

# **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**



## **PSI3212 - Laboratório de Circuitos Elétricos**

### **Alunos:**

Adriano Antonio Silva	10773756
Fernando Campos Chaim	11200608
Lucas Marques Felix	11382129

Professoras: Ariana Serrano  
Verônica Christiano Abê

Turma: 07

# **PROJETO EQUALIZADOR DE SINAIS DE ÁUDIO COM CIRCUITOS ANALÓGICOS - RELATÓRIO FINAL**

Neste primeiro relatório, iremos apresentar a etapa inicial do projeto extraclasse que foi escolhido para ser desenvolvido neste semestre da disciplina de PSI 3212.

## **Introdução**

Equalizadores são equipamentos que conseguem aumentar ou atenuar a intensidade de sinais (ondas). Eles são muito utilizados no ramo da reprodução e gravação de áudio, em que se deseja atenuar certas faixas de áudio (frequências) indesejadas (tais como ruídos ou distorções) ou reforçar faixas que são importantes para o sinal em questão.

Quando se trata de áudio, os equalizadores quase sempre trabalham entre as faixas de frequência de 20 Hz e 20kHz, uma vez que essas são as frequências perceptíveis pelo aparelho auditivo humano.

Além disso, vale salientar que existem dois principais tipos de equalizadores:

### **1) Equalizador de Prateleira**

O equalizador de prateleira é aquele que intensifica ou enfraquece a intensidade dos sinais que estão acima ou abaixo de uma determinada frequência. São compostos, principalmente, de filtros Passa-Baixa, Passa-Faixa e Passa-Alta.

### **2) Equalizador Paramétrico**

O equalizador paramétrico é o tipo de equalizador mais completo que existe, ele permite tanto alterar o ganho de sinais que possuem uma frequência específica (por exemplo, pode-se alterar a intensidade do sinal que possui uma frequência de 2500 Hz), bem como alterar o fator de qualidade (Q) do circuito, que consiste no número de oitavas que o equalizador irá afetar.

### **3) Equalizador Gráfico**

Os equalizadores gráficos normalmente têm vários sliders (de 7 a 31 sliders). De modo que, cada slider possui uma faixa de frequência fixa e que pode ser impulsionada ou não, dependendo da necessidade do usuário. Assim, esse tipo de equalizador pode isolar e/ou misturar várias faixas de frequências sonoras.

## **Etapa 1**

### **Objetivos da Etapa 1**

O objetivo final desse projeto é a construção (no Multisim) de um equalizador monofônico com três faixas de frequências (graves, médios e agudos). Entretanto, o objetivo dessa primeira parte do projeto (que está descrita neste relatório) é o desenvolvimento de três filtros: um Passa-Baixa - que filtra os sons graves, ou seja, aqueles que possuem frequência inferior à da primeira frequência de corte de 360 Hz -, um Passa-Faixa - que filtra os sons médios, ou seja, aqueles que possuem frequência superior à da primeira frequência de corte, mas que possuem frequências inferiores à da segunda frequência de corte de 3200 Hz -, e um Passa-Alta - que filtra os sons graves, ou seja, aqueles que possuem frequência superior à da segunda frequência de corte (3200 Hz).

### **Implementação e Resultados da Etapa 1**

#### **Filtro Passa-Baixa**

Um filtro Passa-Baixa é um circuito elétrico que tem como função atenuar a intensidade de sinais que possuem uma frequência maior do que a frequência de corte (frequência do circuito em que  $V_{out} \approx 0,7.V_{in}$ ). Sendo assim, ele acaba por filtrar todos os sinais que possuem uma frequência menor do que a frequência de corte dos demais, ou seja, ele suprime as frequências acima da frequência de corte.

Após a apresentação do projeto pelos especialistas em uma das aulas, começamos a estudar sobre o funcionamento do filtro Passa-Baixa através dos links de estudo que nos foram sugeridos, bem como em outras fontes de pesquisa. Nessa pesquisas, descobrimos formas de como os filtros passa-baixa podem ser implementados usando apenas elementos eletrônicos passivos (Figura 1), bem como a existência da seguinte relação entre a frequência de corte ( $F_c$ ) de corte com os valores da resistência “R” do resistor do circuito e da capacitância “C” do capacitor  $F_c = \frac{1}{2\pi RC}$ .

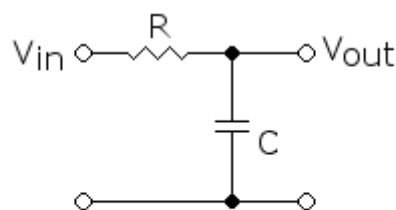


Figura 1

Uma vez que a frequência de corte nos foi dada, sendo igual a 360 Hz, experimentamos várias combinações de resistência e capacitância para procurarmos combinações de resistores e capacitores que eram passíveis de serem comprados em lojas de informática. Com isso, a melhor combinação encontrada para a confecção do circuito foi: um resistor de resistência de  $44200\Omega$  com 1% de tolerância (que pode ser encontrado no link 1 da seção de links) e um capacitor de capacitância de 10nF (de poliéster) com tolerância de 5% (que pode ser encontrado no link 2 da seção de links). Assim, construímos o circuito, que está presente na figura 2, para o filtro Passa-Baixa.

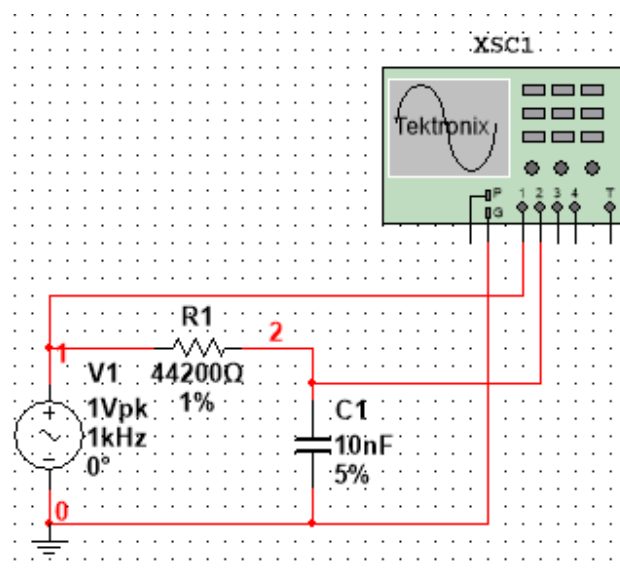


Figura 2

Com o circuito pronto, fizemos a simulação de análise AC (figura 3)

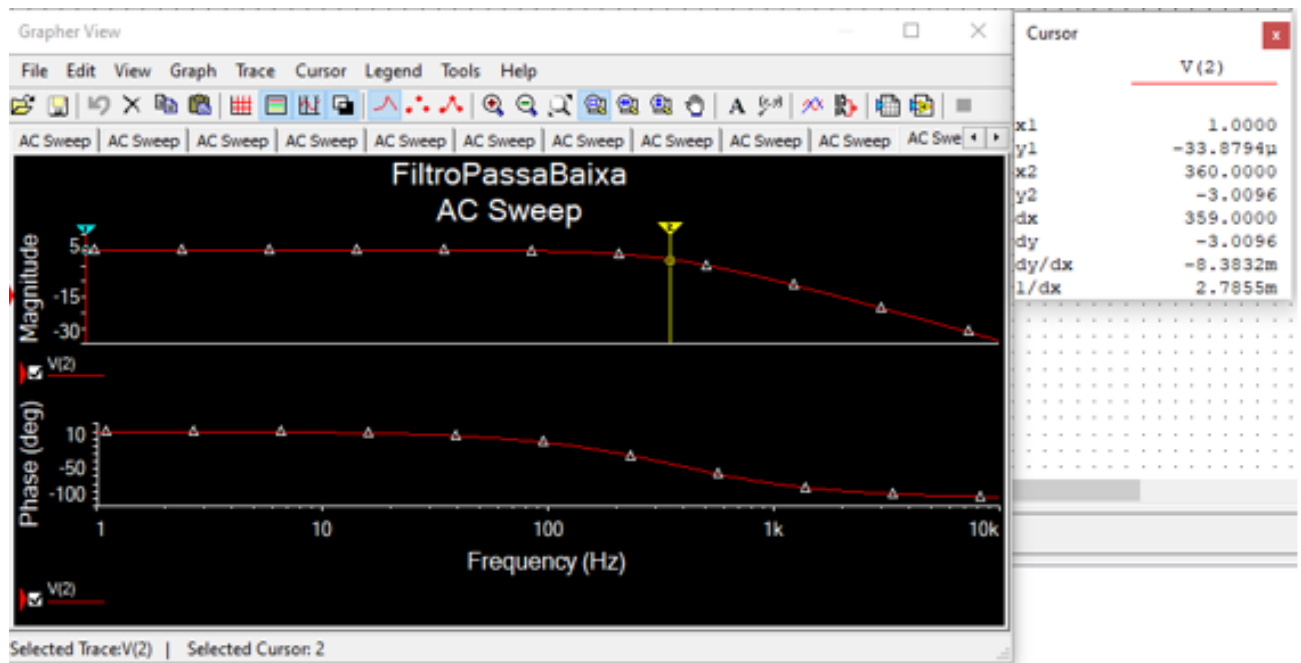


Figura 3

Na análise AC, nós analisamos a voltagem de saída ( $V_{out}$ , que na figura 3 corresponde a  $V(2)$ ) e verificamos qual o valor da resposta em frequência para a frequência de corte.

No nosso caso, a frequência de corte que nos foi fornecida é de 360 Hz (que está representada por  $x_2$  no cursor da Figura 3) e vemos que o valor da resposta em frequência para esta frequência é de -3.0096 dB.

Pela teoria de filtros passivos, sabemos que o valor ideal da resposta em frequência para quando a frequência do circuito corresponde à frequência de corte é de -3 dB. Sendo assim, vemos que o filtro passa-baixa que foi confeccionado acabou por ter uma variação muito pequena (de aproximadamente 0,32%) da resposta em frequência daquela que seria ideal.

### Filtro Passa-Faixa

Esse filtro tem como função filtrar ondas sonoras, de modo que ele privilegia uma faixa específica de frequências, a qual é limitada por duas frequências de corte. Ou seja, há uma supressão da potência de ondas sonoras que estejam fora dessa faixa. Visto que, a fórmula que relaciona as frequências com os valores das constantes dos bipolos para essa situação ( $V_{out} = 70\% V_{in}$ , em que  $V_{out}$  é o sinal de saída da associação em paralelo entre o capacitor e o indutor real) envolve um desenvolvimento algébrico muito extenso, utilizamos a fórmula para nos direcionar aos valores mais indicados e a partir daí, testamos no circuito bipolos com valores encontrados no mercado. Uma vez que os valores aproximados foram encontrados utilizamos como prioridade o indutor, já que foi muito difícil encontrar valores comerciais com especificação de resistência no mercado (usamos a tabela fornecida) e então usar a relação obtida para buscar por componentes disponíveis no mercado de capacitor e resistor que satisfazem as especificações do circuito. Tivemos problemas para o caso do capacitor, mas como não conseguimos encontrar uma nova combinação de valores sem perdas consideráveis, resolvemos esse problema com a associação de capacitores que estivessem disponíveis no mercado a fim de obter o valor de capacitância necessário.

Circuito inicialmente montado no multisim com o capacitor que não estava disponível no mercado:

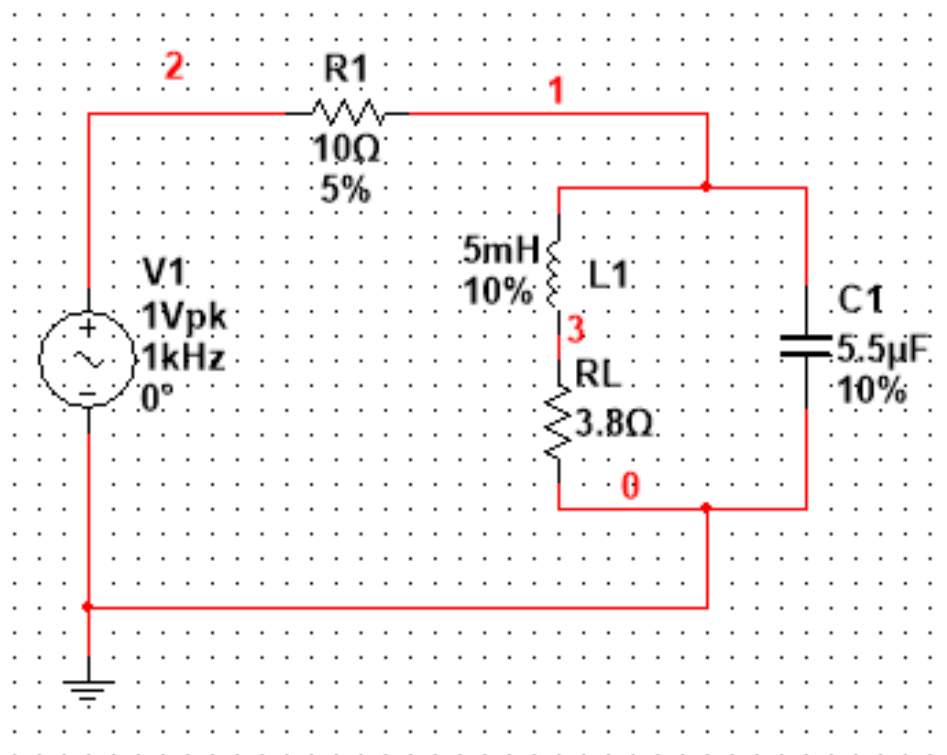


Figura 4

Circuito montado no multisim com a associação de capacitores equivalente ao capacitor de  $5,5\mu F$ :

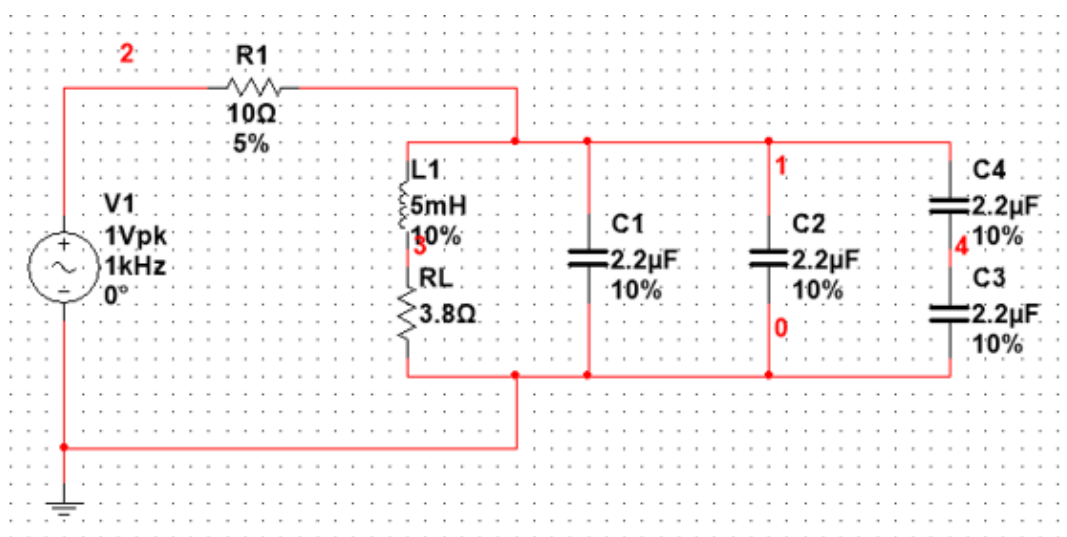


Figura 5

Obtivemos o seguinte resultado para a análise AC :

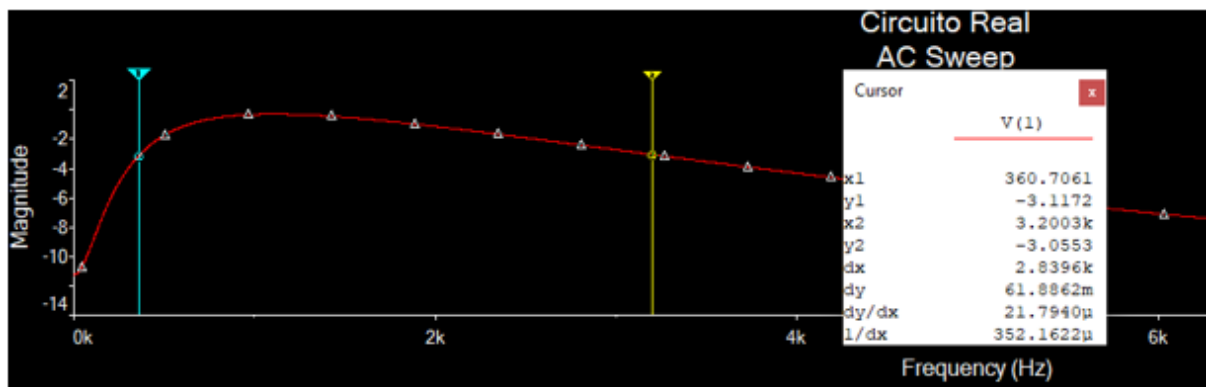


Figura 6

Como podemos perceber pelo gráfico, existe uma faixa de frequências em que o ganho (na escala em decibéis) é maior ou igual a (frequência de corte) - 3 dB, valor esse que indica a situação em que o sinal de saída é aproximadamente 70% do sinal de entrada, e portanto, a potência do sinal de saída é metade da potência do sinal de entrada. Dessa forma, utilizando o cursor podemos concluir que o filtro funciona como o esperado, visto que, os valores em que o ganho vale - 3 dB (aproximadamente) são as frequências de corte que haviam sido pré-estabelecidas para esse equalizador.

### Filtro Passa-Alta

Assim como no caso do filtro passa-baixa, após uma pesquisa sobre o filtro passa-alta, concluímos que esse filtro tem por objetivo suprimir a potência de ondas sonoras de baixa frequência, mais especificamente, ondas que possuam frequência abaixo da frequência de corte. Ainda durante a pesquisa, encontramos a fórmula,  $F = \frac{1}{2\pi RC}$  para o seguinte circuito exemplo:

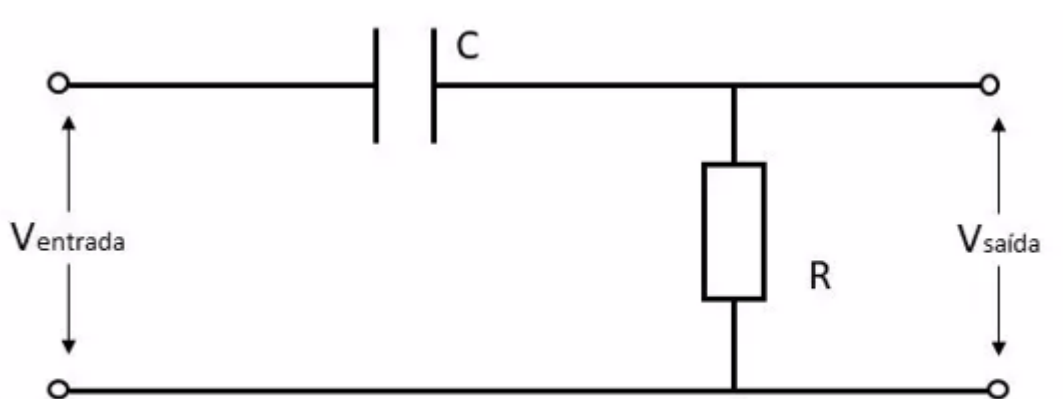


Figura 7

A qual relaciona a frequência de corte (Frequência em que  $V_{saída} \approx 70\% V_{entrada}$ ) do filtro com a resistência e a capacitância dos componentes utilizados na montagem do filtro. Dessa forma, começamos a utilizar resistores ideais na faixa de 10 a 10kΩ a fim de encontrar uma Capacitância que obedecesse a relação descrita pela fórmula. Uma vez encontrado esse valor, através dos links fornecidos no moodle, nós realizamos uma pesquisa a fim de saber se essa capacitância existia em um capacitor real. Visto que os valores de capacitância obtidos não existiam para capacitores disponíveis no mercado, alteramos a forma de se atacar o problema e fixamos um valor de capacitância disponível no mercado e analisamos se a Resistência compatível a esse valor existia no mercado. Assim, chegamos aos valores de 10nF (5% de tolerância) e 4,99 kΩ (1% de tolerância) para

a capacitância e a resistência, respectivamente (podemos encontrar esse esse capacitor e esse resistor na seção de links, sendo eles, respectivamente, link 2 e 3).

Uma vez que os bipolos a serem utilizados haviam sido definidos realizamos a montagem do Filtro no multisim:

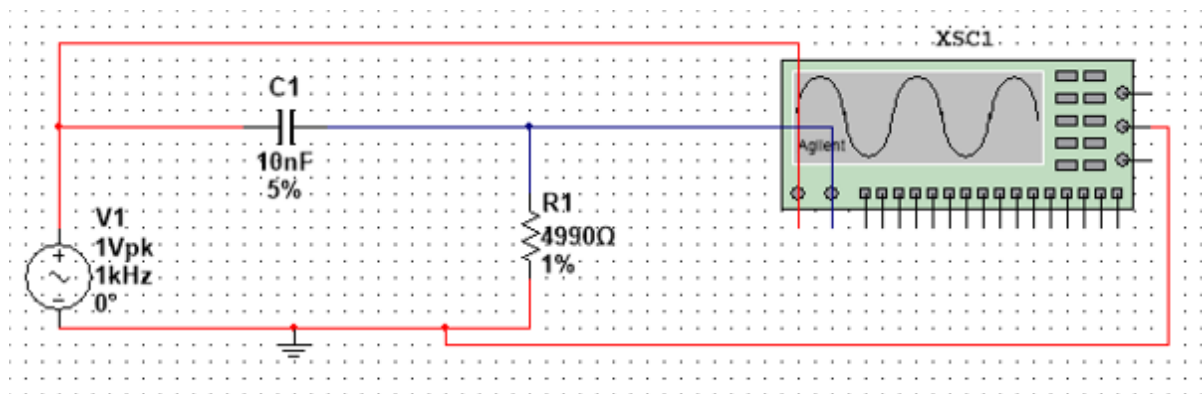


Figura 8

E obtivemos o seguinte resultado para a análise AC:

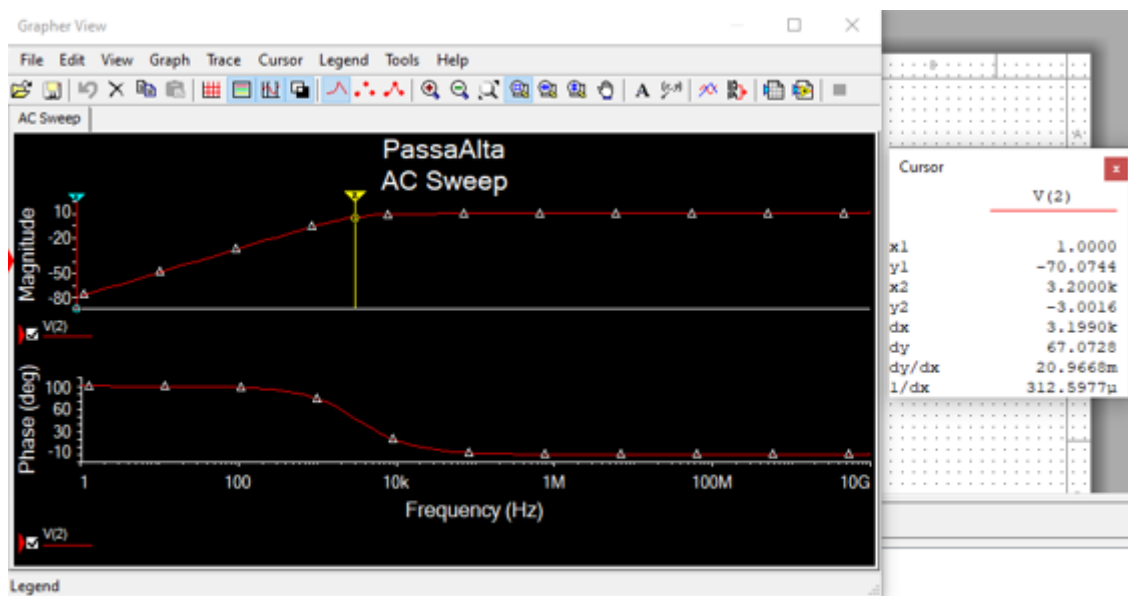


Figura 9

Pelo cursor, obtemos que para a frequência de 3200 Hz (Frequência de corte), o valor do ganho na escala em decibéis é aproximadamente -3 dB, valor esse que representa o caso em que a potência do sinal de saída é igual a metade da potência do sinal ( $V_{out} \approx 0.7V_{in}$ ), isto é, temos uma filtragem dos sinais de entrada, de modo a favorecer os sinais que tem frequência maior do que a frequência de corte (3200 Hz) e, dessa forma, o filtro passa alta funciona como o esperado.

## Etapa 2

### Objetivos da Etapa 2

O objetivo dessa etapa do projeto era adicionar um atenuador a cada um dos filtros para, depois, associá-los a um amplificador somador (amplificador operacional do tipo somador inversor) e, finalmente, obtermos o resultado final do nosso equalizador de três faixas.

### Implementação e Resultados da Etapa 2

#### Alterações

Para que o circuito alcançasse os resultados desejados, houve a necessidade de diminuirmos a amplitude da corrente que atravessava o circuito somador, de forma que ela tendesse a zero e o atenuador que é constituído por um divisor de tensão de resistência variável (potenciômetro mostrado na figura abaixo) funcionasse corretamente.

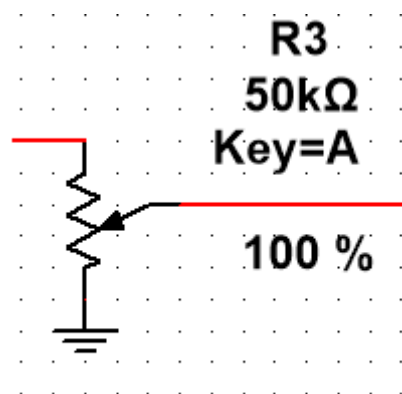


Figura 10

Assim, antes de integrarmos as entradas de cada filtro ao circuito somador, alteramos os valores dos bipolos dos filtros Passa-Baixas e Passa-Altas a fim de termos valores de impedância próximos nos filtros.

Com a proximidade entre esses valores foi mais fácil encontrar os valores de resistência a se aplicar no circuito somador a fim de diminuir a corrente passante.



Abaixo estão os filtros ideais com as devidas alterações:

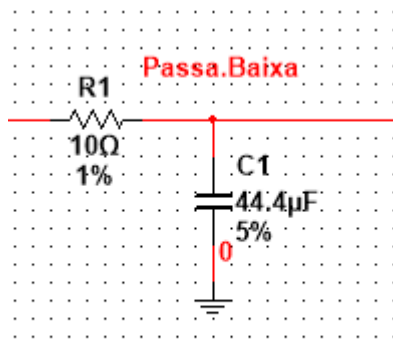


Figura 11

Filtro Passa-Baixas ideal

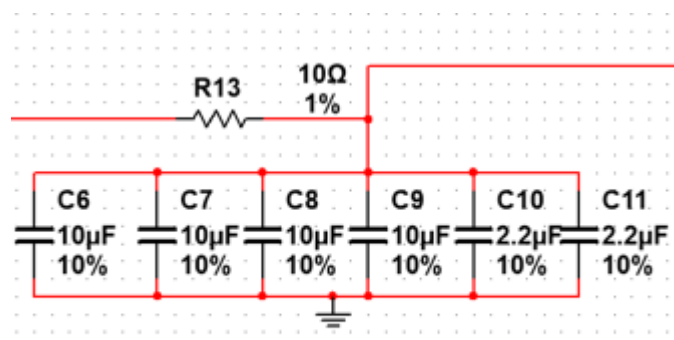


Figura 12

Filtro Passa-Baixas real

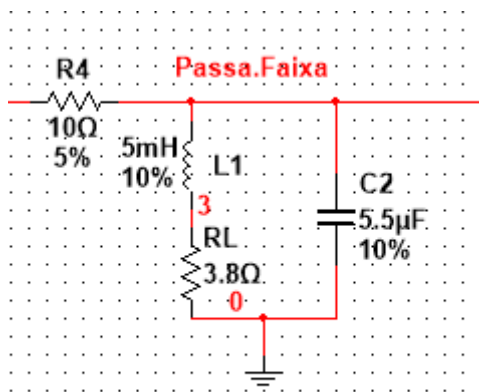


Figura 13

Filtro Passa-Faixas ideal

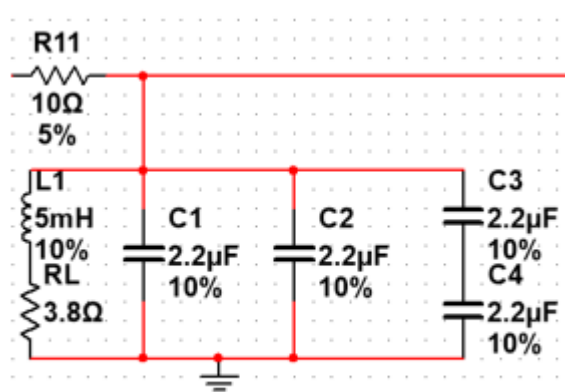


Figura 14

Filtro Passa-Faixas real

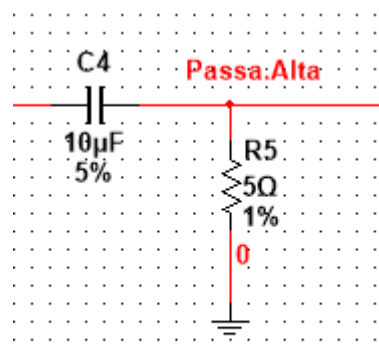


Figura 15

Filtro Passa-Altas ideal

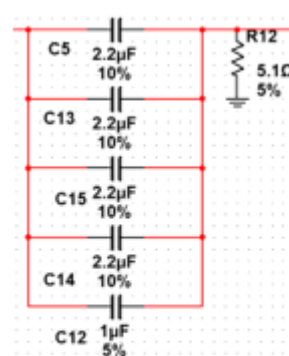


Figura 16

Filtro Passa-Altas real

Dessa forma, temos então acima uma representação dos circuitos ideal e real, mas vale ressaltar que as análises foram feitas no circuito real, a fim de diminuir erros e aproximações (Obs: para ambos os circuitos desconsideramos a resistência interna da fonte AC).

## Funcionamento do Circuito

Os circuitos abaixo representam o circuito equalizador ideal e o real, respectivamente. O equalizador, como explicado anteriormente, é formado pelos três filtros já desenvolvidos e alterados para que os atenuadores funcionassem corretamente e um circuito somador inversor, o qual se utiliza de um amp-op específico para as frequências envolvidas no equalizador, assim, evitando possíveis mal funcionamentos ou ruídos causados por esse quadripolo. Vale ressaltar que o circuito somador inversor se utiliza de um potenciômetro como atenuador para a faixa de frequência passante de cada filtro e um outro funcionando como resistor variável para que o usuário do equalizador possa eventualmente controlar a amplitude de saída.

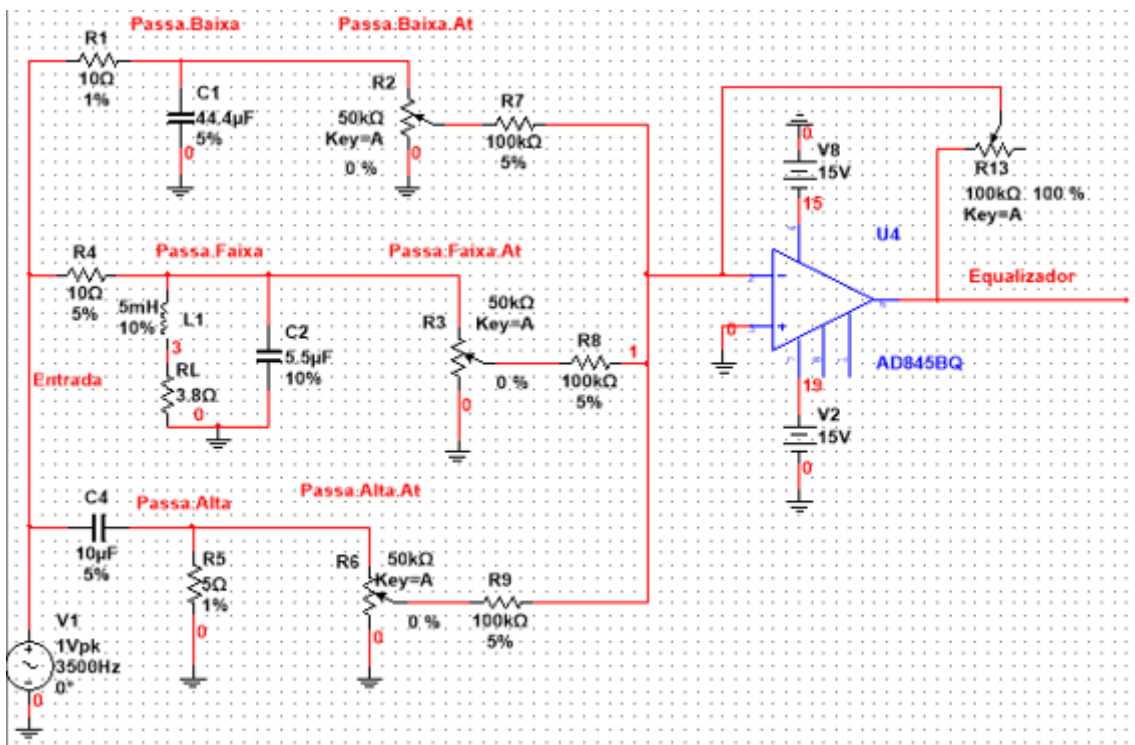


Figura 17

Circuito ideal, nele os bipolos apresentam valores que não são necessariamente encontrados no mercado.

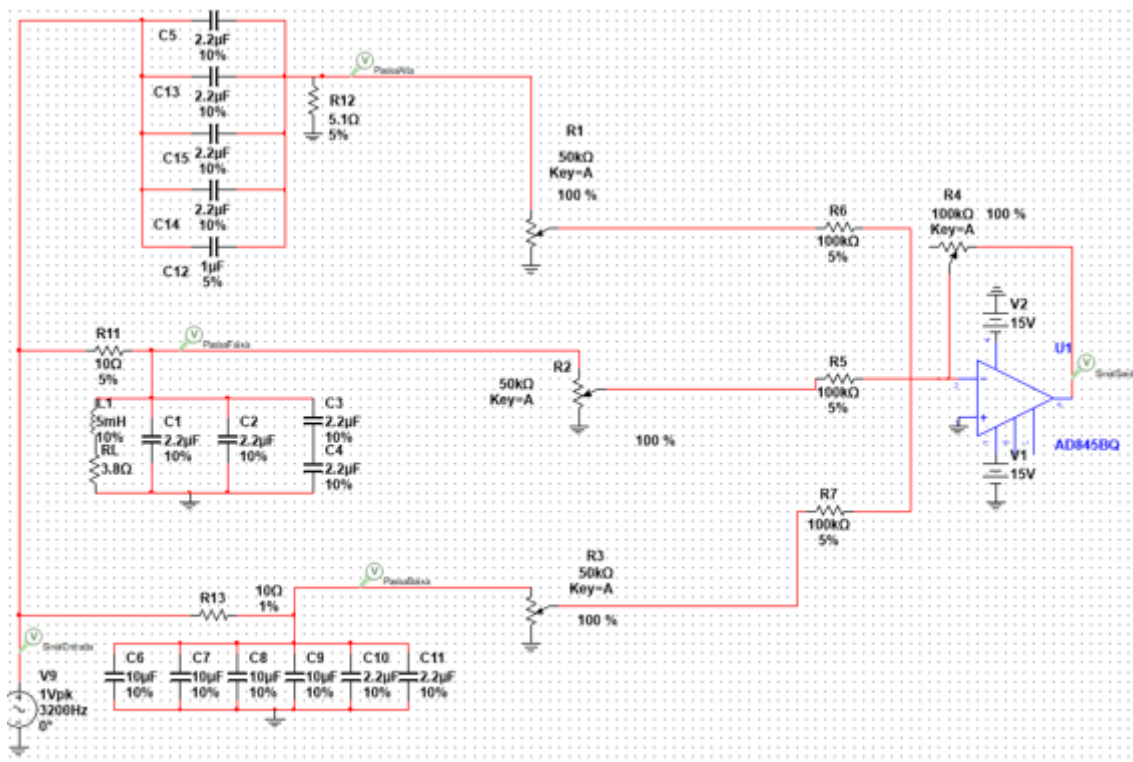


Figura 18

Circuito real, nele usamos valores de bipolos que podem ser comprados no mercado.

### Análise Transiente

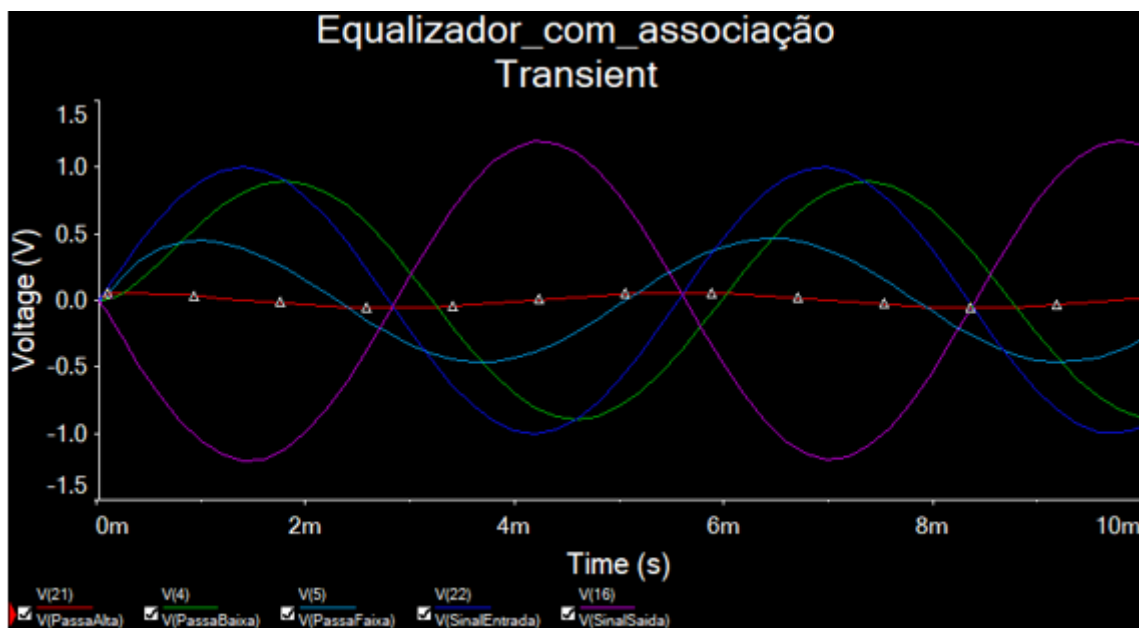


Figura 19

Frequência de 180 Hz com escala de tempo variando entre 0 e 10 ms.

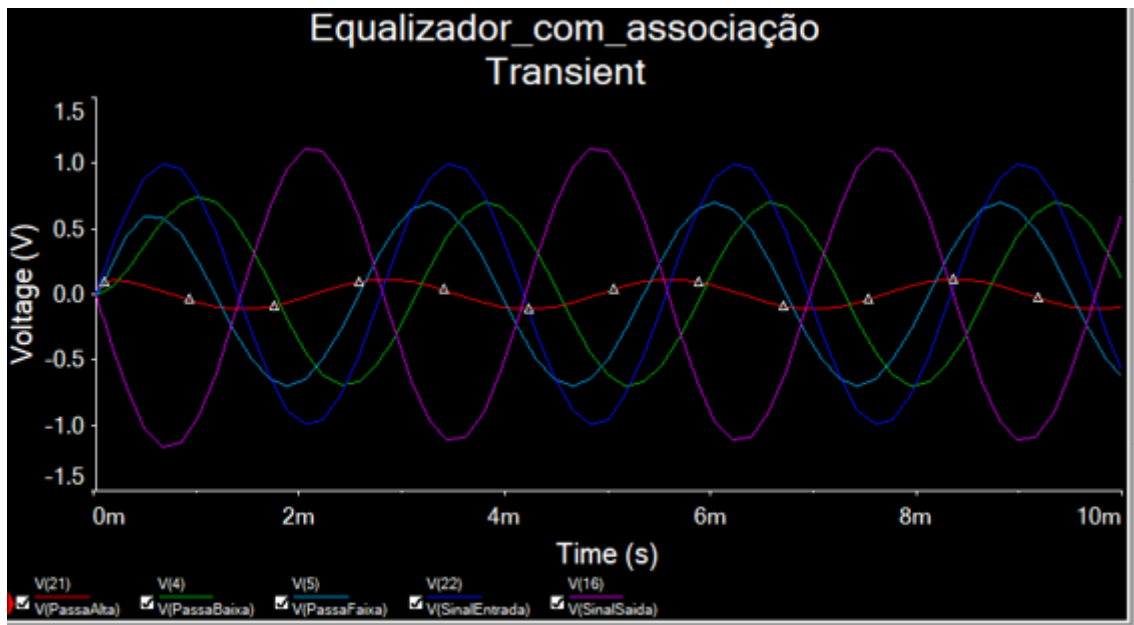


Figura 20

Frequência de 360 Hz com escala de tempo variando entre 0 e 10 ms. Primeira frequência de corte.

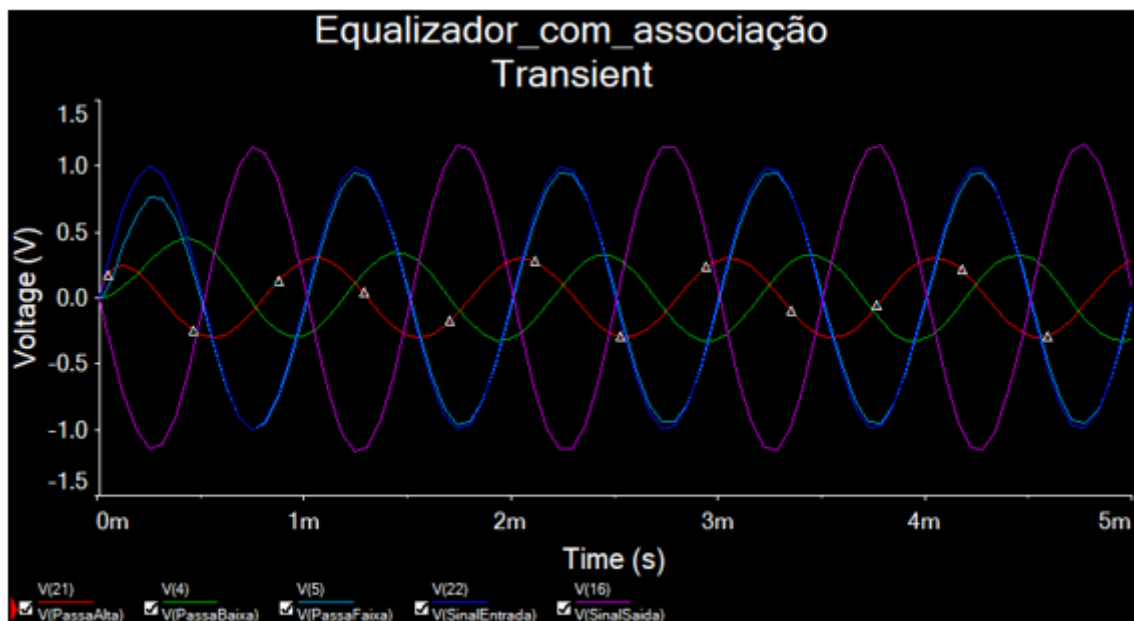


Figura 21

Frequência de 1000 Hz com escala de tempo variando entre 0 e 5 ms.

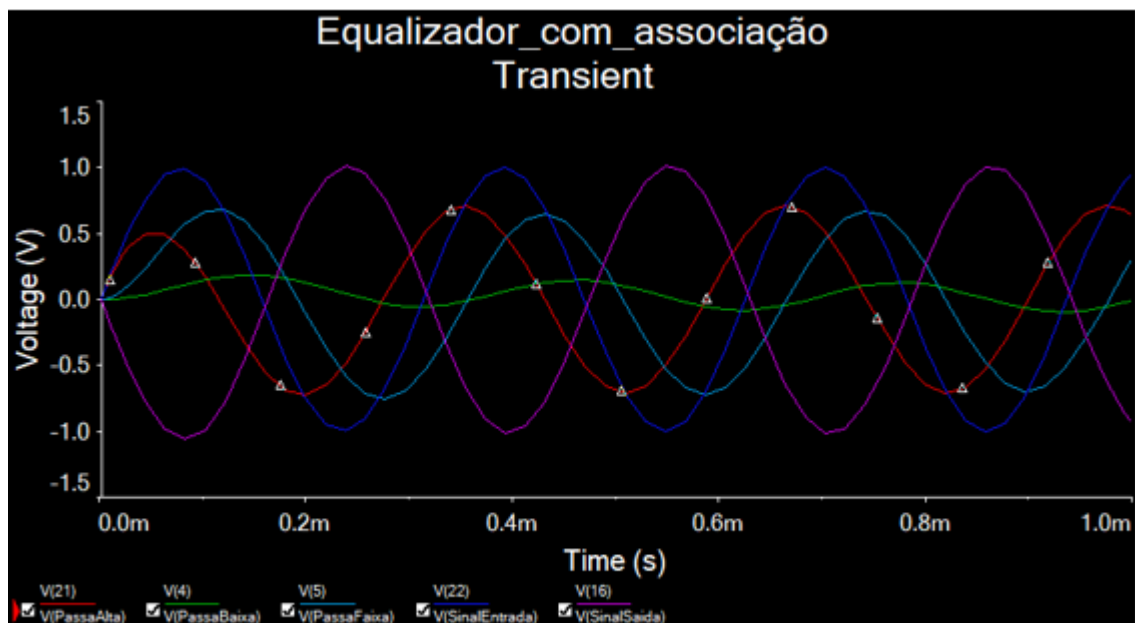


Figura 22

Frequência de 3200 Hz com escala de tempo variando entre 0 e 1 ms. Segunda frequência de corte.

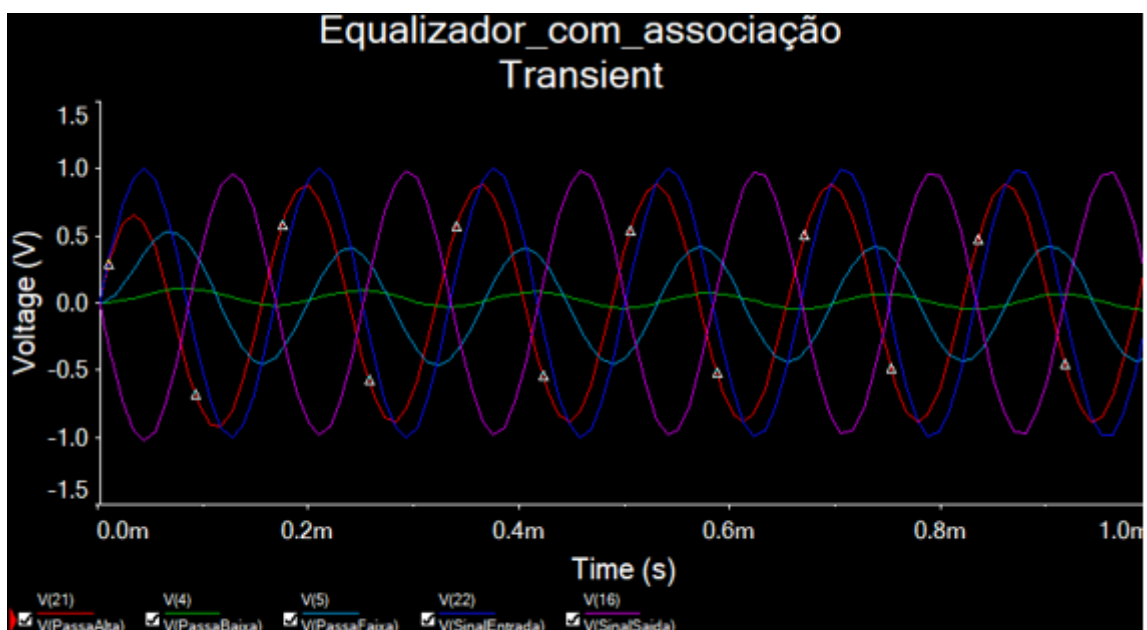


Figura 23

Frequência de 6000 Hz com escala de tempo variando entre 0 e 1 ms.

A atuação dos filtros fica mais nítida analisando a variação da amplitude da tensão na saída de cada um, que é apresentada sem atenuação.

A tensão V(4) em verde representa a amplitude da tensão de saída do passa baixas. Podemos ver que essa onda tem amplitude próxima a amplitude de entrada (azul escuro) para frequências mais baixas e amplitude menor próximo a ser linear em frequências mais altas.

A tensão V(5) em azul claro indica a saída do passa faixas. Podemos ver que ela começa com amplitude menor que 0,5 V se aproxima da tensão de saída (em rosa) e volta a diminuir.

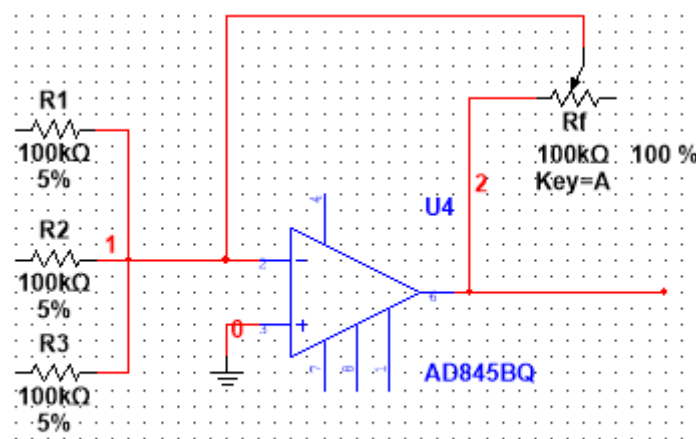
A tensão V(21) em vermelho representa o passa altas. Esse filtro também age como esperado e exibe baixas amplitudes para as frequências mais baixas e grandes para as altas.

### Cálculos do projeto do somador utilizando Amplificador Operacional

Neste circuito, três sinais são aplicados à entrada do AmpOp inversor. O sinal de saída será o inverso da soma dos sinais de entrada amplificados dados pela equação:

Aonde  $R_f$  = resistor variável de máximo 100 k $\Omega$  e  $R = 100$  k $\Omega$

$$V_{Saída} = - \frac{R_f}{R} V_{passa-baixa} - \frac{R_f}{R} V_{passa-faixa} - \frac{R_f}{R} V_{passa-alta}$$



*Esquemática do Amplificador Somador Inversor*

Tal que  $R_1=R_2=R_3=R$

### Análise de Varredura AC (AC Sweep)

**OBSERVAÇÃO:** Como a imagem dos gráficos obtidos na análise AC Sweep teve uma qualidade ruim, uma imagem com melhor resolução pode ser encontrada nos links 14, 15, 16 e 17 da seção de links.

## Análise de Varredura AC quando nenhum dos filtros é atenuado:

Cursores:

Cursor	V(22)	V(21)	V(19)	V(3)	V(16)
	V(Entrada)	V(PassaAlta)	V(PassaBaixa)	V(PassaFaixa)	V(Saida)
x1	360.0000	360.0000	360.0000	360.0000	360.0000
y1	0.0000	-18.9911	-3.0303	-3.1281	1.0527
x2	3.2000k	3.2000k	3.2000k	3.2000k	3.2000k
y2	0.0000	-2.9898	-19.0684	-3.0561	149.2448m
dx	2.8400k	2.8400k	2.8400k	2.8400k	2.8400k
dy	0.0000	16.0013	-16.0382	72.0635m	-903.4879m
dy/dx	0.0000	5.6343m	-5.6472m	25.3745μ	-318.1296μ
1/dx	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ

Figura 24

Gráfico do módulo da resposta e da sua fase:

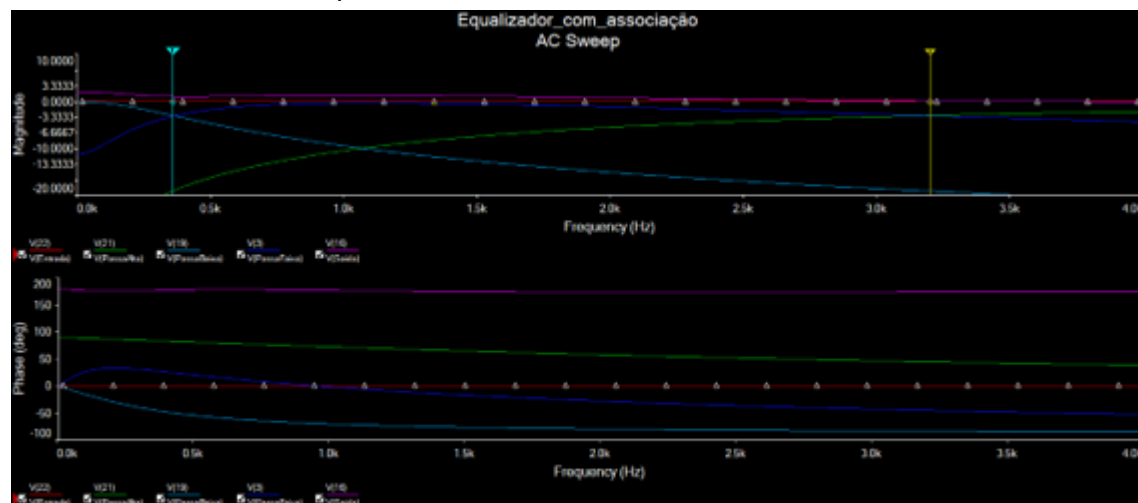


Figura 25

A partir dos gráficos da Análise de Varredura AC, observamos que a resposta dos três filtros continua semelhante àquela apresentada na etapa 1, mostrando que os filtros estão funcionando da maneira correta e desejada. Além disso, vemos que a resposta da saída do equalizador (representada no gráficos pela linha rosa) tende ao sinal de entrada para o caso em que nenhuma das faixas de frequências é atenuada, portanto, o equalizador funciona como o esperado, mas vale ressaltar que para pequenas frequências, a saída do equalizador é levemente amplificada em relação ao sinal de entrada.



## Análise de Varredura AC quando o filtro passa-alta é atenuado completamente:

Cursores:

Cursor	V(22)	V(21)	V(19)	V(3)	V(16)
	V(Entrada)	V(PassaAlta)	V(PassaBaixa)	V(PassaFaixa)	V(Saida)
x1	360.0000	360.0000	360.0000	360.0000	360.0000
y1	0.0000	-18.9906	-3.0303	-3.1281	1.0461
x2	3.2000k	3.2000k	3.2000k	3.2000k	3.2000k
y2	0.0000	-2.9895	-19.0684	-3.0561	-2.0092
dx	2.8400k	2.8400k	2.8400k	2.8400k	2.8400k
dy	0.0000	16.0010	-16.0382	72.0259m	-3.0552
dy/dx	0.0000	5.6342m	-5.6472m	25.3612μ	-1.0758m
1/dx	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ

Figura 26

Gráfico do módulo da resposta e da sua fase:

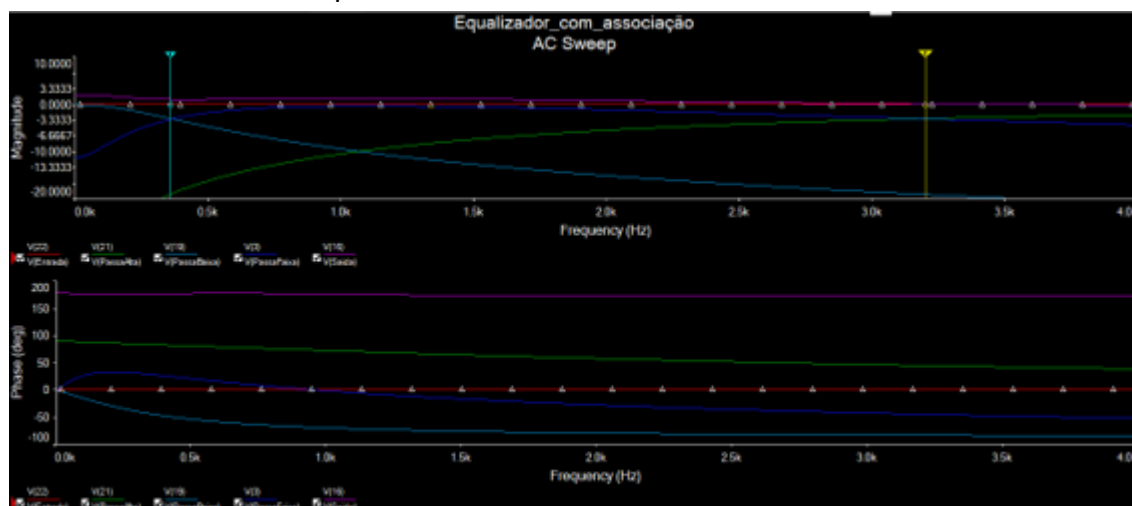


Figura 27

Como podemos observar, para o caso em que apenas o filtro passa alta é atenuado, o ganho cai para frequências maiores que 3.2 kHz. Idealmente para essa frequência o valor esperado em decibéis deveria ser - 3, todavia, em virtude do sinal de saída ser uma soma dos sinais obtidos pelo filtro passa faixa e passa baixa, existe uma leve alteração nesse resultado, porém, consideramos que como não existe uma grande discrepância de valores, o equalizador funciona de forma satisfatória para esse caso.



**Análise de Varredura AC quando o filtro passa-faixa é atenuado completamente:**  
Cursors:

Cursor	V(22)	V(21)	V(19)	V(3)	V(16)
	V(Entrada)	V(PassaAlta)	V(PassaBaixa)	V(PassaFaixa)	V(Saída)
x1	360.0000	360.0000	360.0000	360.0000	360.0000
y1	0.0000	-18.9910	-3.0303	-3.1276	-3.8585
x2	3.2000k	3.2000k	3.2000k	3.2000k	3.2000k
y2	0.0000	-2.9898	-19.0684	-3.0556	-3.8030
dx	2.8400k	2.8400k	2.8400k	2.8400k	2.8400k
dy	0.0000	16.0013	-16.0382	71.9216m	55.4736m
dy/dx	0.0000	5.6342m	-5.6472m	25.3245μ	19.5330μ
1/dx	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ

Figura 28

Gráfico do módulo da resposta e da sua fase:

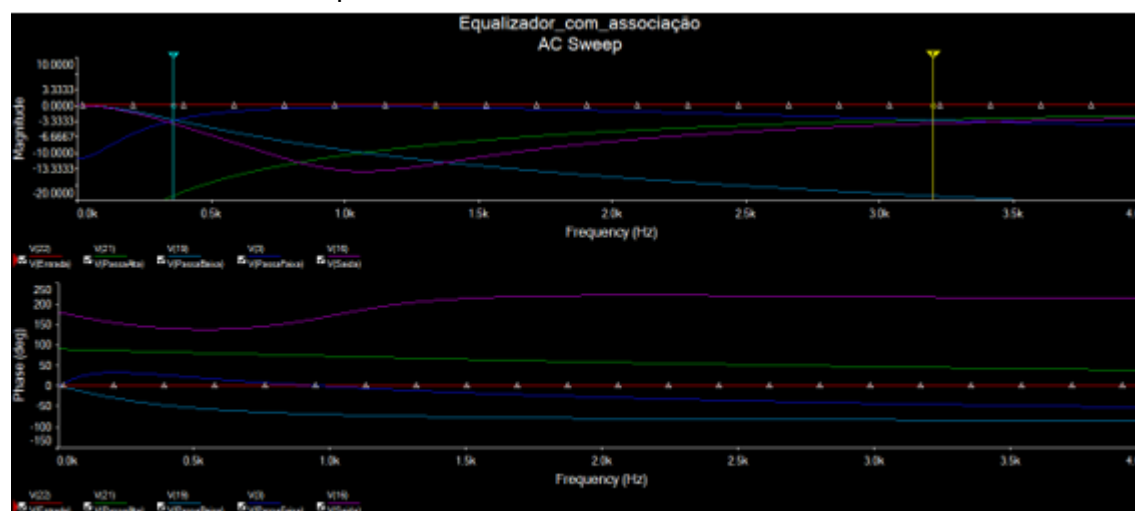


Figura 29

Para esse caso, como esperado, o ganho do sinal de saída do equalizador diminui drasticamente entre as frequências de 360 e 3200 Hz. Todavia, assim como no caso anterior, esperávamos que idealmente o valor em decibéis fosse -3 para os valores de 360 e 3200 Hz, mas como não houve um desvio muito grande desse valor, podemos concluir que o filtro também funciona satisfatoriamente bem para o caso em que frequências intermediárias são atenuadas completamente.

**Análise de Varredura AC quando o filtro passa-baixa é atenuado completamente:**  
 Cursores:

Cursor	V(22)	V(21)	V(19)	V(3)	V(16)
	V(Entrada)	V(PassaAlta)	V(PassaBaixa)	V(PassaFaixa)	V(Saida)
x1	360.0000	360.0000	360.0000	360.0000	360.0000
y1	0.0000	-18.9910	-3.0299	-3.1281	-2.3095
x2	3.2000k	3.2000k	3.2000k	3.2000k	3.2000k
y2	0.0000	-2.9898	-19.0684	-3.0561	-7.6251m
dx	2.8400k	2.8400k	2.8400k	2.8400k	2.8400k
dy	0.0000	16.0013	-16.0386	72.0258m	2.3018
dy/dx	0.0000	5.6342m	-5.6474m	25.3612μ	810.5043μ
1/dx	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ	352.1127μ

Figura 30

Gráfico do módulo da resposta e da sua fase:

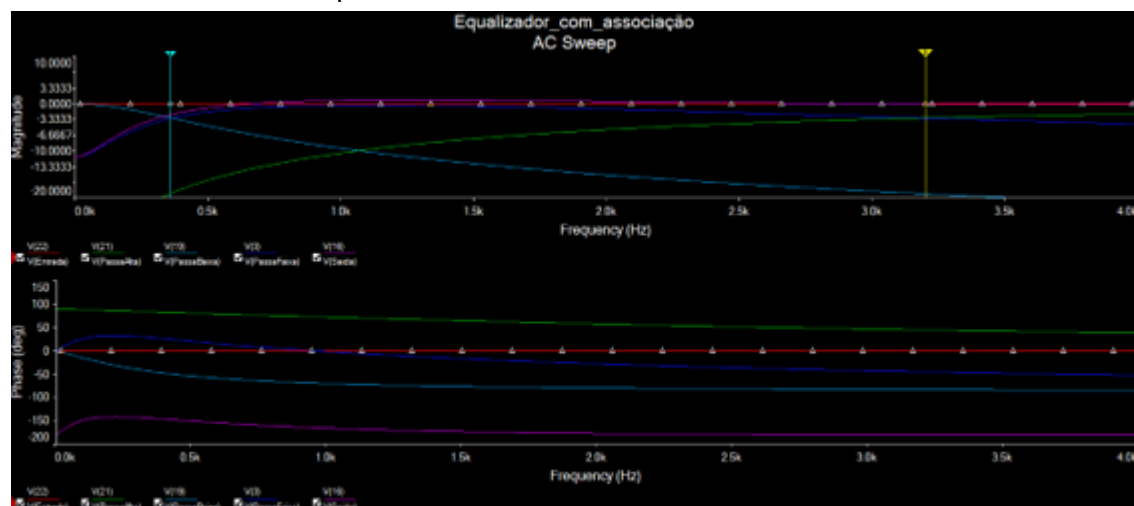


Figura 31

Assim como nos outros dois casos, podemos concluir que o filtro funciona de forma satisfatória, visto que, mesmo que para a frequência de corte (360 Hz) o valor não seja - 3, podemos desprezar essa diferença tendo em vista que os outros filtros influenciam nesse valor.

### Seção de links (componentes utilizados):

link1: <https://www.baudaeletronica.com.br/resistor-smd-44k2-1-0805-1-8w.html> (Resistor usado no filtro passa baixa na etapa 1)

link2: <https://www.baudaeletronica.com.br/capacitor-de-poliester-10nf-400v.html> (Capacitor usado no filtro passa baixa e passa alta na etapa 1)

link 3: <https://www.baudaeletronica.com.br/resistor-smd-4k99-1-0805-1-8w.html> (Resistor usado no filtro passa alta na etapa 1)

link 4: <https://www.baudaeletronica.com.br/resistor-10r-5-1-4w.html> (Resistor usado no filtro passa-faixa na etapa 1)

link 5: <https://www.baudaeletronica.com.br/capacitor-de-poliester-2-2uf-400v.html> (Capacitor usado no passa-faixa na etapa 1)

link 6: <https://www.baudaeletronica.com.br/resistor-100k-5-1-4w.html> (Resistor de 100KΩ usado no amplificador somador e no atenuador variável)

link 7: <https://www.baudaeletronica.com.br/potenciometro-linear-de-50k-50000.html> (Potenciômetro de 50KΩ usado no atenuador variável)

link 8: <https://br.mouser.com/ProductDetail/Analog-Devices/AD845BQ?qs=%2Fha2pyFaduuiZO5ACwyuIJsKg9nM2FybbkfB5qTzN8c%3D> (Amplificador Operacional AD845BQ - que é próprio para aplicações de áudio - usado no amplificador somador)

link 9: <https://www.baudaeletronica.com.br/capacitor-de-poliester-10uf-250v.html> (Capacitor de 10μF usado no filtro passa-alta ideal e no passa-baixa real da etapa 2)

link 10: <https://www.baudaeletronica.com.br/capacitor-de-poliester-2-2uf-400v.html> (Capacitor de 2.2μF usado no filtro passa-alta, passa-faixa e passa-baixa reais da etapa 2)

link 11: <https://www.baudaeletronica.com.br/capacitor-de-poliester-1uf-400v.html> (Capacitor de 1μF usado no filtro passa-alta real da etapa 2)

link 12: <https://www.baudaeletronica.com.br/resistor-5r1-5-2w.html> (Resistor de 5.1Ω usado no filtro passa-alta real da etapa 2)

link 13: <https://www.baudaeletronica.com.br/resistor-10r-5-1-4w.html> (Resistor de 10Ω usado no filtro passa-faixa e passa-baixa da etapa 2)

link 14: [https://drive.google.com/file/d/1xMGG45fNb5\\_UDAIs\\_HgSrgyHwB1DbvT7/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1xMGG45fNb5_UDAIs_HgSrgyHwB1DbvT7/view?usp=sharing)

link 15: <https://drive.google.com/file/d/1YWUf2lQvEKfRBYXWScU977N4To4Aq8Ns/view?usp=sharing>

link 16: <https://drive.google.com/file/d/1ktT21NP-wbQdMfzEqkfhuFoAAsIRdSqF/view?usp=sharing>

link 17: <https://drive.google.com/file/d/1fqUqFinre3stlHcgIHJoNpI2hwhfYOAio/view?usp=sharing>

**OBSERVAÇÃO:** No filtro passa-faixa, os valores para o indutor e a sua resistência foram obtidas a partir de uma relação fornecidas na própria página do projeto, no arquivo denominado “Indutores Sugeridos para o Projeto”.