

# Experimento 2: Oscilações em circuitos RC e RLC

2s2020

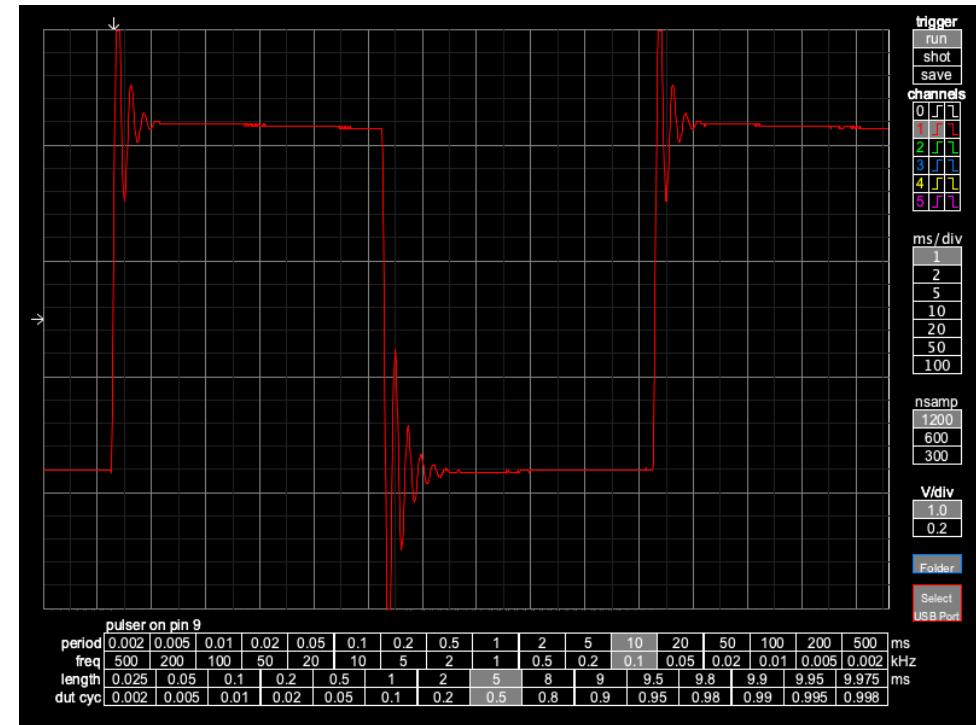
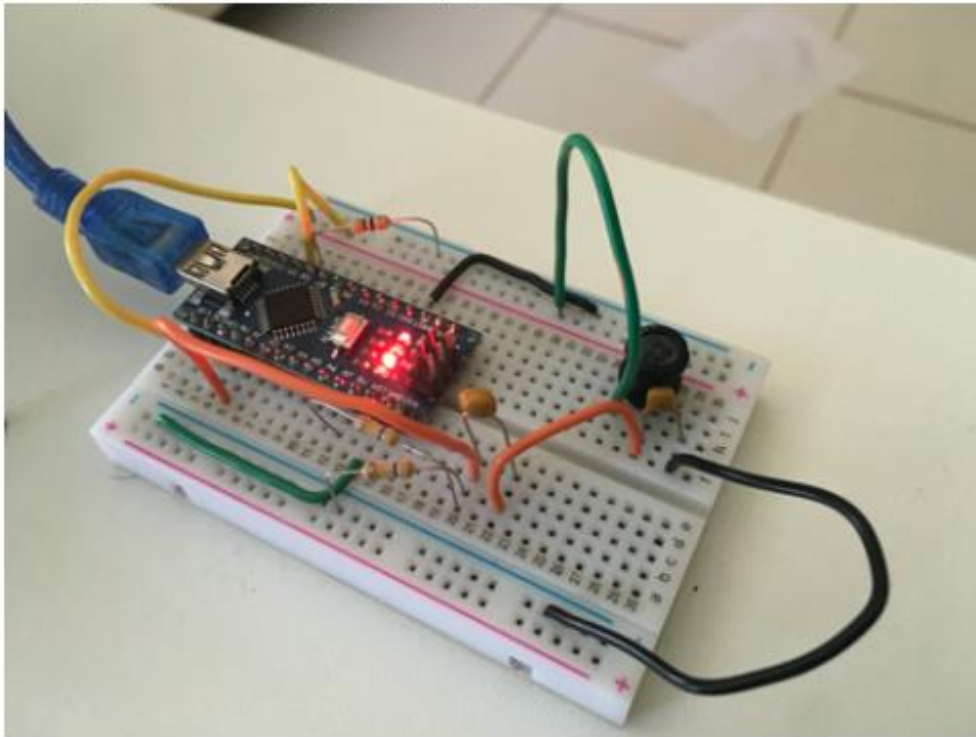
Última atualização:  
13:40 - 03-Nov-2020

# Física Experimental IV

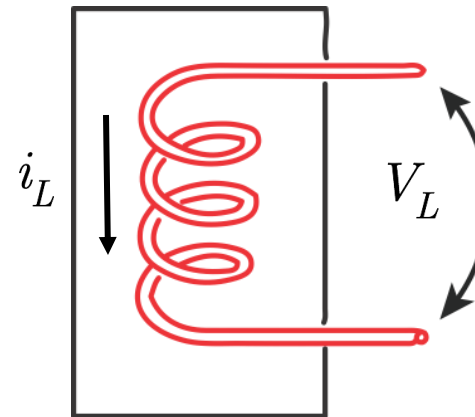
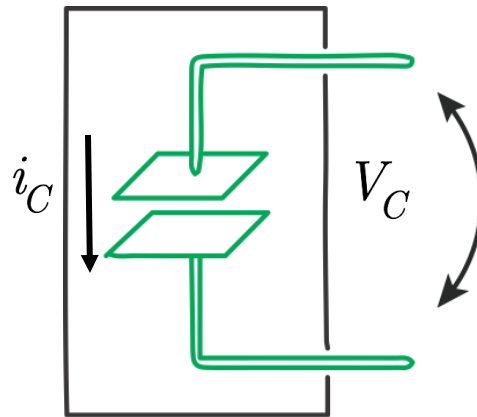
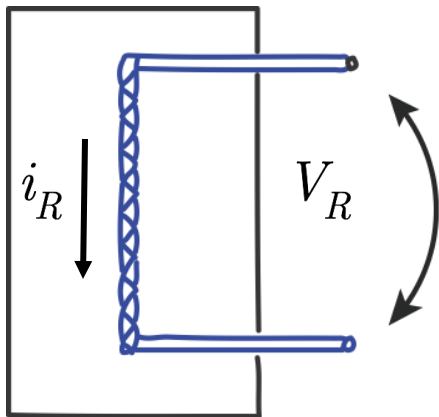
- Experiências de laboratório sobre: propriedades magnéticas da matéria, correntes alternadas, ondas eletromagnéticas, reflexão e refração da luz, polarização, interferência e difração da luz e introdução à física atômica e nuclear.

# Experimento 2

Neste experimento, investigaremos o comportamento de circuito RC e RLC quando são submetidos à ondas quadradas.



# Queda de tensão nos três componentes básicos



Os fenômenos explorados neste experimento decorrem das relações entre tensão e corrente elétrica nos componentes acima. Assume-se que o estudante seja familiar com os conceitos:

- Carga elétrica
- Corrente elétrica
- Tensão
- Resistência, capacitância e indutância

Relações entre carga e corrente elétrica

Corrente

$$i(t) \equiv \frac{dq(t)}{dt}$$

Carga

$$q(t) = \int^t i(t') dt'$$

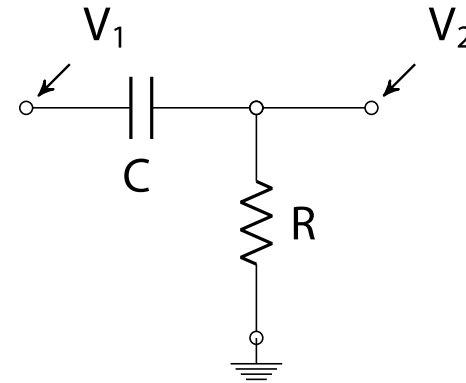
Resistor:  $V_R(t) = R i(t)$

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

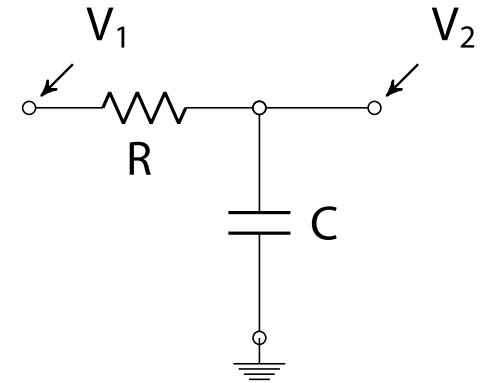
Indutor:  $V_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$

# Explorando circuitos

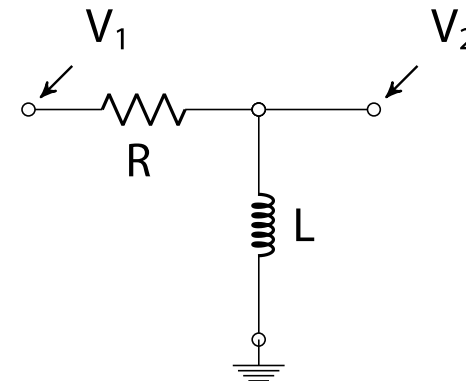
- Quando estabelecemos uma DDP (diferença de potencial) entre dois pontos de um circuito elétrico, uma corrente elétrica irá fluir entre estes. Se a tensão elétrica oscila no tempo, a corrente também irá oscilar.
- Em circuitos contendo componentes como indutores, capacitores e resistores, o comportamento da corrente pode ser complexo.
- Para investigar o que ocorre nestes circuitos, assim como utilizá-los para manipular sinais elétricos, é necessário montar um circuito de forma a medir a tensão elétrica sobre um de seus componentes (resistor, capacitor ou indutor).
- Conforme o slide anterior indica, a tensão sobre cada componente é proporcional às grandezas distintas (carga, corrente ou derivada da corrente) que estão relacionadas entre si por uma derivação ou integração.
- Ao lado são mostradas algumas configurações possíveis destas montagens. **Note que a tensão  $V_2$  é medida sobre o componente diretamente conectado ao terra.**



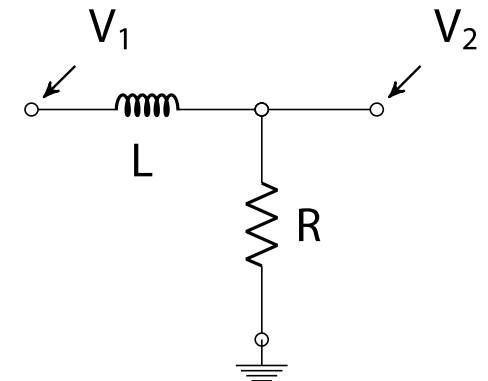
(b) Filtro passa-altas RC



(c) Filtro passa-baixas RC



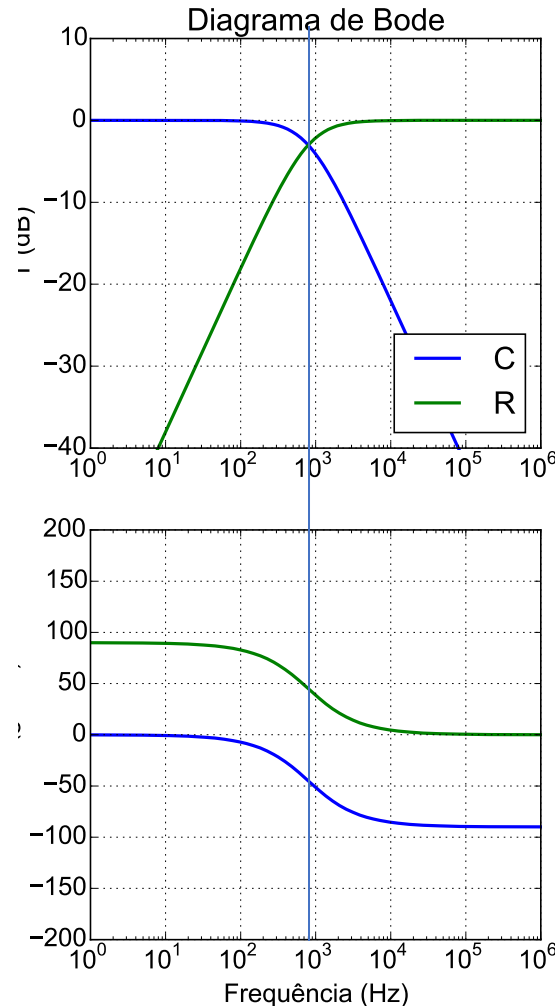
(d) Filtro passa-altas RL



(e) Filtro passa-baixas RL

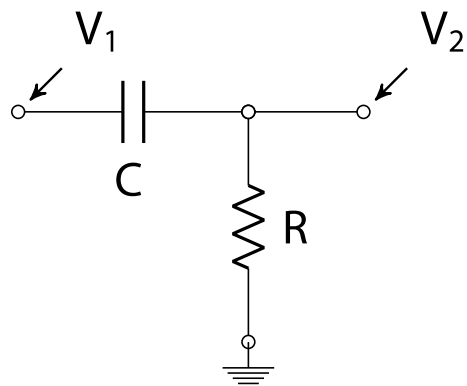
# RC- Parte 1 - Revisão do experimento anterior

- Por exemplo, quando o circuito RC foi caracterizado no experimento anterior, notamos que a medida realizada no resistor ou capacitor apresentava comportamento bastante diferenciado.
- No experimento em vídeo, as tensões de excitação (V1) eram sinais senoidais cuja frequência era variada ao longo do experimento. Observamos que o circuito investigado funciona como um filtro passa-alta (V2 medido no resistor). Neste circuito, a frequência característica é inversamente proporcional à sua constante de tempo.
- A resposta do circuito a uma função senoidal corresponde ao estudo do circuito no domínio da frequência.

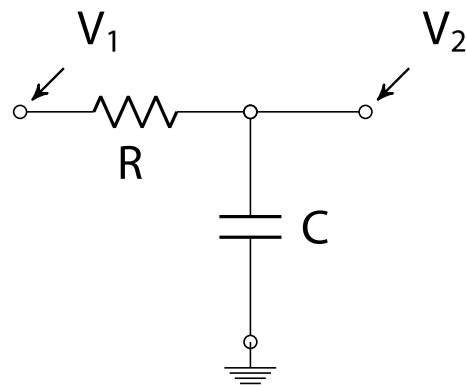


$$\tau = RC$$

$$f_c = 1/(2\pi\tau)$$



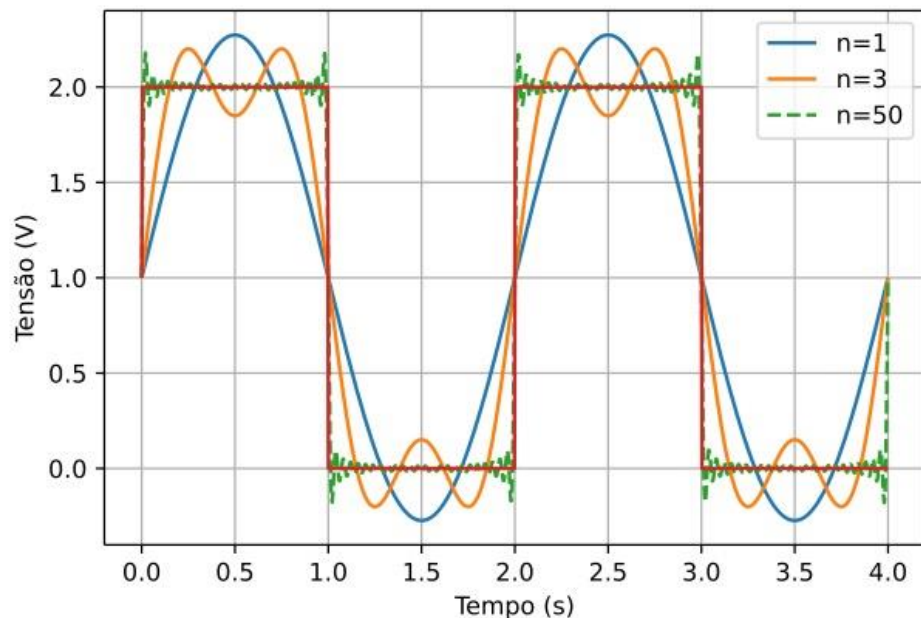
(b) Filtro passa-altas RC



(c) Filtro passa-baixas RC

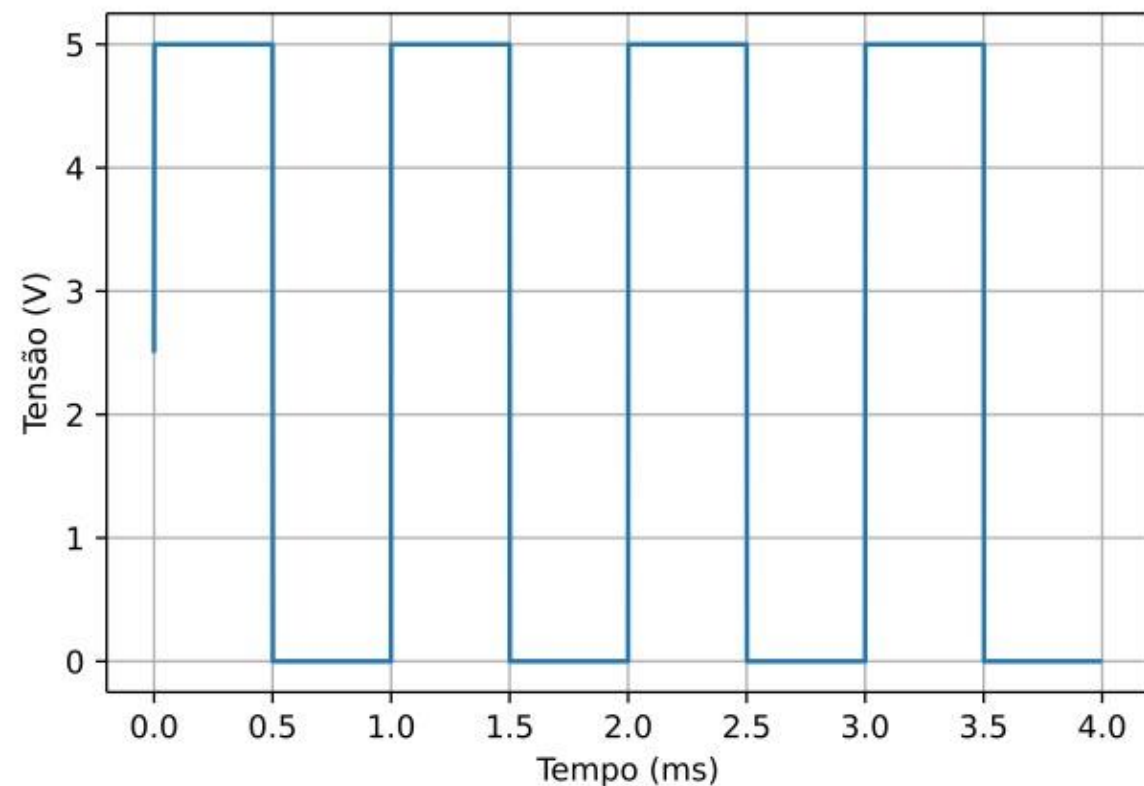
# RC – Parte 0 -Ondas quadradas

1. Neste experimento serão exploradas as respostas dos circuito quando **a tensão de excitação é uma onda quadrada**



Formação de uma onda quadrada a partir da soma de diversas harmônicas senoidais (superposição de Fourier)

A onda quadrada será gerada pelo Arduino (pino D9). Neste exemplo o período é de 1 ms (frequência 1 kHz)



Você pode interpretar a onda quadrada, como uma tensão constante que está ligada para  $(0 < t < T/2)$  e desligada para  $(T/2 < t < T)$ , repetindo-se neste ciclo

# RC – Parte 0 -Ondas quadradas

1. Comece olhando apenas para o canal 0 do arduino. Brinque um pouco com o período da onda “period”, também explore as escalas horizontais do osciloscópio (ms/div e nsamp).
2. Entenda o funcionamento do **trigger**. Clique na seta para reposicionar, mude o trigger para subida ou descida.

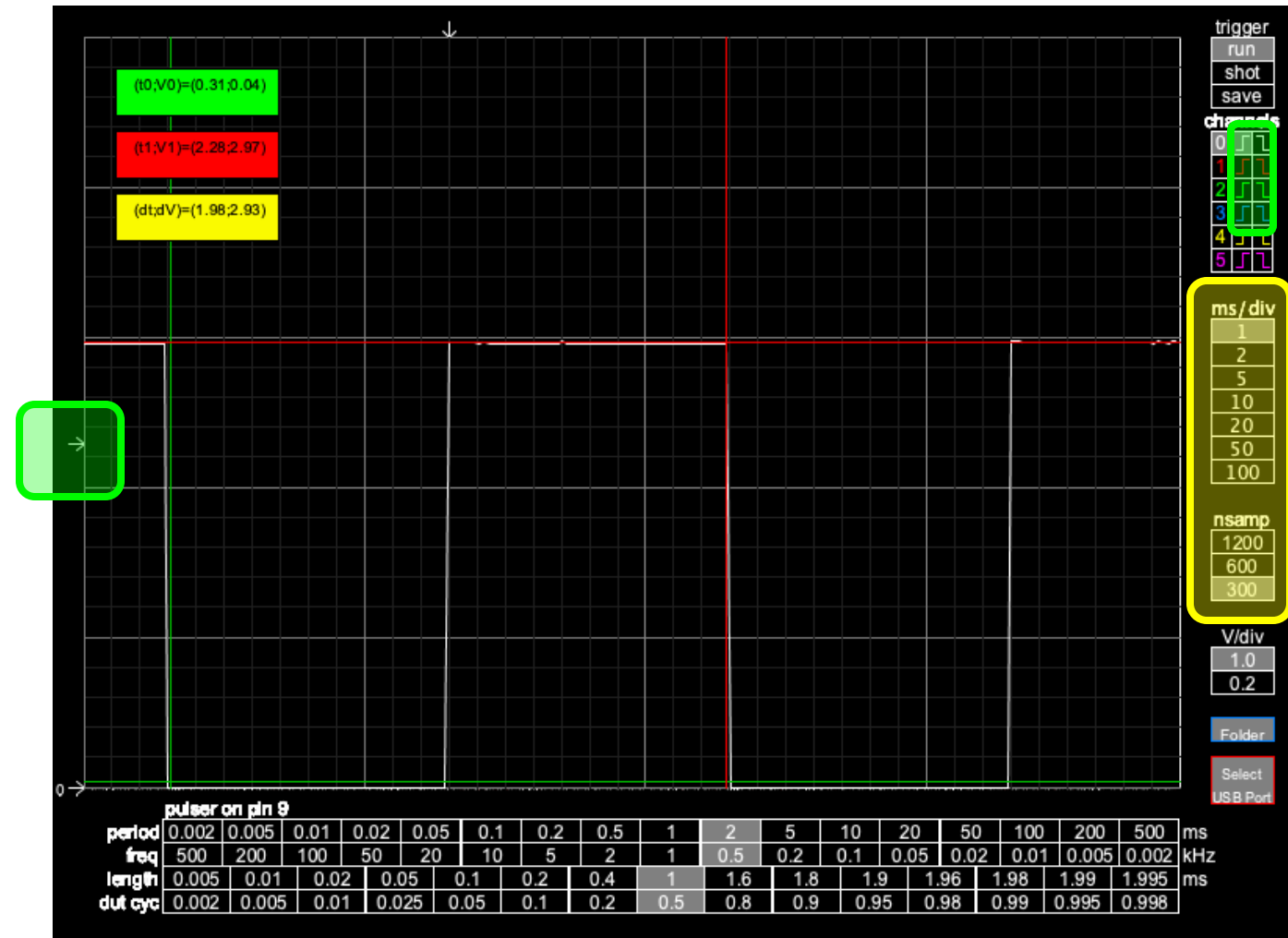


subida



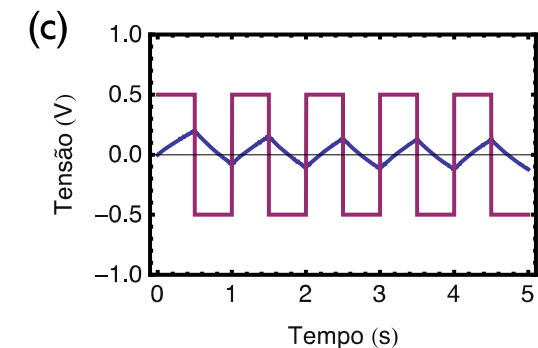
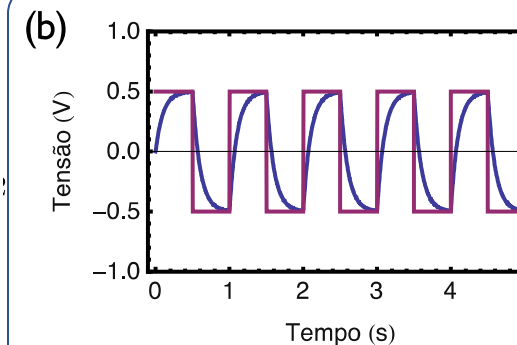
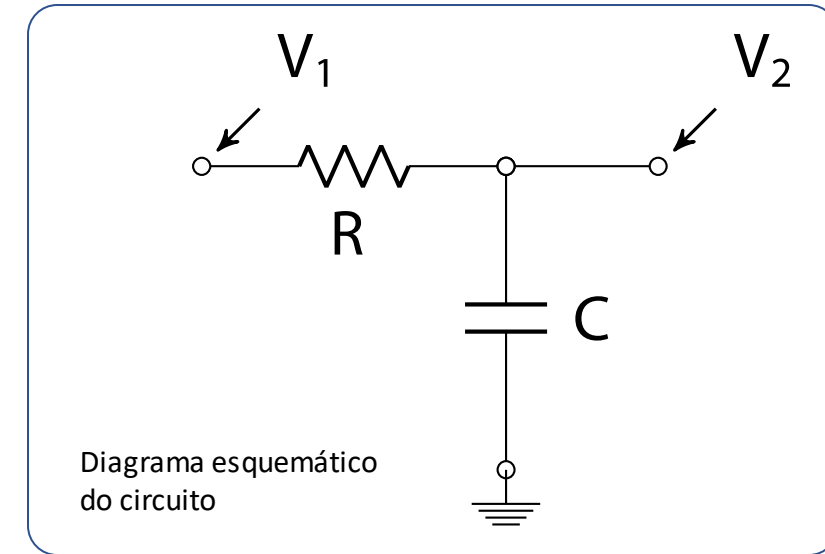
descida

3. Utilize os cursores para fazer medições de amplitude e período da onda. (botões esquerdo e direito do mouse – ou segurando a tecla Ctrl com trackpads)



# RC – Parte 1b

1. Agora monte o circuito na protoboard, comece com um capacitor de 470 nF e um resistor de 1 k $\Omega$ , ou o resistor mais próximo que você tenha.
2. Fotografe o circuito montado, isto deverá fazer parte dos seus dados.
3. Monitore no canal 1 a tensão sobre o capacitor. Que tipo de onda é observada?
4. Você consegue entender este comportamento?
5. Ajuste o período da onda em uma faixa de valores acima, abaixo e próximo à frequência de corte do circuito.
6. Capture dados representativos dos regimes que você observou.
7. Escolha agora resistores maiores, algo 10 ou 50 vezes maior. Repita as observações anteriores.
8. Tente compreender o comportamento global do problema. Como os parâmetros  $R$ ,  $C$ , e período ( $T$ ), influenciam o comportamento do sinal observado?



Características da resposta de um circuito RC à excitação quadrada. Diferentes frequências foram utilizadas em (b), (c)

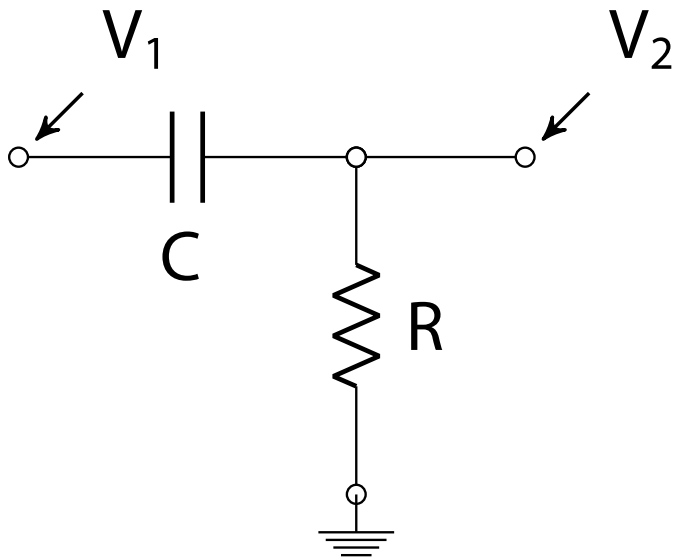
## Dicas:

- Use o trigger no canal 0!
- Evite períodos menores que 200  $\mu$ s. A amostragem do arduino não é tão boa nesta faixa e os dados, provavelmente, não serão muito úteis.



# RC – Parte 1c

1. Agora troque a ordem dos componentes de forma que você consiga medir a tensão no **resistor**.
2. Note que você precisará reposicionar os componentes para isto. Fotografe também esta nova configuração



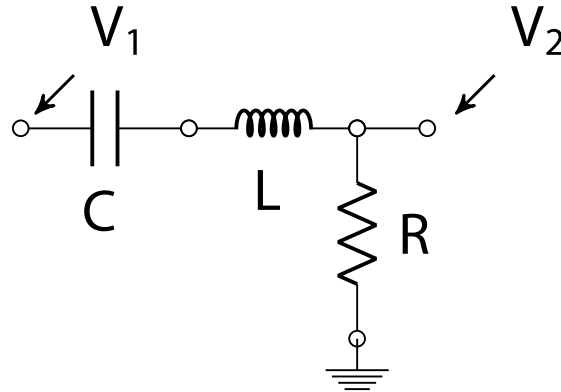
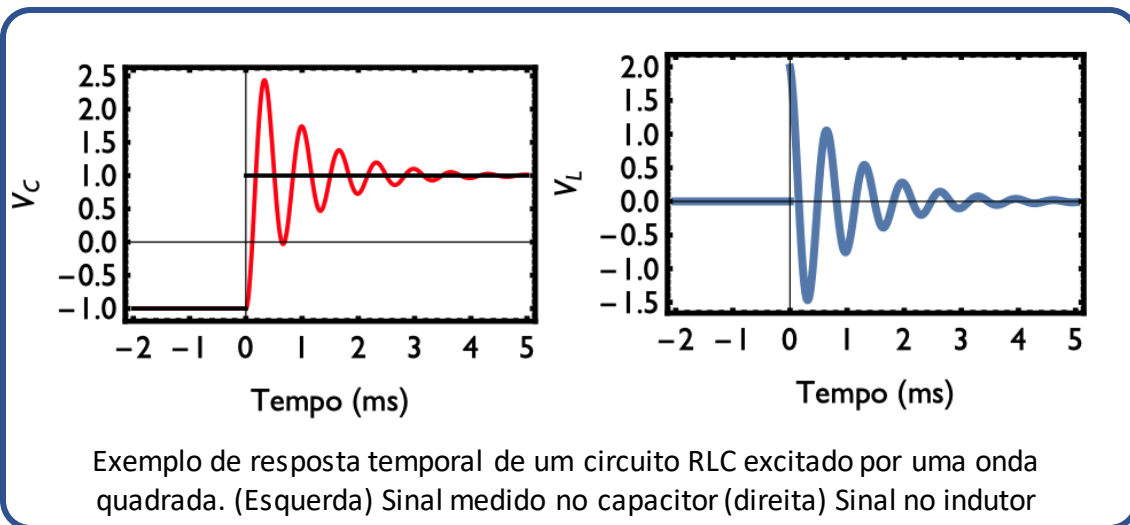
1. Escolha o conjunto de parâmetros ( $R, C, T$ ) que você achou mais interessante da primeira parte.
2. Capture o sinal observado no resistor exatamente nas mesmas condições utilizadas na parte 1. (use o screenshot salvo automaticamente como referência). É fundamental que o trigger esteja no mesmo canal 0 de antes.
3. Salve estes dados e compare os resultados, primeiro qualitativamente.
4. Qual seria a relação entre estes dados e os obtidos no capacitor? Faz sentido o que você obteve?
5. Abra os dados no Python (agora, não depois) e sobreponha ambos os resultados em um mesmo sistema de eixos.
6. Como você verificaria se a Lei de Kirchhoff ( $V_{in}(t) = V_C(t) + V_R(t)$ ) está de acordo com estes dados?
7. Dica: evite períodos menores que  $200 \mu s$ . A amostragem do arduino não é tão boa nesta faixa e os dados, provavelmente, não serão muito úteis.

# RC – Parte 1d

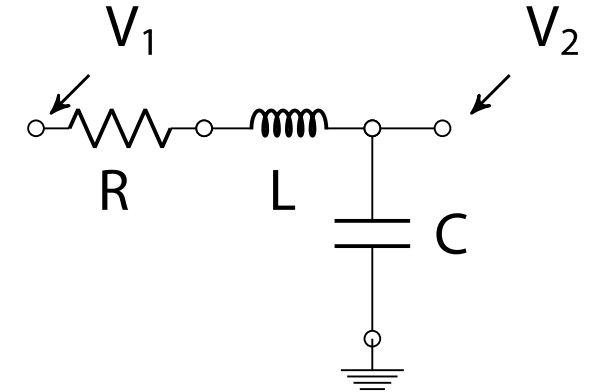
1. Nesta terceira etapa você deverá desenvolver *hard-skills* para analisar estes dados. O objetivo é fazer gráficos claros e informativos que capturem a essência das evidências experimentais obtidas.
  2. Lembre-se que menos pode ser mais. Sintetize. Escolha dados chaves que justifiquem as conclusões que vocês chegaram
1. Escolha o conjunto de parâmetros (R,C,T) que você achou mais interessante da primeira parte.
  2. Capture o sinal observado no resistor **exatamente nas mesmas condições utilizadas na parte 1.**(use o screenshot salvo automaticamente como referência). É fundamental que o trigger esteja no mesmo canal 0 de antes.
  3. Salve estes dados e compare os resultados, primeiro qualitativamente.
  4. Quais a seria a relação entre estes dados e os obtidos no capacitor? Faz sentido o que você obteve?
  5. Abra os dados no Python (agora, não depois) e sobreponha ambos os resultados em um mesmo sistema de eixos.
  6. Como você verificaria se a Lei de Kirchhoff ( $V_{in}(t)=V_c(t)+V_r(t)$ ) está de acordo com estes dados?
  7. **Dica: evite períodos menores que 200  $\mu s$ . A amostragem do arduino não é tão boa nesta faixa e os dados, provavelmente, não serão muito úteis.**

# LC e RLC – Parte 2

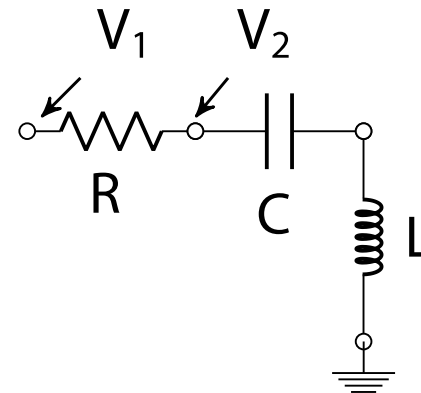
- Os circuitos RLC exibem o fenômeno da ressonância. Assim como no RC, a tensão sobre cada componente é proporcional às grandezas distintas (carga, corrente ou derivada da corrente) que estão relacionadas entre si por uma derivação ou integração.
- Ao lado são mostradas algumas configurações possíveis destas montagens. **Note que a tensão  $V_2$  é medida sobre o componente diretamente conectado ao terra.**
- Nesta etapa, apenas as configurações (b) e (c) ao lado serão exploradas.**



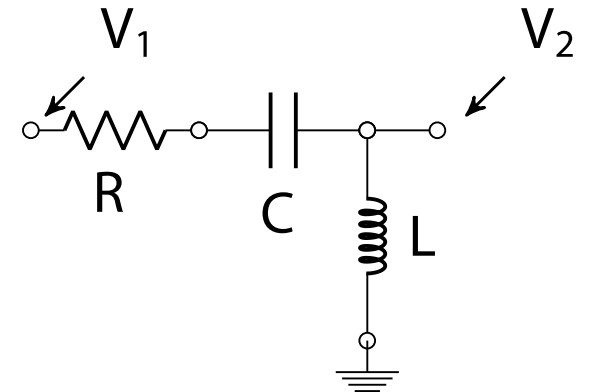
$$(a) \quad V_2(t) = Ri(t)$$



$$(b) \quad V_2(t) = q(t)/C$$



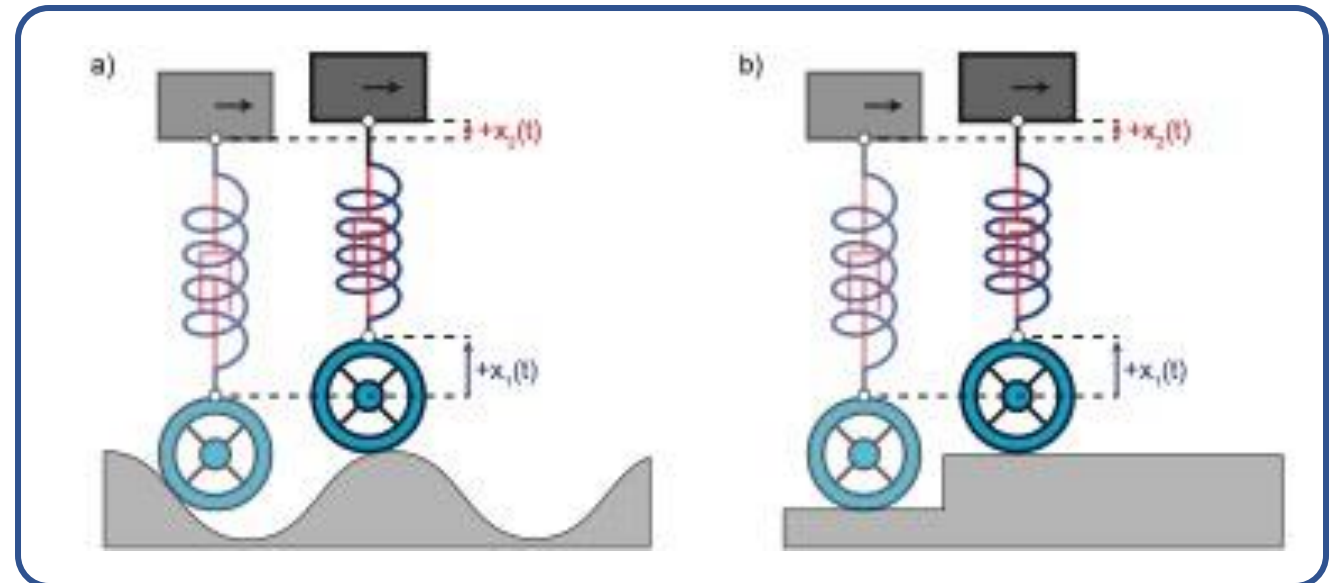
$$(d) \quad V_2(t) = L di/dt + q(t)/C$$



$$(c) \quad V_2(t) = L di/dt$$

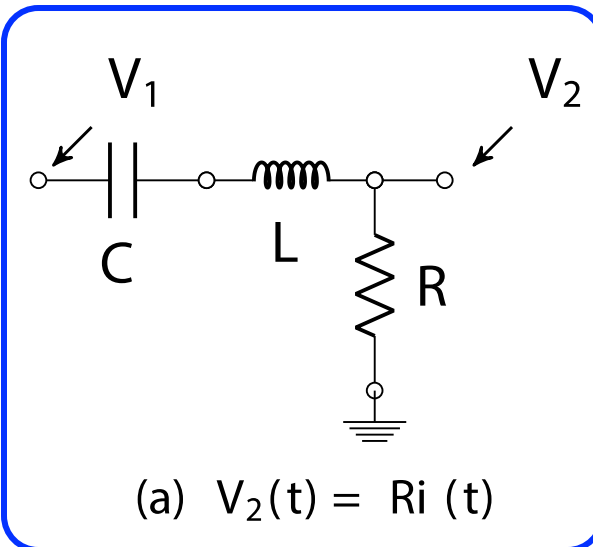
# LC e RLC – Parte 2

- Os circuitos RLC exibem o fenômeno da ressonância. Assim como no RC, a tensão sobre cada componente é proporcional à grandezas distintas (carga, corrente ou derivada da corrente) que estão relacionadas entre si por uma derivação ou integração.
- A física deste circuito, embora possa parecer complexa, é análoga a um sistema massa-mola. O indutor cumpre o papel de força inercial (termo de aceleração na lei de Newton), o capacitor é responsável pela força restauradora (da lei de Hooke), e o resistor corresponde ao termo de amortecimento viscoso (termo proporcional à velocidade).
- Na ilustração abaixo, o perfil do solo impõe uma força ao sistema, que pode ser senoidal (como no experimento anterior) ou abrupta, na forma de degrau. É esta **excitação abrupta** que será explorada nesta parte utilizando uma onda quadrada

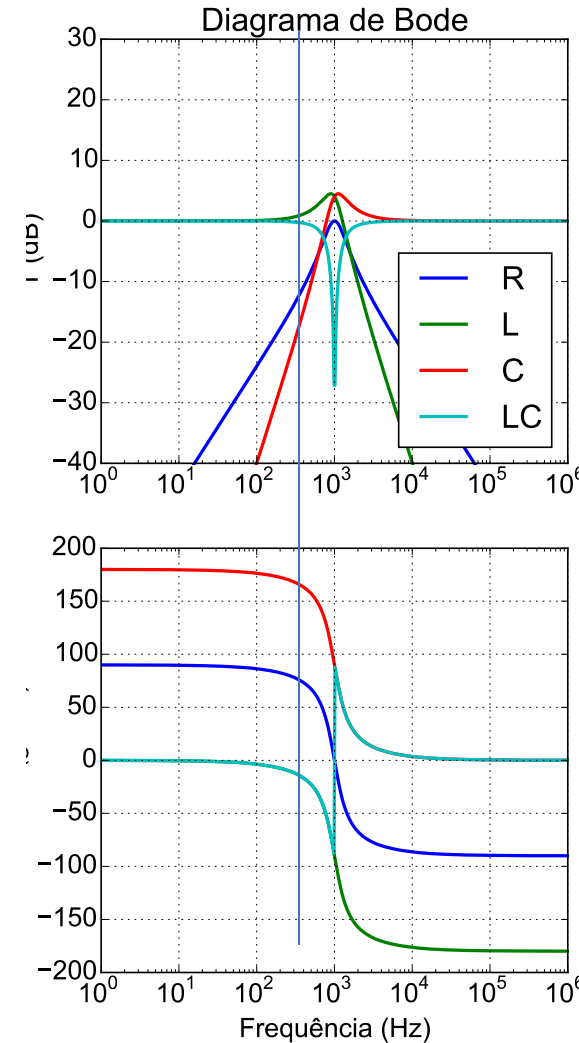


# RLC – Parte 2 - Revisão do experimento anterior

- Quando o circuito RLC foi caracterizado com a varredura em frequência, notamos que a medida realizada no resistor ou capacitor apresentava comportamento bastante diferenciado.
- No experimento em vídeo para o RLC, as tensões de excitação (V1) **eram sinais senoidais cuja frequência era variada ao longo do experimento**. Observamos que o circuito investigado funciona como um filtro passa-banda (V2 medido no resistor). Aqui, a frequência temos 2 frequências características, a principal delas é a frequência de ressonância.



No experimento anterior, apenas esta configuração foi explorada, que equivale a medir a corrente ( $R \cdot i$ ) no circuito (**curvas azuis**)



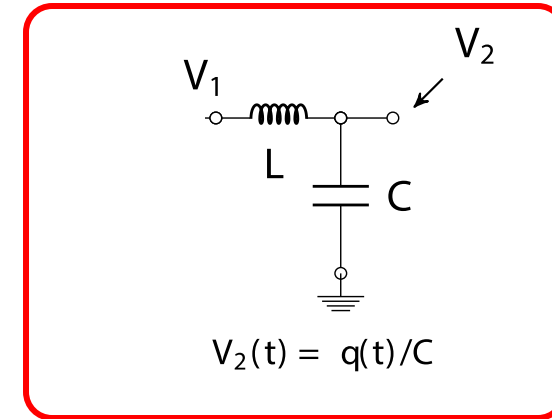
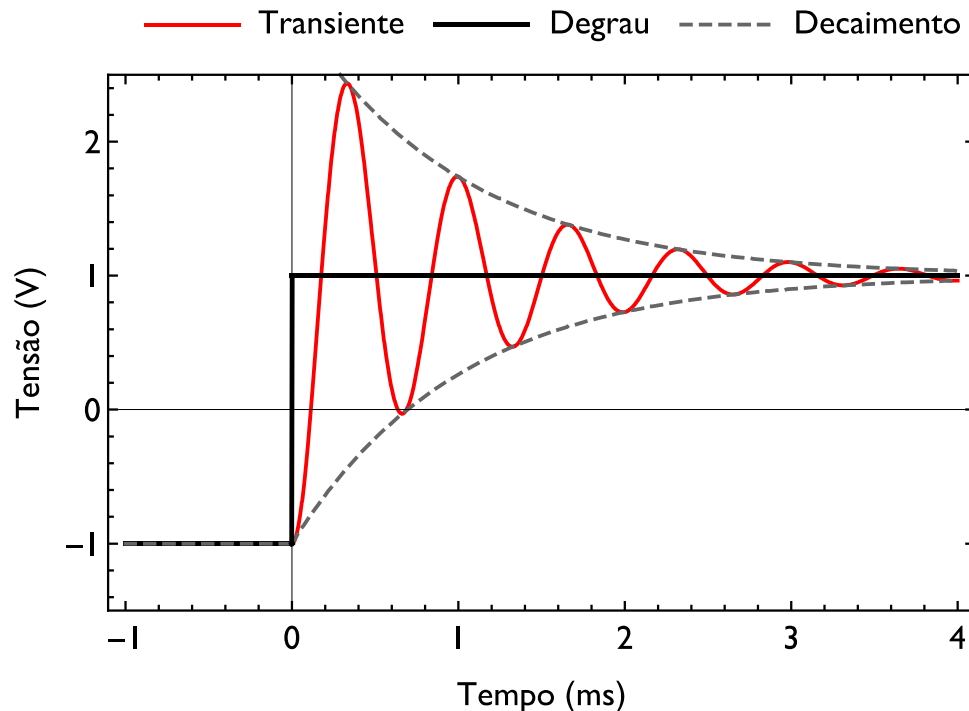
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi$$

Frequência de ressonância

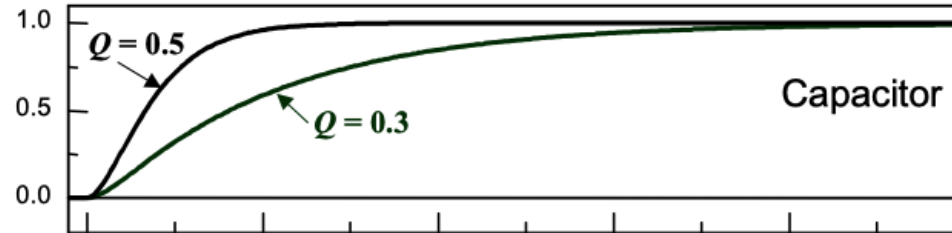
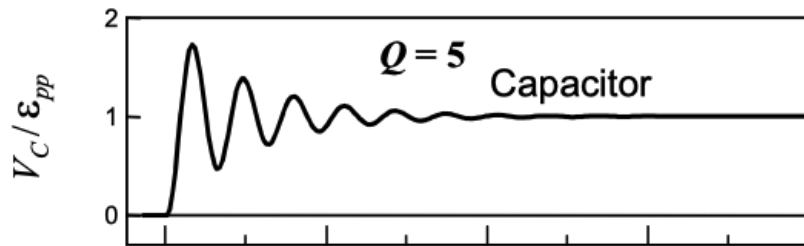
# RLC – Parte 2a

1. Você deverá explorar as propriedades do um circuito RLC quando **a tensão de excitação é uma onda quadrada**
2. Os principais aspectos dessa resposta são mostrados na figura abaixo
3. Para observar a relaxação da ressonância, é importante a distância entre dois degraus de tensão, seja **suficientemente longo**.

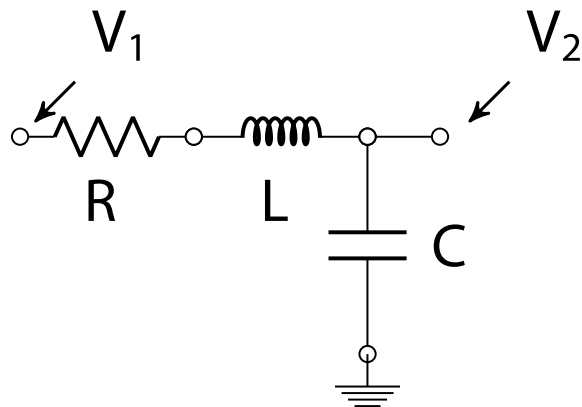


1. Monte o circuito na protoboard, comece com um capacitor de 470 nF e o indutor apenas, como ilustrado acima. Lembre-se de documentar sua montagem.
2. Monitore no canal 1 a tensão sobre o capacitor ( $V_2$ ), que tipo de onda é observada?
3. Você consegue entender este comportamento?
4. Qual a frequência de relaxação? E o tempo de relaxação?
5. Coloque um capacitor ligeiramente menor, o que acontece?
6. Se você não colocou nenhum resistor, como pode este circuito relaxar?

# RLC – Parte 2b



(Esquerda) Regime sub-amortecido. (Direita) regime criticamente amortecido ( $Q=0.5$ ) e sobre-amortecido ( $Q=0.3$ )



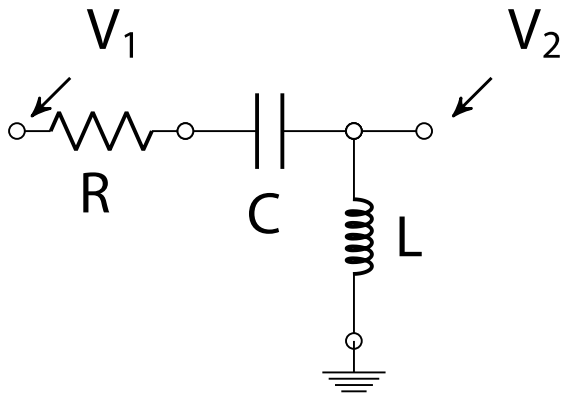
(b)  $V_2(t) = q(t)/C$

1. Adicione um resistor à sua montagem. Comece com o menor resistor, de 10 Ohms e prossiga com valores maiores.
2. O que acontece?
3. Você consegue entender este comportamento?
4. O que acontece com a frequência de relaxação? E o tempo de relaxação? Colete dados que lhe permitam inferir isto.
5. Este comportamento é descrito pelo fator de qualidade  $Q$  do circuito. Essencialmente, o número de oscilações ( $n$ ) observadas é dado por

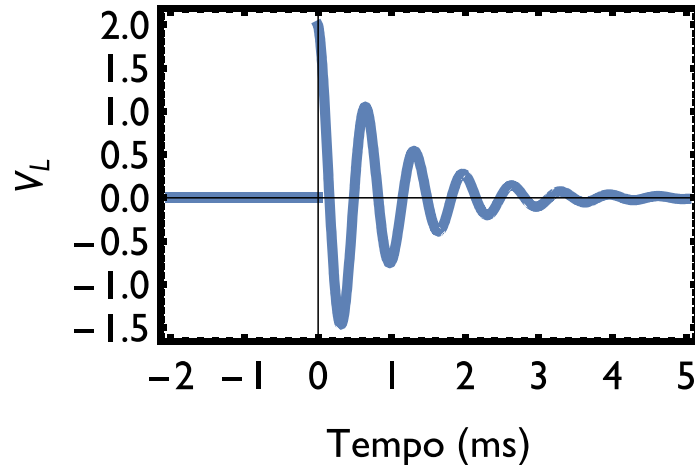
$$n \approx Q/\pi$$

6. Capture dados que lhe permitam concluir sobre o fator de qualidade.

# RLC – Parte 2c



(c)  $V_2(t) = L di/dt$



1. Ajuste a sua montagem para medir a tensão no indutor.
2. Escolha dois extremos da medida anterior (Q alto e Q baixo) e capture os dados.
3. Qual a diferença entre estas medidas e a medida anterior?
4. Você consegue entender este comportamento com base nas relações do [slide 3](#)?
5. As propriedades da relaxação temporal se alteram (frequência de oscilação e tempo de relaxação)?
6. Use os cursores do programa para medir o tempo de relaxação. Lembre-se que a envoltória da oscilação é uma função exponencial!

$$V_L(t) = \epsilon_{dc} + \epsilon_{pp} e^{-\frac{t}{\tau}} \left( \cos \omega t - \frac{1}{\omega \tau} \sin \omega t \right)$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$$

Caso esteja curioso sobre estas fórmulas, veja a página 43 da [apostila do Prof. Fragnito](#), (Transientes no circuito ressonante série)



# RLC – Parte 2d

1. Nesta terceira etapa você deverá desenvolver *hard-skills* para analisar estes dados. O objetivo é fazer gráficos bonitos e informativos que capturem a essência das evidências experimentais obtidas.
2. Lembre-se que menos pode ser mais. Sintetize, escolha os dados chaves para convencer um cientista das conclusões que vocês chegaram

$$V_L(t) = \epsilon_{dc} + \epsilon_{pp} e^{-\frac{t}{\tau}} \left( \cos \omega t - \frac{1}{\omega \tau} \sin \omega t \right)$$

Note que esta expressão só se aplica ao circuito subamortecido,  $Q > 1/2$ .

Lembre-se que o nosso osciloscópio somou uma tensão de  $\sim 2.5V$  ao sinal (você consegue ver o valor exato somado no sinal?)

1. Escolha o conjunto de dados que você achou mais interessante nas partes (2b,2c), e que representem diferentes regimes de comportamento (e.g.,  $Q$  alto,  $Q$  médio e  $Q$  baixo)
2. Abra os dados no Python (agora, não depois) e sobreponha ambos os resultados em um mesmo sistema de eixos.
3. Como você verificaria que as relações do [slide 3](#) estão condizentes com os dados?
4. Dê um "zoom" nos seus dados destacando apenas uma relaxação, como ilustrado abaixo, Com base nos valores dos parâmetros inferidos (usando cursores), você consegue obter uma concordância entre o modelo da equação ao lado e os seus dados?

