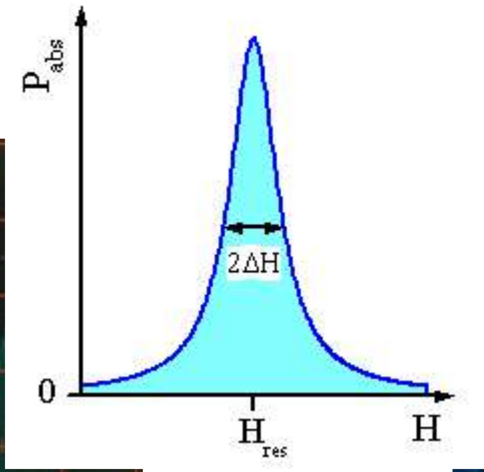
Ressonância em Circuito RLC

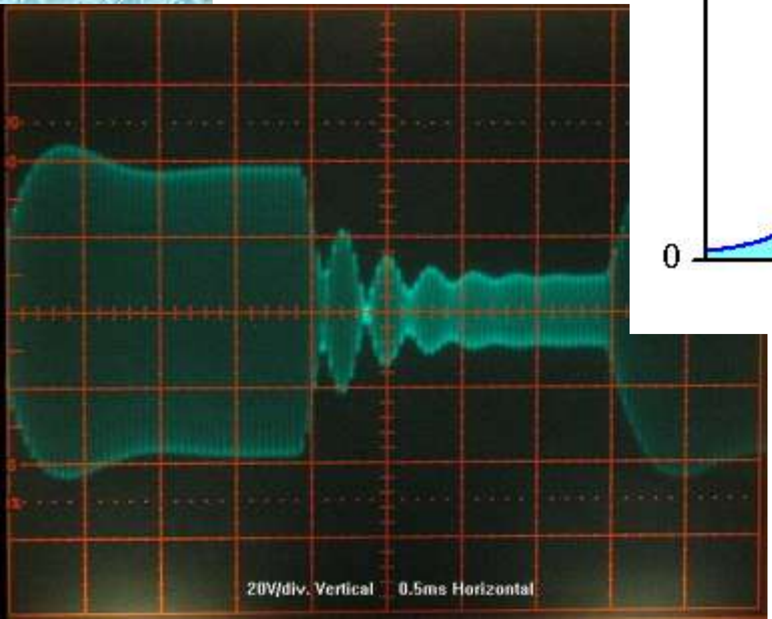
- **Ressonância**:

ocorre em todo tipo de fenômeno ondulatório

- ondas mecânicas
  - Em todo tipo de meio
- Ondas eletromagnéticas







O Indutor

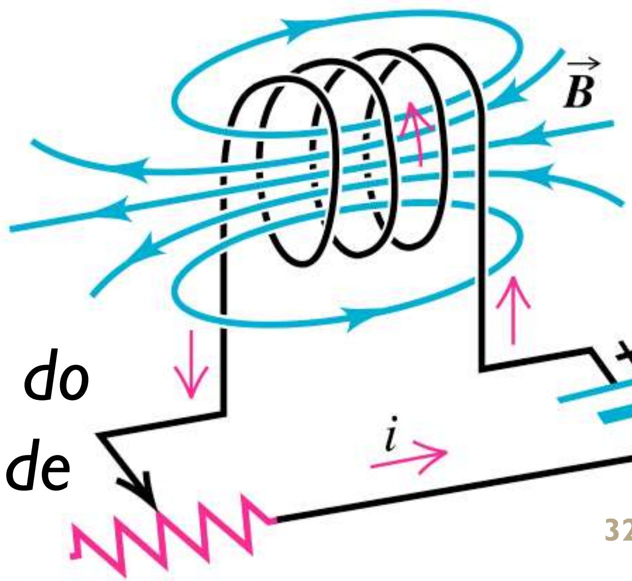
- Ao passar uma corrente elétrica por um indutor, um campo magnético é criado proporcional a corrente

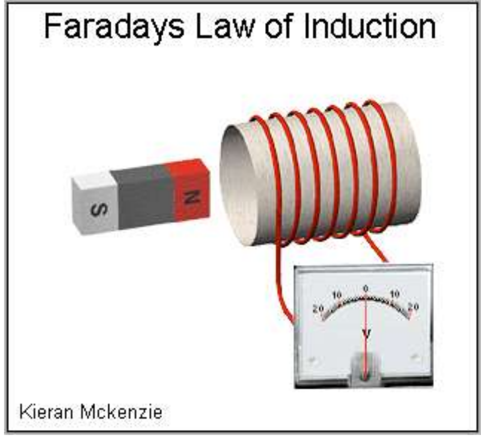
$$B \propto i$$

- Se a corrente for variável no tempo, o campo também será! O que nos faz lembrar da lei de Faraday:

$$\varepsilon_L = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

A tensão elétrica $\boldsymbol{\varepsilon_L}$ *nos terminais do indutor é proporcional à variação de fluxo magnético através dele.*





O Indutor

- Como a única coisa que varia é a corrente:

$$\varepsilon_L = -\frac{d\phi_B}{dt} - A\frac{dB}{dt} = -cte\frac{di(t)}{dt}$$

- Vamos chamar a constante de **L**, ou indutância, e a força eletromotriz induzida, $\boldsymbol{\varepsilon_L}$, que é a queda de tensão no indutor, será $\mathbf{V_L}$:

$$V_L(t) = L\frac{di(t)}{dt}$$

L é a indutância, medida em Henry (H)

- Em notação complexa, a corrente passando pelo indutor é:

$$\hat{i} = i_L e^{j\omega t}$$

Indutor – Notação Complexa

- E a tensão será então:

$$V_L = L\frac{di}{dt} = j\omega L i_L e^{j\omega t}$$

- Assim a impedância é dada por:

$$\hat{Z}_L = \frac{\hat{V}_L(t)}{i(t)} = \frac{j\omega L i_L e^{j\omega t}}{i_L e^{j\omega t}} = j\omega L$$

Reatância indutiva

- Ou, usando a fórmula de Euler:

$$\hat{Z}_L = j\omega L = \omega L e^{j\frac{\pi}{2}}$$

Portanto a tensão está adiantada de π/2 em relação a corrente

A fase da tensão

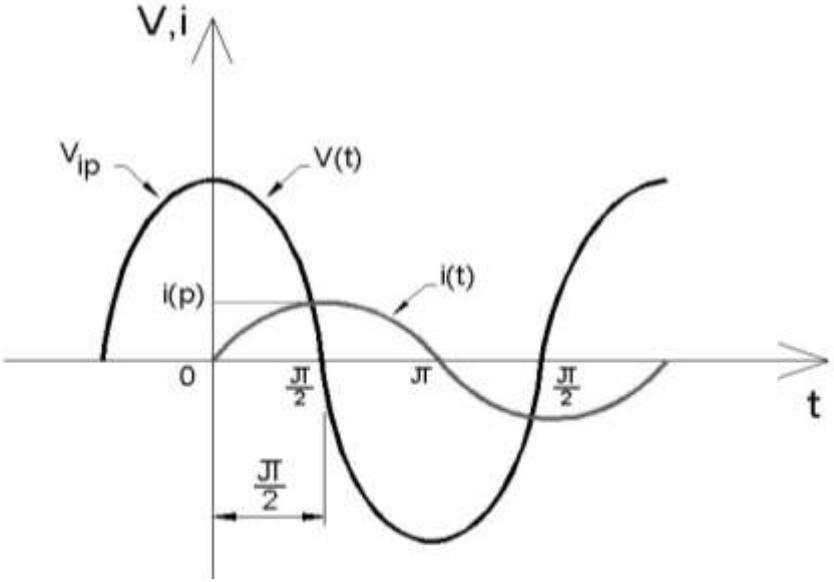
Corrente: $\hat{i}(t) = i_L e^{j\omega t}$

- Indutor:

$$\hat{V}_L(t) = \hat{Z}_L \hat{i}(t)$$

adiantada

$$= \omega L i_L \exp\left[j\left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

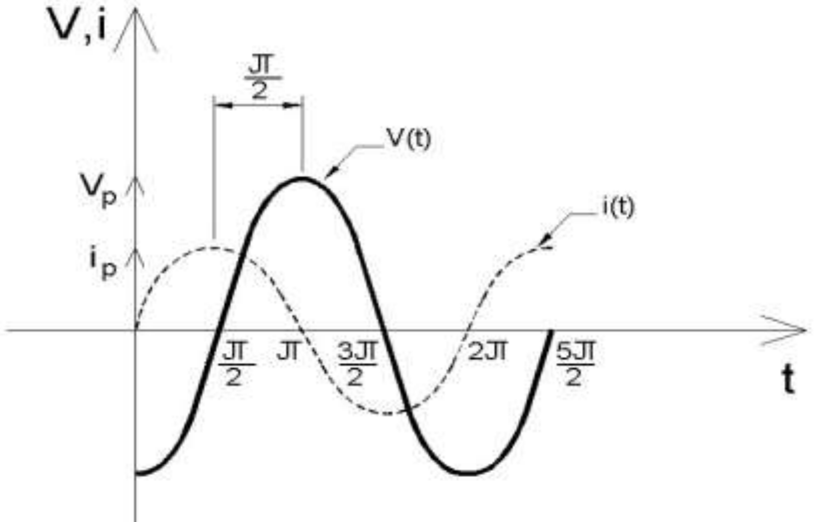


- Capacitor:

$$\hat{V}_C(t) = \hat{Z}_C \hat{i}(t)$$

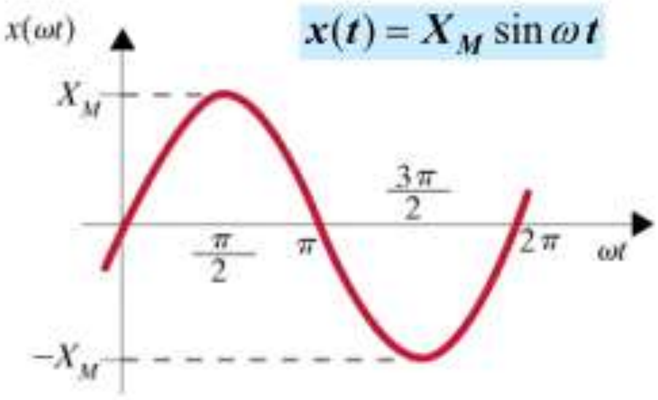
atrasada

$$= \frac{1}{\omega C} i_C \exp\left[j\left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

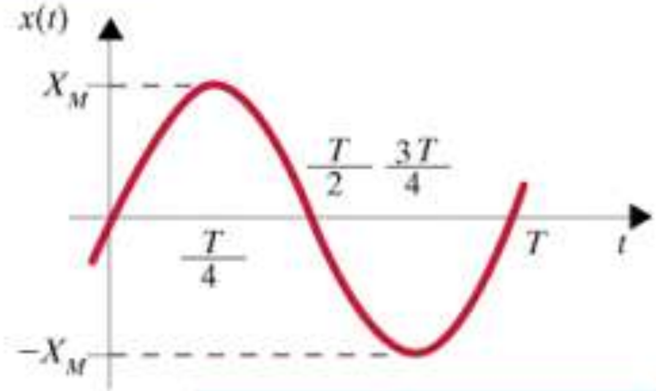


Capacitor e Indutor...

Quem estava adiantado e quem estava atrasado mesmo??



Plotagem adimensional



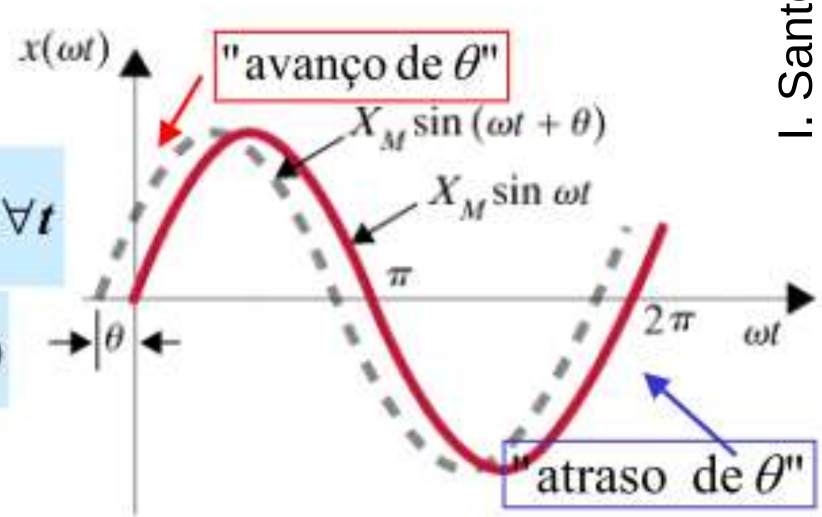
Como função do tempo

X_M = amplitude ou valor máximo
ω = freqüência angular (rad/s)
ωτ = argumento (radianos)

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \text{ Período} \Rightarrow x(t) = x(t+T), \forall t$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \text{freqüência em Hertz (ciclos/s)}$$

$$\omega = 2\pi f$$



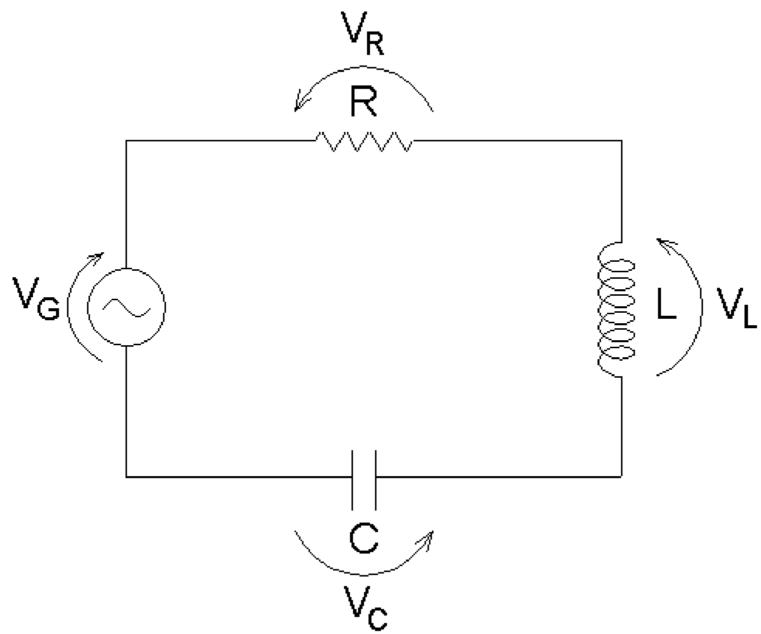
I. Santos, UNB (2008)

Circuito RLC

- Já sabíamos tudo sobre capacitores
- Agora sabemos tudo sobre indutores

O próximo passo é obvio...Vamos juntar tudo!

Dado um sinal de entrada $V_g(t)$, qual a tensão em cada um dos elementos e qual a corrente no circuito?



Circuito RLC

A equação básica é:

$$V_L(t)+V_R(t)+V_C(t)=V_G(t)$$

No indutor temos:

$$V_L(t)=L\frac{di}{dt}=L\frac{d^2q(t)}{dt^2}$$

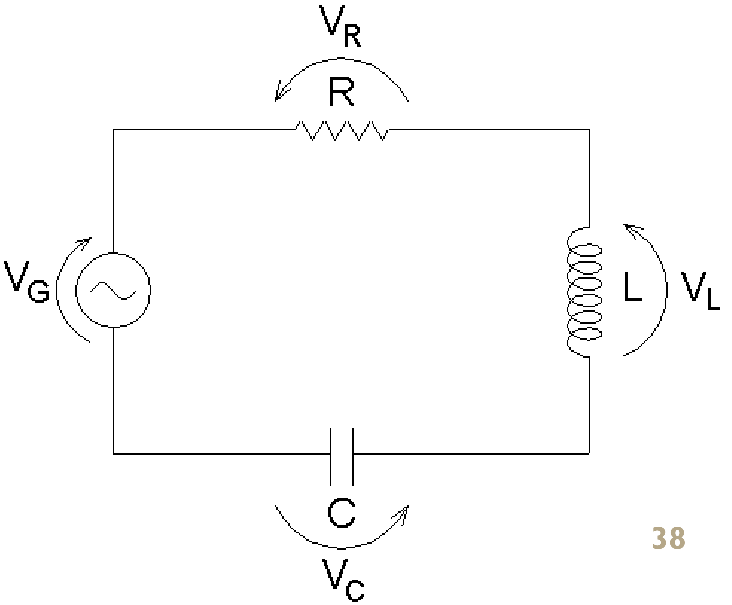
$$V_G(t)=V_0\cos(\omega t)$$

No resistor temos:

$$V_R(t)=Ri(t)=R\frac{dq(t)}{dt}$$

No capacitor temos:

$$V_C(t)=\frac{q(t)}{C}$$



A Equação do Circuito RLC

Substituindo tudo na equação se obtém:

$$L\frac{d^2q(t)}{dt^2}+R\frac{dq(t)}{dt}+\frac{1}{C}q(t)=V_o\cos(\omega t)$$

A solução para $q(t)$ é a solução geral da homogênea mais uma solução particular da equação acima.

- **Solução da homogênea**
  - comportamento transitório do circuito (quando ele é ligado ou desligado): oscilador harmônico amortecido
- **Solução particular**
  - comportamento em regime estacionário, depois que o comportamento transitório desaparece: oscilador forçado

A dedução não vai ser feita em detalhe aqui, mas pode ser encontrada no capítulo 2 de Mecânica de K. R. Symon e nas notas de aula do curso FAP–212, aulas 4 e 5.

Caminho mais fácil...

- Como é um **circuito em série** a impedância complexa total do circuito é a soma das impedâncias complexas de cada elemento:

$$\hat{Z} = \hat{Z}_R + \hat{Z}_L + \hat{Z}_C = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

- A **impedância real** será:

$$Z = \sqrt{\hat{Z}\hat{Z}^*} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

- E a **fase** será:

$$tg\phi = \frac{\mathrm{Im}[\hat{Z}]}{\mathrm{Re}[\hat{Z}]} = \omega\frac{L}{R} - \frac{1}{\omega RC}$$

$$\hat{Z} = Ze^{j\phi}$$

A Corrente no Circuito RLC

- Sendo a tensão de entrada: $\hat{V}_G = V_G e^{j\omega t}$
- A corrente pode ser escrito como:

$$\hat{i} = \frac{\hat{V}_G}{\hat{Z}} = i_0 e^{j(\omega t - \phi_i)}$$

- Portanto:

$$\hat{i} = \frac{V_G e^{j\omega t}}{Z e^{j\phi}} = \frac{V_G}{Z} e^{j(\omega t - \phi)} = \overbrace{\frac{V_G}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}} e^{j(\omega t - \phi)}$$

$$\boxed{\text{A fase da corrente vem da impedância total.}}$$

Tensões Nos Elementos

- Agora o problema está resolvido, pois como a corrente é a mesma em todo o circuito, podemos calcular a tensão no:
  - Resistor:

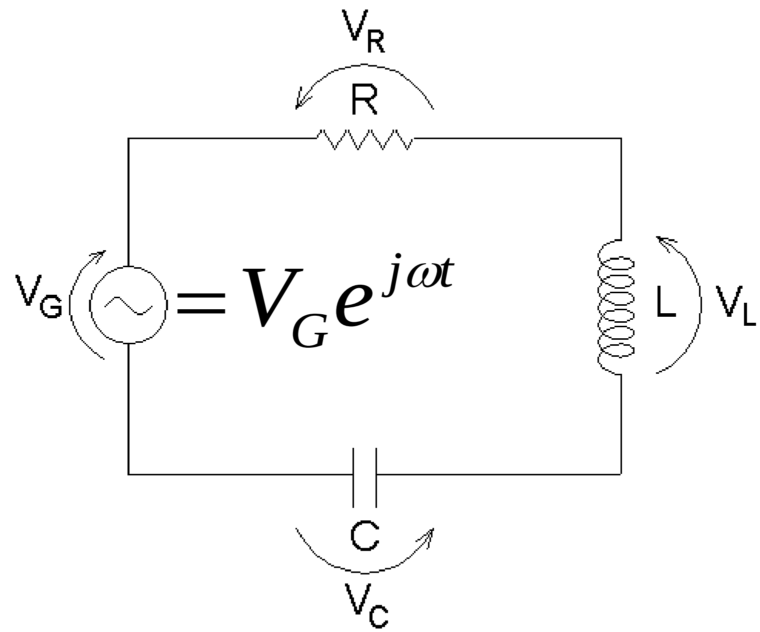
$$\hat{V}_R(t) = Ri_0 e^{j(\omega t - \phi)}$$

  - Capacitor

$$\hat{V}_C(t) = \frac{1}{\omega C} i_0 e^{j(\omega t - \phi - \pi/2)}$$

  - Indutor:

$$\hat{V}_L(t) = \omega L i_0 e^{j(\omega t - \phi + \pi/2)}$$

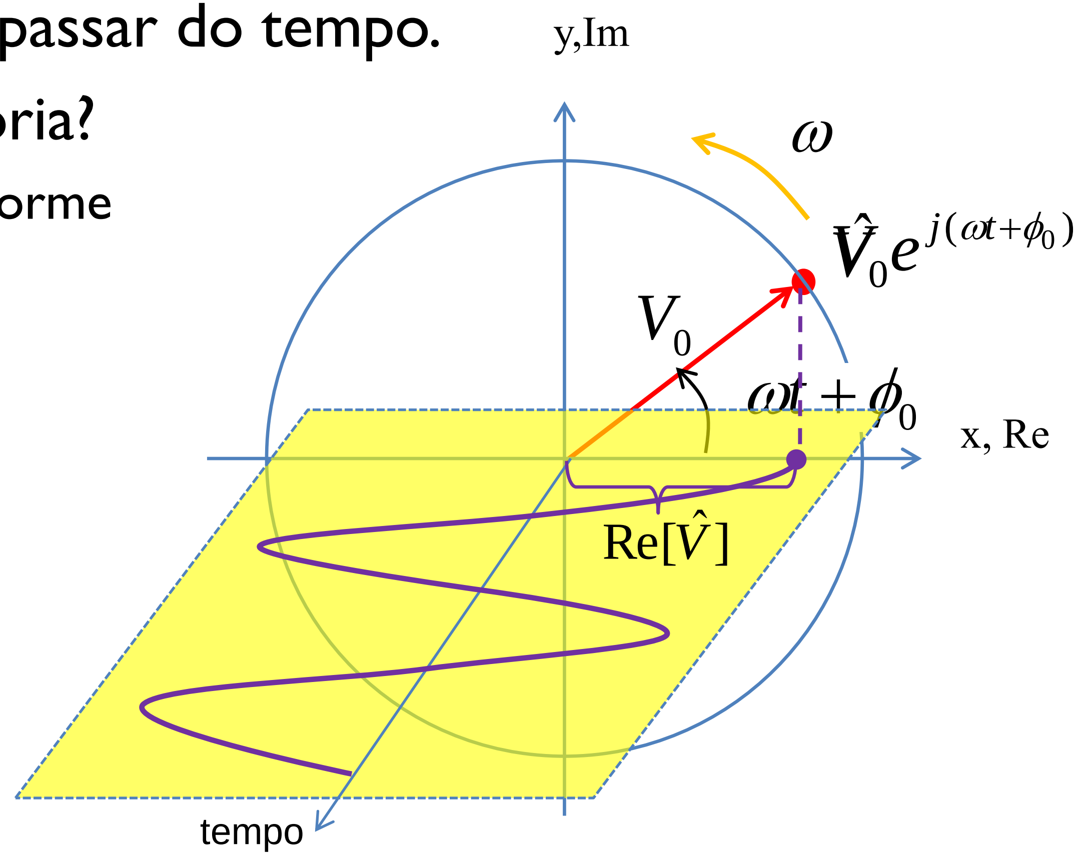


$$= V_G e^{j\omega t}$$

Fasores e Correntes Alternadas

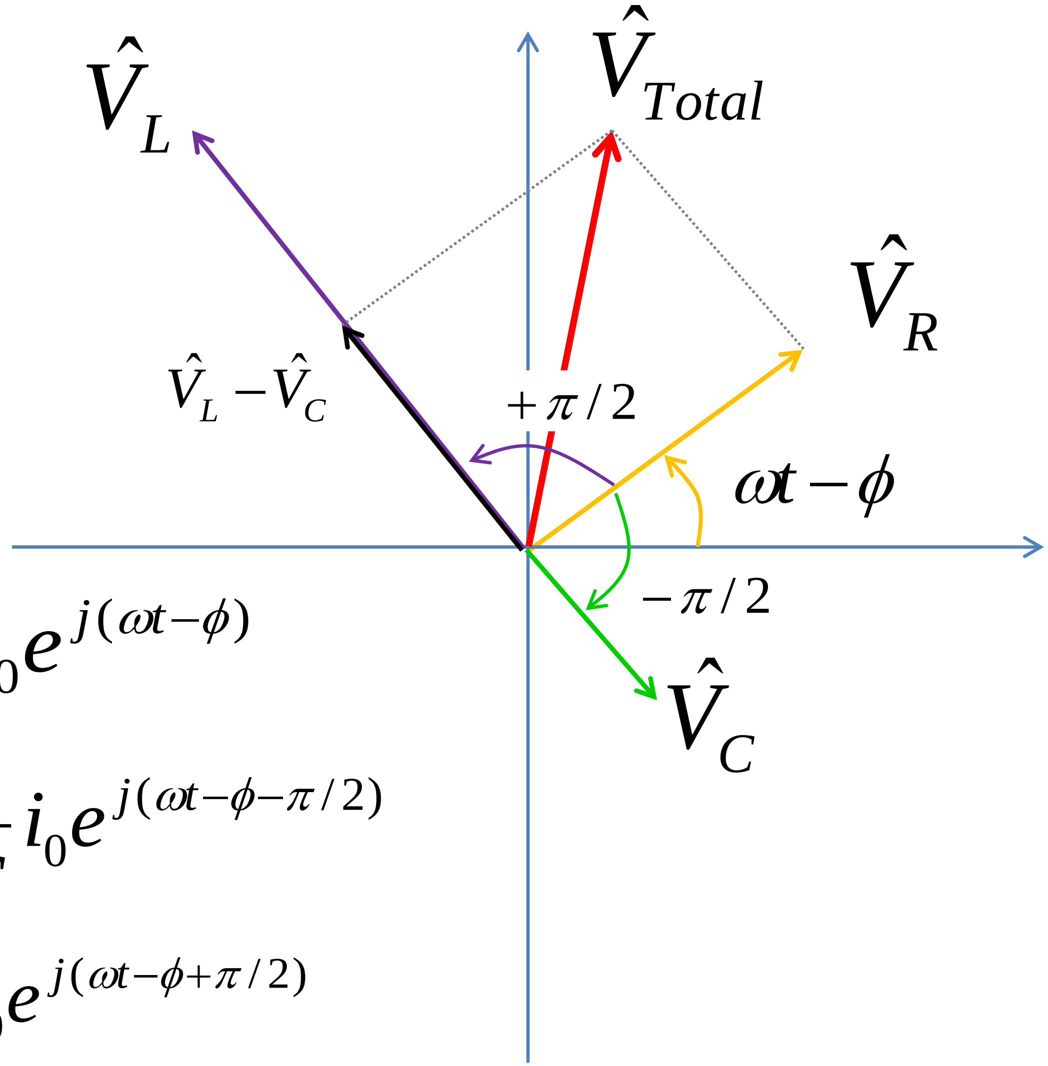
$$\hat{V}(t) = V_0 e^{j(\omega t + \phi_0)} \Rightarrow \begin{array}{l} V(t) = V_0 \cos(\omega t + \phi_0) \\ V(t) = \mathrm{Re}\left(\hat{V}(t)\right) \end{array}$$

- Mas o que esta acontecendo realmente?
  - O número complexo V(t) muda de posição no plano complexo com o passar do tempo.
  - Qual é sua trajetória?
    - Mov. Circular Uniforme



Fasores e o Circuito RLC

- Mas e o capacitor e o indutor??



$$\hat{V}_R(t) = Ri_0 e^{j(\omega t - \phi)}$$

$$\hat{V}_C(t) = \frac{1}{\omega C} i_0 e^{j(\omega t - \phi - \pi/2)}$$

$$\hat{V}_L(t) = \omega L i_0 e^{j(\omega t - \phi + \pi/2)}$$

Ressonância em Corrente

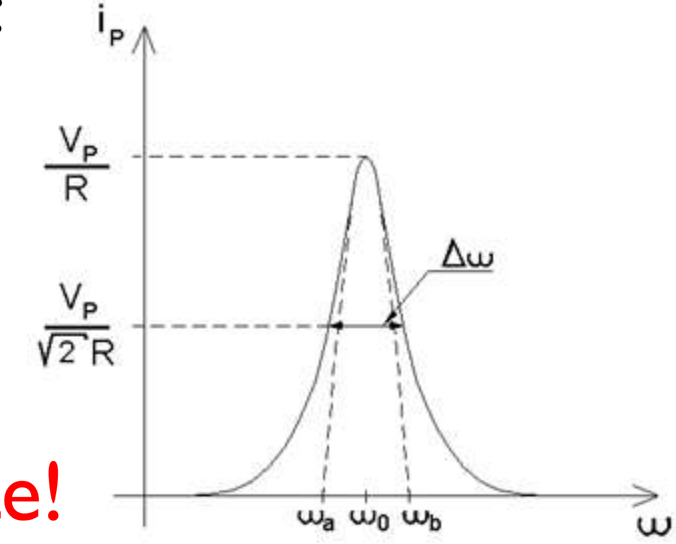
- Algo passou quase despercebido.
  - A amplitude da corrente (e de todas as tensões) depende de uma maneira bastante peculiar da freqüência.

$$i_0 = \frac{V_G}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

  - A corrente é máxima quando:

$$\frac{di_0}{d\omega} = 0 \Rightarrow \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ e } \phi = 0$$



- O circuito RLC é ressonante!

Ressonância em Carga

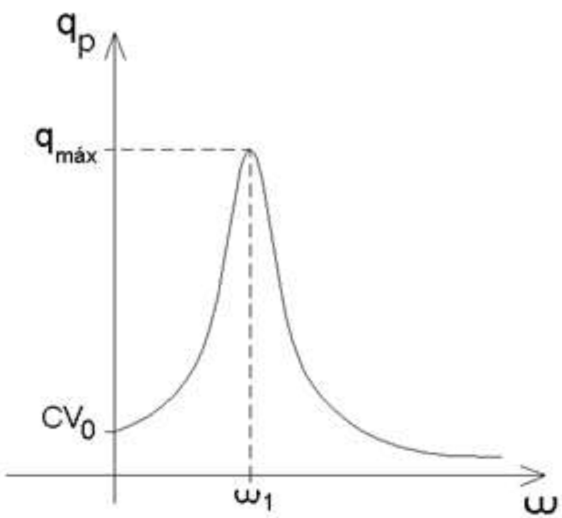
- Para a carga (tensão no capacitor) é diferente:

$$V_{C0} = \frac{i_0}{\omega C} = \frac{V_G}{\omega C\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

- A tensão é máxima quando, $dV_{C0}/d\omega = 0$, portanto:

$$\Rightarrow \frac{d}{d\omega}\left[\omega C\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}\right] = 0$$

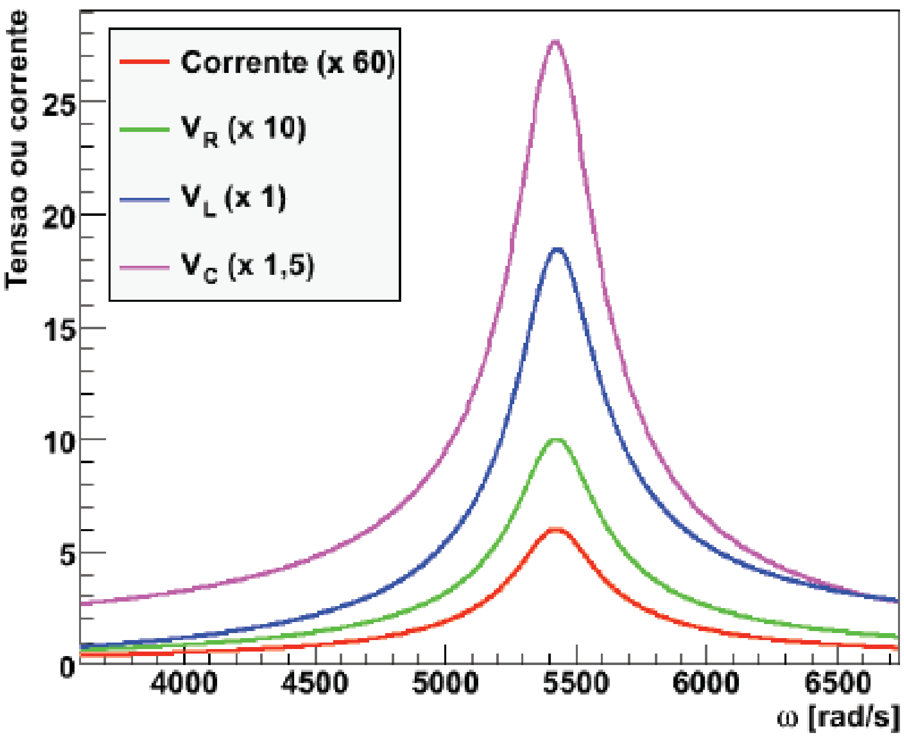
$$\Rightarrow \omega_1 = \sqrt{\omega_0 - \frac{R^2}{2L^2}}$$



- O capacitor tem carga para ω=0
- As freq. de ressonância são diferentes!
- Pergunta: podemos medir essa diferença?

Ressonância: Circuito RLC

- As tensões e correntes têm um máximo num valor definido ⇒ Ressonância



  - O que define a posição são as constantes (R, L e C)
  - A posição dos máximos não são necessariamente a mesma para todos os sinais (verifiquem o valor para a tensão no indutor)

- Mas o que define a altura e a largura dessas curvas?

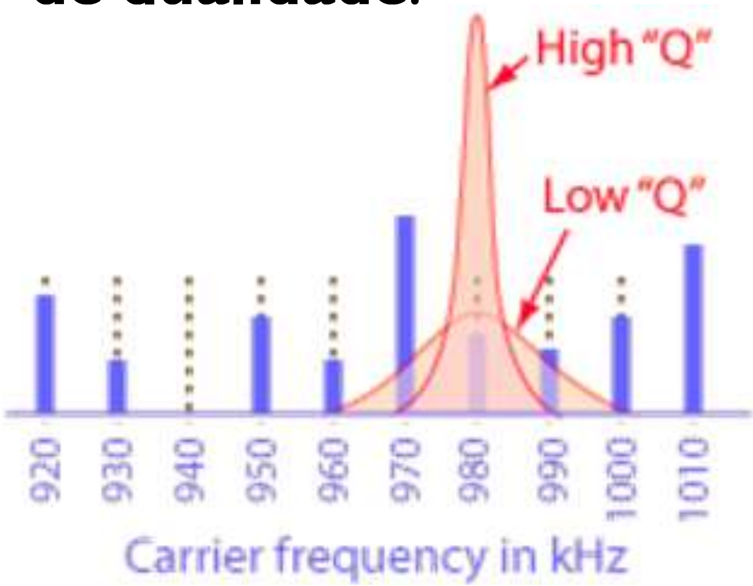
Fator de Qualidade

- Um rádio AM usa um circuitos ressonantes RLC para selecionar a estação.
  - A seleção tem que conseguir separar estações vizinhas, sem perder o sinal da estação que se quer ouvir.
  - Os engenheiros definiram o **fator de qualidade**:

$$Q = \frac{\omega}{\Delta\omega} = 2\pi\left[\frac{U}{\Delta U}\right]_{ressonância}$$

U = Energia armazenada por ciclo

ΔU = Energia dissipada por ciclo



Fator de Qualidade

- Fator de qualidade do circuito:

$$Q = 2\pi\left[\frac{U}{\Delta U}\right]_{res} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}$$

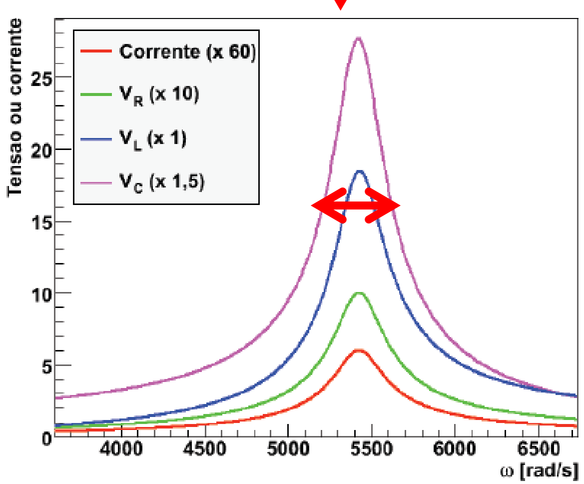
Largura em $\begin{cases} \dfrac{i_0}{\sqrt{2}} \text{ (curva i} \times \omega) \\ \dfrac{P_0}{2} \text{ (curva Pot} \times \omega) \end{cases}$

- U é a energia armazenada no circuito na condição de ressonância:

$$U = \frac{1}{2}Li_0^2 = \frac{1}{2}CV_{C0}^2$$

- ΔU é a energia dissipada pelo circuito durante um período de oscilação:

$$\Delta U = \overline{P}T = \frac{1}{2}Ri_0^2T$$



Potência

- A potência entregue a um bipolo é o produto entre a tensão e a corrente.

$$
\begin{aligned}
P(t) &= V(t)\cdot i(t) \\
&= V_P \cos(\omega t)\cdot i_P \cos(\omega t - \phi) \\
&= V_P i_P \frac{1}{2}\left(\cos(2\omega t - \phi) + \cos(\phi)\right)
\end{aligned}
$$

- no caso de correntes alternadas, o que vai interessar saber é a potência média dissipada num ciclo, em cada um dos elementos

$$
\overline{P} = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{V_P i_P}{2}\cos(\phi)dt + \underbrace{\frac{1}{T}\int_0^T \frac{V_P i_P}{2}\cos(2\omega t + \phi)dt}_{=0}
$$

$$
= \frac{1}{2} V_P i_P \cos\phi
$$

Ressonância em Energia

- Portanto a potência média absorvida pelo circuito **RLC** (veja também a apostila de **Corrente Alternada**) pode ser escrita como:

$$\overline{P} = \frac{1}{2} V_{G0} i_0 \cos\phi = \frac{V_{G0}^{\ 2}}{2Z_0} \cos\phi$$

- Na condição de ressonância, **ϕ=0** e **Z_0=R**, portanto, a potência média **por ciclo** vai ser **máxima**:

$$\overline{P} = \frac{V_{G0}^2}{2R}$$

O máximo da potência ocorre para a mesma freqüência em que ocorre a ressonância para a corrente.

A ressonância de corrente é também chamada de ressonância de energia.

Potência

- Resumindo:
  - Somente a resistência dissipa potência, capacitores e indutores <u>puros</u> não dissipam potência num período:
    - O que eles retiram do circuito na metade do período, eles devolvem na outra metade

- Existem capacitores e indutores puros ou ideais?
  - O capacitor é ideal e vocês verificaram
  - E o indutor, o que acham?

- Há outras resistências, além do resistor no circuito?

Circuito RLC: Dissipação de Energia

- Você pode verificar isso!
  - Na condição de ressonância de corrente, $\omega = \omega_0$ e:

$$Z_0 = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \Rightarrow R$$

$$tg\phi_0 = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)\frac{1}{R} \Rightarrow \phi_0 = 0$$

Se Φ_0=0, corrente e tensão estão em fase, o circuito é puramente resistivo

  - Portanto:

$$V_{G0} = Ri_0$$

V_{G0} é a tensão de pico aplicada pelo gerador e i_0 é a corrente de pico no circuito

  - Ou seja, se medir V_{G0} e i_0 na ressonância você descobre qual é a resistência total, **R**, do circuito

Atividades da Semana

- A freqüência de ressonância é ligeiramente diferente se observarmos a corrente, tensão no capacitor ou indutor
  - Contudo, é muito difícil quantificar experimentalmente
  - CONCLUSÃO: Vamos medir apenas uma curva de ressonância e tentar aprender o máximo possível com ela.
    - Ressonância em corrente.
- O que podemos obter da curva de ressonância?
  - Freqüência e largura
  - Fator de qualidade (Q)
    - Energia armazenada e dissipada no circuito.

Para entregar

- Levantar a curva de ressonância de corrente do circuito **RLC**
  - Ajustar e Comparar com a curva teórica
    - O que usar? Ondas harmônicas simples ou quadrada + FFT ?
- Calcular a potência média dissipada por ciclo em função da freqüência
  - Obter o valor de Q e comparar com a previsão
- Na ressonância, medir V_L e V_C
  - Qual a diferença de fase entre as duas? Compare uma com a outra e ambas com a amplitude da tensão no gerador. Comente.

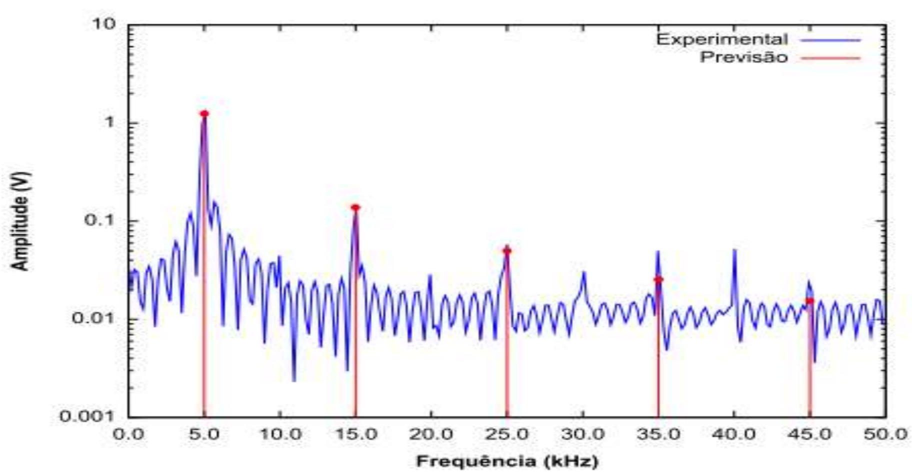
- Fazer isso para dois circuitos diferentes:

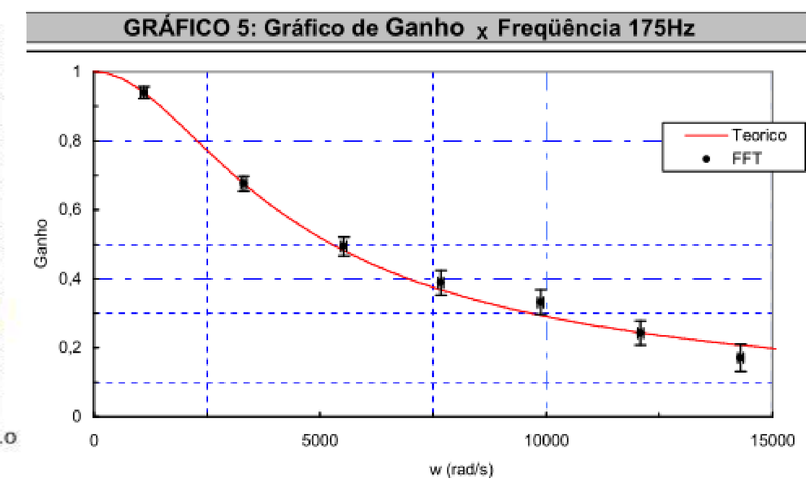
R_1=1Ω, **C=1μF** e **L=35mH**

R_1=33Ω, **C=1μF** e **L=35mH**

Como fazer a medida

- Precisamos medir o sinal de saída em função da freqüência... Podemos usar o método da FFT?
  - Quando usamos a FFT, só determinamos em alguns pontos, não foi? Porque?
  - Medimos os pontos correspondentes aos picos, pois o ruído dos dois sinais não são correlacionados!
  - Qual a resolução que conseguimos (separação entre os picos da FFT(onda quadrada)?
  - Qual a largura da curva de ressonância?

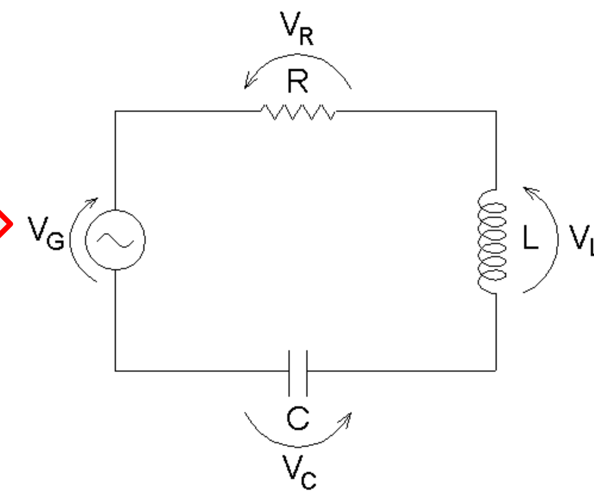


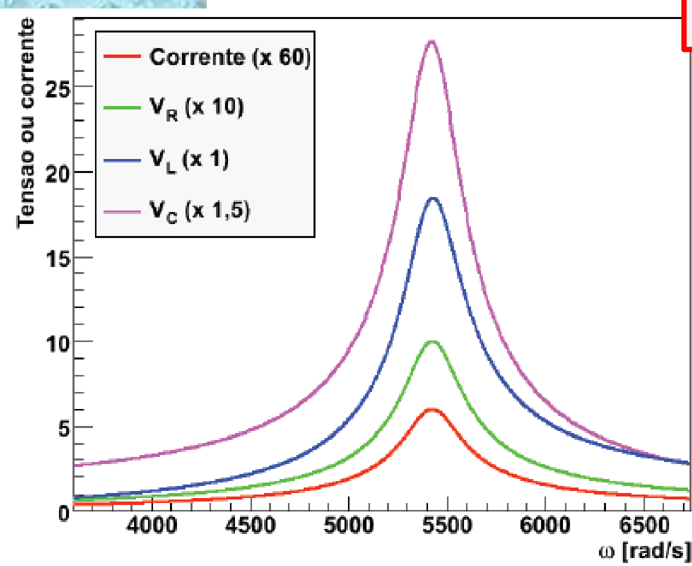


Cuidados

Usar o casador de impedâncias do gerador de áudio

O que vão medir? Onde colocar o terra?





Lembre-se de medir um número de pontos que permita obter curvas bem definidas