

Laboratório 2

Equalizador Paramétrico

Referências Bibliográficas:

Veronese PR, **Simulação de Indutância ou Girador** In **Capítulo 4 - Circuitos para Aplicações Especiais**, SEL315 – Circuitos Eletrônicos III.

Veronese PR, **Girador** in **Capítulo 9 - Amplificadores de Áudio**, SEL315 – Circuitos Eletrônicos III.

Self D, **Parametric Middle EQs** in **Chapter 10 – Tone Controls and Equalizers**, Small Signal Audio Analysis, 2010, Focal Press.

Roteiro Experimental

SEL318 - Laboratório de Circuitos Eletrônicos III

Laboratório 2 – Equalizador Paramétrico

O equalizador Baxandall pode ser bastante útil para um ajuste de graves e agudos em pré-amplificadores de áudio, principalmente devido a sua simplicidade. A principal desvantagem DESTA topologia é a sua pouca versatilidade pois ele funciona para graves e agudos. O que ocorre caso se deseje um ajuste mais fino, por exemplo, a cada oitava?

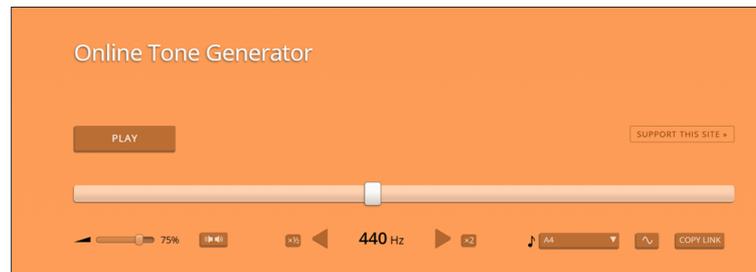
O **Equalizador Paramétrico** é uma solução elegante para a necessidade de equalização e amplificação em áudio. Montado com várias células, cada uma sintonizada para uma faixa de frequência, este tipo de equalizador fornece ganho simétrico com o ajuste de um potenciômetro, podendo ser sintonizado para qualquer banda dentro da resposta dos componentes ativos.

O **Circuito Girador** é um simulador de indutâncias utilizando um operacional, resistores e capacitores, muito útil para elaboração de filtros com frequências de corte baixas.

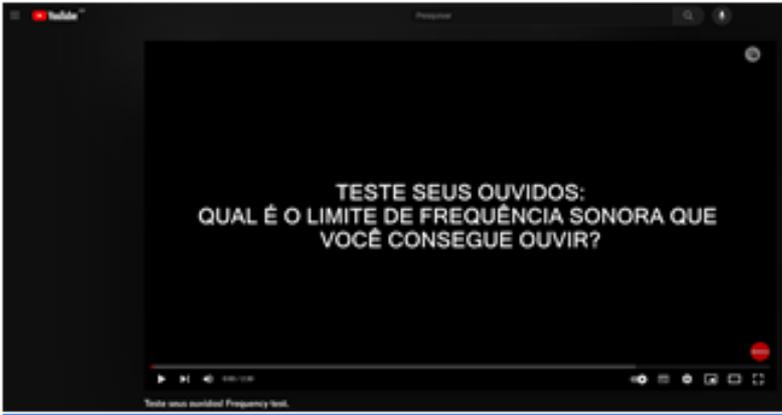
Implementação em Protoboard

Geradores Senoidais

Os geradores de sinais senoidais, através dos links abaixo mostrados, podem ser utilizados para testar o equalizador Baxandall e o amplificador de áudio.



<https://www.szynalski.com/tone-generator/>



<https://www.youtube.com/watch?v=gf2JkPNuICU>

Filtro Paramétrico

Implemente o Filtro Paramétrico da Fig. 2.1 utilizando o amplificador operacional LF351.

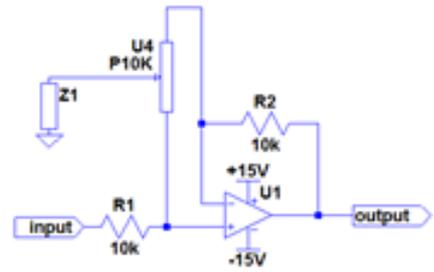


Fig. 2.1 - Filtro Paramétrico

Amplificador de Áudio

Utilize o amplificador de áudio implementado no Laboratório 1 – Equalizador [Baxandall](#) com o op amp [LF351](#) e alimentação simétrica de 15V, mostrado na [fig. 2.2](#).

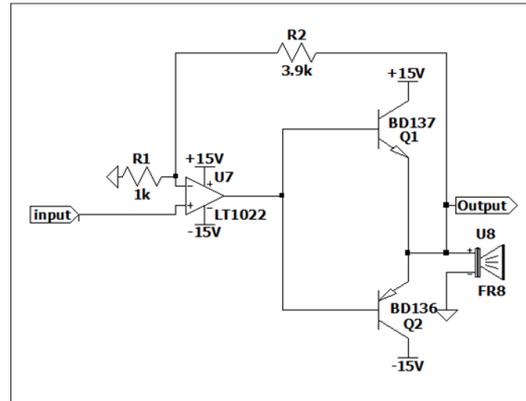


Fig. 2.2 - Amplificador de Potência (esquemático [LTSPice](#))

Girador

Implemente o Girador da Fig. 2.3 utilizando o amplificador operacional LF351.

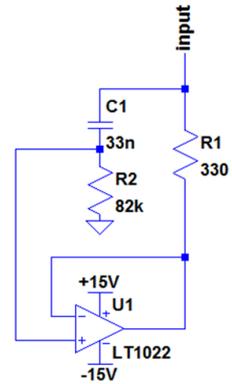


Fig. 2.3a - Circuito Girador

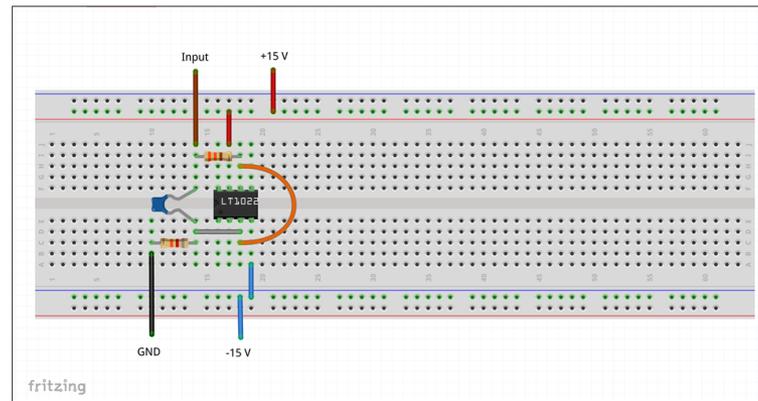


Fig. 2.3b - Circuito Girador

Amplificador de Ganho Variável

Implemente o circuito da Fig.2.4 utilizando o amplificador operacional LF351 sendo **Z1 um resistor de 2.2k Ω** .

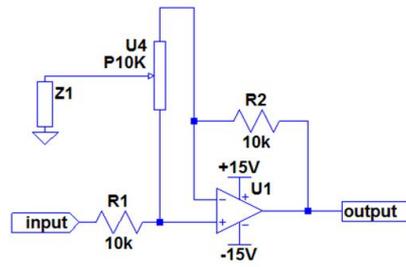


Fig. 2.4a – Amplificador de Ganho Variável

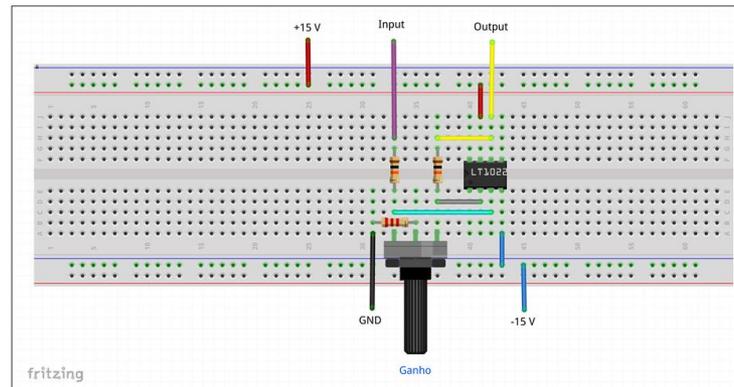


Fig. 2.4b – Amplificador de Ganho Variável

- 2.1) Aplique um sinal senoidal de 1kHz e baixa amplitude na entrada do filtro e verifique como se comporta o ganho do circuito em função da posição do potenciômetro. Meça o máximo e o mínimo ganho.
- 2.2) Aplique um sinal musical na entrada do circuito, conecte a sua saída na entrada do amplificador de áudio e verifique o seu comportamento.

Utilize a saída de áudio traseira do desktop, conforme figura 2.5.



Fig. 2.5 – Saída de áudio traseira do desktop

Filtro Paramétrico Controle de Graves

- 2.3) Use como Z_1 um resistor de $1.8k\Omega$ em série com o girador (Fig.2.6). Aplique um sinal senoidal de 100Hz, 1kHz e 10kHz e verifique na saída do filtro os máximos e mínimos ganhos.
- 2.4) Aplique um sinal musical na entrada do circuito, conforme Fig. 2.5, conecte a sua saída na entrada do amplificador de áudio e verifique o seu comportamento, de preferência uma música com muitos graves (música eletrônica).

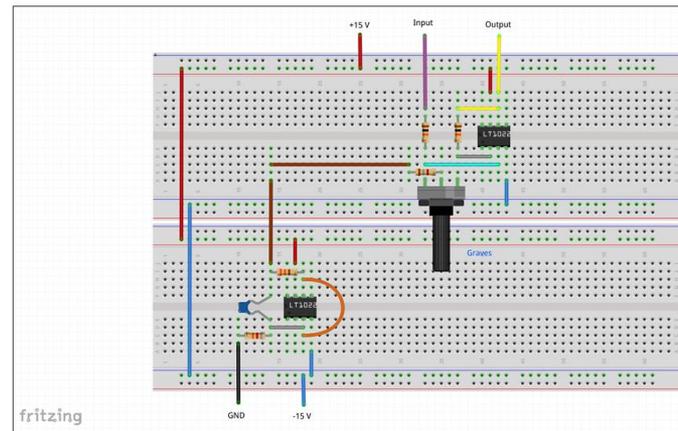


Fig. 2.6 - Filtro Paramétrico | Controle de Graves

Filtro Paramétrico Controle de Agudos

2.5) Use como Z_1 um resistor de $2.2k\Omega$ em série com um capacitor de $15nF$, conforme Fig. 2.7. Aplique um sinal senoidal de 100Hz, 1kHz e 10kHz e verifique na saída do filtro os máximos e mínimos ganhos.

2.6) Aplique um sinal musical na entrada do circuito, Aplique um sinal musical na entrada do circuito, conforme Fig. 2.5, conecte a sua saída na entrada do amplificador de áudio e verifique o seu comportamento, de preferência utilizando uma música com muitos agudos (Ex.: música clássica – Inverno de Vivaldi).

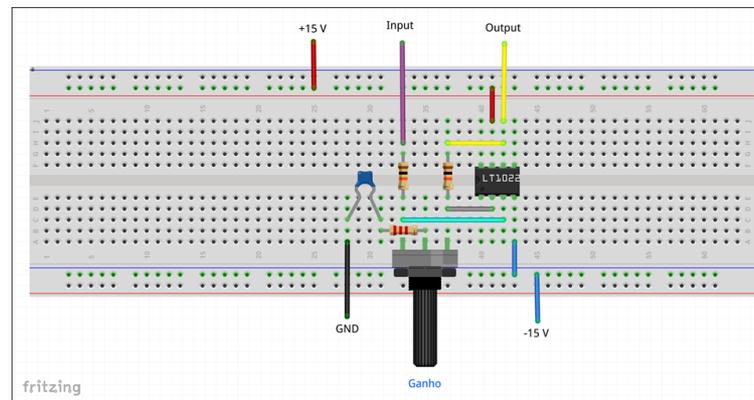


Fig. 2.7 - Filtro Paramétrico | Controle de Agudos

Filtro Paramétrico Controle de Médios

Um filtro paramétrico de passa faixa pode ser implementado com a associação de um resistor, um capacitor e um girador em série, ou somente do capacitor e girador caso deseje-se obter um fator de qualidade maior.

2.7) Use como Z_1 como a associação em série de um resistor de $1.2k\Omega$, um capacitor de $27nF$ e o girador, conforme Fig.2.8. Aplique novamente um sinal senoidal de 100Hz, 1kHz e 10kHz e verifique na saída do filtro os máximos e mínimos ganhos.

1.8) Aplique um sinal musical na entrada do circuito, Aplique um sinal musical na entrada do circuito, conforme Fig. 2.5) conecte a sua saída na entrada do amplificador de áudio e verifique o seu comportamento, de preferência utilizando uma música com muitos médios (Ex.: pop com vocal).

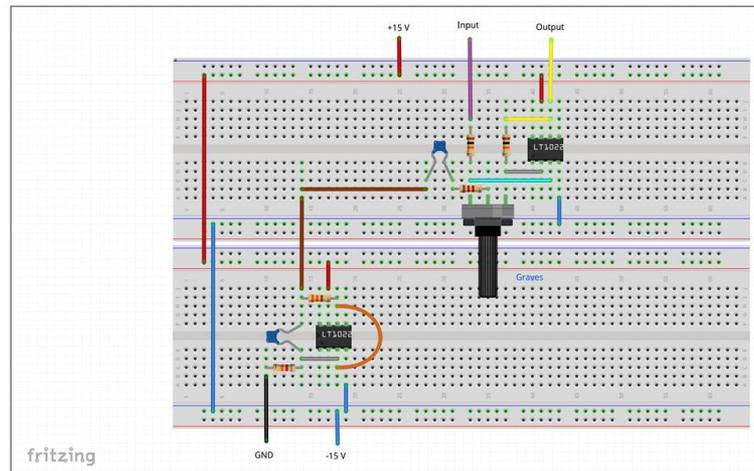


Fig. 2.8 - Filtro Paramétrico | Controle de Médios

Simulação no LTSpice

Amplificador de Ganho Variável

- 2.1) Simule o circuito da Fig.2.1 para o caso onde Z_1 é um resistor de $2.2k\Omega$. Aplique um sinal dc em sua entrada e plote em análise .OP a tensão de saída em função da variação do potenciômetro.
- 2.2) Plote a família de curvas da resposta em frequência do circuito variando a posição do potenciômetro.

Filtro Paramétrico

Controle de Graves

- 2.2) Substitua Z_1 por um resistor de $2.2k\Omega$ e um indutor de $1mH$, o maior valor comercial disponível no laboratório. Plote a família de curvas da resposta em frequência do circuito variando a posição do potenciômetro.

Controle de Agudos

- 2.3) Simule o circuito da Fig. 2.1 para o caso onde Z_1 é um resistor de $2.2k\Omega$ em série com um capacitor de $15nF$. Plote a família de curvas da resposta em frequência do circuito variando a posição do potenciômetro.

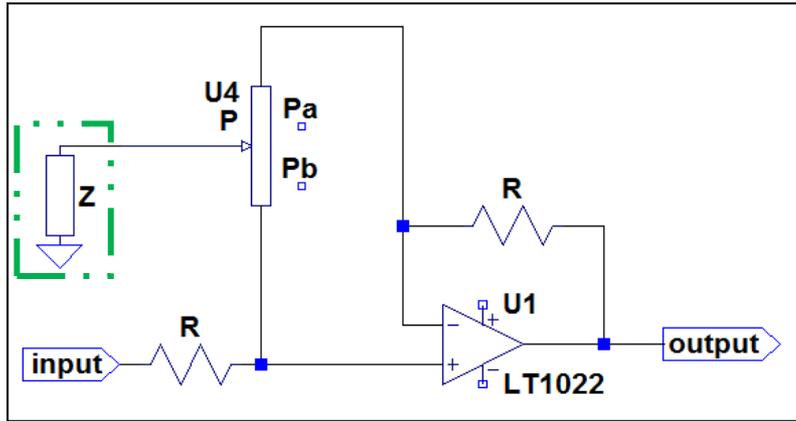
Girador

- 2.4) No circuito da Fig. 2.2 em análise .AC simule o circuito na faixa de áudio e meça a impedância vista pela entrada em função da frequência.
- 2.5) Simule um resistor de valor R_1 em série com um indutor ideal de valor $L=R_1R_2C_1$ e compare a sua impedância de entrada em função da frequência com a do girador.
- 2.6) Use Z_1 como um resistor de $1.8k\Omega$ em série com o girador e plote a família de curvas da resposta em frequência do circuito variando a posição do potenciômetro.
- 2.7) Use Z_1 como um resistor de $1.2k\Omega$ em série com o capacitor de $27nF$ e o girador e plote a família de curvas da resposta em frequência do circuito variando a posição do potenciômetro.

Questionário

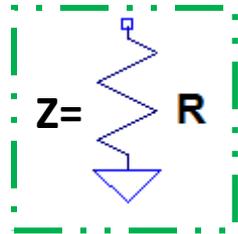
- 2.1) O circuito da Fig. 2.1 ilustra a unidade básica de um filtro paramétrico, um amplificador não inversor, com ganho ajustável pelo potenciômetro. O valor máximo e mínimo desse ganho são determinados pela impedância genérica vista pelo tap central do potenciômetro. Deduza ou pesquise a equação que relaciona o ganho entre entrada e saída do amplificador, com os resistores R_1 e R_2 , a posição do potenciômetro e a magnitude da impedância Z_1 . Suponha primeiramente que a impedância Z_1 é puramente resistiva.
- 2.2) Qual o máximo ganho que pode ser obtido com a excursão do potenciômetro? E qual o mínimo ganho? Qual relação matemática o máximo ganho apresenta com o mínimo ganho?
- 2.3) O que pode ocorrer caso a impedância Z_1 seja variável com a frequência?
- 2.4) Como o circuito se comporta quando Z_1 é resistivo ?
- 2.5) Como o circuito se comporta quando Z_1 é um resistor em série com um capacitor ?
- 2.6) Como o circuito se comporta quando Z_1 é um resistor em série com um capacitor e com um indutor ?

Equalizador Paramétrico



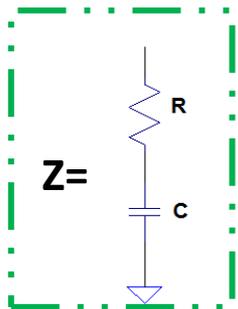
1

Amplificador de Ganho Variável



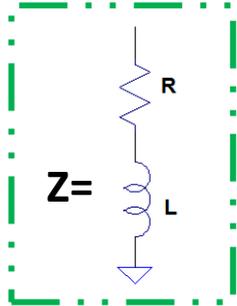
2

Controle de Agudos (filtro passa-alta)



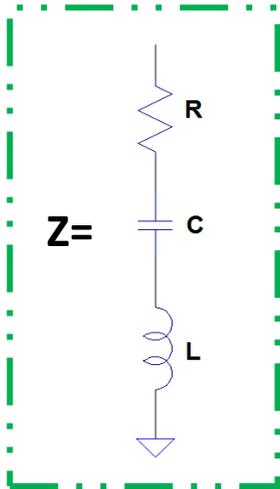
3

Controle de Graves (filtro passa-baixa)

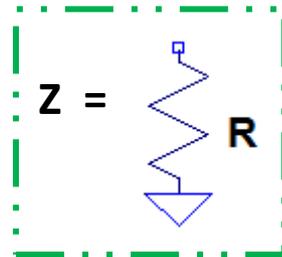
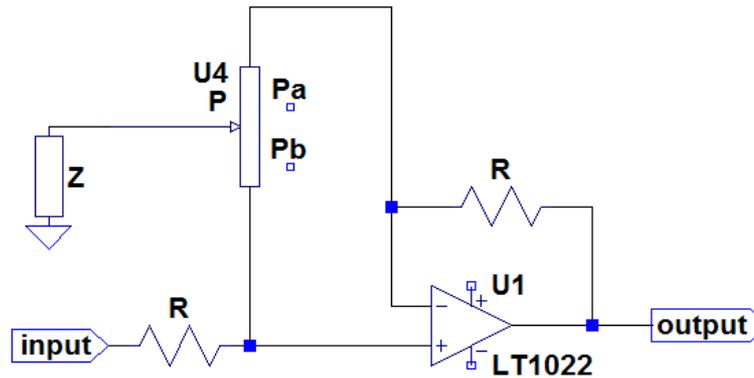


4

Controle de Faixas (filtro passa faixa)



Amplificador de Ganho Variável



$$A_v = \frac{ZP + P_a P_b + RP_b}{ZP + P_a P_b + RP_a}$$

1 **Máximo Reforço**
($P_a = 0$ e $P_b = P$)

$$A_{vmax} = \frac{Z+R}{Z}$$

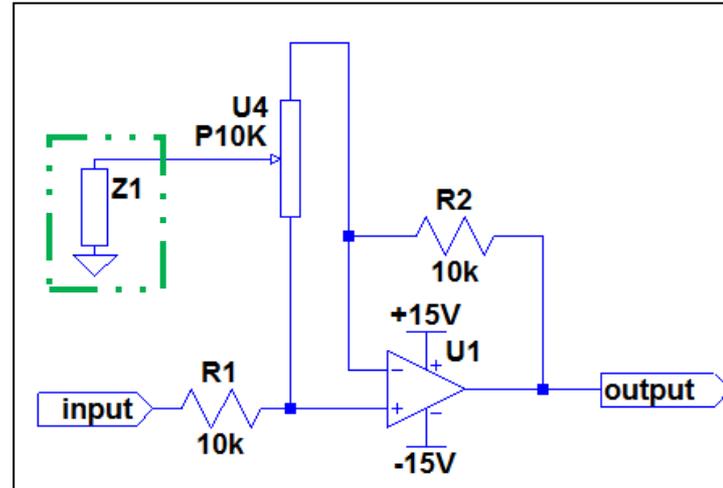
2 **Minimo Reforço**
($P_a = P$ e $P_b = 0$)

$$A_{vmin} = \frac{Z}{Z+R}$$

3 $P_a = P_b$

$$A_v = 1$$

Filtro

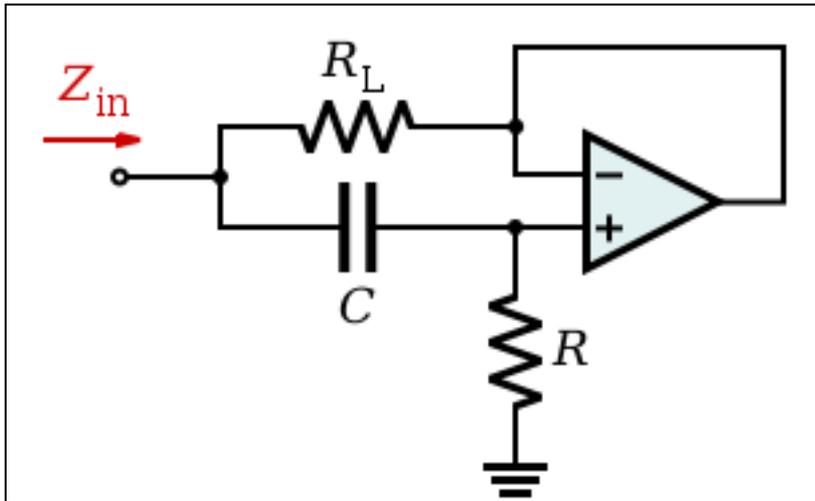


- 1** **Influência nos Agudos**
 Z_1 = resistor em série com um capacitor
- 2** **Influência nos Graves**
 Z_1 = resistor em série com indutância (girador)
- 3** **Influência nos Médios**
 Z_1 = associação em série de um resistor, um capacitor e indutância (girador)

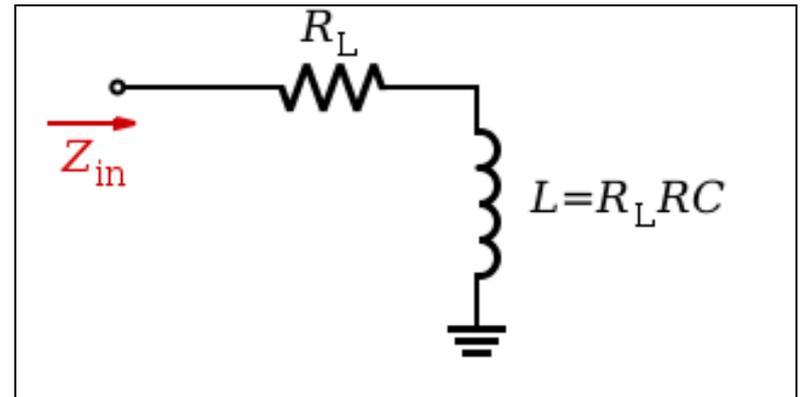
Girador

(Simulador de Indutância)

Topologia 1

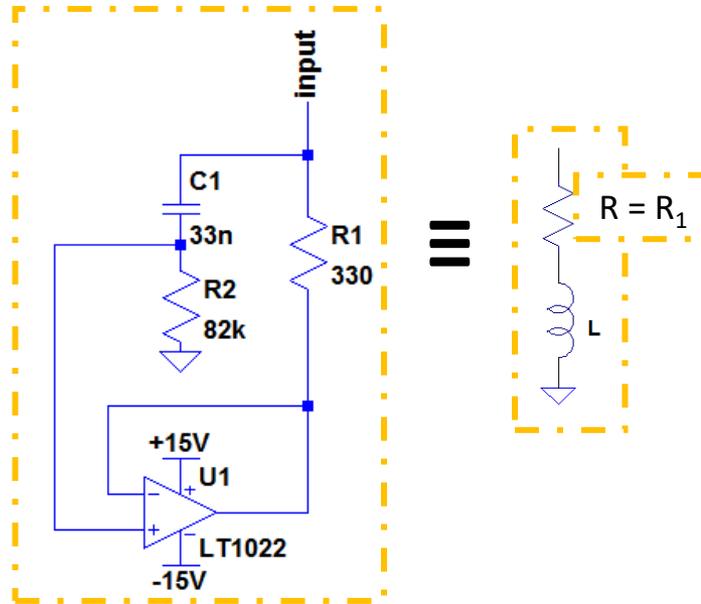


≡



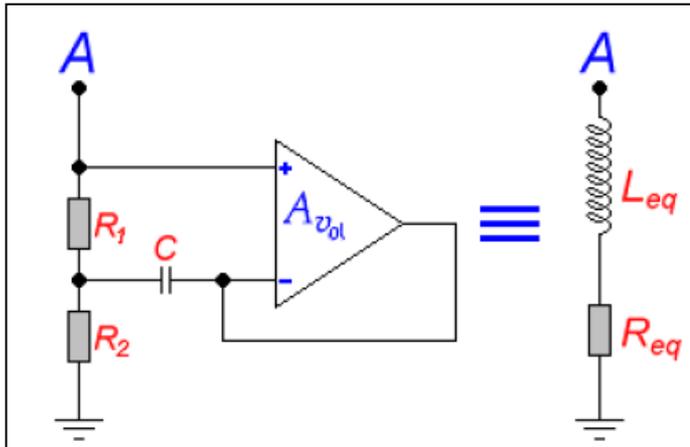
$$Z_{in} \approx R_L + j\omega R_L RC$$

Topologia 2



$$L = R_1 R_2 C_1$$

Topologia 3



Indutância Equivalente:

$$L_{eq} = R_1 R_2 C \quad [\text{H}]$$

Resistência de Perdas Equivalente:

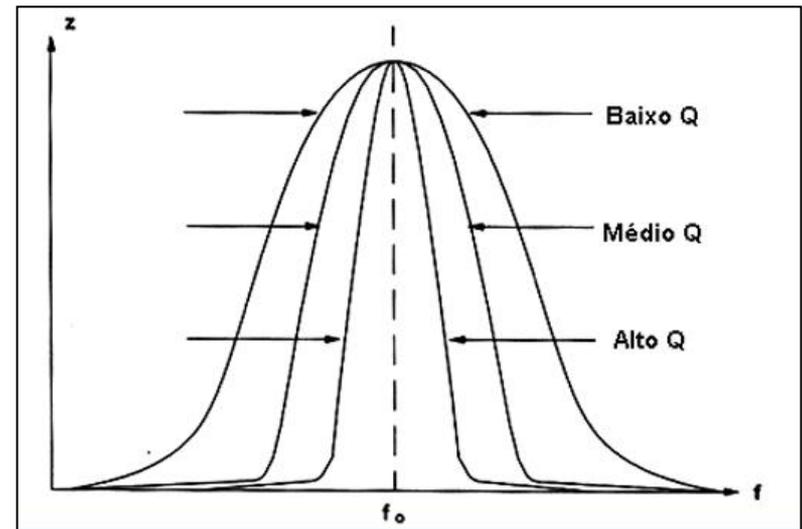
$$R_{eq} = R_1 + R_2 \quad [\Omega]$$

Fator de Qualidade

$$Q = \frac{Z_L}{R} = \frac{\omega L}{R}$$

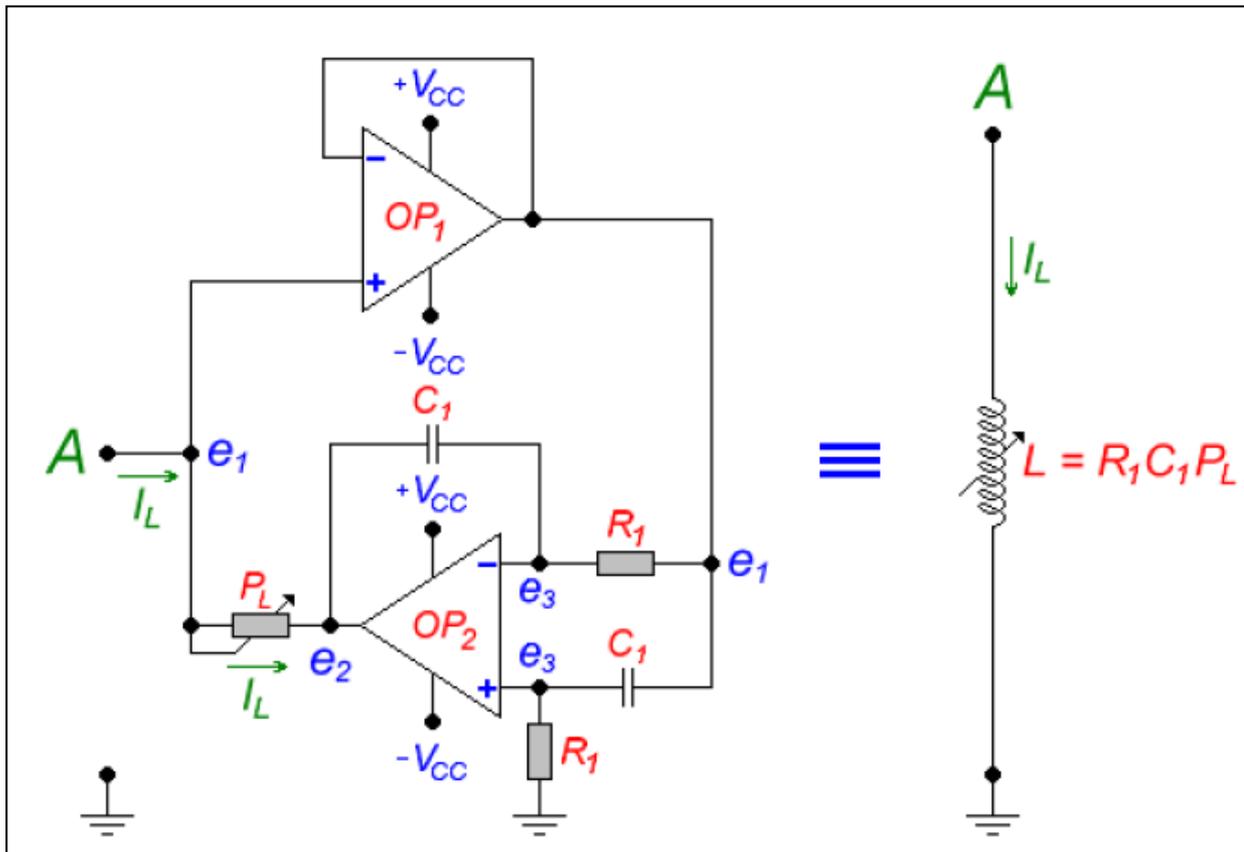
Z_L - Reatância da bobina (Ω)
 R - resistência da bobina (Ω)

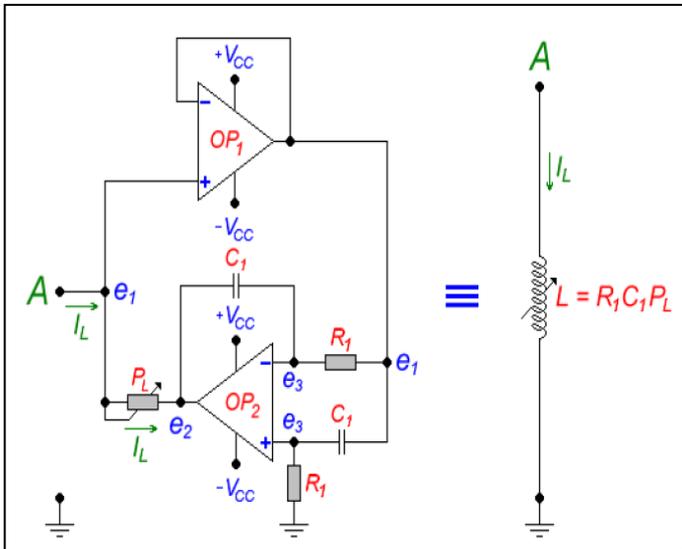
$$Q = \frac{2\pi f R_1 R_2 C}{R_1 + R_2}$$



O máximo fator de qualidade é estabelecido, para esse circuito, quando $R_1 = R_2$. Nesse caso, obtém-se a maior relação L_{eq} / R_{eq} .

Topologia 4





1 Esse resultado só é válido dentro da faixa de frequências de áudio.

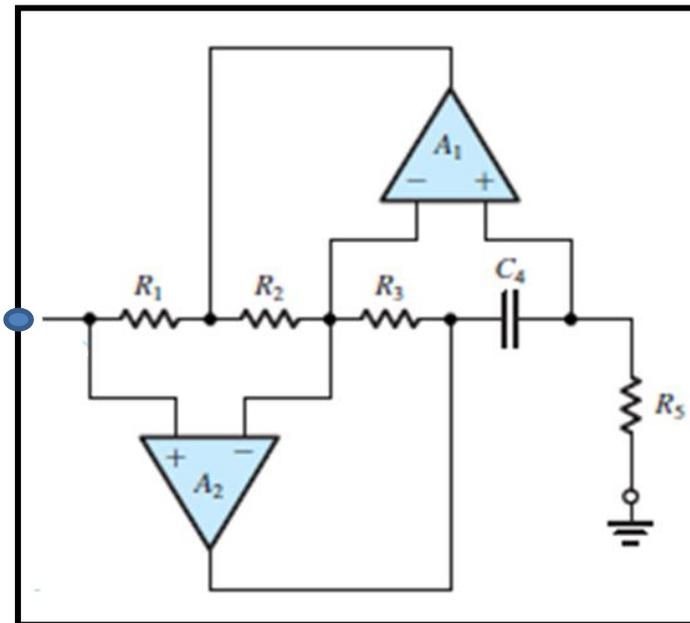
2 Para que o indutor equivalente não possua perdas resistivas internas é fundamental que os capacitores C_1 sejam totalmente sem perdas e, por isso, devem ser usados capacitores cerâmicos ou de poliestirol de alta qualidade, com baixo coeficiente térmico (NPO) e com capacitâncias na faixa: $C_1 \leq 0,1 \mu F$.

3 Capacitores eletrolíticos são totalmente inviáveis para esse tipo de aplicação.

4 Os resistores R_1 devem ser de precisão com baixo coeficiente térmico (de filme metálico) e devem ter valores dentro da faixa: $1k\Omega \leq R_1 \leq r_{i2}$, sendo r_{i2} as resistências de entrada dos terminais de OP2.

5 O indutor equivalente resultante pode ter sua indutância ajustável através de um resistor variável P_L , que pode excursionar na faixa: $10k\Omega \leq P_L \leq 100k\Omega$.

Topologia 5 (Antoniou`s Gyration)



$$L = \frac{C_4 R_1 R_3 R_5}{R_2}$$

Inovação Tecnológica

Indutor: Componente eletrônico é reinventado depois de 180 anos

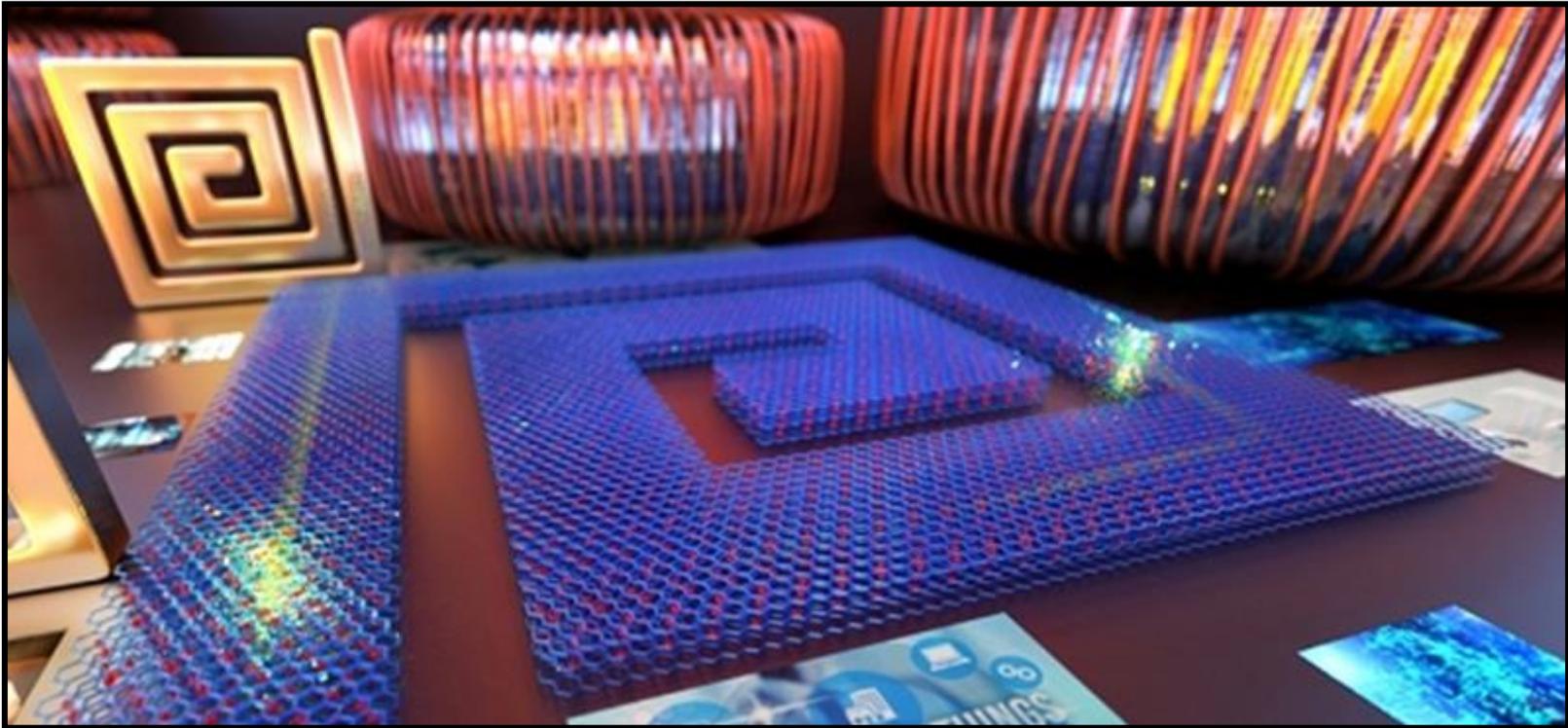
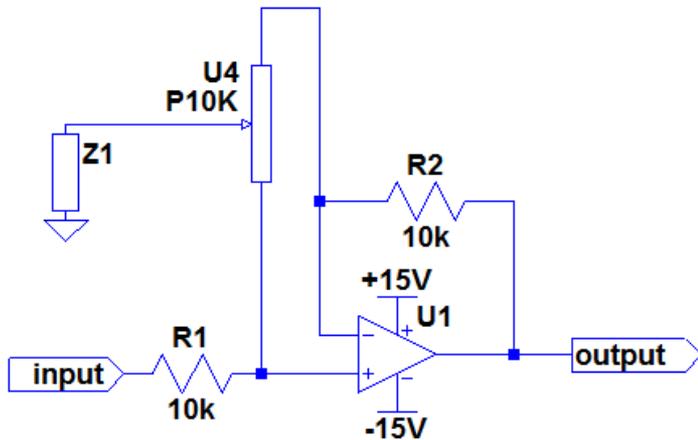


Ilustração artística do indutor de grafeno, em comparação com os indutores usados hoje. [Imagem: Peter Allen]

Frequência de Operação: 10 - 50 GHz

Simulação no LTSPice

Equalizador Paramétrico



1 **Comparação entre indutor e girador**

2 **Amplificador de Ganho Variável**

Z_1 = resistor de 2.2k Ω

3 **Influência nos Agudos**

Z_1 = resistor de 2.2k Ω em série com um capacitor de 15nF

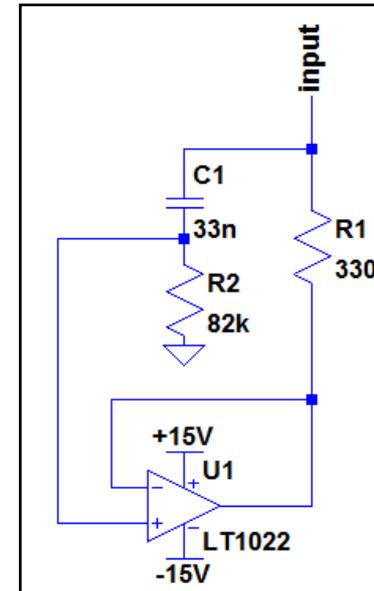
4 **Influência nos Graves**

Z_1 = resistor de 1.8k Ω em série com indutância (girador)

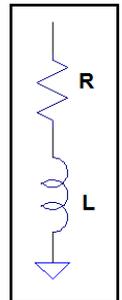
5 **Influência nos Médios**

Z_1 = associação em série de um resistor de 1.2k Ω , um capacitor de 27nF e indutância (girador)

Girador (Simulador de Indutância)



$$L = R_1 R_2 C_1$$

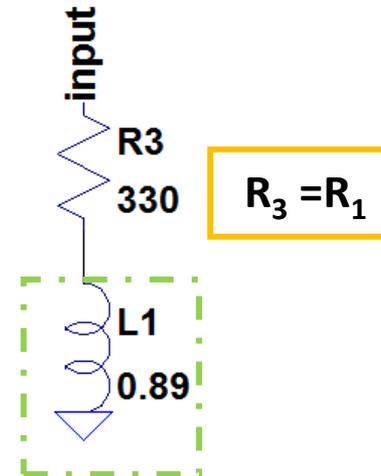
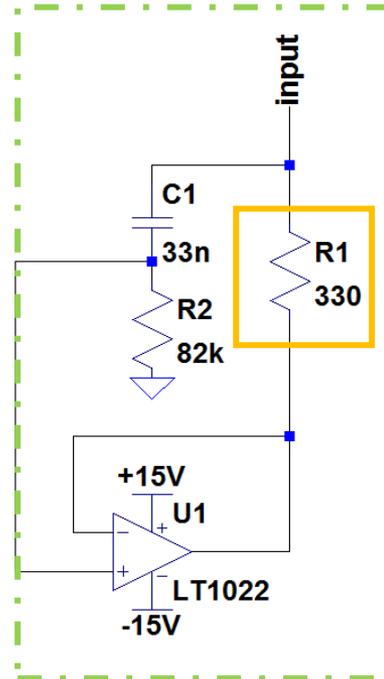


$$R = R_1$$

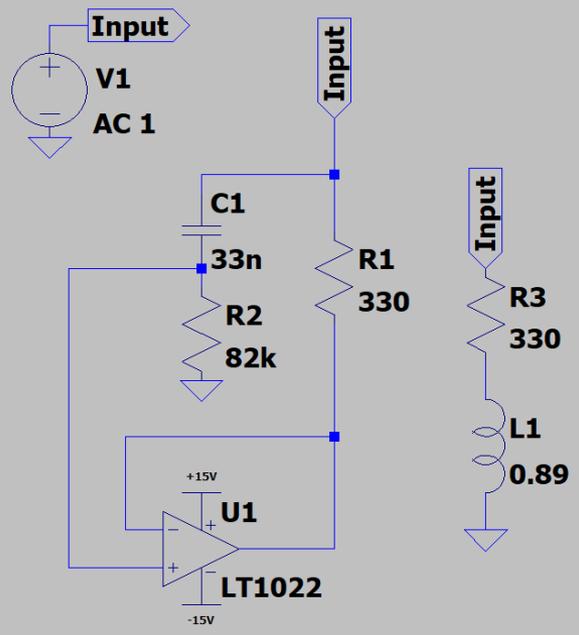
Girador

Comparação entre o girador e o seu circuito equivalente.

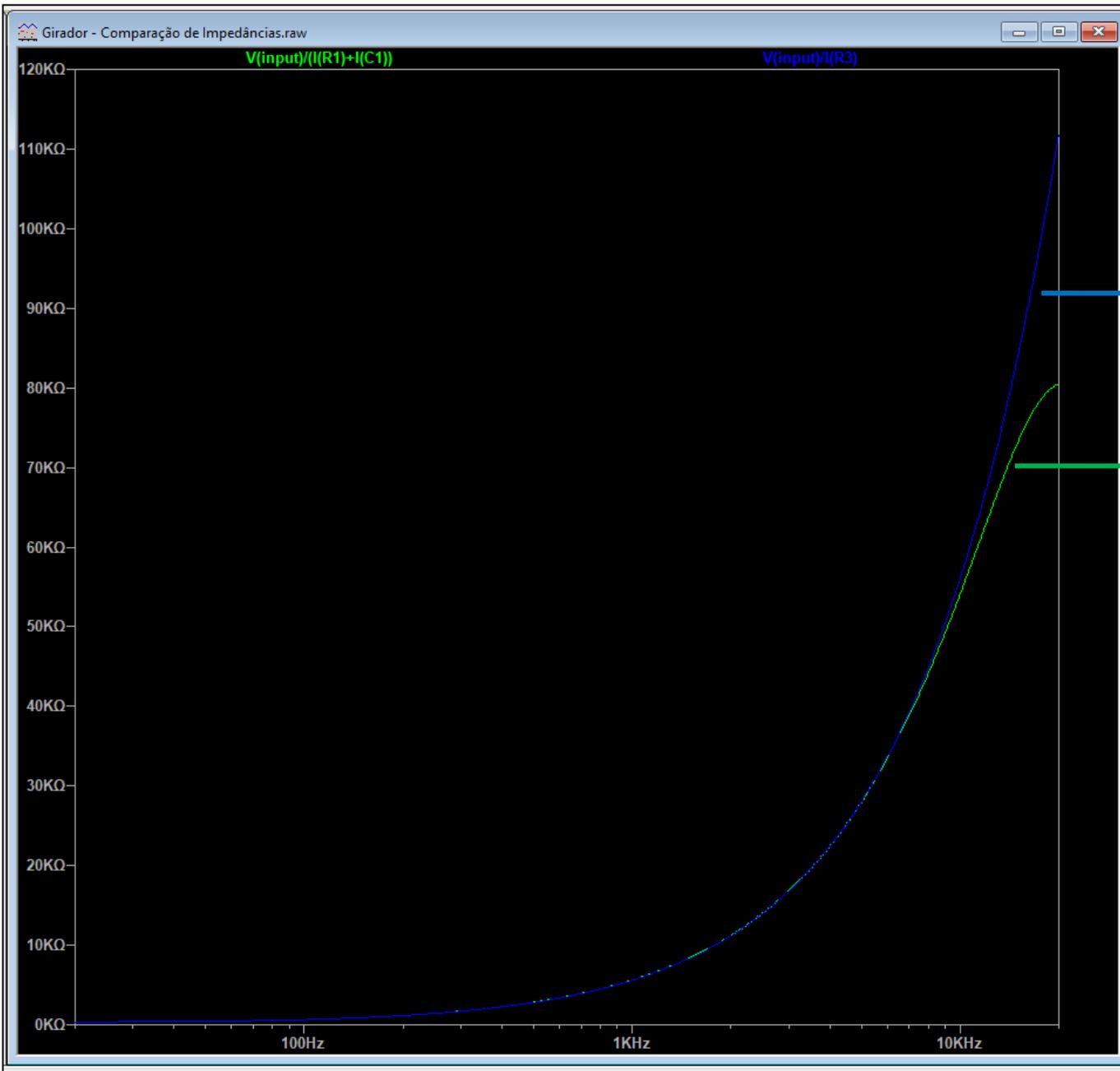
$$L_1 = R_1 R_2 C_1 = 0.89\text{mH}$$



$$R_3 = R_1$$

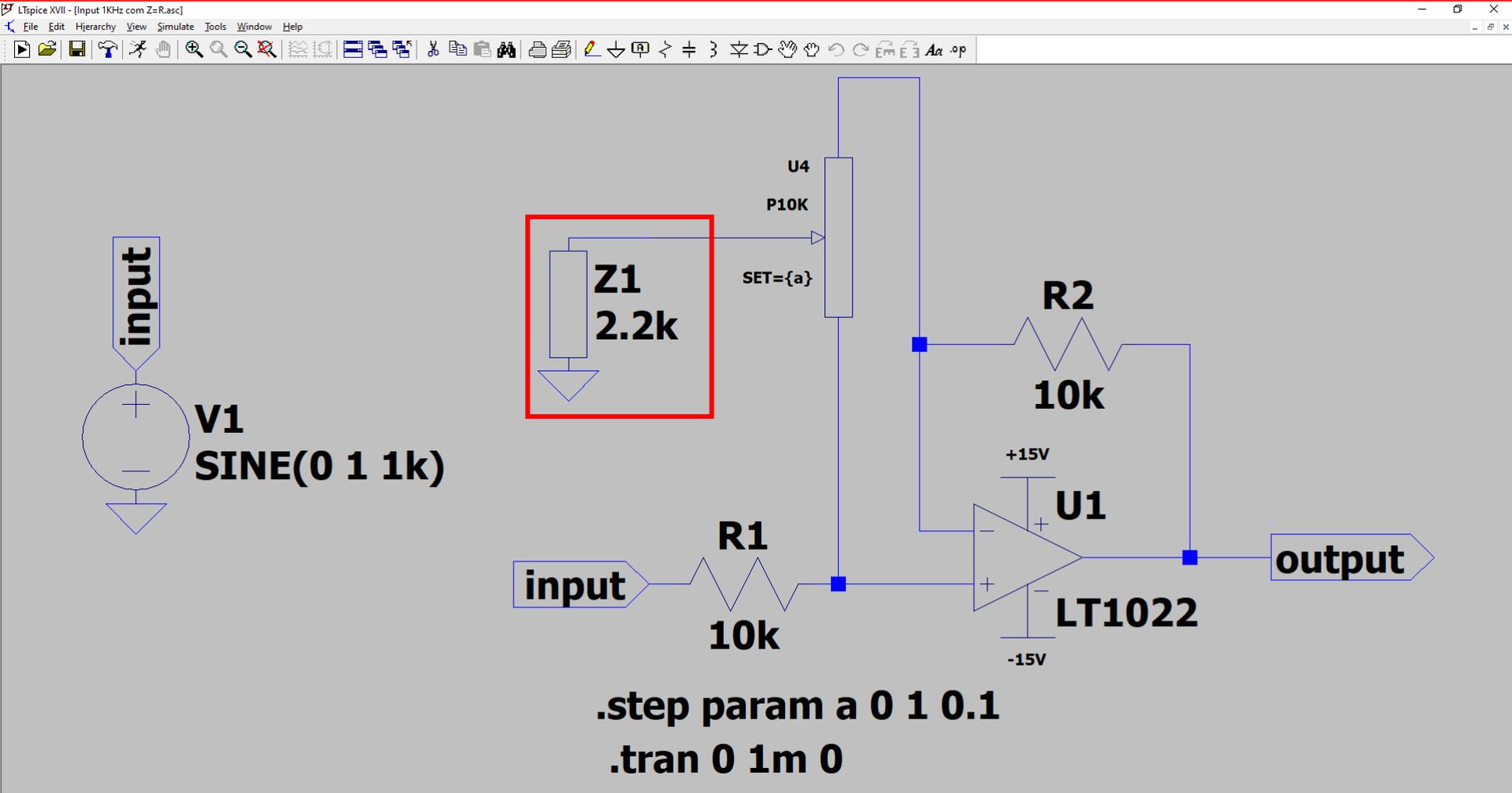


Plotar $V(\text{input})/(I(R1)+I(C1))$
Plotar $V(\text{input})/I(R3)$
.ac oct 1k 20 20k

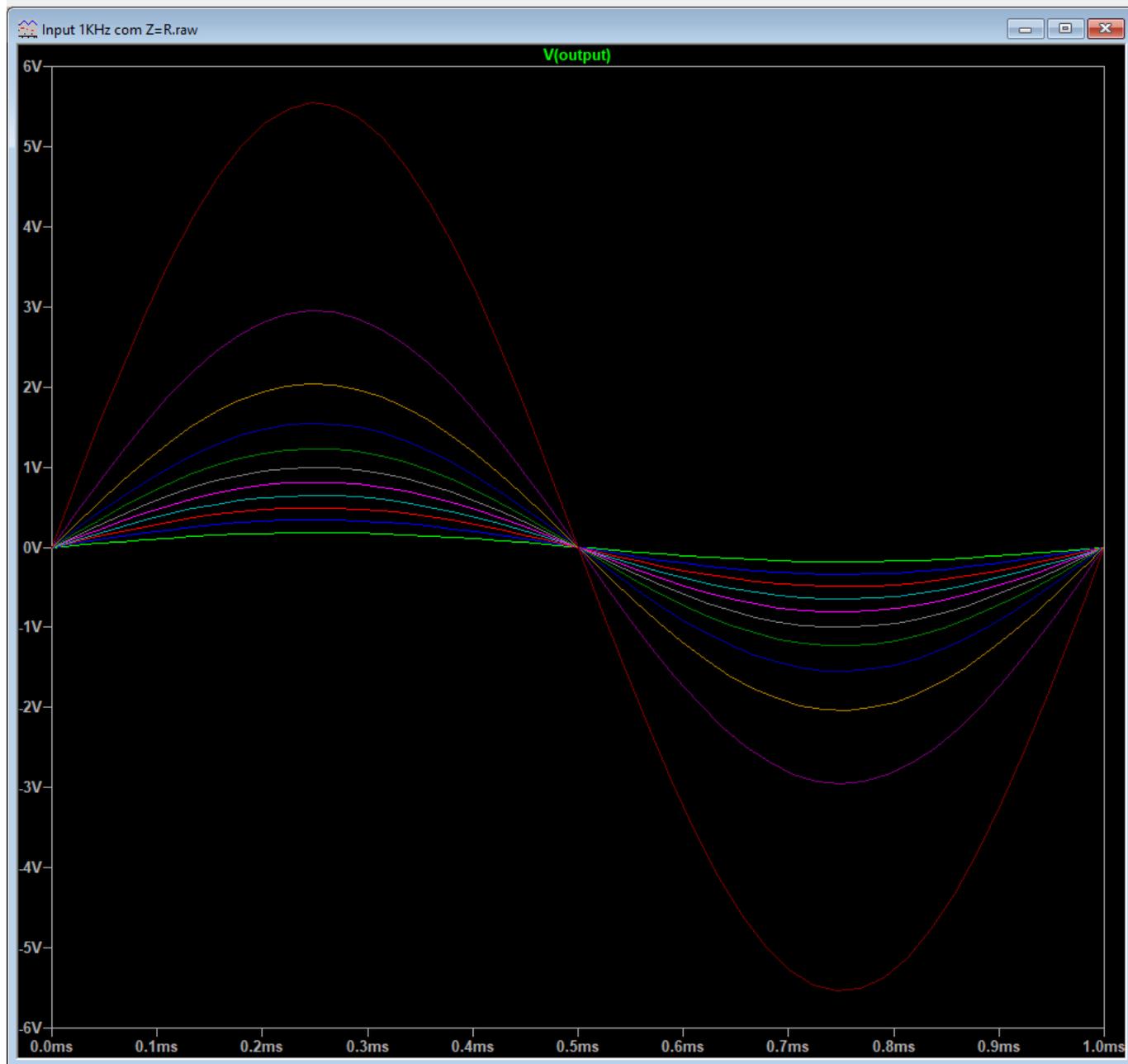


Amplificador de Ganho Variável

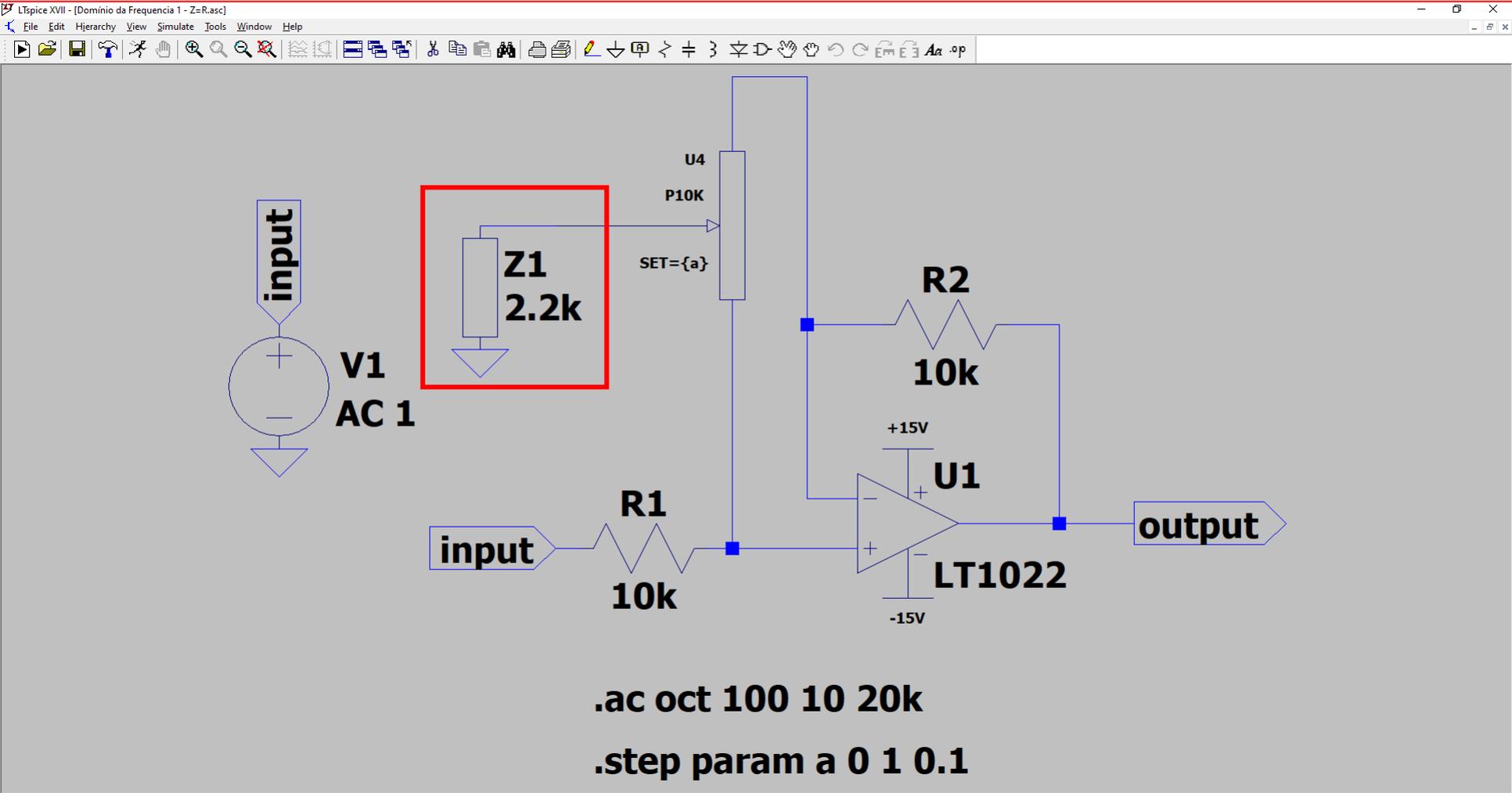
Domínio do Tempo



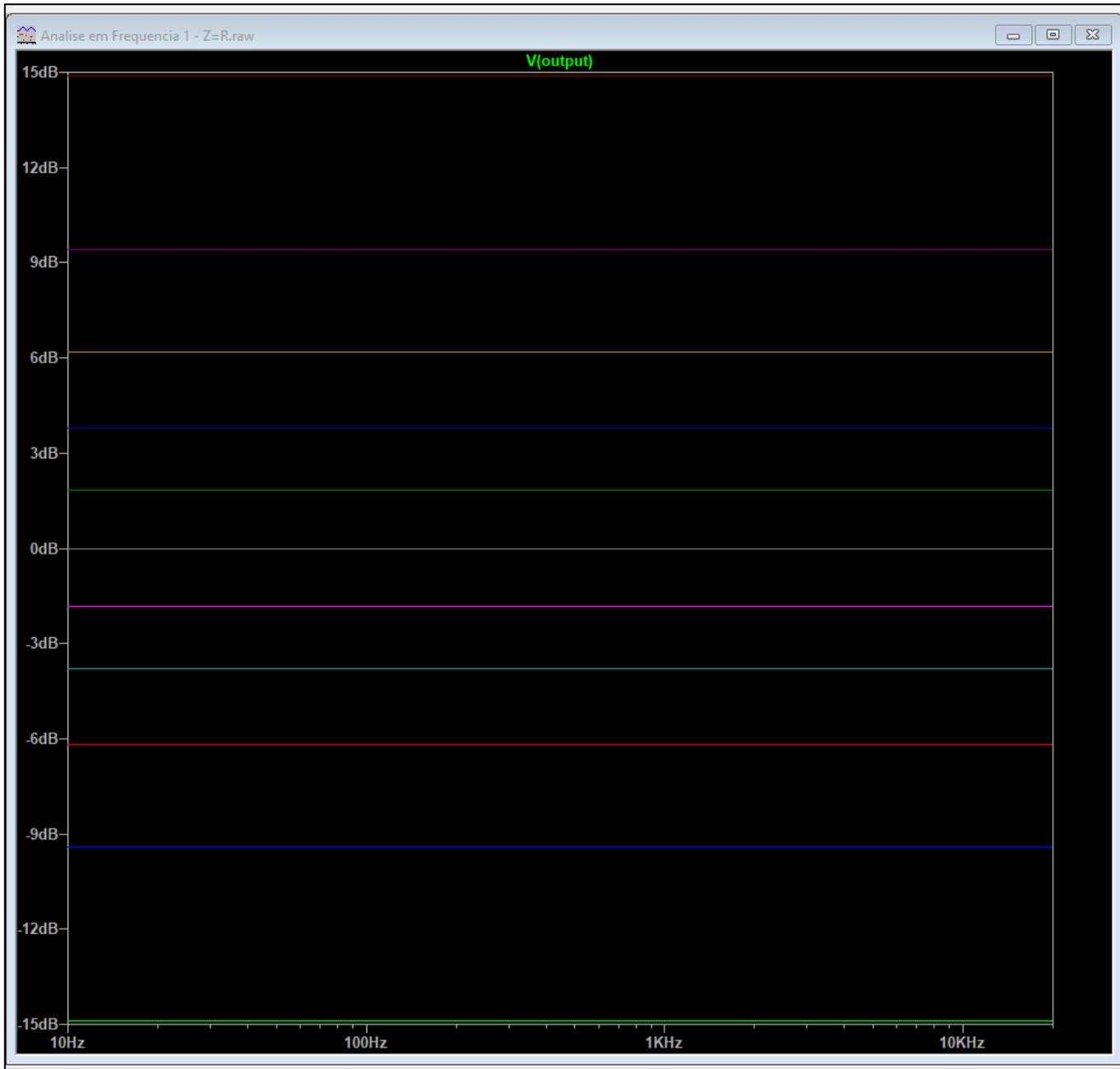
Domínio do Tempo

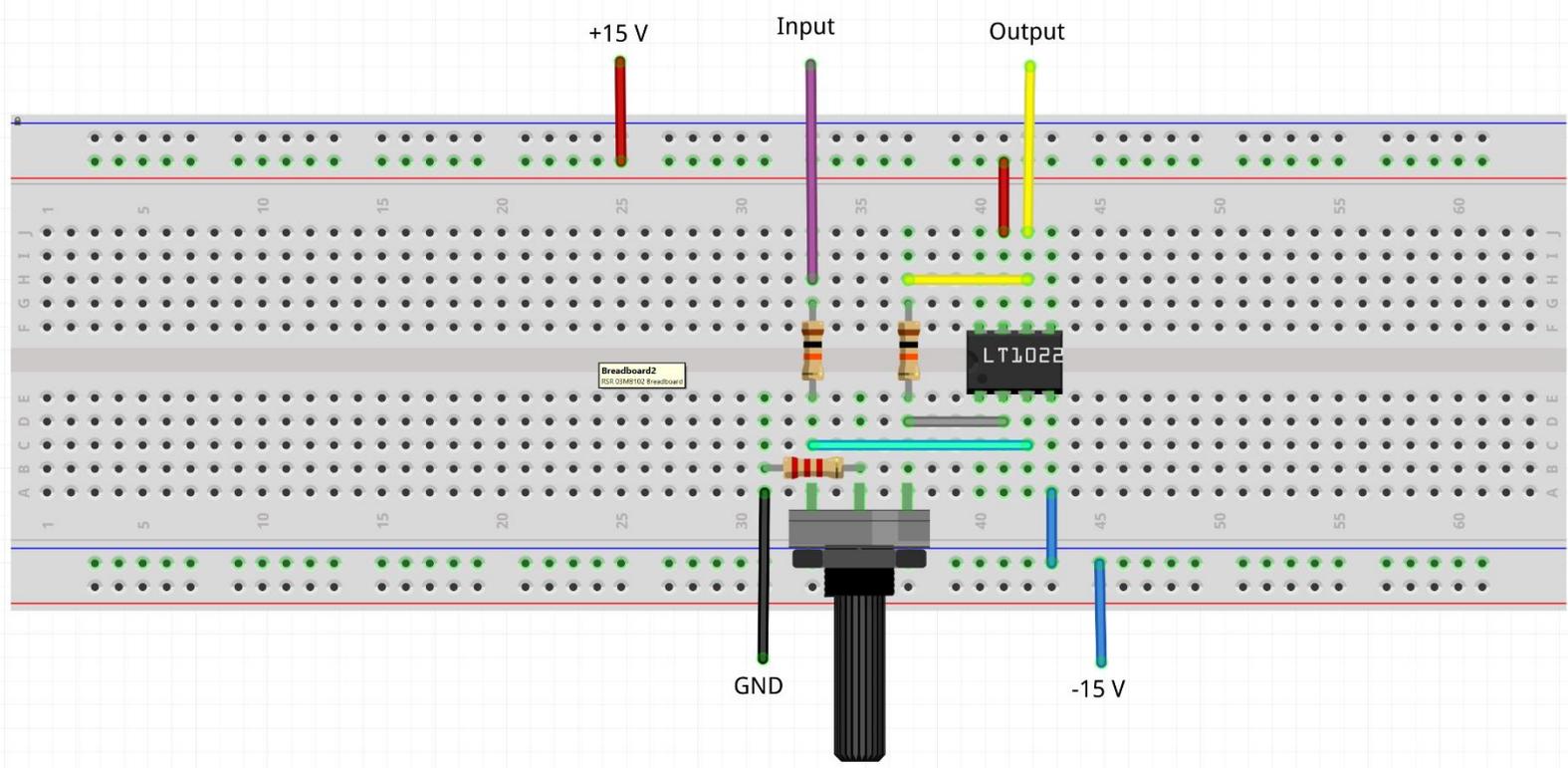


Domínio da Frequência



Domínio da Frequência





Componentes

Core Parts

CORE Básico

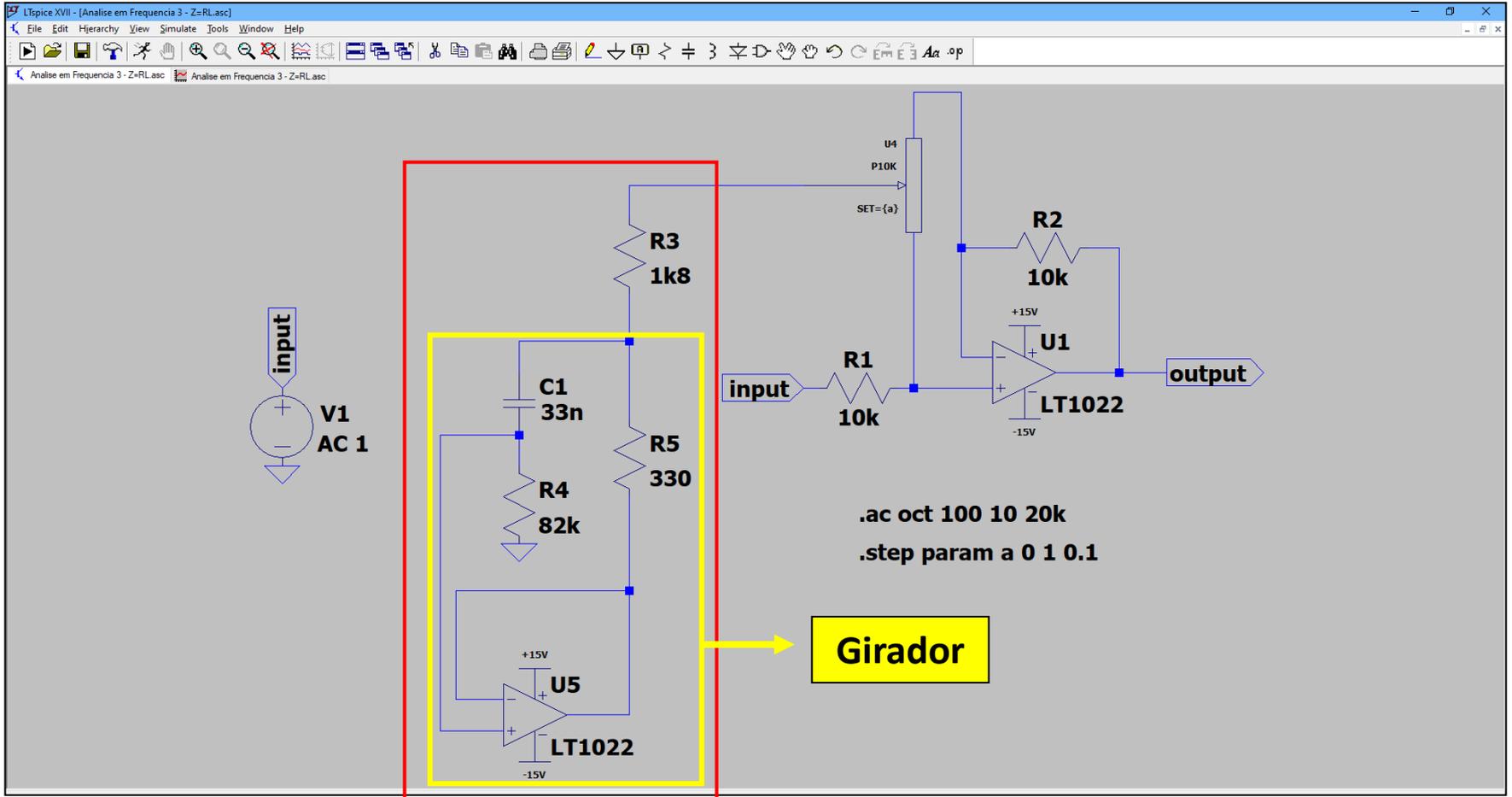
MINE

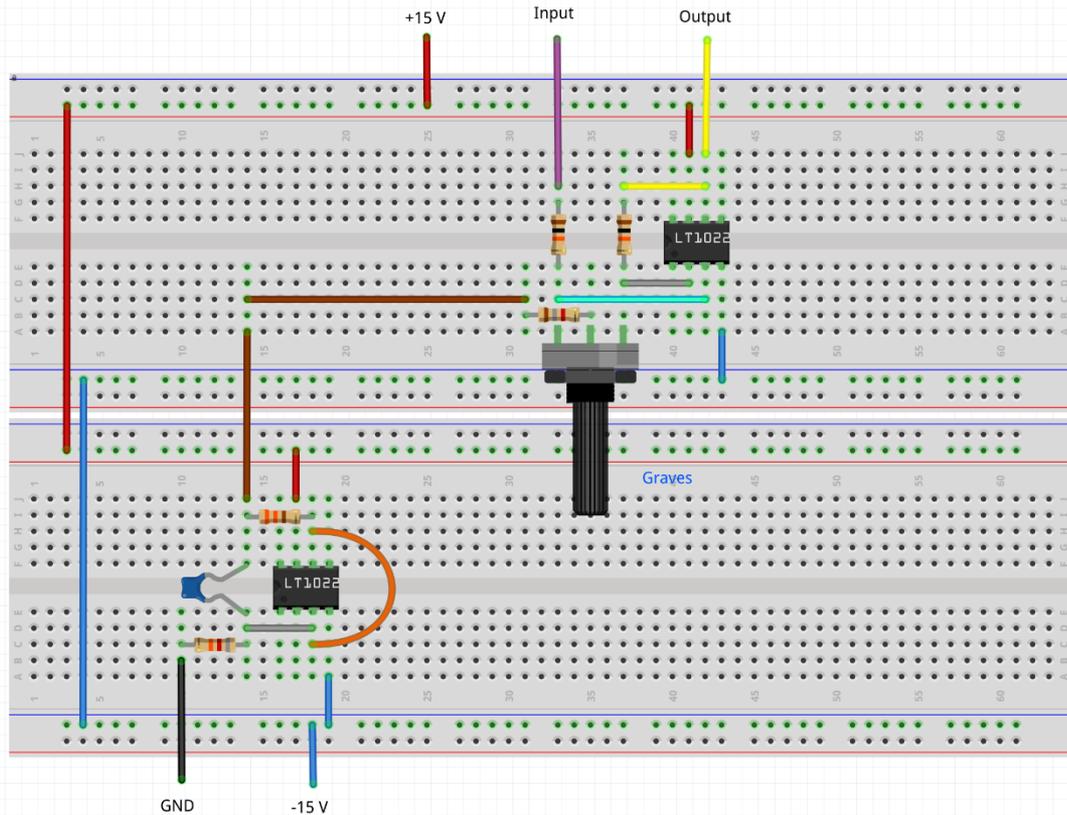
Entrada

Solds

CONTRIB

Controle de Graves

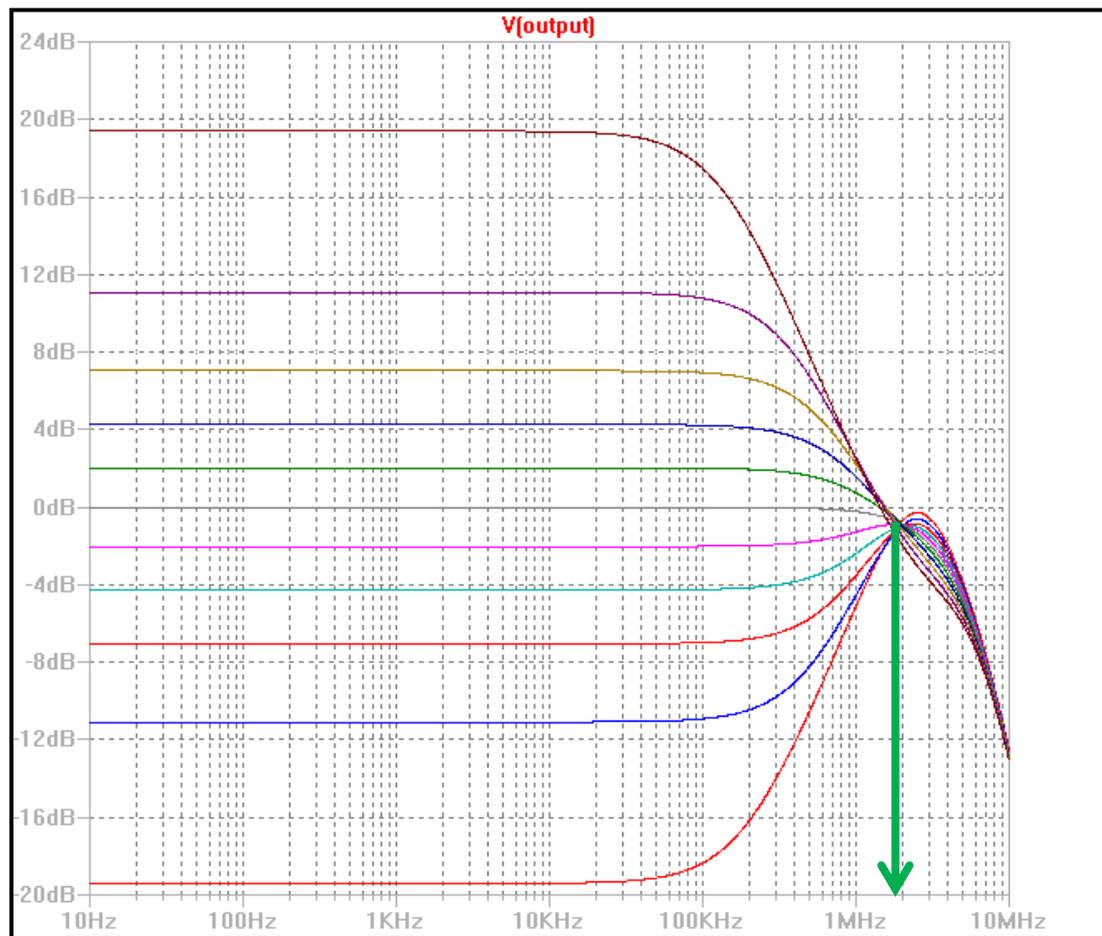
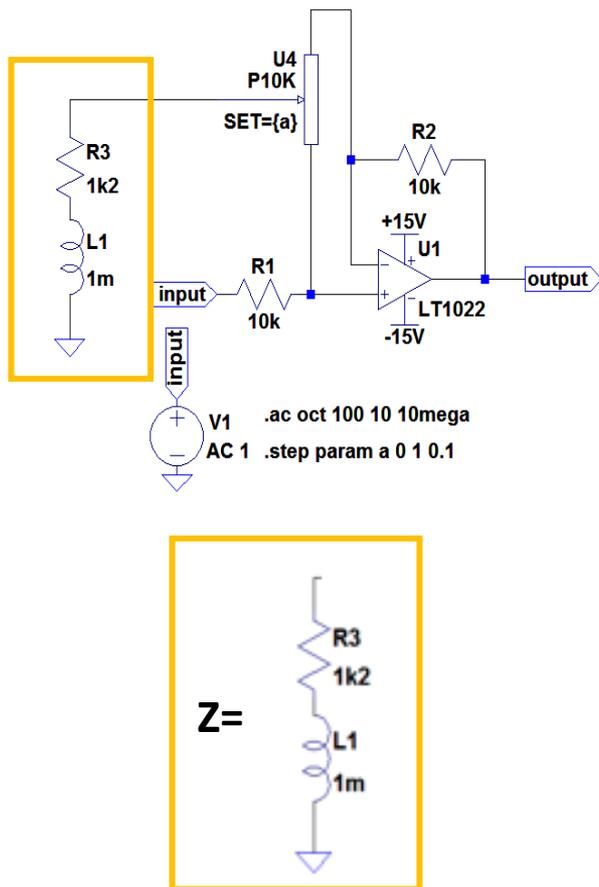




Core Parts

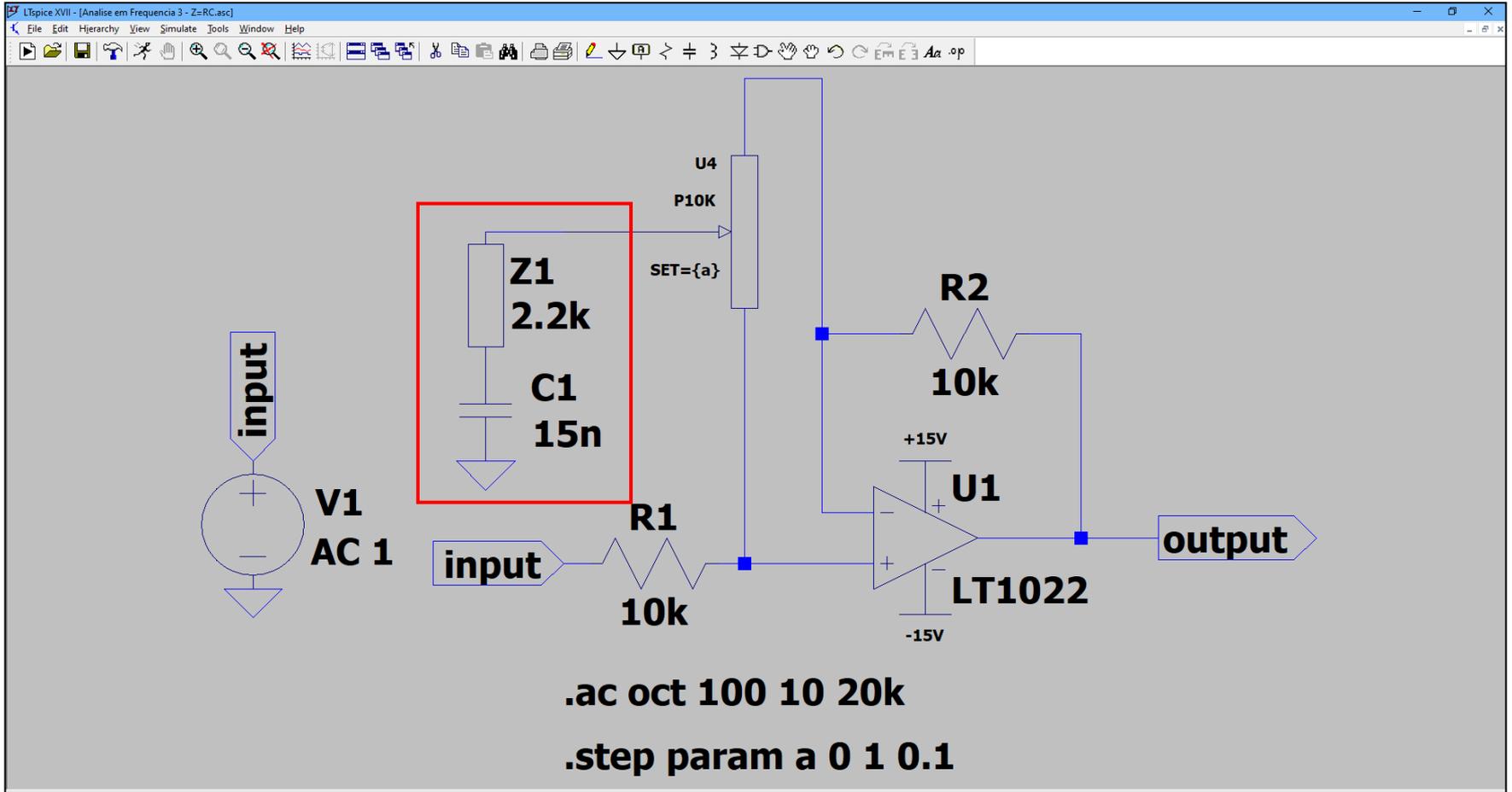
- CORE
- MINI
- Entrada
- Saída
- CONTRIB

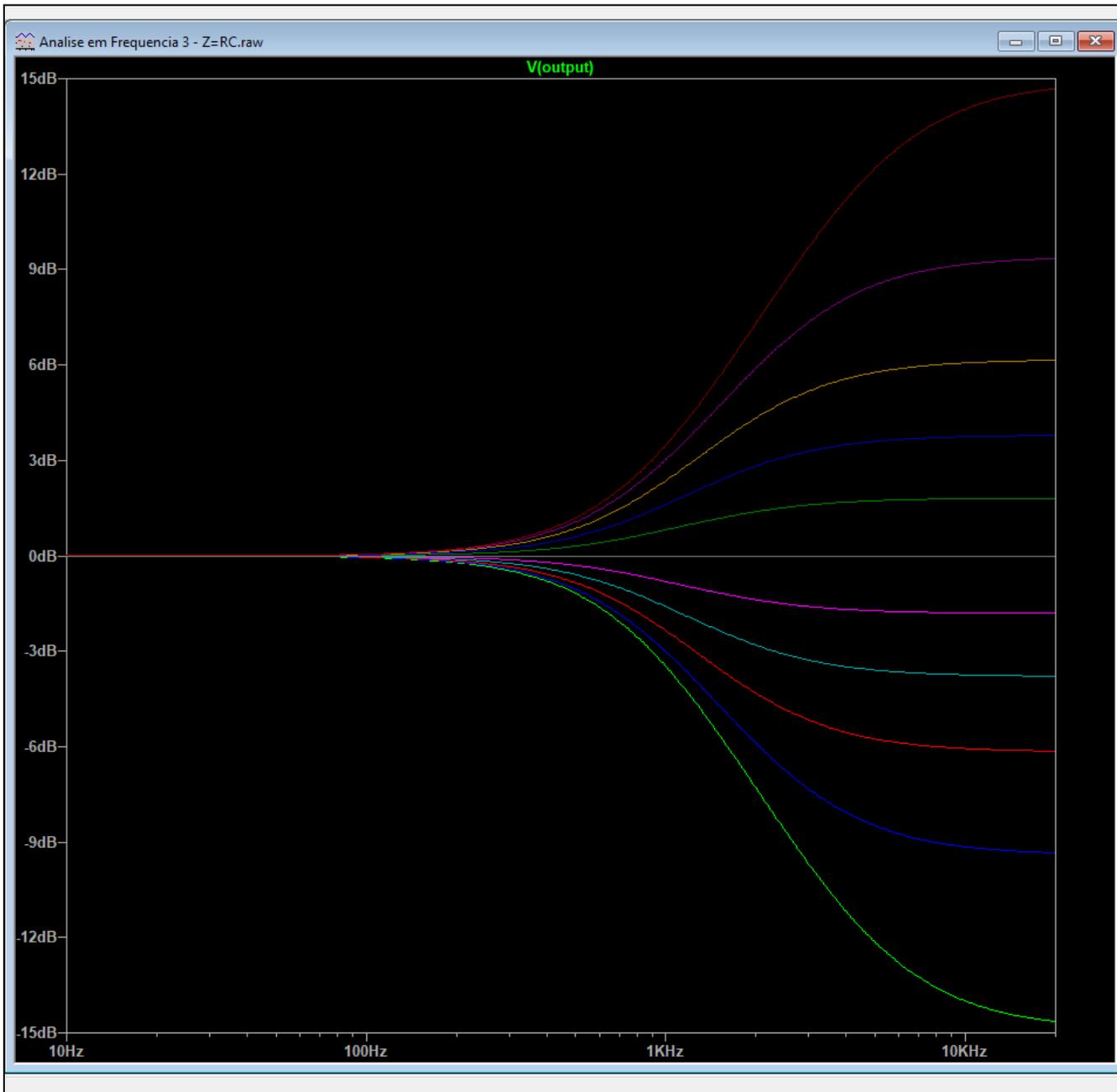
A resposta pode estar fora da faixa de áudio !

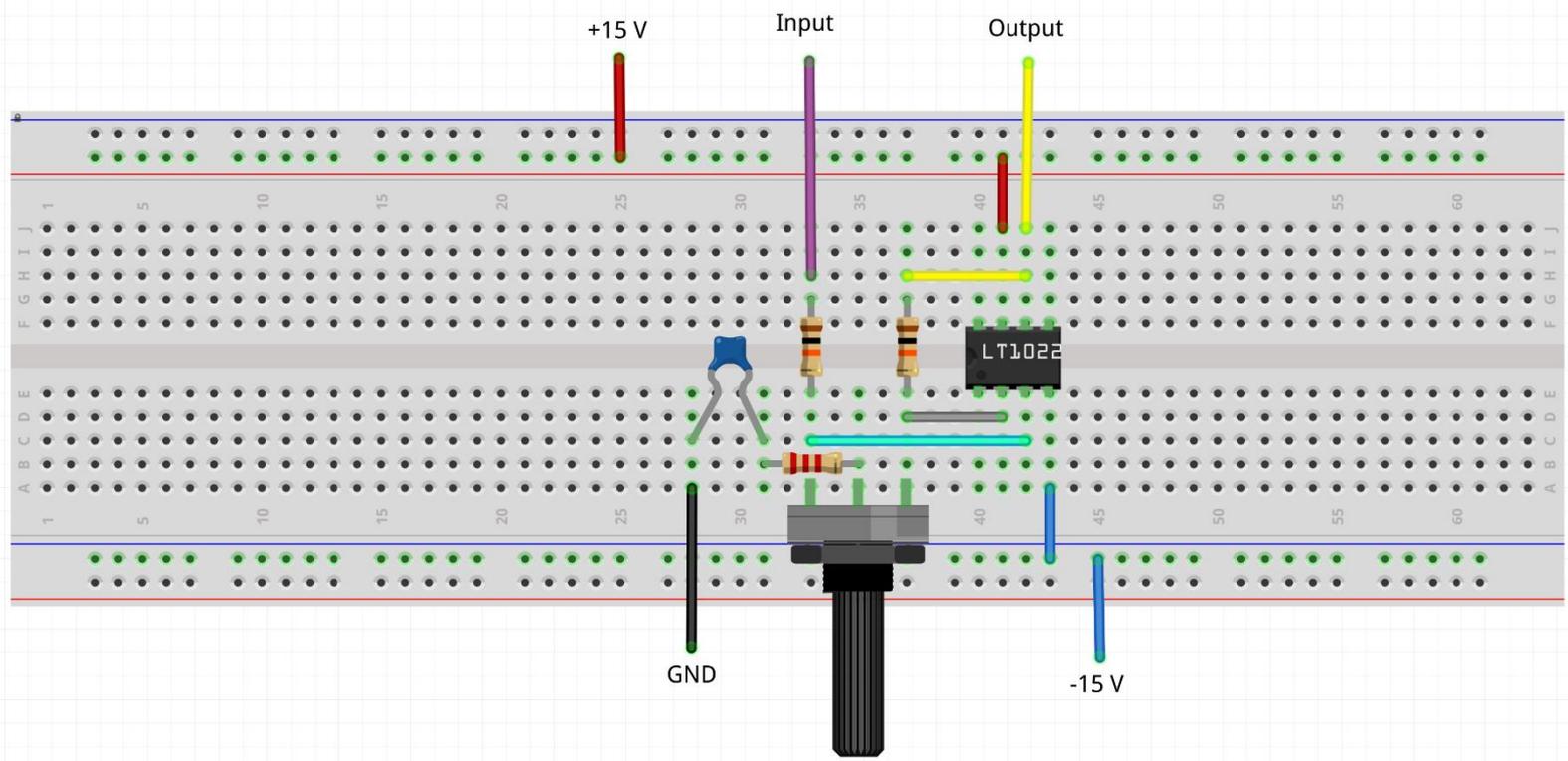


resposta em frequência

Controle de Agudos

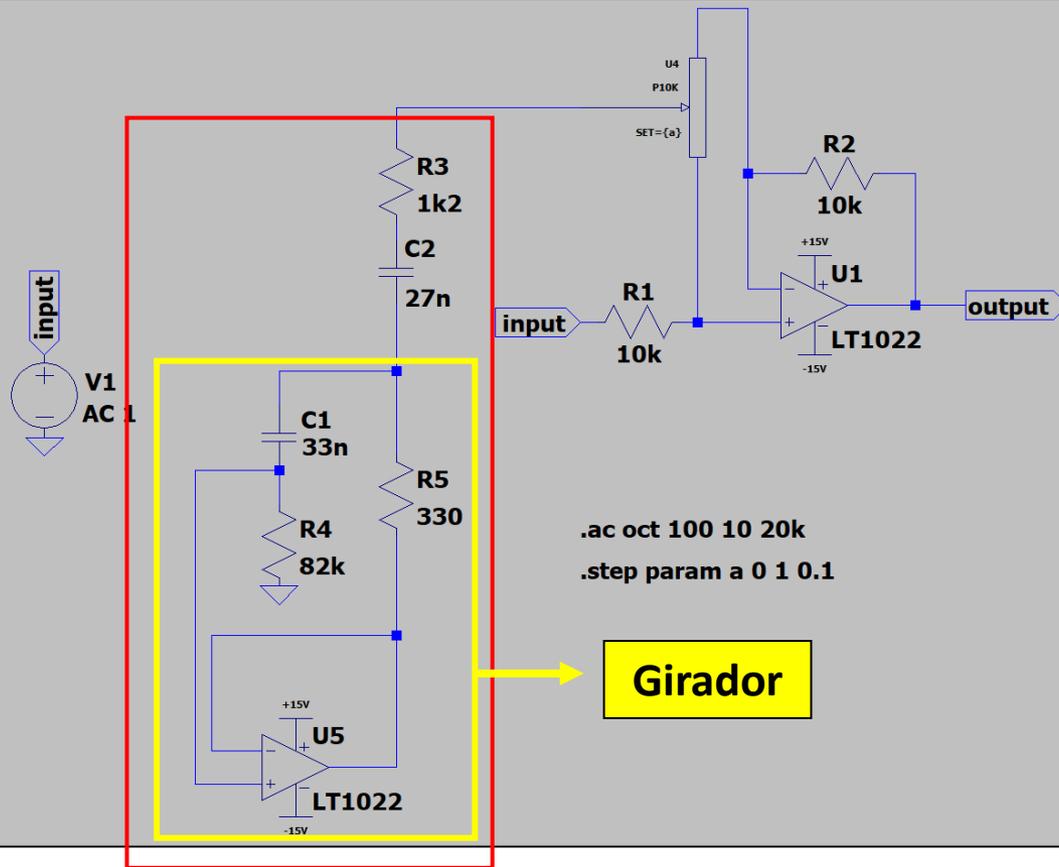


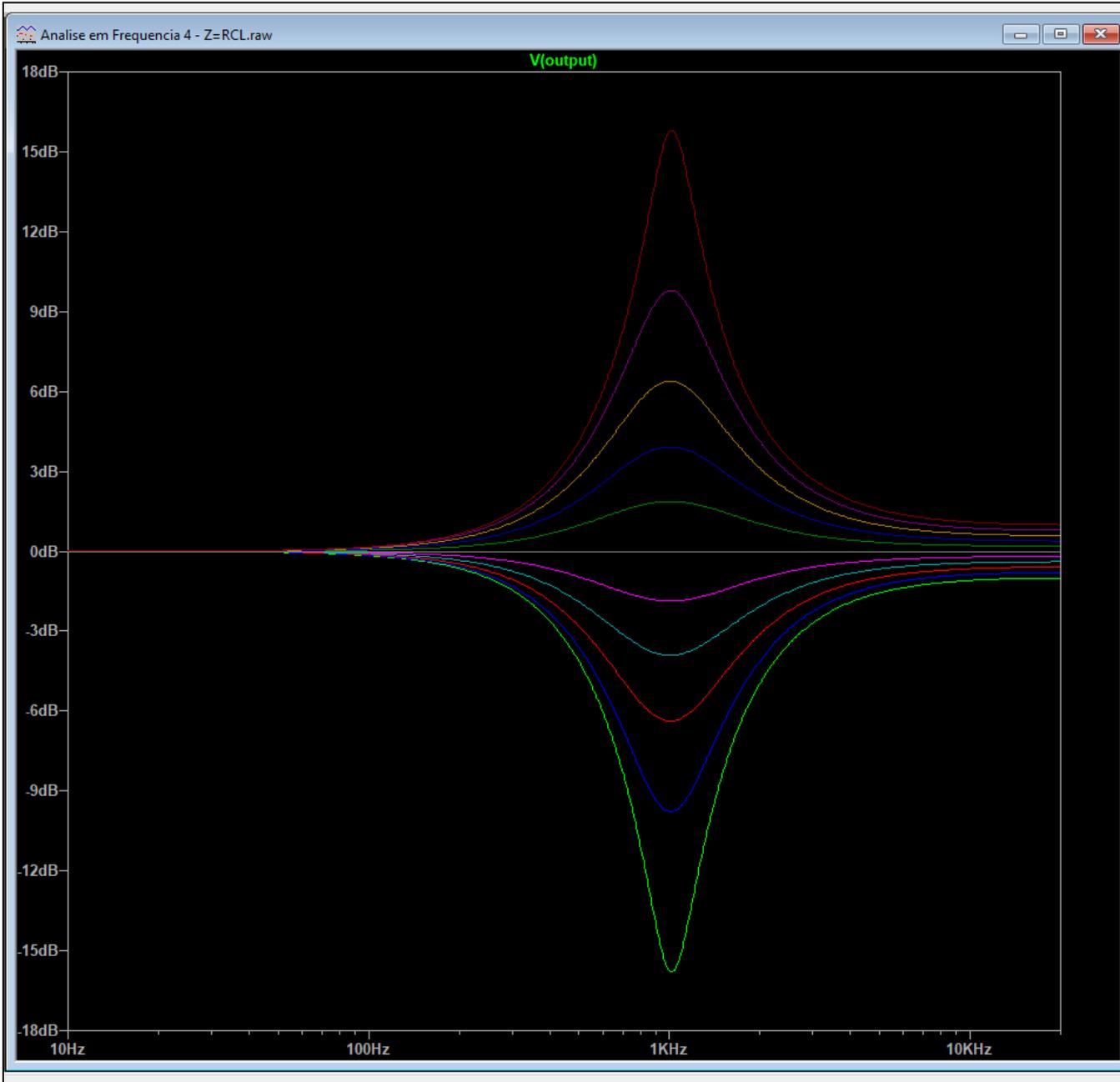


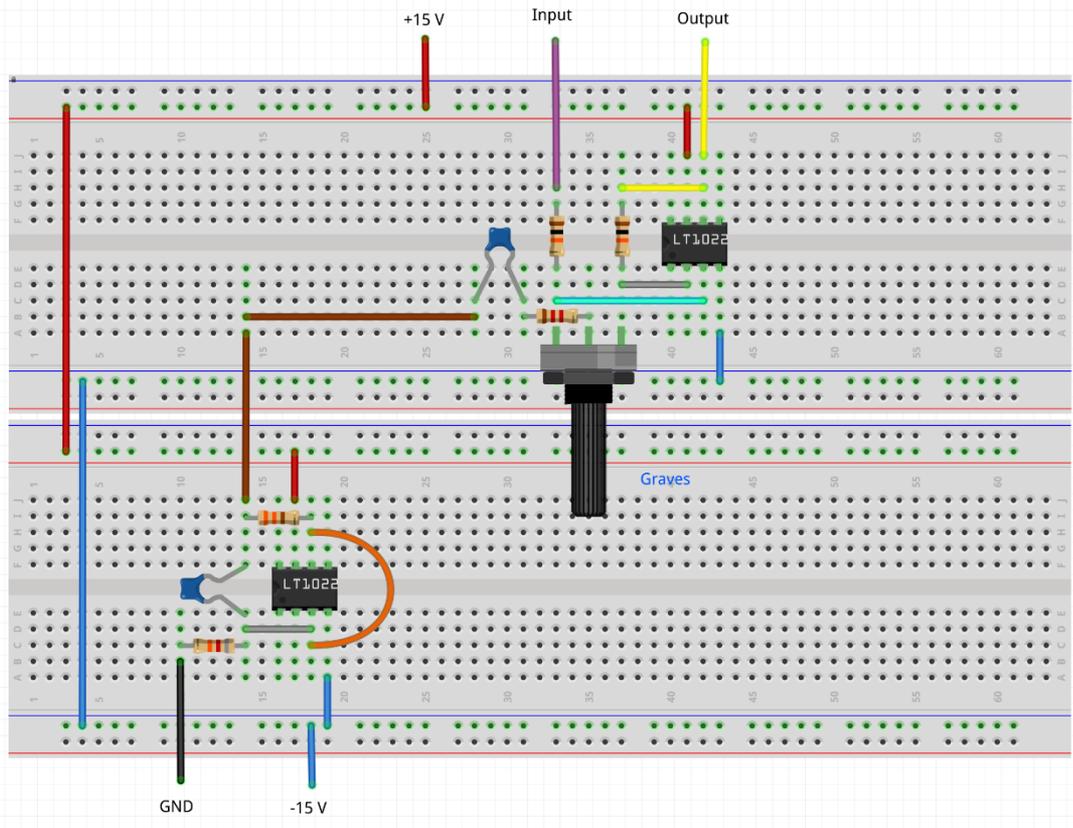


Component library sidebar with categories: CORE, MINE, Entrada, Saida, CON TRIB. It contains various electronic components like resistors, capacitors, and integrated circuits.

Controle de Médios







Componentes

Core Parts

- CORE Básico
- MINE
- Entrada
- Saída
- CONTRIB

fritzing

**Equalizador
Paramétricos
(Multi Banda)**

Equalizador Paramétrico com 7 Bandas

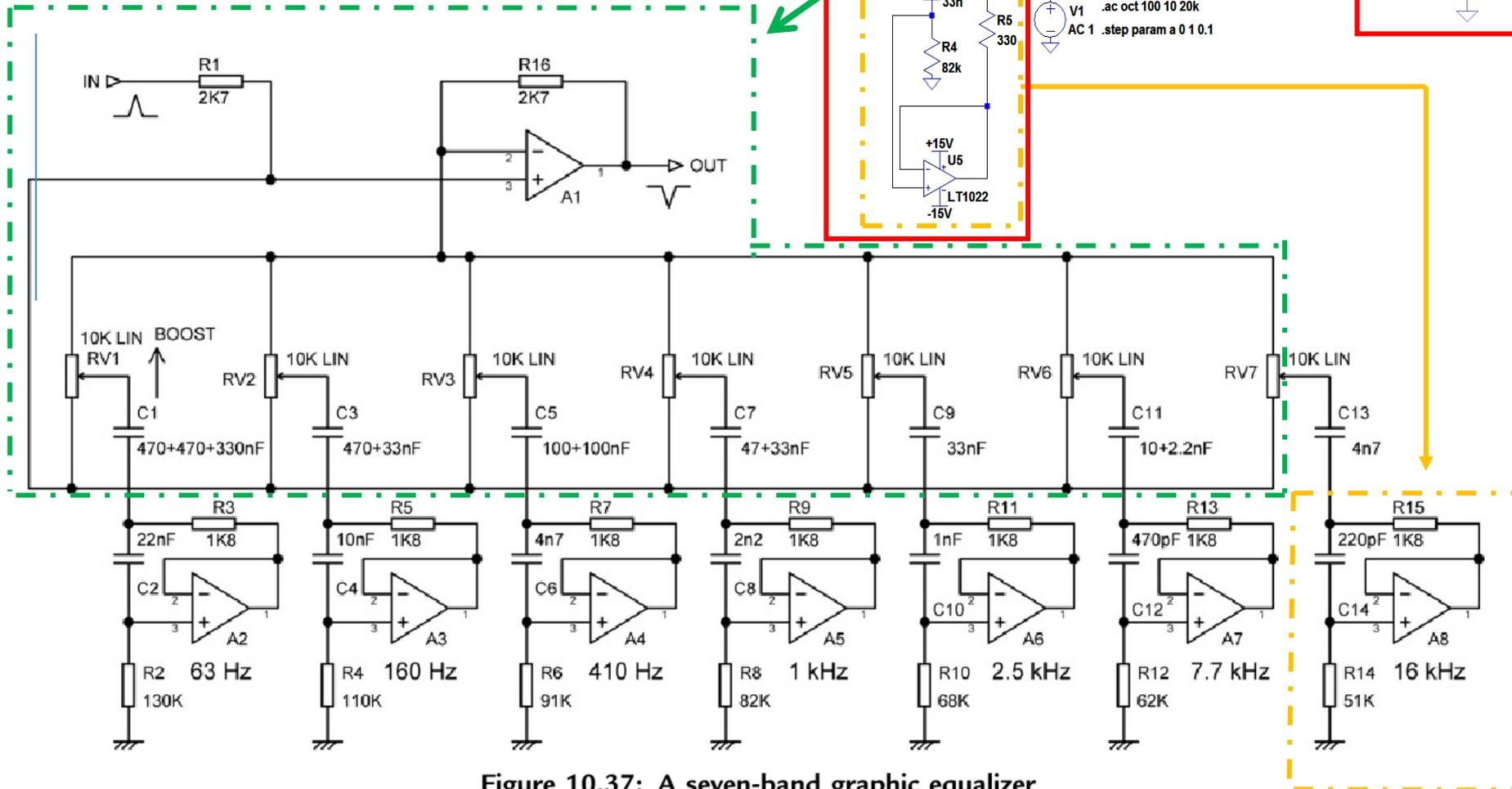
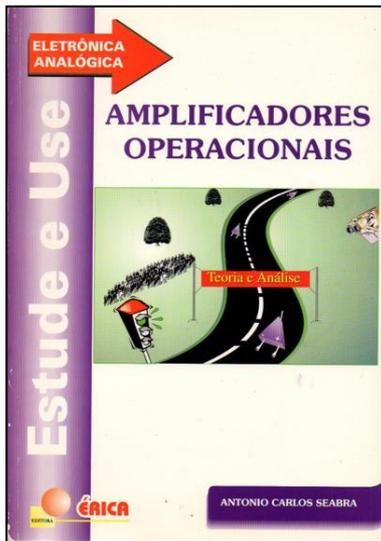


Figure 10.37: A seven-band graphic equalizer



Índice

3.6	Tensão de Offset de Entrada	107
3.7	Máxima Taxa de Variação de Tensão	114
3.8	Razão de Rejeição de Modo Comum	120
3.9	O Amplificador de Instrumentação	126
3.10	Condições Limites de Operação	135
3.11	O Que Você Aprendeu neste Capítulo?	142
	Exercícios Propostos	144
Capítulo 04 - Circuitos com Amplificadores Operacionais		147
4.1	Um Equalizador Gráfico de Áudio	148
4.2	Um Controlador Industrial de Temperatura	163
4.3	O Que Você Aprendeu neste Capítulo?	178
	Respostas dos Exercícios Propostos	179

