



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica

Filtros Elétricos

Segundo Relatório

Prof. Dr. Cleonílson Protásio Souza

Aluno: Vitor de Sousa França - 20180041455

João Pessoa - PB
2024

1 Introdução

Os filtros elétricos são dispositivos utilizados em uma ampla gama de circuitos eletrônicos. A função do filtro é permitir ou bloquear diferentes faixas de frequências e dessa forma garantir que o circuito opere como esperado.

Uma utilização muito importante para os filtros é a remoção de ruídos. O ruído pode ser compreendido como um sinal aleatório e indesejado na banda de frequência útil do circuito e é extremamente comum na maioria dos projetos eletrônicos.

Os filtros podem ser classificados em dois grandes grupos. Os filtros passivos, os que utilizam apenas elementos que dissipam energia como capacitores, resistores e, menos comumente, indutores. Os filtros ativos, por outro lado, são aqueles que também possuem Amplificadores Operacionais, um elemento ativo pois introduz mais energia ao sistema.

O objetivo desse relatório é apresentar a simulação da remoção de ruídos devido a utilização de filtros ativos e passivos. A linguagem de programação Python foi utilizada para fazer as simulações. O código referente a esse relatório pode ser encontrado publicamente no repositório do GitHub através do link: https://github.com/V-kr0pt/filtros_ufpb.

1.1 Sinais de Interesse e Ruído

Foram determinadas 4 senoides de amplitude unitária com diferentes frequências: 1kHz, 10kHz, 50kHz e 100kHz como sinal de interesse. A Figura 1 apresenta os sinais simulados.

A fonte de ruído foi a mesma que a gerada no trabalho anterior: ruído gaussiano branco. O histograma das amplitudes do ruído pode ser visto na Figura 2a e a representação do ruído no domínio da frequência na Figura 2b.

Como esperado a distribuição do ruído se aproxima de uma função de densidade de probabilidade Normal e as componentes de frequência do ruído estão presente de forma quase uniforme em todos os espectros de potência, o que define um ruído branco.

Os sinais com a adição do ruído no domínio do tempo e da frequência podem ser vistos na Figura 3.

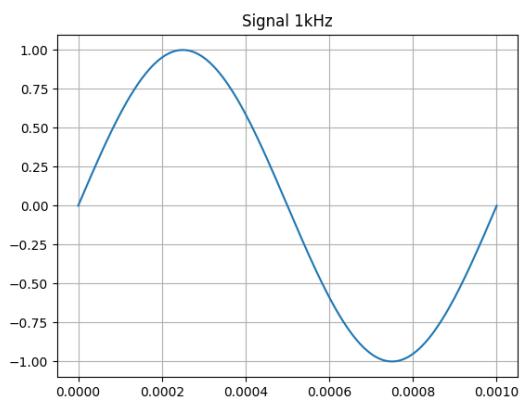
1.2 Relação Sinal Ruído

A relação Sinal Ruído (SNR) é uma forma de quantificar a potência do sinal de interesse P_s em relação à potência do ruído P_n e é descrita na equação 1. Para o sinal de entrada dos filtros a SNR foi de 3,19 dB.

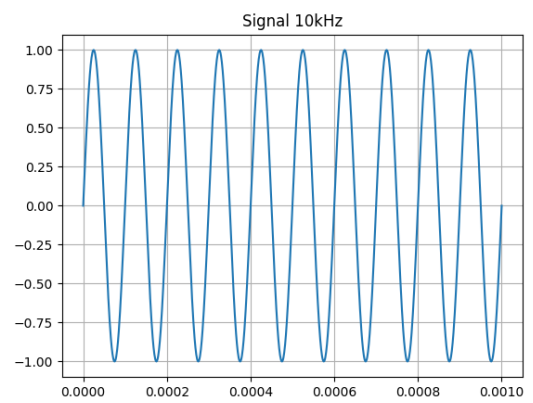
$$SNR(dB) = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (1)$$

Para calcular a SNR dos filtros e assim ser possível comparar quantitativamente a sua eficácia, para todos os filtros, foi simulado a saída para o sinal sem ruído (ou sinal puro) e para o sinal ruído. Tomando a potência do sinal de saída puro por P_s e o sinal de saída com ruído por P_{s+n} . A SNR dos sinais de saída dos filtros foi definida como mostrado pela equação 2.

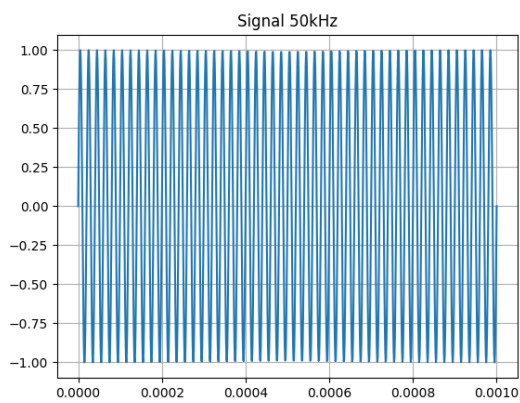
$$SNR(dB) = 10 \log \left(\frac{P_s}{P_n} \right) = 10 \log \left(\frac{P_s^{out}}{P_{s+n}^{out} - P_s^{out}} \right) \quad (2)$$



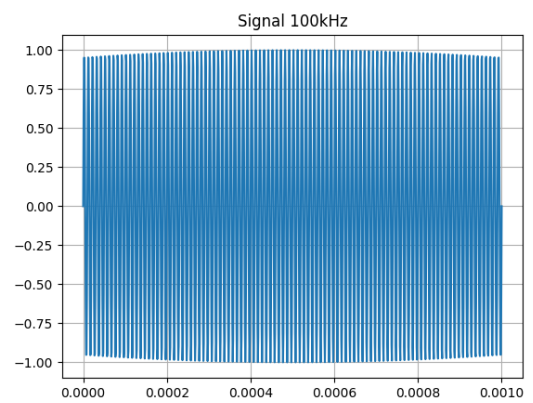
(a) Sinal senoidal de 1kHz



(b) Sinal senoidal de 10kHz



(c) Sinal senoidal de 50kHz



(d) Sinal senoidal de 100kHz

Figura 1: Sinais de interesse

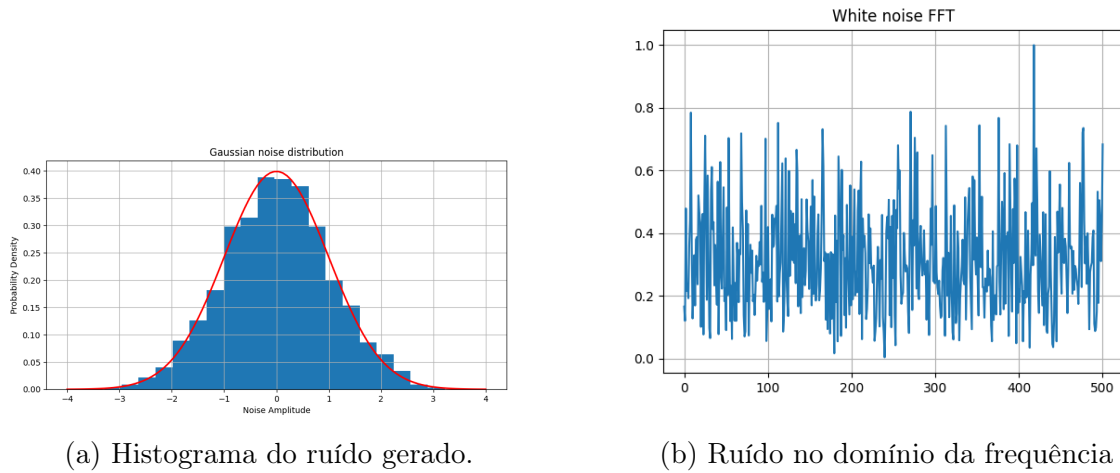


Figura 2: Ruído Gaussiano Branco

2 Filtros passa-baixa

O objetivo do filtro passa-baixa é atenuar o máximo possível as componentes de alta frequência do sinal e o mínimo possível as de baixa frequência. Dessa forma, a resposta em frequência desses filtros devem ter a sua banda de passagem em baixas frequências e banda de corte para altas.

2.1 Filtro passa-baixa passivo

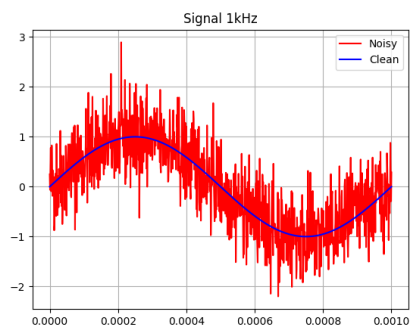
O circuito do filtro passa baixa passivo é apresentado na Figura 4a e a resposta em frequência associada na Figura 4b. A função de transferência desse circuito é apresentada na equação 3. Em que $\omega_c = \frac{1}{RC}$ é a frequência de corte do filtro.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-\frac{1}{RC}}{s - \frac{1}{RC}} = \frac{-\frac{1}{RC}}{s - \omega_c} \quad (3)$$

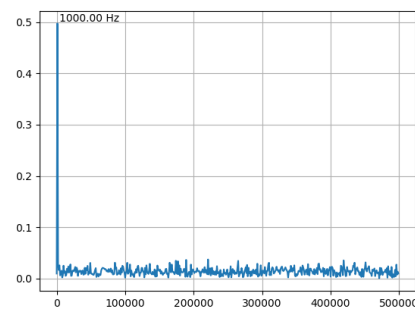
Por ser um filtro passivo não é possível ter ganho maior que 1 no sinal de frequência inclusa na banda de passagem. Através da equação 3, é possível verificar que o ganho DC do filtro, isso é quando $s = 0$, é $A_{dc} = 1$ e para altas frequência, isso é $s \rightarrow \infty$, $A_{s \rightarrow \infty} = 0$.

De forma a obter uma frequência de corte de 30kHz, objetivo definido pela atividade, utilizou-se uma resistência $R = 5k\Omega$ e uma capacitância de $C = 1nF$ resultando em uma frequência de corte aproximadamente de $f_c = 2\pi\omega_c = 31,8kHz$.

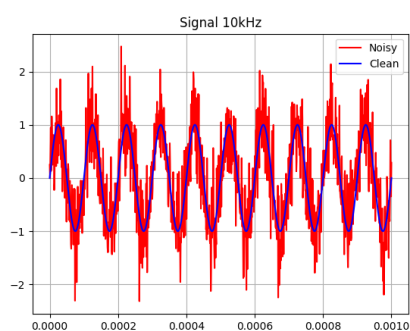
Dessa forma, ao aplicar o filtro passa-baixa passivo aos sinais ruidosos obtém-se como saída os sinais que podem ser vistos na Figura 5.



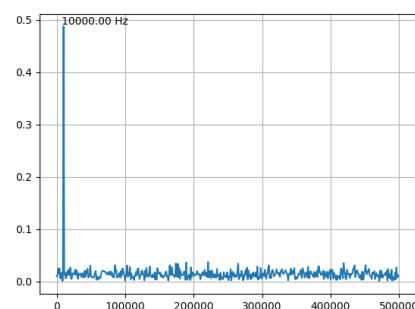
(a) Sinal de 1kHz com ruído



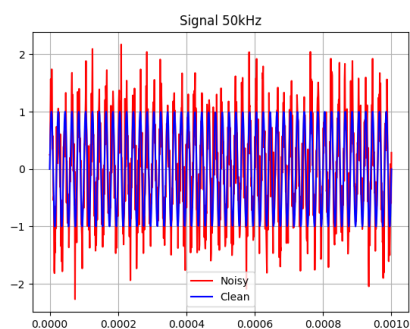
(b) Sinal de 1kHz com ruído no domínio da frequência



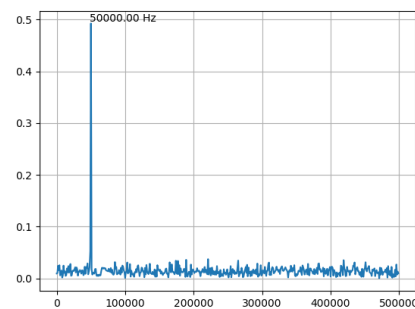
(c) Sinal de 10kHz com ruído



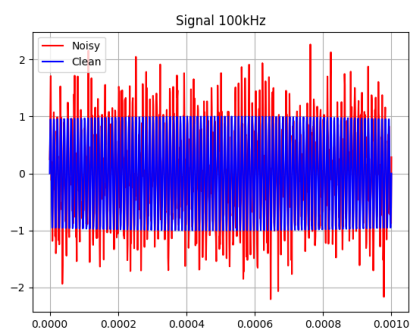
(d) Sinal de 10kHz com ruído no domínio da frequência



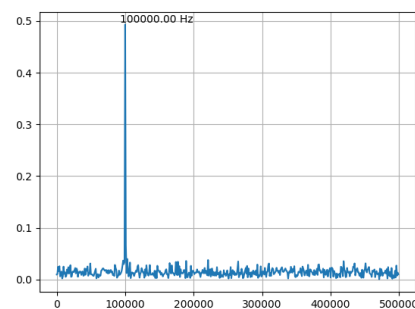
(e) Sinal de 50kHz com ruído



(f) Sinal de 50kHz com ruído no domínio da frequência

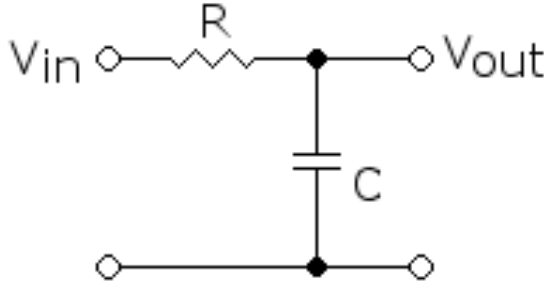


(g) Sinal de 100kHz com ruído

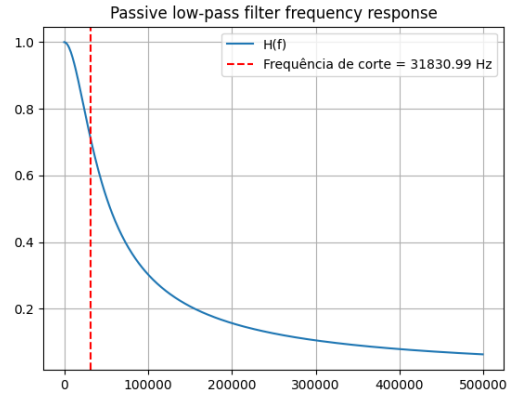


(h) Sinal de 100kHz com ruído no domínio da frequência

Figura 3: Sinais de interesse com o ruído.



(a) Esquemático do filtro passa baixa passivo.



(b) Resposta em frequência do filtro passa baixa passivo.

2.2 Filtro passa-baixa ativo

O circuito do filtro passa-baixa ativo é apresentado na Figura 6a e a sua resposta em frequência na Figura 6b. A sua função de transferência é apresentada na equação 4, em que a frequência de corte é $w_c = \frac{1}{R_2 C}$.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-\frac{1}{R_1 C}}{s - \frac{1}{R_2 C}} \quad (4)$$

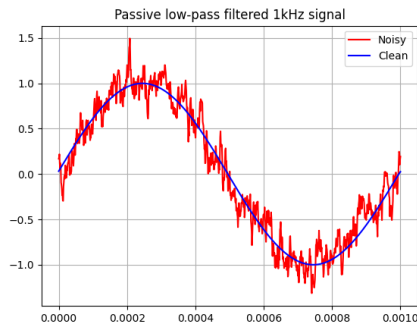
O ganho DC desse filtro é $A_{dc} = -\frac{R_2}{R_1}$. Como ele introduz energia ao sistema, é possível gerar um ganho maior que 1 aos sinais de frequências incluídas na faixa de passagem, basta tornar $R_2 > R_1$. É importante verificar que é um filtro inversor, isso é ele cria uma defasagem de π rad no sinal.

A resistência R_2 e o capacitor C foram os mesmos utilizados no filtro passivo para manter a frequência de corte w_c a mesma. O resistor $R_1 = 1k\Omega$, isso é, 5x menor que R_2 . Dessa forma obtem-se o ganho DC de $A_{dc} = 5$.

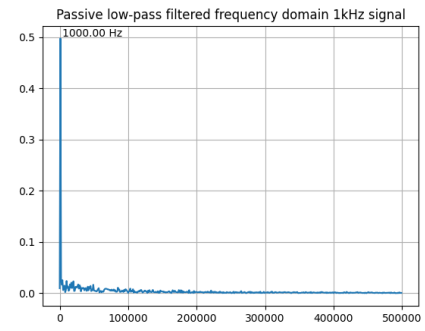
Ao aplicar o filtro passa-baixa ativo aos sinais ruidosos obtem-se como saída os sinais apresentados na Figura 7.

2.3 Relação sinal ruído dos filtros passa-baixa

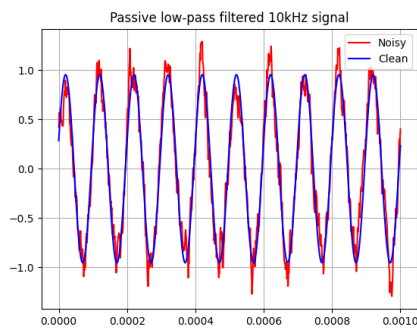
A SNR do sinal de saída dos filtros passa-baixa, calculados utilizando-se da equação 2, foram de: 13.40 dB para 1kHz, 12.99 dB para 10kHz, 8.00 dB para 50kHz e 3.04 dB para 100kHz. Pode-se verificar, como esperado, uma SNR decrescente em função da frequência do sinal de interesse.



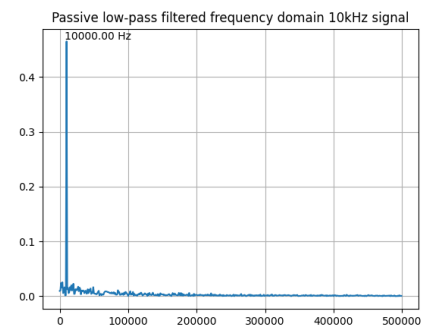
(a) Sinal de 1kHz filtrado por passa-baixa passivo



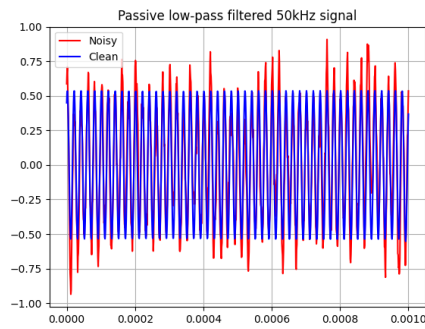
(b) Sinal de 1kHz filtrado por passa-baixa passivo no domínio da frequência



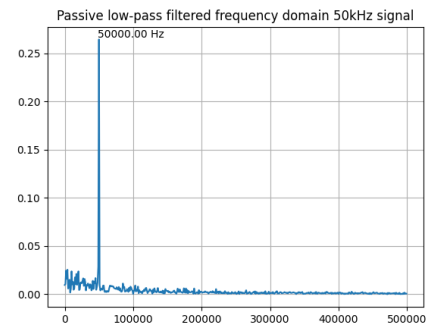
(c) Sinal de 10kHz filtrado por passa-baixa passivo



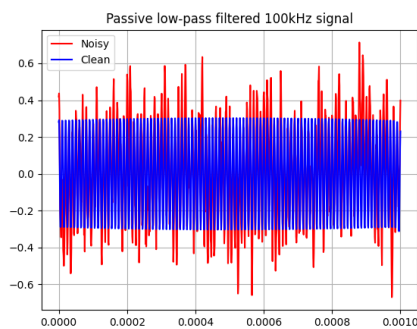
(d) Sinal de 10kHz filtrado por passa-baixa passivo no domínio da frequência



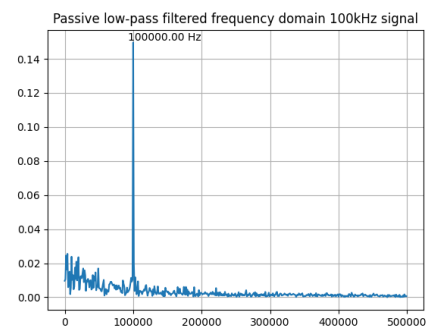
(e) Sinal de 50kHz filtrado por passa-baixa passivo



(f) Sinal de 50kHz filtrado por passa-baixa passivo no domínio da frequência

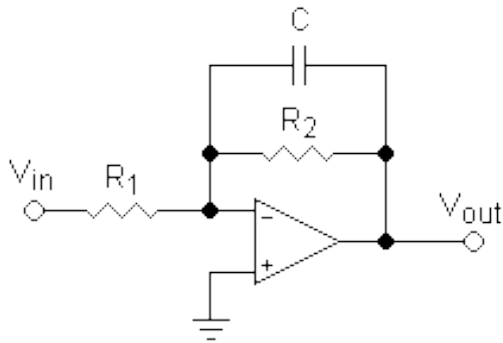


(g) Sinal de 100kHz filtrado por passa-baixa passivo

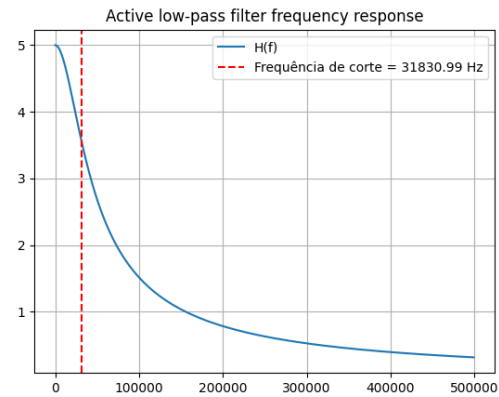


(h) Sinal de 100kHz filtrado por passa-baixa passivo no domínio da frequência

Figura 5: Sinais obtidos a partir da filtragem passa-baixa passivo.



(a) Esquemático do filtro passa baixa ativo.



(b) Resposta em frequência do filtro passa baixa ativo.

3 Filtros passa-alta

O objetivo do filtro passa-alta é atenuar o máximo possível as componentes de baixa frequência do sinal, enquanto mantém as de alta frequência. Assim, a resposta em frequência desses filtros deve ter sua banda de passagem em altas frequências e a banda de corte em baixas.

3.1 Filtro passa-alta passivo

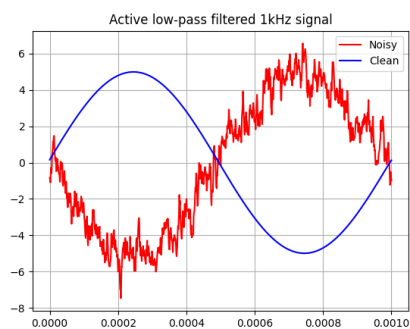
O circuito do filtro passa-alta passivo é mostrado na Figura 10a e a resposta em frequência associada na Figura 10b. A função de transferência desse circuito é apresentada na equação 5, $\omega_c = \frac{1}{RC}$ é a frequência de corte do filtro.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{s}{s + \frac{1}{RC}} \quad (5)$$

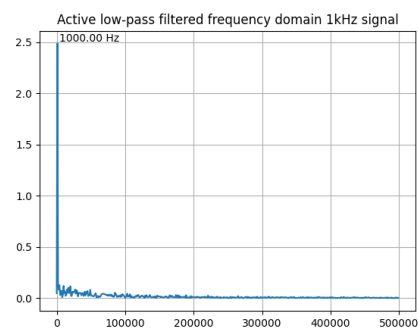
Por ser um filtro passivo, ele não oferece ganho nas frequências da banda de passagem. O ganho DC do filtro, quando $s = 0$, é $A_{dc} = 0$ e, para altas frequências ($s \rightarrow \infty$), o ganho tende a $A_{s \rightarrow \infty} = 1$.

Para alcançar uma frequência de corte de 30kHz, utilizou-se uma resistência $R = 5k\Omega$ e uma capacitância de $C = 1nF$, resultando em uma frequência de corte aproximadamente de $f_c = 2\pi\omega_c = 31,8kHz$.

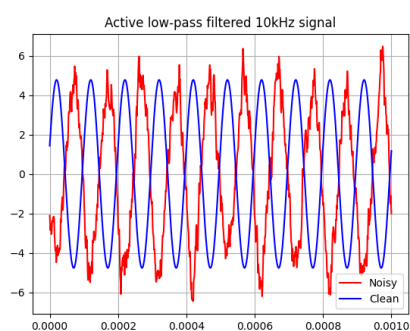
Ao aplicar o filtro passa-alta passivo aos sinais ruidosos, obtém-se como saída os sinais que podem ser vistos na Figura 9.



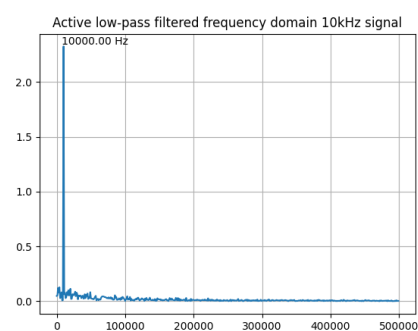
(a) Sinal de 1kHz filtrado por passa-baixa ativo



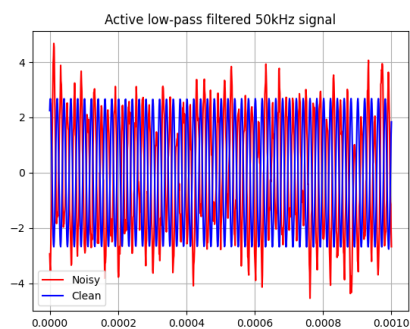
(b) Sinal de 1kHz filtrado por passa-baixa ativo no domínio da frequência



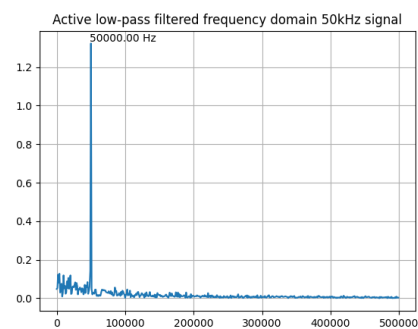
(c) Sinal de 10kHz filtrado por passa-baixa ativo



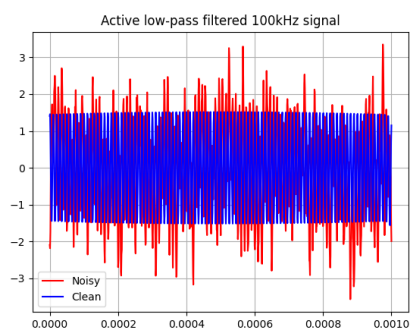
(d) Sinal de 10kHz filtrado por passa-baixa ativo no domínio da frequência



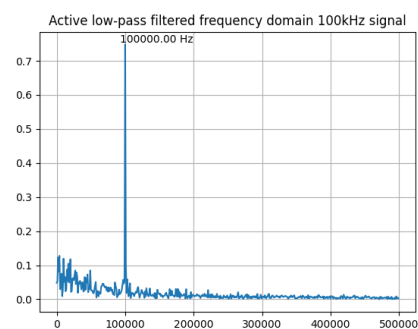
(e) Sinal de 50kHz filtrado por passa-baixa ativo



(f) Sinal de 50kHz filtrado por passa-baixa ativo no domínio da frequência

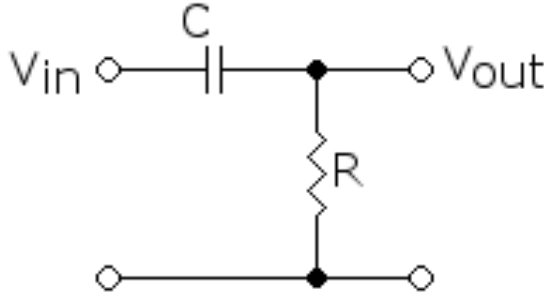


(g) Sinal de 100kHz filtrado por passa-baixa ativo

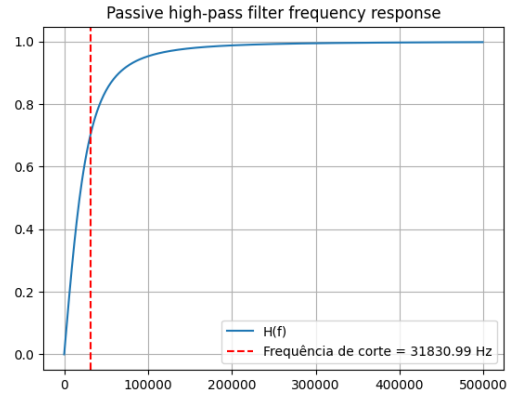


(h) Sinal de 100kHz filtrado por passa-baixa ativo no domínio da frequência

Figura 7: Sinais de saída do filtro passa-baixa ativo.



(a) Esquemático do filtro passa alta passivo



(b) Resposta em frequência do filtro passa alta passivo

3.2 Filtro passa-alta ativo

O circuito do filtro passa-alta ativo é apresentado na Figura 11h e a sua resposta em frequência na Figura 11h. A função de transferência deste filtro é dada pela equação 6, em que a frequência de corte é $\omega_c = \frac{1}{R_1 C}$.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-s \frac{R_2}{R_1}}{s + \frac{1}{R_1 C}} \quad (6)$$

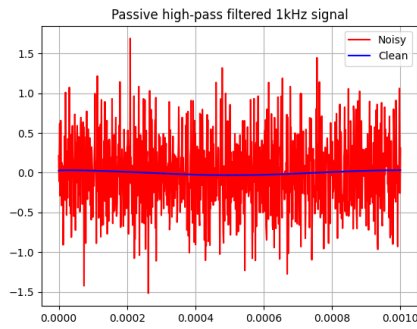
O ganho DC deste filtro é $A_{dc} = 0$. O ganho para altas frequências é $A_{s \rightarrow \infty} = -\frac{R_2}{R_1}$ e ele permite amplificação do sinal na banda de passagem, dependendo da relação entre R_2 e R_1 . Como se trata de um filtro inversor, ele introduz uma defasagem de π rad no sinal.

Mantendo a mesma frequência de corte do filtro passivo, utilizou-se os mesmos valores de $R_1 = 5k\Omega$ e $C = 1nF$. O resistor $R_2 = 25k\Omega$ foi usado para permitir um ganho DC de $A_{dc} = 5V/V$.

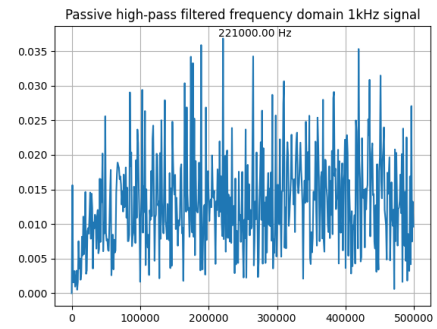
Ao aplicar o filtro passa-alta ativo aos sinais ruidosos, obtém-se como saída os sinais apresentados na Figura 11.

3.3 Relação sinal ruído dos filtros passa-alta

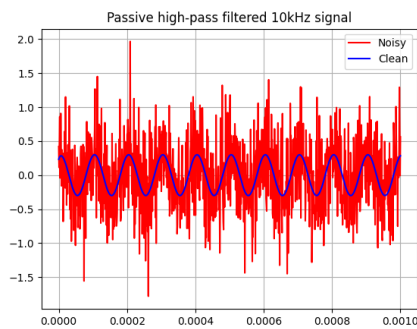
A SNR do sinal de saída dos filtros passa-alta, calculados utilizando-se da equação 2, foram de: -26.43 dB para 1kHz, -6.84 dB para 10kHz, 2.15 dB para 50kHz e 3.21 dB para 100kHz. Pode-se verificar, como esperado, uma SNR crescente em função da frequência do sinal de interesse.



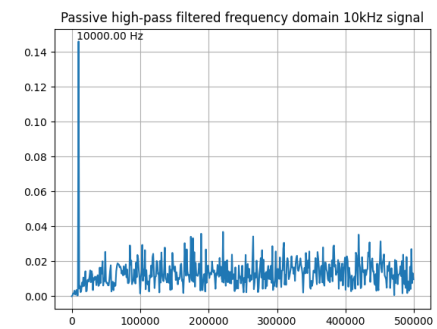
(a) Sinal de 1kHz filtrado por passa-alta passivo.



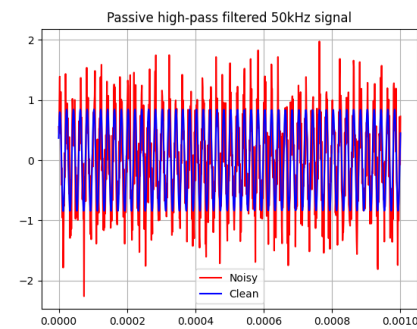
(b) Sinal de 1kHz filtrado por passa-alta passivo. domínio da frequência



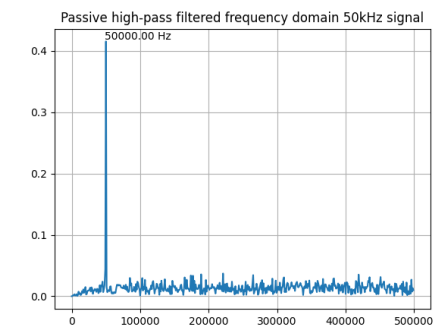
(c) Sinal de 10kHz filtrado por passa-alta passivo



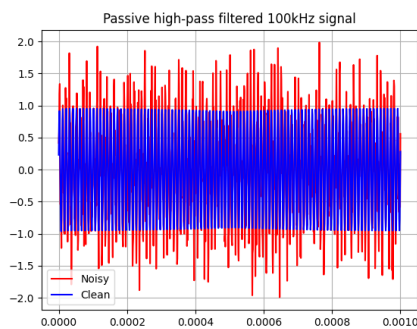
(d) Sinal de 10kHz filtrado por passa-alta passivo no domínio da frequência



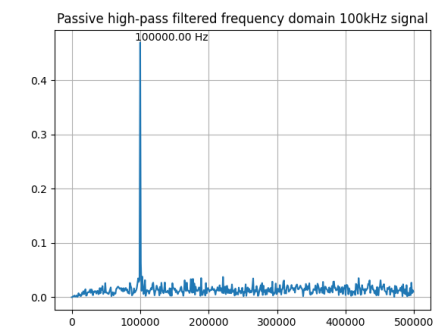
(e) Sinal de 50kHz filtrado por passa-alta passivo



(f) Sinal de 50kHz filtrado por passa-alta passivo no domínio da frequência

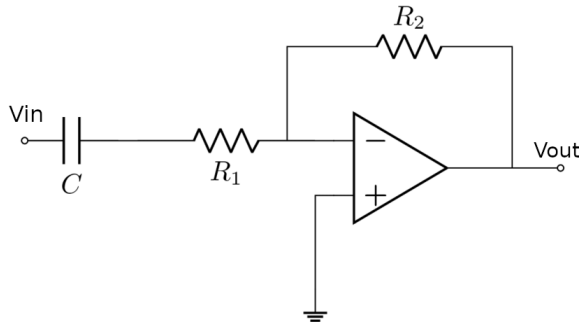


(g) Sinal de 100kHz filtrado por passa-alta passivo

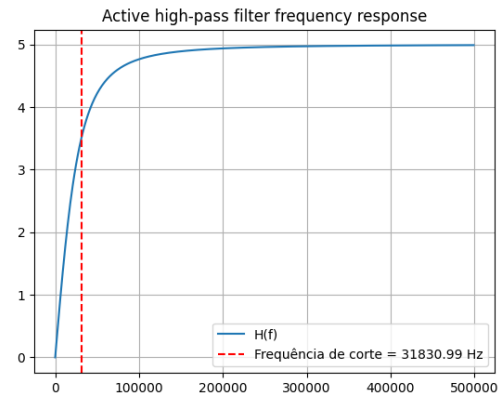


(h) Sinal de 100kHz filtrado por passa-alta passivo no domínio da frequência

Figura 9: Sinais de interesse com o ruído.



(a) Esquemático do filtro passa alta ativo.



(b) Resposta em frequência do filtro passa alta ativo.

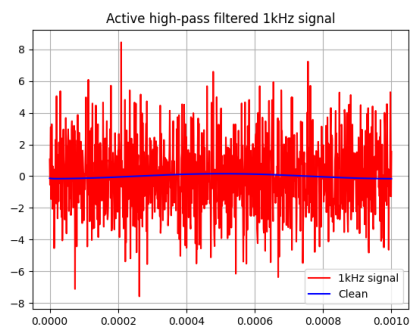
4 Conclusão

Verifica-se que com uma frequência de corte $f_c = 31,8\text{kHz} \approx 30\text{kHz}$ a relação sinal ruído para os filtros passa-baixa foi de 13.40 dB para 1kHz, 12.99 dB para 10kHz, 8.00 dB para 50kHz e 3.04 dB para 100kHz. Enquanto que, para os filtros passa-alta foi de -26.43 dB para 1kHz, -6.84 dB para 10kHz, 2.15 dB para 50kHz e 3.21 dB para 100kHz.

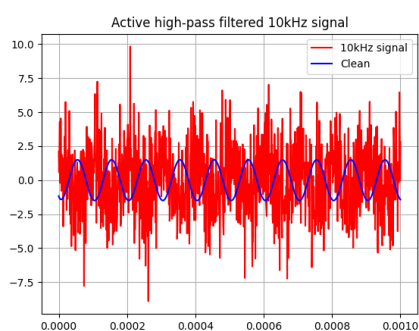
Conclui-se portanto que os filtros passa-baixa permitem uma maior relação sinal ruído para todos os sinais quando comparado ao filtro passa-alta. Obtendo uma SNR maior que a do sinal de entrada: 3,19 dB, para todos os sinais testados.

Esse fato pode ser explicado devido ao comportamento praticamente uniforme da potência do ruído em função da frequência. Há uma parte considerável da potência do ruído em frequências maiores que as frequências dos sinais.

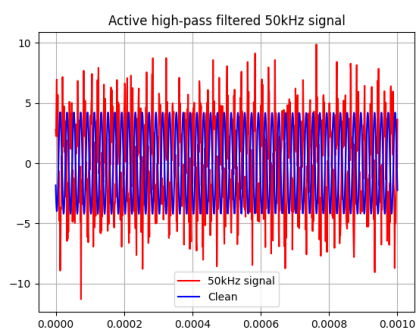
Pelo mesmo motivo explica-se a SNR tão baixa obtida após a utilização do filtro passa-alta. Esse filtro atenua mais a potência do sinal que a potência do ruído para a maioria dos casos de teste. O único caso contrário foi a de 100kHz em que a SNR do sinal de saída ficou um pouco maior que a SNR do sinal de entrada.



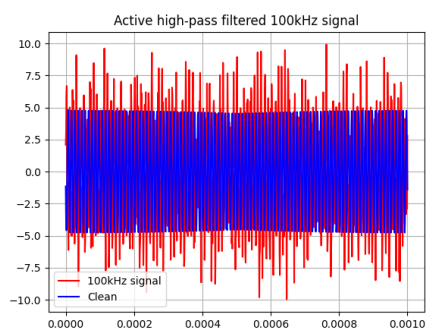
(a) Sinal de 1kHz com ruído



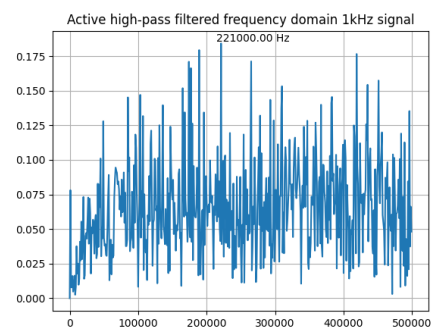
(c) Sinal de 10kHz com ruído



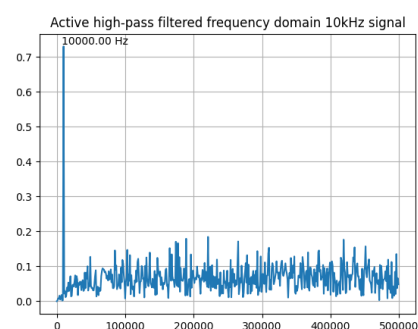
(e) Sinal de 50kHz com ruído



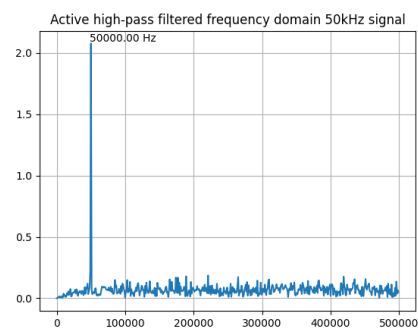
(g) Sinal de 100kHz com ruído



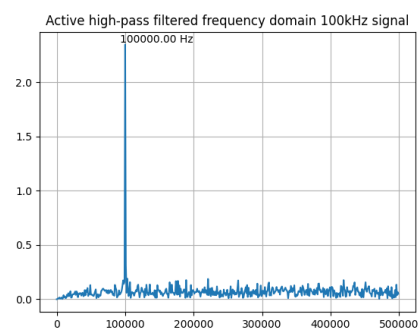
(b) Sinal de 1kHz com ruído no domínio da frequência



(d) Sinal de 10kHz com ruído no domínio da frequência



(f) Sinal de 50kHz com ruído no domínio da frequência



(h) Sinal de 100kHz com ruído no domínio da frequência

Figura 11: Sinais de interesse com o ruído.