
Estudo e Implementação de um Filtro Passivo Passa-Faixa RLC Série

Study and Implementation of a Passive RLC Series Bandpass Filter

Daniel Jonathas da Costa Pereira¹, Kenedy Marconi Geraldo dos Santos¹,
Marcelo Bender Perotoni², Décio Renno de Mendonça Faria³, Heli Neres
Silva¹, Victor Emanuel Paz Teixeira¹, Rafael Neves Ribeiro¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Vitória da Conquista, Bahia, Brasil

² Universidade Federal do ABC, Santo André, São Paulo, Brasil

³ Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais, Brasil

Autor para Correspondência: ¹ djc.eeng@gmail.com.

Resumo

Este trabalho tem a finalidade de apresentar um estudo sobre filtros passivos passa-faixa RLC série, confirmando aspectos teóricos através da comparação entre simulações e os resultados obtidos a partir de um filtro real. Os conceitos teóricos apresentados são demonstrados através de sua utilização em uma análise prática com o objetivo de determinar o valor de um indutor inicialmente desconhecido em um filtro passa-faixa RLC série. É apresentada também uma comparação entre os resultados obtidos com o filtro montado em uma matriz de contatos (protoboard) e em uma placa de circuito impresso.

Palavras-chave filtro, circuito RLC, frequência, passa-faixa, protoboard.

Abstract

This work presents a study on a passive RLC series bandpass filter, confirming theoretical aspects through the comparison between simulations and the results obtained from a real filter. The theoretical concepts presented are demonstrated through its use in a practical analysis in order to determine the value of an initially unknown inductor in a series RLC bandpass filter. A comparison is also presented between the results obtained with the filter installed on a protoboard and another implementation on a printed circuit board.

Keywords filter, RLC circuit, frequency, bandpass, protoboard.

1 Introdução

Com os avanços tecnológicos das últimas décadas os dispositivos eletrônicos estão passando a utilizar cada vez mais sistemas *wireless*. O desenvolvimento da Internet das Coisas (IoT), dos carros autônomos e da Indústria 4.0, faz com que a utilização dessas tecnologias aumente ainda mais [1]. Em decorrência deste uso, os ambientes urbanos estão atualmente imersos em ondas eletromagnéticas provenientes de redes de telefonia, estações de rádio, sinais de televisão, veículos, aparelhos celulares, dentre outras fontes. Assim, a necessidade de dispositivos que possam “purificar” frequências e garantir a operação correta de aparelhos eletrônicos tende a ser cada vez mais requisitada nos departamentos de engenharia das empresas de tecnologia [2].

Nesse cenário, os filtros elétricos RLC surgem como um dos recursos indicados para impedir que ondas eletromagnéticas indesejadas sejam irradiadas bem como prevenir que ondas eletromagnéticas externas causem interferências. Esses filtros são uma importante ferramenta utilizada para alcançar a chamada compatibilidade eletromagnética (EMC) que leva a uma melhor qualidade e confiabilidade dos equipamentos eletrônicos. No setor elétrico esses filtros são utilizados, por exemplo, para redução de harmônicos e ruídos em conversores CA/CC que podem ser utilizados para alimentar os veículos elétricos. A sua utilização em equalizadores de áudio, conversores analógico-digitais, entre outros evidencia a importância desses filtros para a engenharia atual [3].

Um filtro elétrico pode ser entendido como um sistema que irá receber um sinal de entrada composto de várias frequências e irá disponibilizar na saída apenas uma faixa de frequência pré-determinada, função dos valores dos componentes e da respectiva topologia dos mesmos.

Existem diversas categorias de filtros elétricos, como exemplo os filtros passivos, ativos, digitais, eletromecânicos, de cavidades de micro-ondas, dentre outros. Com relação às técnicas de implementação, os filtros de uma maneira geral podem ser classificados como filtros passivos ou filtros ativos. Um filtro passivo utiliza apenas resistores, indutores e capacitores, ao passo em que um filtro ativo utiliza, além dos dispositivos supracitados, componentes chamados ativos como transistores e amplificadores operacionais [4]. O presente trabalho fará análises de filtros passivos, mais especificamente os filtros construídos com resistores, capacitores e indutores em série, filtros esses denominados filtros RLC série. O filtro em questão também é denominado filtro baseado em elementos concentrados, em contraste com filtros distribuídos, baseados em linhas de transmissão.

Os filtros também são classificados quanto ao tipo de resposta em frequência, podendo ser: passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa, tendo como referência uma frequência denominada frequência de corte. Um filtro passa-baixa permite a passagem de frequências abaixo da frequência de corte rejeitando as frequências acima desta. Um filtro passa-alta, ao contrário de um filtro passa-baixa, rejeita as frequências abaixo da frequência de corte e permite a passagem das frequências acima desta. Um filtro passa-faixa permite a passagem de sinais dentro de uma faixa de frequência delimitada por uma frequência de corte inferior e uma frequência de corte superior rejeitando os demais sinais fora desta faixa. Um filtro rejeita-faixa, por sua vez, apresenta comportamento inverso ao filtro passa-faixa, rejeitando os sinais dentro da faixa de frequência e permitindo a passagem dos sinais fora desta faixa [4]. As respostas em frequência dos quatro tipos de filtros podem ser visualizadas na Figura 1, onde G representa o ganho em decibéis e ω a frequência angular dada em radianos por segundo.

Considera-se o ganho do filtro como sendo a razão entre a tensão de saída com a entrada (G). Devido às grandes variações de escala de valores, e para facilitar a análise, o ganho é frequentemente expresso em decibéis (dB), uma unidade logarítmica dada em termos de potências pela equação (1) e em termos de tensão pela equação (2).

$$G_{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

$$G_{dB} = 20 \log_{10} \frac{V_2}{V_1} \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

Assim, se $P_2 = P_1/2$, o ganho obtido será de $10 \log(1/2) \approx -3\text{dB}$, que é frequentemente tomado como referência para o cálculo da frequência de corte de filtros.

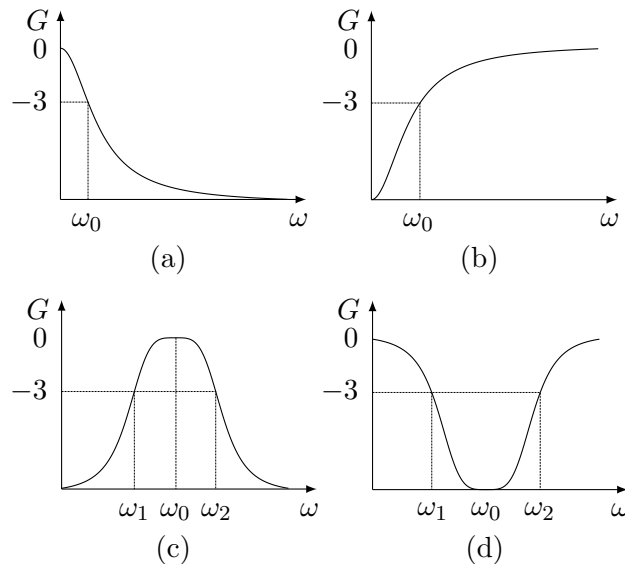


Figura 1: Resposta em frequência (Ganho [dB] versus frequência [rad/s]) para um (a) filtro passa-baixa, (b) filtro passa-alta, (c) filtro passa-faixa, (d) filtro rejeita-faixa

A resposta em frequência para um filtro passa-faixa é apresentada graficamente na Figura 1c, na qual são indicadas a frequência de ressonância ou frequência central do filtro (ω_0) e as frequências de corte inferior (ω_1) e superior (ω_2), que definem a largura de banda (*bandwidth*) do filtro.

A frequência de corte de um filtro é geralmente tomada como a frequência em que a potência de saída do filtro é a metade da potência na faixa de passagem, sendo por isso também denominada frequência de meia-potência. Em termos de tensão ou corrente, isso representa uma redução a 70,7% do valor na faixa de passagem, ou uma atenuação de -3dB como citado anteriormente.

Para que um circuito com componentes discretos se comporte como filtro passa faixa (Figura 1c), esse circuito obrigatoriamente deve conter elementos resistivos, indutivos e capacitivos.

1.1 Impedância

A impedância é definida como a razão entre a tensão e a corrente em um circuito de corrente alternada, a impedância é dependente da frequência e é medida em ohms (Ω), como indicado na equação (3). Em circuitos elétricos e de radiofrequência ela representa fisicamente a oposição que um circuito oferece ao fluxo de corrente alternada senoidal.

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} \quad [\Omega] \quad (3)$$

O inverso da impedância é a admitância, que é medida em siemens (S).

A impedância é representada por um número complexo, $\mathbf{Z} = R + jX$, sendo a parte real (R) chamada de resistência e a parte imaginária (X) de reatância. A reatância pode ser positiva ou negativa, de forma que reatâncias positivas possuem características indutivas enquanto reatâncias negativas possuem características capacitivas. A Tabela 1 apresenta as impedâncias e reatâncias para resistores, indutores e capacitores.

Analisando a Tabela 1, observa-se que para altas frequências o indutor apresenta elevada impedância, aproximando-se de um circuito aberto, e o capacitor baixa impedância, aproximando-se de um curto-circuito. Em baixas frequências, observa-se o contrário: indutores apresentam baixa impedância, aproximando-se de circuitos abertos, e capacitores apresentam alta impedância, aproximando-se de circuitos abertos.

Tabela 1: Impedâncias e reatâncias para resistores, indutores e capacitores

Elemento	Impedância $[\Omega]$	Reatância $[\Omega]$
R	$\mathbf{Z} = R$	0
L	$\mathbf{Z} = R + jX_L$	$X_L = \omega L$
C	$\mathbf{Z} = R - jX_C$	$X_C = \frac{1}{\omega C}$

Na Teoria de Circuitos Elétricos e eletrônicos, um conceito importante é o conceito de impedância de entrada e impedância de saída. A impedância de entrada é definida como a impedância medida nos terminais de entrada de um circuito e é um parâmetro muito importante em projetos de circuitos elétricos e eletrônicos. A impedância de saída é definida como a impedância medida nos terminais de saída de um circuito sendo um parâmetro primordial em circuitos que necessitam a máxima transferência de potência.

O Teorema da Máxima Transferência de Potência afirma que a potência máxima é transferida para uma carga quando a impedância da carga é igual ao conjugado da impedância de saída do circuito ao qual a carga está acoplada. Assim, para obter o maior rendimento possível de um circuito, é necessário que a impedância da carga seja igual à impedância de saída - no caso de impedâncias reais, o que é o mais comum em circuitos bem projetados, técnica conhecida como casamento de impedâncias [5].

1.2 Circuito RLC Série

Dentre os circuitos utilizados como filtros, dois dos principais são os circuitos RLC série e o circuito RLC paralelo. Um circuito RLC série contém ao menos um resistor, um indutor e um capacitor, ou um agrupamento de componentes que possa ser reduzido a um circuito equivalente em série, conforme apresentado na Figura 2.

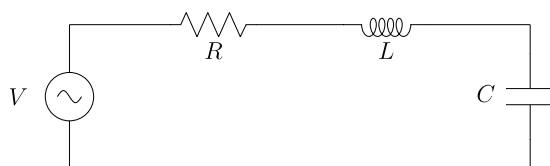


Figura 2: Representação de um circuito RLC série

Aplicando a Lei de Kirchhoff das Tensões ao circuito apresentado na Figura 2, obtém-se a seguinte equação:

$$\mathbf{V} = \mathbf{I} \cdot \frac{1}{j\omega C} + \mathbf{I}j\omega L + \mathbf{I}R = 0$$

Após algumas manipulações algébricas, é possível obter a impedância equivalente do circuito:

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{I}} = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad [\Omega] \quad (4)$$

onde $\mathbf{Z}$ é a impedância do circuito, R o valor do resistor, L a indutância, C a capacitância e ω a frequência angular.

1.3 Circuito RLC Paralelo

Um circuito RLC paralelo contém ao menos um resistor, um indutor e um capacitor, ou uma combinação de componentes que possa ser reduzida a um circuito equivalente em paralelo, conforme apresentado na Figura 3.

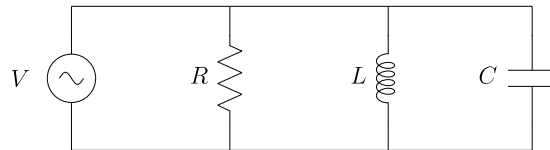


Figura 3: Representação de um circuito RLC paralelo

Aplicando a Lei de Kirchhoff das Correntes ao circuito da Figura 3 e realizando algumas manipulações algébricas, é possível obter a admitância equivalente do circuito:

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \quad [\text{S}] \quad (5)$$

onde $\mathbf{Y}$ é a admitância do circuito, R o valor do resistor, L a indutância, C a capacitância e ω a frequência angular.

1.4 Frequência de Ressonância

A frequência de ressonância (ω_0) é definida como a frequência em que a impedância (ou a admitância) resultante do circuito é puramente resistiva, ou seja, sua parte imaginária se anula. Desta forma, igualando a parte imaginária da equação (4) ou da equação (5) a zero, obtém-se:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad [\text{rad/s}] \quad (6)$$

Assim, a frequência de ressonância é a mesma para circuitos RLC série ou paralelo. Nesta frequência, a impedância do circuito RLC série é mínima ($\mathbf{Z}(\omega_0) = R$) e a corrente no resistor é máxima, sendo a tensão no resistor máxima dada por $\mathbf{V}(\omega_0) = R\mathbf{I}(\omega_0)$.

1.5 Fator de Amortecimento

O fator de amortecimento (α) de um circuito RLC determina a taxa com a qual o circuito dissipa energia. Essa dissipação de energia ocorre na resistência R . O fator de amortecimento é calculado pelas equações (7a e 7b).

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (\text{RLC série}) \quad (7a)$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad (\text{RLC paralelo}) \quad (7b)$$

Sendo $\alpha = 0$ com $R = 0$ para circuitos RLC série e $R = \infty$ para circuitos RLC paralelo, o valor de um circuito LC ideal, ou seja, sem perda de energia.

1.6 Largura de Banda

A largura de banda (β) é definida como sendo a faixa de frequência em que a potência de saída do filtro se mantenha acima de 50% da potência de entrada. Matematicamente, pode ser expressa como a diferença entre as frequências de corte superior e inferior do filtro [4].

As frequências de corte para circuitos RLC são apresentadas na equação (8) e na equação (9).

$$\omega_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} \quad (8)$$

$$\omega_2 = \alpha + \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} \quad (9)$$

Assim, a largura de banda é dada pela equação (10).

$$\beta = \omega_2 - \omega_1 = 2\alpha \quad (\text{RLC geral}) \quad (10a)$$

$$\beta = \frac{R}{L} \quad (\text{RLC série}) \quad (10b)$$

$$\beta = \frac{1}{RC} \quad (\text{RLC paralelo}) \quad (10c)$$

Analisando a equação (10a), percebe-se que a largura de banda depende fortemente do fator de amortecimento do filtro. No projeto de filtros RLC, é possível obter uma largura de banda específica ajustando o fator de amortecimento [6].

A frequência de ressonância também pode ser obtida através dos valores de ω_1 e ω_2 , como apresentado na equação (11).

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad (11)$$

1.7 Função de Transferência

Função de transferência de um circuito é definida como a razão entre a saída e a entrada de sinal, sendo possível comparar tanto a tensão como a corrente, conforme apresentado na equação (12). A resposta de frequência de um circuito é representado pelo gráfico de sua função de transferência, com a frequência variando entre 0 e ∞ .

$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{\mathbf{Y}(\omega)}{\mathbf{X}(\omega)} \quad (12)$$

onde $\mathbf{H}$ representa a função de transferência, $\mathbf{Y}$ representa a saída e $\mathbf{X}$ representa a entrada.

Como é possível comparar tanto tensão quanto corrente, existem quatro funções de transferência possíveis. São elas:

$$\mathbf{H}(\omega) = \text{Ganho de tensão} = \frac{\mathbf{V}_o(\omega)}{\mathbf{V}_i(\omega)} \quad (13)$$

$$\mathbf{H}(\omega) = \text{Ganho de corrente} = \frac{\mathbf{I}_o(\omega)}{\mathbf{I}_i(\omega)} \quad (14)$$

$$\mathbf{H}(\omega) = \text{Impedância de transferência} = \frac{\mathbf{V}_o(\omega)}{\mathbf{I}_i(\omega)} \quad (15)$$

$$\mathbf{H}(\omega) = \text{Admitância de transferência} = \frac{\mathbf{I}_o(\omega)}{\mathbf{V}_i(\omega)} \quad (16)$$

onde os índices i e o indicam, respectivamente, entrada e saída.

A função de transferência é um número complexo, comumente representado em notação polar com magnitude $H(\omega)$ e ângulo de fase ϕ . A função de transferência também é frequentemente representada no domínio da frequência, sendo utilizada como variável independente s ao invés de $j\omega$.

Outra representação conveniente da função de transferência é dada em termos de seus polinômios com numerador $\mathbf{N}(\omega)$ e denominador $\mathbf{D}(\omega)$ como apresentado na equação (17). Esta representação é útil, por exemplo, na determinação dos polos e zeros de um circuito, utilizados no projeto de filtros.

$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{\mathbf{N}(\omega)}{\mathbf{D}(\omega)} \quad (17)$$

$\mathbf{N}$ e $\mathbf{D}$ na equação (17) não são necessariamente as mesmas expressões para as funções de entrada e saída da equação (12). Na equação (17) subentende-se que os termos em comum nas funções de entrada e saída foram eliminados, simplificando ambas as funções. As raízes de $\mathbf{N}(\omega) = 0$ são denominadas zeros e as raízes de $\mathbf{D}(\omega) = 0$ são denominadas polos. Um zero representa um valor de frequência para o qual a função de transferência é nula, e um polo representa um valor de frequência para o qual a função de transferência é infinita.

Para determinar o ganho de tensão do circuito RLC apresentado na Figura 2 considerando como saída o resistor R , deve-se analisar o circuito para determinar a tensão no resistor. Aplicando divisor de tensão, obtém-se a função de transferência apresentada na equação (18).

$$\mathbf{H}(\omega) = \frac{\mathbf{V}_o(\omega)}{\mathbf{V}_i(\omega)} = \frac{R}{R + j\omega L + 1/j\omega C} \quad (18)$$

Transferindo a equação (18) para o domínio da frequência e realizando algumas manipulações algébricas, obtém-se o resultado apresentado na equação (19).

$$\mathbf{H}(s) = \frac{sR}{L(s^2 + sR/L + 1/LC)} = \frac{2s\alpha}{s^2 + 2s\alpha + \omega_0^2} \quad (19)$$

1.8 Cascadeamento

No projeto de filtros, para atender à uma resposta específica, frequentemente utiliza-se a técnica de cascadeamento, que consiste em projetar uma unidade básica e repeti-la um determinado número de vezes a fim de obter a resposta de frequência do filtro desejado [7]. Um exemplo de filtro em cascata é apresentado na Figura 4.

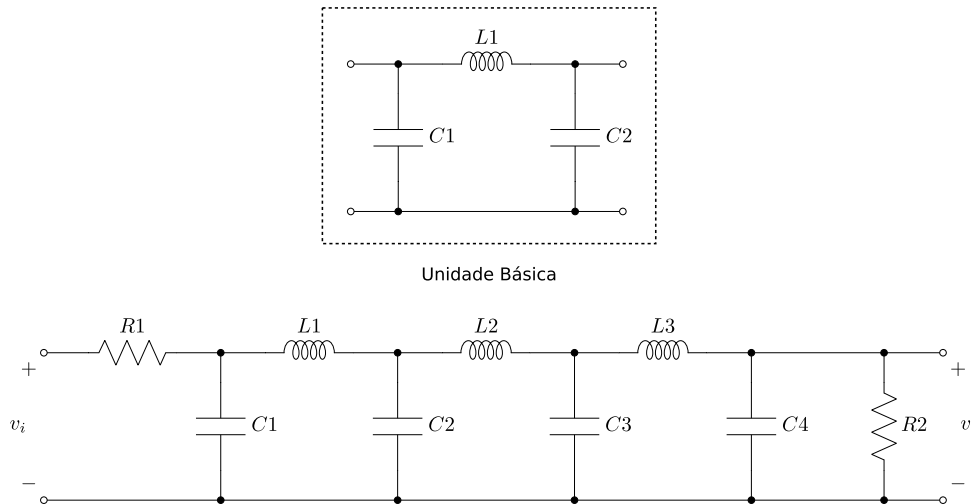


Figura 4: Exemplo de um filtro RLC em cascata

Dentre as topologias de filtros em cascata, existem duas categorias básicas: equilibrada e desequilibrada, tendo como referência à simetria da unidade básica utilizada. Na topologia equilibrada, as impedâncias (Z) de cada ramo são balanceadas, ou seja, não existe um ponto de referência comum entre a entrada e a saída, o que não acontece na topologia desequilibrada. A Figura 5 ilustra essa situação apresentando uma comparação entre as topologias equilibrada e desequilibrada de filtros em cascata.

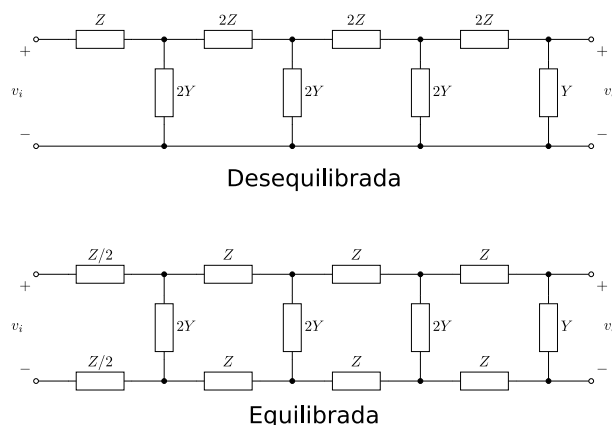


Figura 5: Comparação entre as topologias equilibrada e desequilibrada para filtros em cascata

1.9 Fator de Qualidade

O fator de qualidade (Q) é definido como a medida do nível de “estreitamento” da curva de ressonância de um circuito ressonante. Ele relaciona a energia de pico armazenada e a energia dissipada no circuito por ciclo de oscilação e é dado pela equação (20).

$$Q = 2\pi \frac{E_p}{E_d} \quad (20)$$

onde E_p representa a energia de pico armazenada no circuito e E_d representa a energia dissipada pelo circuito em um período de ressonância.

Para um circuito RLC série, o fator de qualidade é:

$$Q = \frac{\omega_0}{\beta} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} \quad (21)$$

onde β representa a largura de banda.

Através da análise das equações é possível concluir que quanto maior o fator de qualidade, menor a largura de banda (ou seletividade) para uma mesma frequência (21). Assim sendo, para construir um filtro com alta seletividade é necessário projetar um filtro com fator Q elevado, como ilustrado na Figura 6.

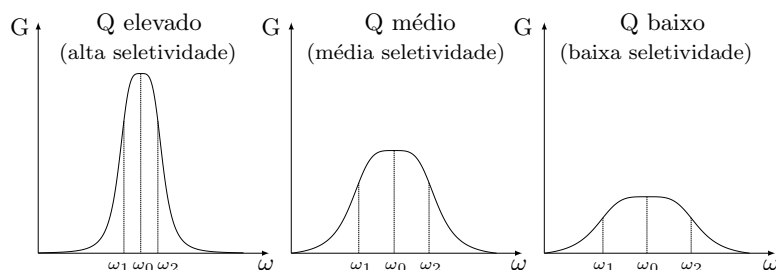


Figura 6: Comparação dos efeitos do fator de qualidade na resposta de um filtro passa-faixa

1.10 Gráficos de Bode

Para facilitar a análise da resposta de um filtro, é comum a utilização do gráfico de Bode. Para representação da função de transferência o gráfico de Bode apresenta um par de gráficos semilogarítmicos, onde um gráfico apresenta a amplitude e o outro apresenta a fase, ambas em função logarítmica da frequência.

Além da representação gráfica a função de transferência pode ser expressa em termos da amplitude e da fase como apresentado na equação (22), sendo a amplitude dada em termos logarítmicos pela equação (23).

$$\mathbf{H} = H e^{j\phi} \quad (22)$$

$$\mathbf{H}_{dB} = 20 \log_{10} H \quad (23)$$

O gráfico de Bode para filtros RLC série é apresentado na Figura 7 para fatores de qualidade distintos.

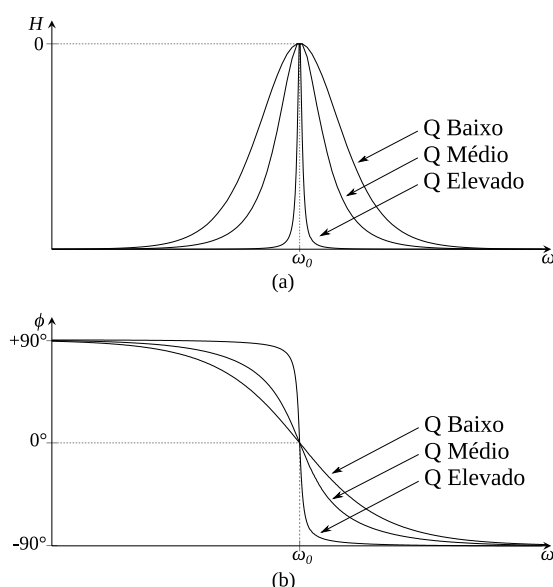


Figura 7: Gráfico de Bode de filtros RLC série: (a) gráfico da amplitude, (b) gráfico da fase

2 Materiais e Procedimentos

2.1 Experimento Proposto

Para demonstrar os conceitos apresentados, propõe-se utilizar um filtro RLC série considerando como saída a tensão no resistor, e como objetivo determinar o valor de um indutor desconhecido. Através da utilização de um gerador de sinais e de um osciloscópio, o circuito deve ser submetido a diferentes frequências relacionando o sinal da tensão na entrada (gerador) com o sinal da tensão na saída (resistor). Do estudo de circuitos RLC série, na frequência de ressonância do circuito é esperado que a tensão na saída seja igual em amplitude e fase ao sinal da entrada. Para outras frequências a amplitude de tensão na saída estará abaixo da tensão da entrada e com diferença de fase. Assim, no momento em que a tensão na saída atingir o valor máximo e estiver em fase com o sinal de entrada, a frequência de ressonância do circuito estará determinada e será possível determinar o valor do indutor desconhecido utilizando a equação (24).

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} \quad (24)$$

É proposto que o filtro seja analisado em um protoboard e em uma placa de circuito impresso, de forma a verificar a influência das capacitâncias parasitas do protoboard para esse experimento. Também propõe-se a simulação computacional do filtro utilizando um *software* de simulação de circuitos, para comprovar os dados obtidos experimentalmente.

O circuito proposto para a realização do estudo é apresentado na Figura 8.

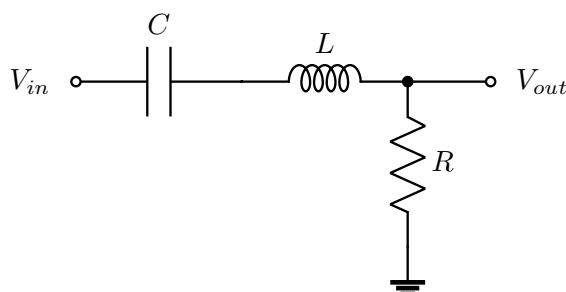


Figura 8: Esquema do filtro utilizado no estudo

Para facilitar a identificação da frequência de ressonância, o resistor deve ser escolhido de modo a diminuir a largura de banda sem, no entanto, atenuar demasiadamente o sinal. Assim, deve-se escolher um resistor de baixa resistência, como determinado pela equação (10b).

2.2 Planejamento e Execução

Foram escolhidos para a execução do experimento um resistor de 10Ω e um capacitor de 10nF . Além disso, foi construído um indutor utilizando fio de cobre enrolado em dezessete espiras de aproximadamente 1cm de diâmetro.

Foi escolhido o *software* Qucs para realizar a simulação computacional, um simulador de circuitos gratuito e de código aberto, que permite a análise de sinais e ruídos variados [8].

Foi confeccionada uma placa de circuito impresso utilizando uma placa de fenolite. Também foi utilizado um protoboard de 400 furos para a realização do experimento. Foram adicionados pinos na placa de circuito impresso para que esta pudesse ser encaixada no protoboard para a realização das medições.

O circuito da Figura 8 foi montado utilizando os componentes citados. Foram realizados os experimentos propostos com a placa encaixada no protoboard e, posteriormente sem encaixe. A Figura 9 apresenta a montagem do filtro no protoboard e a Figura 10 apresenta a montagem do filtro na placa de circuito impresso.

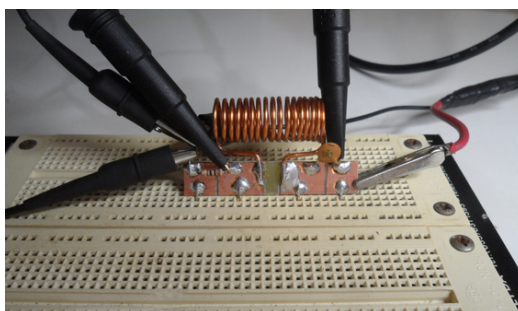


Figura 9: Filtro RLC série montado no protoboard

Durante a realização do experimento, o osciloscópio foi configurado com o canal 1 na tensão de entrada (gerador) e o canal 2 na tensão de saída (resistor). Utilizando o gerador de sinais, o circuito foi submetido a sinais senoidais de diferentes frequências, conforme proposto. Quando o gerador de sinais foi ajustado para a frequência de $1,48\text{MHz}$ os dois sinais entraram em fase e alcançaram aproximadamente a mesma amplitude. Pôde-se assim identificar que o circuito havia atingido a frequência de ressonância, com a qual tornou-se possível calcular o valor da indutância através da equação (24).

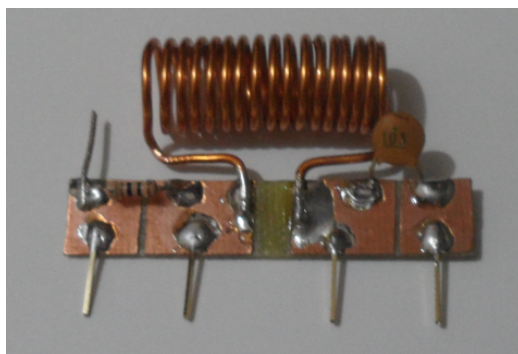


Figura 10: Filtro RLC série montado na placa de circuito impresso

A Figura 11 apresenta a saída do osciloscópio para o circuito montado na placa de circuito impresso na frequência de ressonância (1,48MHz).

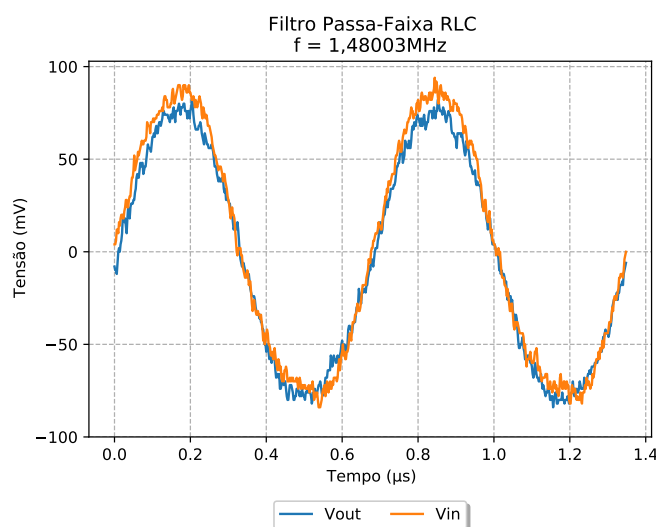


Figura 11: Ondas da entrada e saída do filtro em ressonância.

A Figura 12 apresenta a saída do osciloscópio na frequência de 2,05MHz, superior à frequência de ressonância.

A Figura 13 apresenta a saída do osciloscópio na frequência de 760,78kHz, inferior à frequência de ressonância.

Nos testes realizados com o protoboard, a frequência de ressonância do filtro, as amplitudes e as fases não apresentaram diferenças mensuráveis ou perceptíveis quando comparadas com o circuito montado na placa de circuito impresso.

Para validar os resultados obtidos, foram realizadas simulações no *software* Qucs.

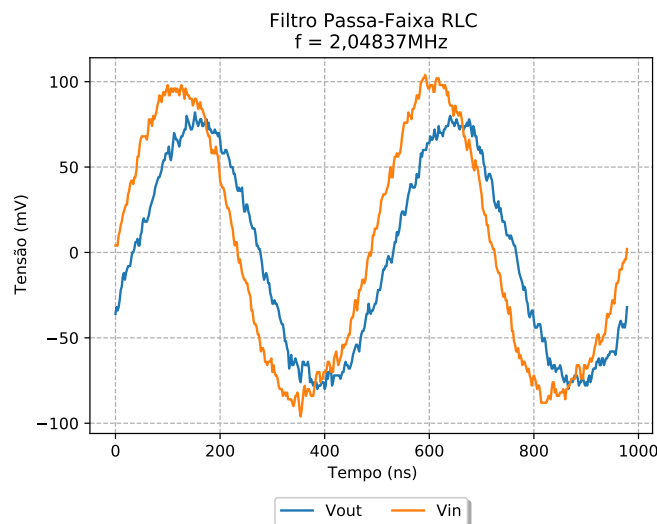


Figura 12: Onda da saída do filtro maior que a frequência de ressonância.

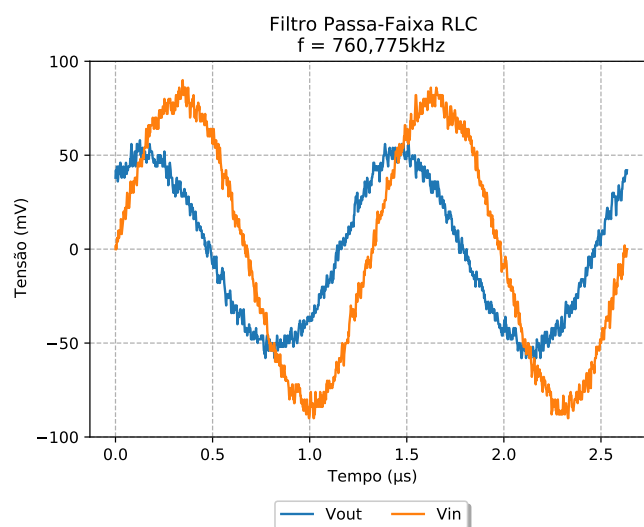


Figura 13: Onda da saída do filtro menor que a frequência de ressonância.

3 Resultados e Discussões

A partir das medições realizadas com o osciloscópio, verificou-se que a frequência de ressonância para o circuito foi de 1,48003MHz.

Utilizando a frequência de ressonância obtida e utilizando a equação (24), com $\omega_0 = 2\pi f$, foi possível encontrar o valor de $1,156\mu\text{H}$ para a indutância da bobina confeccionada.

Utilizando a equação (21), foi possível determinar o fator de qualidade do filtro, $Q = 1,075$.

Foi realizada uma simulação no *software* Qucs com o circuito utilizado nos testes, obtendo o resultado apresentado na Figura 14, onde é possível verificar que a frequência de ressonância obtida experimentalmente está de acordo com a simulação.

A Figura 15 apresenta o diagrama de Bode do filtro RLC utilizado no experimento e calculado

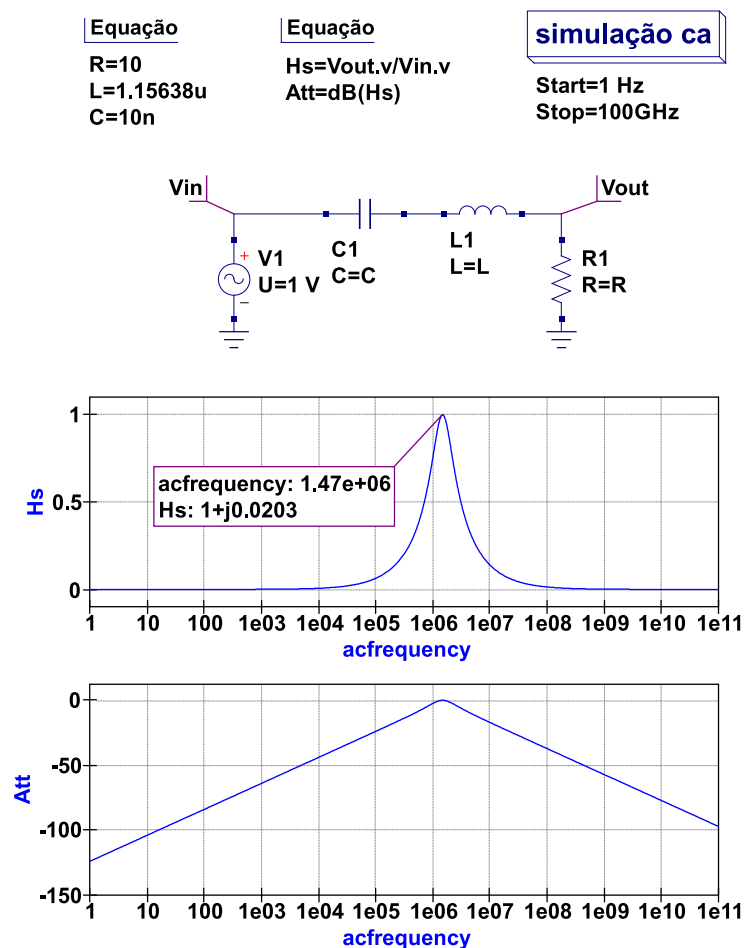


Figura 14: Simulação realizada no *software* Qucs

pelo *software* Qucs.

A Figura 16 apresenta o estado do filtro na frequência de ressonância, comparando os dados simulados e os dados obtidos experimentalmente através do osciloscópio.

Na Figura 12 é possível observar que a tensão de saída está atrasada com relação à tensão de entrada, evidenciando o efeito da reatância negativa. Em contrapartida, a Figura 13 apresenta a tensão de saída adiantada com relação à tensão de entrada e evidencia o efeito da reatância positiva.

Através de um capacímetro, foi possível medir a capacitância presente entre dois furos adjacentes e não interligados do protoboard resultando em aproximadamente 1,8pF.

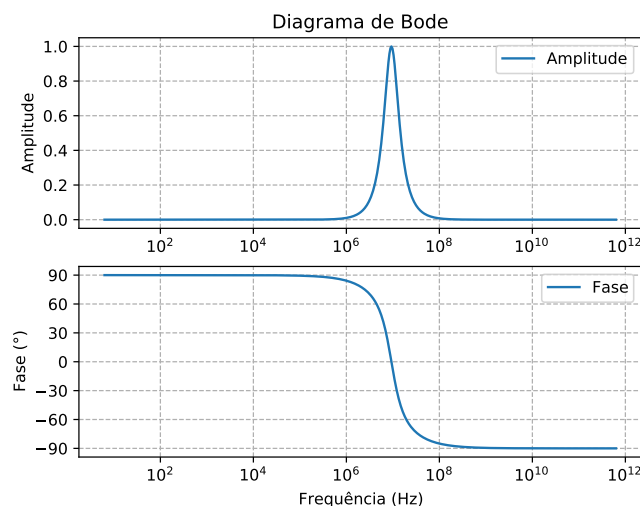


Figura 15: Diagrama de Bode do filtro utilizado no experimento

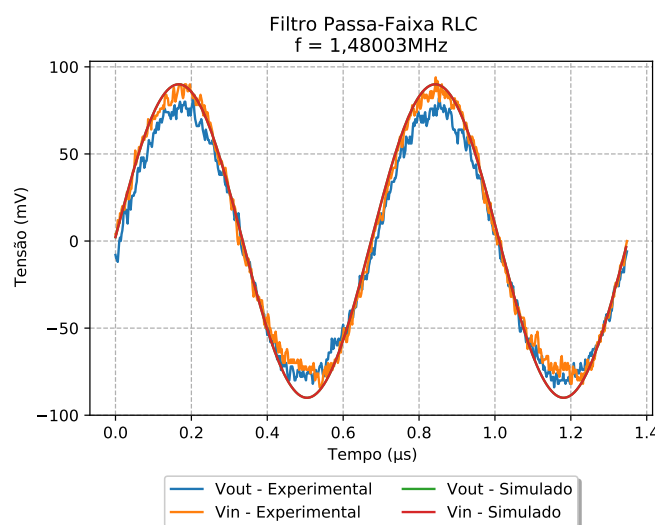


Figura 16: Comparação entre simulação e dados experimentais do filtro utilizado no experimento

4 Considerações finais

A análise do comportamento do filtro instalado no protoboard permite concluir que este não produz efeitos mensuráveis em circuitos na faixa de frequência utilizada. Entretanto, a capacitância entre furos do protoboard determinada experimentalmente aponta para uma inviabilidade de uso na realização de ensaios com circuitos em frequências mais elevadas, sendo necessário uma investigação mais detalhada, principalmente em aplicações de maior sensibilidade. A utilização de placas de circuito impresso muitas vezes é a única alternativa para ensaios em frequências elevadas, mesmo assim, vale salientar que os componentes instalados em placas de circuito impresso também estão sujeitos aos efeitos de capacitâncias parasitas, ocasionadas pela proximidade entre trilhas, pelo dielétrico entre as trilhas e pelas características intrínsecas dos componentes entre

outros.

Um filtro ideal possui uma banda passante totalmente plana (sem atenuação) e atenua completamente todos os sinais com frequência fora desta banda. Além disso, em um filtro ideal a atuação deste para sinais dentro da banda e fora da banda é realizada de forma bem definida, ou seja, existe um limite que define se um sinal está dentro ou fora da banda. Na prática nenhum filtro passa-faixa é ideal, um comportamento como esse na análise matemática implicaria em uma equação com infinitos polos em sua função de transferência. Assim sendo, o que existe na "vida real" são filtros que não atenuam totalmente todas os sinais com frequências fora da faixa desejada, além disso, os sinais que a princípio deveriam passar sem atenuação são atenuados.

O comportamento mais próximo do ideal pode ser atingido pelo uso de técnicas modernas como o processamento digital de sinais (DSP), que consiste basicamente no processo de amostragem, quantização e codificação do sinal transformando-o em valores numéricos que possibilitam o tratamento matemático computadorizado. Nesta técnica as funções de transferência dos filtros convencionais podem ser modeladas e aplicadas aos sinais resultando em uma resposta próxima do ideal [9].

Referências

- [1] C. Mavromoustakis, G. Mastorakis and J.M. Batalla, *Internet of Things (IoT) in 5G Mobile Technologies* (Springer International Publishing, Switzerland, 2016).
- [2] J.M. Redouté and M. Steyaert, *EMC of Analog Integrated Circuits* (Springer Netherlands, Dordrecht, 2010).
- [3] L. Wanhammar, *Analog Filters Using MATLAB* (Springer Science, New York, 2009).
- [4] C.K. Alexander and M.N.O. Sadiku, *Fundamentos de circuitos elétricos* (AMGH, Porto Alegre, 2013), 5^a ed.
- [5] J. O'Malley, *Análise de Circuitos - Coleção Schaum* (Bookman, Porto Alegre, 2014), 2^a ed.
- [6] N. Carlin, E.M. Szanto, R. Ichiwaki, F.O. Jorge, W.A. Seale e F.A. Souza, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **32** n. 1, 9 (2010).
- [7] G.A. Campbell, *Physical Theory of the Electric Wave-Filter*, *Bell System Technical Journal*, v. 1 (1922) pp. 1-31.
- [8] QUCS - Quite Universal Circuit Simulator. Versão 0.0.19, 22 jan. 2017. Disponível em: <http://qucs.sourceforge.net>. Acesso em: 14 de maio de 2020.
- [9] S. K. Mitra and J. F. Kaiser, *Handbook for Digital Signal Processing* (John Wiley & Sons, New York, 1993).