EE103 – Laboratório de Engenharia Elétrica I
Módulo III – CIRCUITOS DE 2ª ORDEM, AMORTECIMENTO, RESSONÂNCIA SÉRIE, FATOR DE QUALIDADE
RESPOSTA EM FREQUÊNCIA, FILTRO SEPARADOR DE BAIXAS E ALTAS FREQUÊNCIAS
Parte 2

Proposição III.4
RESSONÂNCIA SÉRIE, FAIXA DE PASSAGEM, LARGURA DE BANDA, FATOR DE QUALIDADE

Objetivo: Verificar o fenômeno da ressonância, sintonia, faixa de passagem e fator de qualidade de um circuito RLC série.

Introdução:

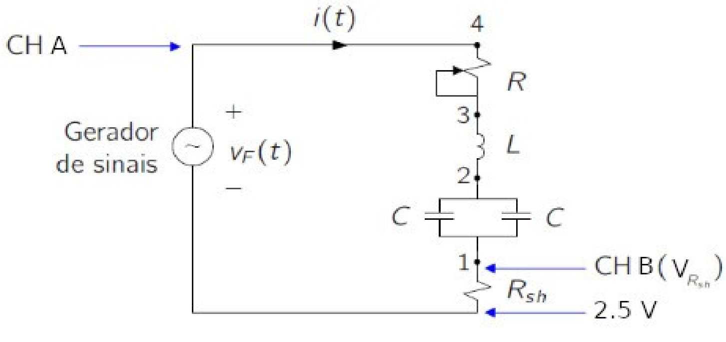
Já vimos anteriormente que os circuitos indutivo e capacitivo introduzem defasagens contrárias entre tensão e corrente. Vimos também que a defasagem depende da frequência da tensão de alimentação. Veremos agora que a frequência não determina apenas a defasagem, mas afeta também as magnitudes dos sinais de tensão ou corrente resultantes. Para observar esses efeitos vamos considerar a frequência uma variável independente no circuito *RLC* série abaixo.

Observe que se trata do mesmo circuito analisado nas Proposições III.1 e III.3, porém agora a análise do comportamento será no domínio da frequência. Ou seja, faremos a análise para diferentes valores de frequência.

Ensaios e Questões:

(i) Determine analiticamente e experimentalmente a magnitude da corrente do circuito abaixo para uma entrada senoidal de frequência 10 kHz com R = 300 Ω. Qual o valor da corrente para frequências muito altas e muito baixas? Explique.

(ii) ► Monte o circuito abaixo, conectando o osciloscópio de forma a observar os sinais de corrente e tensão da fonte respectivamente.(O resistor shunt é utilizado para facilitar a obtenção do valor RMS da corrente, é possível utilizar a corrente medida pelo canal A caso corrija o *offset* para a corrente centralizar em 0 manualmente.)



R = potenciômetro

L = 1 mH

C = 0,1 μF

R_{sh} = 100 Ω

V_F=3 Vpp

(iii) ► Preencha as tabelas a seguir para ***R* = 300 Ω** e ***R* = 100 Ω**. (Caso prefira, é possível também utilizar os resistores de 330 e 110 que vieram no kit ao invés do potenciômetro.) Mantenha a amplitude da tensão da fonte constante durante o ensaio, para isso ative a medição de Vpp do software ALICE e ajuste os valores mínimo/máximo da tensão gerada para que o Vpp seja o mesmo em todas as medições.

	f [kHz]	*R* = 300 Ω	*R* = 100 Ω	*f* [kHz]	*R* = 300 Ω	*R* = 100 Ω
		I [mA] (*)	*I* [mA] (*)		*I* [mA] (*)	*I* [mA] (*)
	1			8		
	2			9		
	4			10		
	5			11		
	6			12		
	7			13		
$f_{I_{max}}$ (**) →				14		

(*) Valores RMS

(**) Frequência para a qual a corrente é máxima

(iv) Explique por que, se nenhuma variação de amplitude for feita, a tensão fornecida pela fonte muda tanto quando a frequência muda. Observe experimentalmente.

(v) Compare a frequência ($f_{I_{max}}$) que provoca a máxima corrente (I_{max}), com a frequência natural $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}$ obtida na tabela acima. O que você conclui?

(vi) Trace em um mesmo gráfico as curvas $[I \times f]$ para ***R* = 300 Ω** e ***R* = 100 Ω**.

Note através das curvas $[I \times f]$ traçadas em **(vii)** que o valor de *R* não afeta a frequência de ressonância, porém modifica a "altura" e a "largura" da curva $[I \times f]$, ou seja, modifica a "sintonia" do circuito. Essa sintonia pode ser quantificada em função da faixa de passagem de frequência.

A faixa de passagem é definida em função das frequências (f_A e f_B) para as quais a potência cai para a metade do valor absorvido na ressonância. Essa definição é conveniente, uma vez que a potência absorvida na ressonância é máxima e vale:

$$P_{\max} = \frac{V^2}{R_T} = R_T \cdot I_{\max}^2$$

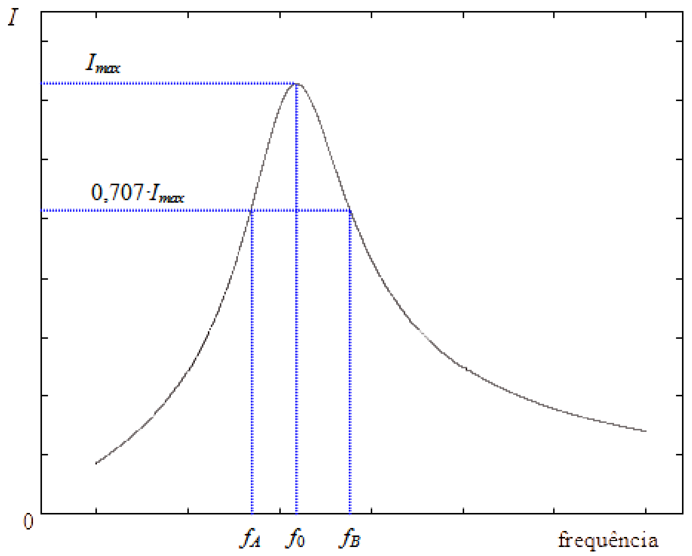
em que I e V são valores eficazes, e R_T é a resistência total do circuito. Portanto, a condição de meia potência ocorre para:

$$\frac{P_{\max}}{2} = R_T \left(\frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \right)^2$$

As frequências nas quais ocorre essa condição são chamadas **frequências de corte**. Define-se, então, a **largura de faixa** (B) como sendo a diferença entre as frequências de corte.

(vii) ► Determine experimentalmente os dois valores de frequência de corte $\{f_A, f_B\}$. Lembre-se de manter a tensão na entrada do circuito constante.

	f_A [Hz]	f_B [Hz]
***R* = 300 Ω**		
***R* = 100 Ω**		



Proposição III.5
RESPOSTA EM FREQUÊNCIA,
FILTRO SEPARADOR DE BAIXAS E ALTAS FREQUÊNCIAS

Objetivo: Verificar as características de filtragem de circuitos RL e RC.

Introdução:

Sabemos que um circuito *RL* é um derivador de corrente, pois

$$v(t)=R\cdot i(t)+L\frac{di(t)}{dt}$$

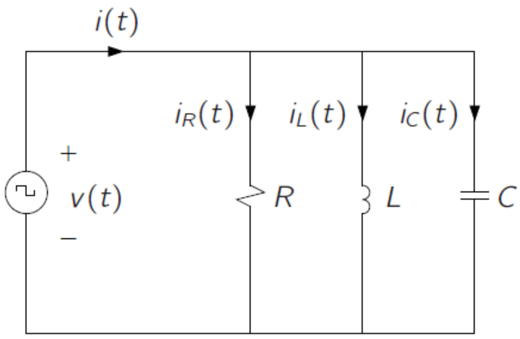
enquanto que um circuito *RC* é um integrador de corrente, pois

$$v(t)=R\cdot i(t)+\frac{1}{C}\int i(t)dt+v_C(0)$$

Isto significa que se a tensão *v* é imposta ao circuito, com *R*, *L* e *C* dados, o circuito *RL* funciona como um limitador de derivada (taxa de variação)[1] da corrente e o circuito *RC* como um limitador de integração (taxa de acumulação)[2] da corrente. Em outras palavras, podemos dizer que o indutor não admite variações bruscas de corrente, pois sua derivada é limitada. Ou seja, ele limita altas frequências. Por outro lado, o capacitor limita variações de carga, ou seja, não permite que um degrau de corrente seja sustentado (limita baixas frequências).

Essa característica de filtragem dos circuitos *RL* e *RC* pode ser explorada, por exemplo, para obter a separação dos sinais de áudio de alta e baixa frequência, dirigindo-os a alto-falantes projetados especialmente para cada faixa, melhorando o desempenho acústico do aparelho de som.

CIRCUITO *RLC* PARALELO



Neste circuito:

$$i=i_R+i_L+i_C \qquad i_R=\frac{v}{R}$$

$$v_L=L\frac{di_L}{dt} \qquad i_C=C\frac{dv}{dt}$$

1 Observe que o valor da derivada é no máximo $v(t)/L$, o que ocorre quando $i(t)=0$.
2 Observe que o valor máximo da integral é $C(v(t)-v_C(t))$, o que ocorre quando $i(t)=0$.

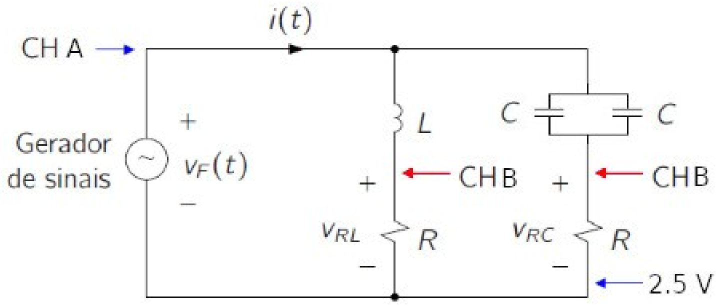
Portanto: $$i = \frac{v}{R} + i_L + C\frac{dv}{dt}$$

Vemos que se trata de um caso similar ao circuito RLC série; apenas as variáveis (*i* e *v*) e os coeficientes foram trocados. É de se esperar, portanto, que ocorram os três casos: superamortecido, crítico e subamortecido para a variável comum *v*, onde:

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \qquad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

Ensaios e Questões:

(i) ► Para observar a separação de altas e baixas frequências, faça a seguinte montagem abaixo [O CANAL B DEVE MEDIR A TENSÃO DE RL **OU** DE RC, NÃO AS DUAS AO MESMO TEMPO, troque o canal de lugar quando for medir a outra tensão]:



R = 100 Ω

***L* = 1 mH**
C = 0,1 μF
V_F=3 Vpp

(ii) Calcule a frequência de ressonância natural (sem amortecimento) [em Hz] do circuito com base nos parâmetros medidos.

(iii) Determine a corrente máxima nos ramos do capacitor e do indutor. Em que frequência elas ocorrem?

(iv) Obtenha as expressões analíticas para as correntes de cada ramo em função da frequência e dos parâmetros do circuito.

(v) ► Levante a resposta em frequência dos dois ramos, preenchendo a tabela a seguir, *usando a tensão da fonte senoidal* em V_{pp} = 3 V.

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

f [kHz]	V_{RL} [Vrms]	V_{RC} [Vrms]
1		
2		
4		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		

(*)

(*) frequência para a qual $V_{RL} = V_{RC}$

(vi) Trace as respostas em frequência $\left[V_{RL} \times f\right]$ e $\left[V_{RC} \times f\right]$ em um único gráfico, com o eixo das frequências em escala logarítmica.

(vii) Na frequência natural do circuito tem-se $|V_{RL}| = |V_{RC}|$. Esta condição determina então a frequência de cruzamento (*crossover*) de um ramo para outro do circuito. Obtenha a frequência natural do circuito a partir do gráfico acima.

(viii) Suponha que as resistências do circuito fossem alto-falantes. Explique como o som se distribuiria pelos dois ramos em função da frequência (graves e agudos).