

# Filtros ativos

Gabriel Wendell Celestino Rocha\*

12 de novembro de 2023

## Resumo

Resumo do experimento abordado neste relatório. Deve conter uma descrição bastante breve e geral dos **objetivos** do experimento, os **métodos** utilizados para a coleta dos dados e posterior tratamento dos mesmos, os **resultados** obtidos e a **conclusão** do relatório.

## 1 Introdução

Um filtro passivo passa-faixa é um circuito que permite a passagem de sinais de tensão e corrente com frequências situadas numa **faixa intermediária**, atenuando os sinais com frequências abaixo ou acima dessa faixa. Essa faixa intermediária é delimitada por uma frequência de corte inferior ( $\omega_{CI}$ ) e uma frequência de corte superior ( $\omega_{CS}$ ).

Por outro lado, um filtro passivo rejeita-faixa é um circuito que atenua, ou seja, "impede" a passagem de sinais de tensão e corrente com frequências situadas numa faixa intermediária, "permitindo" a passagem de sinais com **frequências acima ou abaixo dessa faixa**. Essa faixa intermediária é delimitada por uma frequência de corte inferior ( $\omega_{CI}$ ) e uma frequência de corte superior ( $\omega_{CS}$ ).

## 2 Embasamento teórico

### 2.1 Filtro passa-faixa

Para avaliar sinais de frequência intermediária, ou seja, acima da frequência de corte inferior e abaixo da frequência de corte superior do filtro, o ganho é unitário, portanto, o módulo do sinal de saída é igual ao de entrada. Para sinais de frequência abaixo da frequência de corte inferior ou acima da frequência de corte superior o ganho do filtro é nulo, ou seja, o módulo do sinal de saída é totalmente atenuado.

Um circuito RLC como apresentado na Fig. 2.1 pode comportar-se como um filtro passivo passa-faixa real.

Um filtro passa-faixa é baseado na **ressonância** que ocorre entre indutores e capacitores em circuitos CA. Para *sinais de frequências baixas* o indutor do circuito da Fig. 2.1 apresenta

---

\*gabrielwendell@fisica.ufrn.br

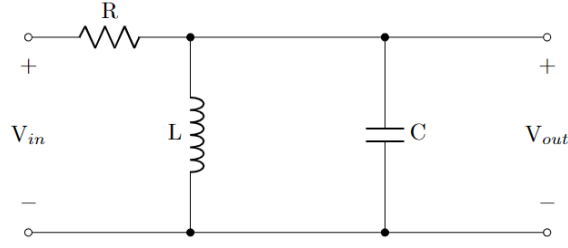


Figura 1: Circuito de um filtro passivo passa-faixa em série

baixa reatância indutiva e tende a comportar-se como um curto-circuito, porém, o capacitor apresenta alta reatância capacitiva e tende a comportar-se como um circuito aberto. Desta forma, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o capacitor e a tensão sobre o resistor de saída será muito baixa, ou seja, o sinal será atenuado. Podemos dizer que o circuito “impede a passagem” de sinais de baixa frequência.

Para *sinais de frequências altas* o capacitor apresenta baixa reatância capacitiva e tende a comportar-se como um curto-circuito, porém, o indutor apresenta alta reatância indutiva e tende a comportar-se como um circuito aberto. Desta forma, a maior parcela de tensão de entrada estará sobre o indutor e a tensão sobre o resistor de saída será muito baixa, ou seja, o sinal será atenuado. Podemos dizer que o circuito “impede a passagem” de sinais de alta frequência.

Para *sinais de frequências intermediárias*, ou seja, sinais cujas frequências estiverem numa faixa próxima à frequência de ressonância do circuito, o indutor e o capacitor juntos apresentarão baixa reatância e tenderão a comportarem-se como um curto circuito. Desta forma, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o resistor de saída. Podemos dizer, então, que o circuito “deixa passar” sinais dentro de uma determinada faixa de frequência

### 2.1.1 Ganho e fase

Para o circuito da Fig. 2.1, a tensão de saída em função da tensão de entrada pode ser dada pela expressão:

$$V_s = \frac{R \cdot V_c}{R + X_L + X_C} = \frac{R}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} \cdot V_c \quad (1)$$

ou ainda

$$\frac{V_s}{V_c} = \frac{R}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 - j \cdot \frac{1 - \omega^2 LC}{\omega RC}} \quad (2)$$

Portanto, a **função de transferência** para um filtro passa-faixa, na forma fatorada é:

$$H(\omega) = \frac{1}{1 - j \left( \frac{1 - \omega^2 LC}{\omega RC} \right)} \quad (3)$$

Sabemos que a função de transferência é um número complexo e que o ganho de tensão é o módulo da função de transferência e a fase é o ângulo, na forma polar. Portanto, a

expressão para o ganho de tensão para um filtro passa-faixa série é:

$$GV = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega RC}\right)^2}} \quad (4)$$

A expressão para a fase do filtro passa-faixa será:

$$\alpha = \arctan \left( \frac{1 - \omega^2 LC}{\omega RC} \right) \quad (5)$$

## 2.2 Filtro rejeita-faixa

Sinais de frequências intermediárias, ou seja acima da frequência de corte inferior e abaixo da frequência de corte superior do filtro, o ganho é nulo, portanto, o módulo do sinal de saída é totalmente atenuado (nulo). Para sinais de frequências abaixo da frequência de corte inferior ou acima da frequência de corte superior, o ganho do filtro é unitário, ou seja, o módulo do sinal de saída é igual ao de entrada. Na prática, porém, não é possível obter a resposta em frequência de um filtro rejeita-faixa ideal.

Um circuito RLC como o apresentado na Fig. 2.2 pode comporta-se como um filtro passivo rejeita-faixa ideal.

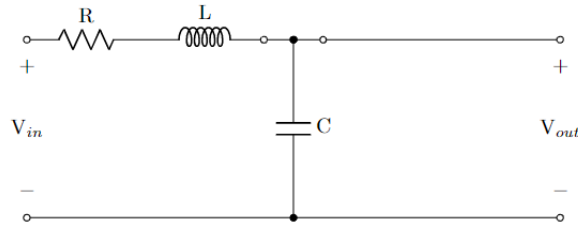


Figura 2: Circuito de um filtro passivo rejeita-faixa em série

Um filtro rejeita-faixa é baseado na **ressonância** que ocorre entre indutores e capacitores em circuitos CA.

Para *sinais de frequências baixas* o indutor do circuito da Fig. 2.2 apresenta baixa reatância (tende a um curto-circuito), porém, o capacitor apresenta alta reatância e tende a comportar-se como um circuito aberto. Desta forma, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o capacitor e a tensão sobre o resistor será muito baixa, ou seja, a tensão de saída será praticamente igual à tensão de entrada. Podemos dizer que o circuito “permite a passagem” de sinais de baixa frequência.

Para *sinais de frequências altas* o capacitor apresenta baixa reatância e tende a comportar-se como um curto-circuito, porém o indutor apresenta alta reatância e tende a comportar-se como um circuito aberto. Desta forma, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o indutor e a tensão sobre o resistor será muito pequena, ou seja, a tensão de saída será praticamente igual à tensão de entrada. Podemos dizer que o circuito “permite a passagem” de sinais de alta frequência.

Porém, para *sinais de frequências intermediárias*, ou seja, sinais cujas frequências estiverem numa faixa próxima à frequência de ressonância do circuito, o indutor e o capacitor juntos apresentarão baixa reatância e tenderão a comportar-se como um curto-circuito. Desta forma, a maior parcela da tensão de entrada estará sobre o resistor e a tensão de saída será praticamente nula, ou seja, o sinal será atenuado. Podemos dizer, então, que o circuito “impede a passagem” (rejeita) sinais dentro de uma determinada faixa de frequências.

### 2.2.1 Ganho e fase

Para o circuito da Fig. 2.2, a tensão de saída em função da tensão de entrada pode ser dada pela expressão:

$$V_s = \frac{(X_L + X_C) \cdot V_e}{R + (X_L + X_C)} \quad (6)$$

ou ainda

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + \frac{j\omega RC}{\omega^2 LC}} \quad (7)$$

Portanto, a **função de transferência** para um filtro passa-faixa, na forma fatorada é:

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + j\left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right)} \quad (8)$$

Sabemos que a função de transferência é um número complexo e que o ganho de tensão é o módulo da função de transferência e a fase é o ângulo, na forma polar. Portanto, a expressão para o ganho de tensão para um filtro rejeita-faixa em série é:

$$GV = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right)^2}} \quad (9)$$

A expressão para a fase do filtro passa-faixa será:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 LC}\right) \quad (10)$$

## 3 Procedimento experimental

O experimento como um todo foi realizado em três etapas. Na primeira foi-se investigado o comportamento do circuito como um filtro passa-baixa. Já na segunda se investigou o comportamento do mesmo como um filtro passa-alta. Por fim, na terceira etapa foi realizada uma simulação usando o programa [CircuitMaker](#) utilizando os mesmos componentes e instrumentos utilizados na experiência no laboratório. A comparação entre os dados experimentais e a simulação se encontra na seção 4.

Abaixo está listado os materiais utilizados nas duas etapas do experimento:

1. 1 gerador de funções AGF1022 da Tektronix;

2. 1 osciloscópio digital TDS11002B da Tektronix;
3. 1 protoboard de duas seções;
4. 1 capacitor de  $1\mu\text{F}$ ;
5. 1 resistor de  $68\ \Omega$ ;
6. 1 indutor de  $0.4\ \text{mH}$ .

Vamos agora descrever o procedimento experimental em cada etapa.

### 3.1 Etapa 1: Filtro passa-faixa

1. Primeiramente, montou-se um circuito RLC de acordo com a Fig. (2.1) e usamos um  $V_i$  como sendo uma onda senoidal cuja  $\omega$  variava dentro do intervalo  $[1, 4 \times 10^4]\ \text{Hz}$  e  $400\text{mV}_{pp}$ , onde  $V_{pp}$  representa a tensão de pico a pico da onda senoidal.
2. Em seguida, por meio do osciloscópio, captou-se o sinal direto do gerador de funções. O sinal capturado pelo osciloscópio encontra-se abaixo. O canal utilizado foi o 1.
  - Captura do sinal de entrada no circuito durante a Etapa 1:

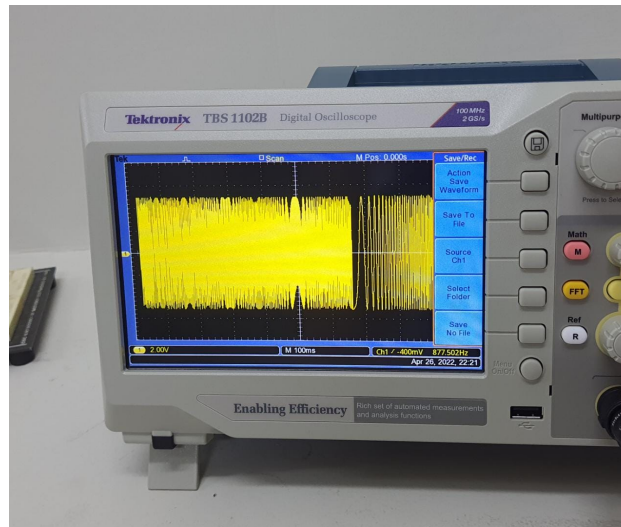


Figura 3: Sinal capturado direto do gerador de funções para uma onda senoidal cuja frequência varia de  $1\ \text{Hz}$  até  $40\ \text{kHz}$ .

O valor de referência do eixo horizontal (tempo) é de  $50.0\ \text{ms}$  enquanto o valor de referência do eixo vertical (tensão) é de  $5.00\ \text{V}$ .

3. Em seguida, captou-se o sinal entre os terminais do capacitor para avaliar o sinal do filtro passa-baixa. O gráfico gerado pelo osciloscópio foi o que se segue.
  - Captura do sinal de saída do capacitor (filtro passa-baixa):

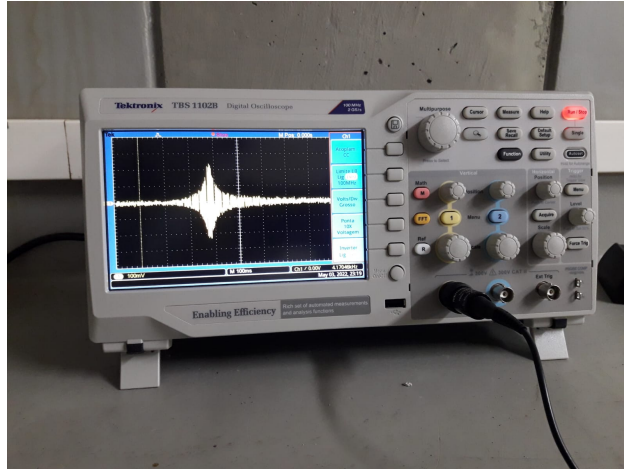


Figura 4: Sinal capturado entre os terminais do indutor para um filtro passa-baixa.

### 3.2 Etapa 2: Filtro passa-alta

1. Analogamente ao que foi feito na etapa 1, montou-se um circuito RLC e selecionou-se  $V_i$  como sendo uma onda senoidal cujo intervalo de variação da frequência é o mesmo exposto na etapa 1.
2. Em seguida, capturou-se então o sinal direto do gerador de funções.
  - Captura do sinal de entrada no circuito durante a Etapa 2:

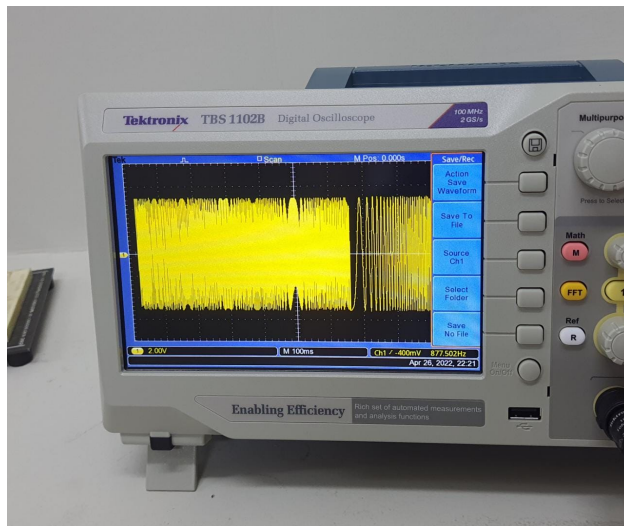


Figura 5: Sinal capturado direto do gerador de funções para uma onda senoidal cuja frequência varia de 1 Hz até 40 kHz.

Note que o resultado foi basicamente o mesmo obtido na etapa anterior.

3. Por fim, avaliou-se o sinal de saída direto dos terminais do resistor.

- Captura do sinal de saída do resistor:

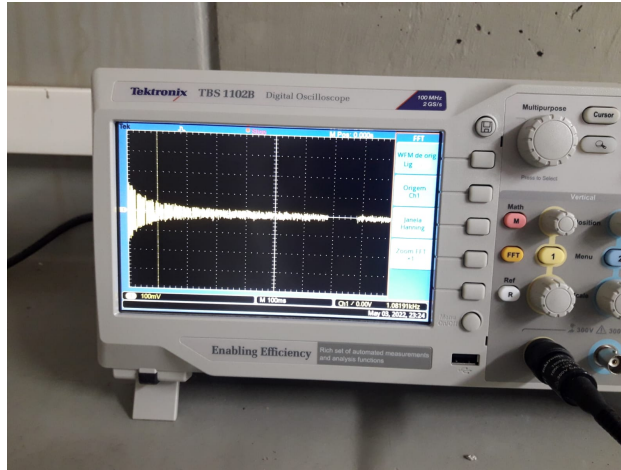


Figura 6: Sinal capturado entre os terminais do capacitor para um filtro passa-alta.

Note que os sinais de saída do indutor (Fig. 4) e em (Fig. 6) são complementares, ou seja, uma função é a inversa da outra.

### 3.3 Etapa 3: Simulação da Etapa 1 usando o CircuitMaker

1. Inicialmente, criou-se um arquivo na extensão .CKT intitulado Band\_Pass\_Filter.ckt onde se montou um circuito como descrito na etapa 1, subseção 3.1.

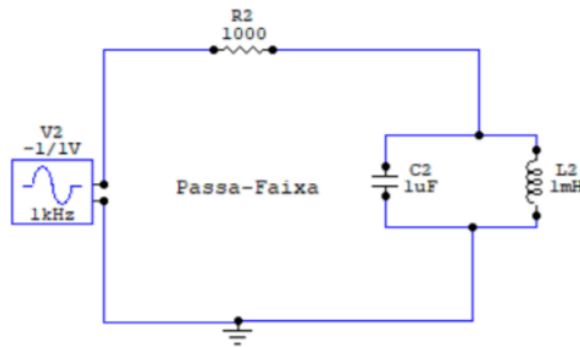


Figura 7: *Schematic* de um filtro passa-faixa montado no CircuitMaker seguindo a descrição exposta na Etapa 1, Seção 3.1.

2. O sinal de entrada foi definido de forma a ser semelhante ao utilizado durante a prática em laboratório.
3. Dessa forma, avaliou-se o sinal de saída do circuito e obteve-se o seguinte gráfico:

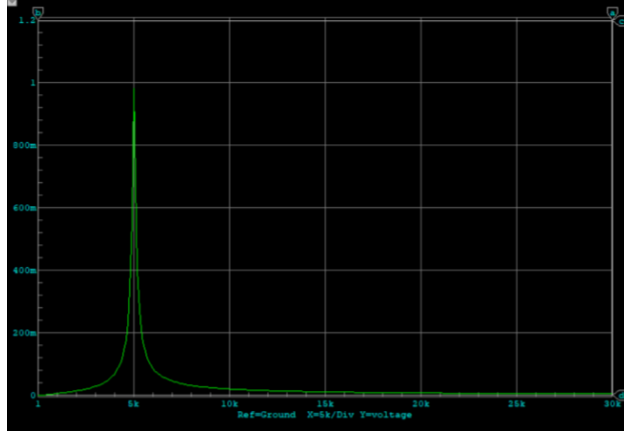


Figura 8: Sinal de saída capturado no filtro passa-faixa.

### 3.4 Etapa 4: Simulação da Etapa 2 usando o CircuitMaker

1. Semelhantemente ao que foi feito na etapa anterior, foi criado um arquivo na extensão .CKT intitulado `Pass_Stop_Filter.ckt` onde foi montado um circuito como descrito na etapa 2, subseção 3.2.

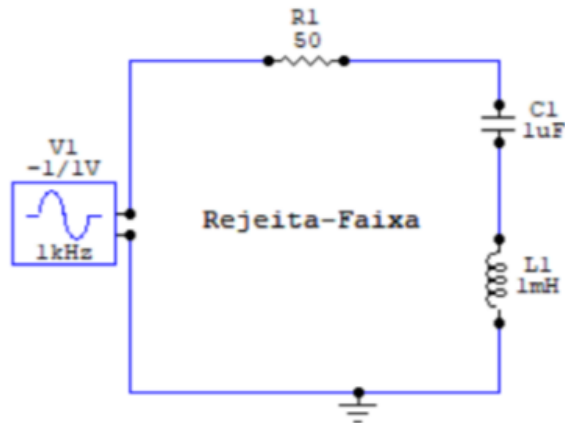


Figura 9: *Schematic* de um filtro rejeita-faixa montado no CircuitMaker seguindo a descrição exposta na Etapa 2, Seção 3.2.

2. E da mesma forma como foi feito na etapa anterior, avaliou-se o sinal de saída do resistor:



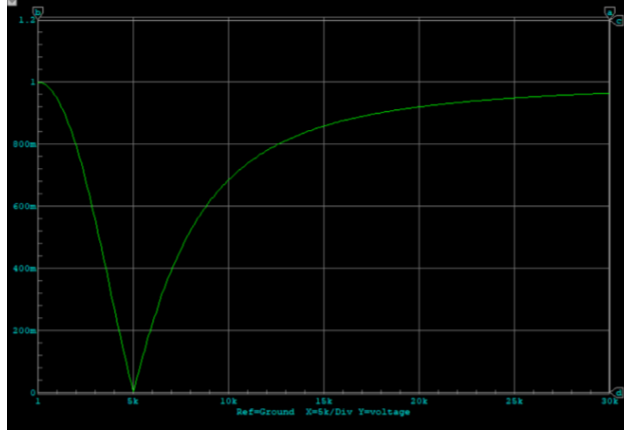


Figura 10: Sinal de saída capturado no filtro rejeita-faixa.

## 4 Análise dos resultados

Nesta seção iremos discutir os resultados obtidos ao longo das etapas experimentais descritas anteriormente.

Como descrito na seção 2, a ideia dos filtro passa-faixa e rejeita-faixa é limitar a passagem de frequência em um dado intervalo e rejeitar a passagem de frequências em outro intervalo, respectivamente. Dessa forma, para o filtro passa-faixa, teremos um gráfico decrescente que só permite a passagem de um certo intervalo de frequências, como pode ser observado na Fig. (8). Com relação ao filtro rejeita-faixa, o mesmo deve impedir a passagem de um certo intervalo de frequência mostrando assim um caráter crescente com o tempo, como ilustrado na Fig. (10).

Com relação ao modelo teórico obtido por meio de uma simulação através do programa **CircuitMaker**, temos algumas semelhanças. Primeiramente, note que como o **CircuitMaker** é um programa que simula a parte teórica dos componentes eletrônicos, ele irá simular apenas o funcionamento dos filtros tendo como sinal de entrada uma onda senoidal com uma frequência específica constante e não um conjunto de frequências variadas. Dessa forma, vemos que o modelo teórico exprime muito bem o caráter esperado para os filtros passa-faixa e rejeita-faixa, respectivamente.

## 5 Conclusões

Dado o exposto ao longo deste relatório, temos que os resultados experimentais expostos na seção 3 condizem com o modelo matemático exposto na seção 2. Portanto, temos que os resultados experimentais estão dentro do esperado do modelo teórico a menos de alguns ruídos experimentais, mostrando assim que os modelos teóricos tanto para um filtro passa-baixa quanto para um filtro passa-alta exprimem razoavelmente bem os filtros passa-faixa e rejeita-faixa reais.

## Referências

- [1] Spitzer, Frank; Howarth (1973). *Principles of Modern Instrumentation*. Nova York: [s.n.] p. Ch. 11
- [2] SEDRA, Adel S., *Microeletrônica* 5<sup>o</sup> ed. volume único, Prentice Hall, 1997
- [3] Bakshi, U.A.; Bakshi, A.V., *Circuit Analysis - II*, Technical Publications, 2009 ISBN 9788184315974.
- [4] Horowitz, Paul; Hill, Winfield, *The Art of Electronics* (3rd edition), Cambridge University Press, 2015 ISBN 0521809266.