

Laboratório 1

Equalizador Baxandall

Referências Bibliográficas

- 1 Veronese PR, **Amplificadores de Áudio**, In: Notas de Aula da Disciplina **SEL315 – Circuitos Eletrônicos III**, Escola de Engenharia de São Carlos, 2009
- 2 Veronese PR, **Filtros e Equalizadores de Áudio**, In: Notas de Aula da Disciplina **SEL315 – Circuitos Eletrônicos III**, Escola de Engenharia de São Carlos, 2015

Roteiro Experimental

SEL318 - Laboratório de Circuitos Eletrônicos III

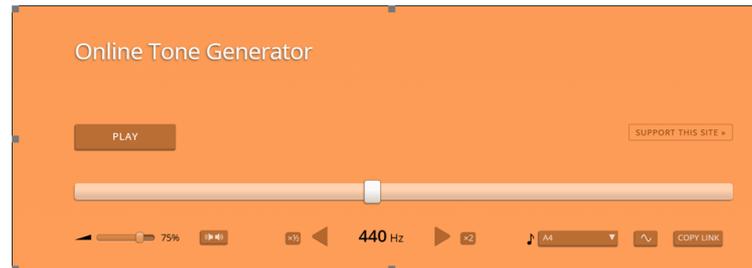
Laboratório 1 – Equalizador Baxandall

Equalizadores são filtros ativos ajustáveis capazes de atenuar ou reforçar determinadas faixas de frequência. O conceito de equalização pode ser extremamente abrangente e aplicado em vários campos de estudos, telecomunicações, instrumentação, áudio. As próximas duas práticas deste laboratório irão tratar de equalizadores de áudio, aplicáveis diretamente para montagem de um pré-amplificador, e o uso de sinais de música para os testes.

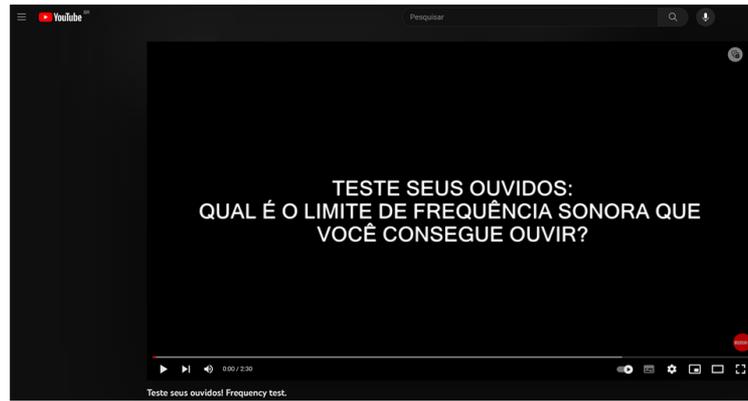
Equalizadores pertencem ao pré-amplificador de áudio, responsável pelo controle de volume, limitação, filtragem. O **Equalizador Baxandall** possui dois controles manuais, um para graves e um para agudos. Para boa parte das aplicações este equalizador possui desempenho muito bom e permite a compensação de falantes, ajuste para tipos diferentes de sala e até mesmo para agradar a ouvidos mais sofisticados.

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>

Equalizador Baxandall

Implemente em protoboard, conforme fig. 1.1, o circuito da fig. 1.2, o **Equalizador Baxandall Modificado**, com um amplificador operacional LF351 ou LT081. O circuito utiliza dois potenciômetros de 100kΩ para controle dos graves (**Pgraves**) e outro para controle dos agudos (**Pgraves**), ambos ajustáveis manualmente.

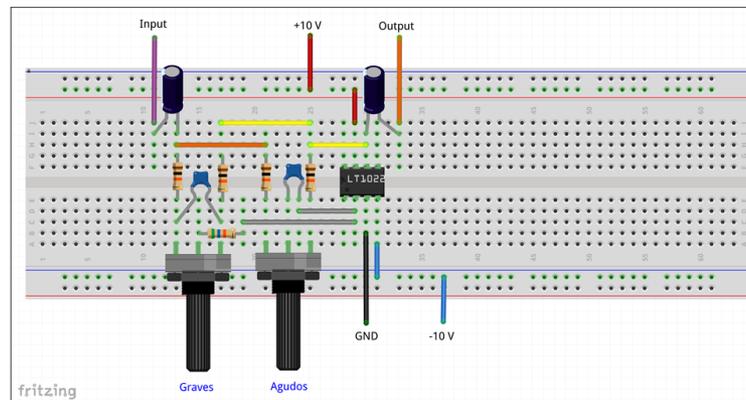


Fig.1.1 - Equalizador **Baxandall** (protoboard virtual)

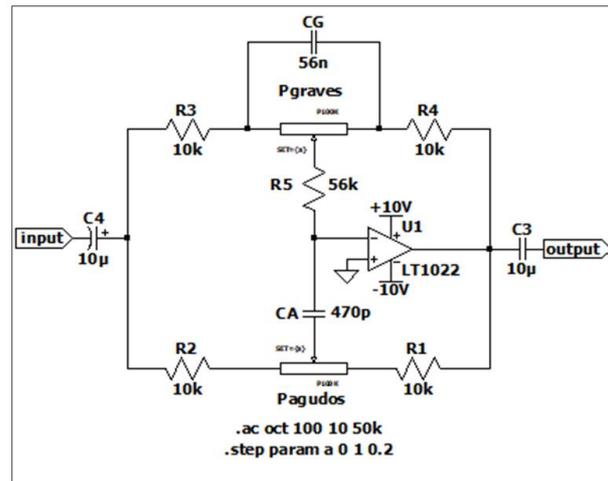


Fig.1.2 - Equalizador Baxandall (esquemático LTSPice)

- 1.1) Com um **signal de 100Hz** e 1V na entrada do circuito excursiona o potenciômetro de graves tal que $P_{G1} = 0$ e $P_{G2} = P_G$ e meça o ganho do equalizador (**máximo reforço**). Compare com o valor teórico.
- 1.2) Com um **signal de 100Hz** e 1V na entrada do circuito excursiona o potenciômetro de graves tal que $P_{G1} = P_G$ e $P_{G2} = 0$ meça o ganho do equalizador (**máxima atenuação**). Compare com o valor teórico.
- 1.3) Com um **signal de 10KHz** e 1V na entrada do circuito excursiona o potenciômetro de agudos tal que $P_{A1} = 0$ e $P_{A2} = P_A$ e meça o ganho do equalizador (**máximo reforço**). Compare com o valor teórico.
- 1.4) Com um **signal de 10KHz** e 1V na entrada do circuito excursiona o potenciômetro de agudos tal que $P_{A1} = P_A$ e $P_{A2} = 0$ e meça o ganho do equalizador (**máxima atenuação**). Compare com o valor teórico.
- 1.5) Com um **signal de 1kHz** realize excursões nos dois potenciômetros e verifique o ganho para essa frequência em função dos ajustes.

Amplificador de Áudio Simplificado

Implemente em protoboard o amplificador de áudio da fig. 1.3.

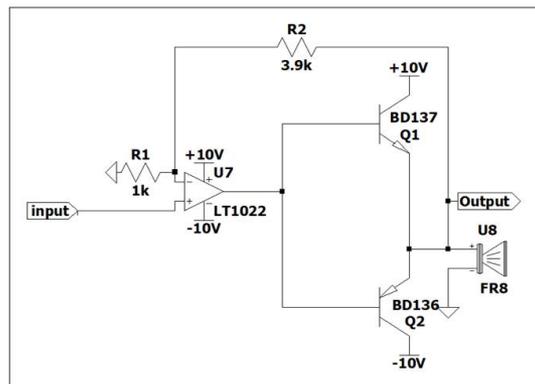


Fig. 1.3 - Amplificador de Potência (esquemático LTSPice)

1.6) Conecte a saída do equalizador Baxandall na entrada do amplificador de áudio e utilize uma música do computador como entrada. Utilize a saída de áudio traseira do desktop, conforme figura 1.4.



Fig. 1.4 – Saída de áudio traseira do desktop

- 1.7) Como se comportam as músicas com a variação do potenciômetro de graves?
- 1.8) Como se comportam as músicas com a variação do potenciômetro de agudos?
- 1.9) Tire conclusões sobre o uso de um equalizador com controle de graves e agudos para ajuste de tonalidade em um sinal de áudio.

Simulação em LTSPice

Acesse no E-disciplinas USP, na disciplina <SEL0318 - Laboratório de Circuitos Eletrônicos III (2022)>, no item <Laboratório 1 – Equalizador Baxandall>, o arquivo de simulação <Equalizador Baxandall a=0 até a=1 com incremento 0,2>.

Utilizar os componentes “p100ka” para o potenciômetro de agudos e “p100kg” para o potenciômetro de graves. Ambos são definidos pelo parâmetro **a** que pode ser definido ou excursionado pelos comandos do simulador.

- 1.1) Observe o resultado de simulação através da variação dos potenciômetros de graves e de agudos em frequências de 100Hz à 50KHz.
- 1.2) Comparar os valores teóricos de máximo reforço e máxima atenuação medidos em bancada com os medidos em simulação nas frequências de 100Hz e 10KHz.
- 1.3) Com um sinal de 1kHz realize excursões nos dois potenciômetros e verifique o ganho para essa frequência em função dos ajustes.

**ME3100 – Analog
Electronic Courseware**

ME3100 Analog Circuit Design
Ready-to-Teach Package for Electronic Instrumentation and Measurement

Quick Start Guide

revision 1.03
Printed on 20 September 2012



No	Lab Sheet	Objective	Duration
1	Designing a Voltage Regulator	To design and build a DC voltage regulator circuit, and measure its performance under varying operating conditions; as well as understand the improvements that can be made to achieve better performance	3 Hours
2	Designing an IR Transceiver Circuit	To design and test the performance of infrared based circuits; as well as understand design improvements to achieve better performance	3 Hours
3	Designing a BJT-Based Amplifier	To design and compare the performance of the different biasing schemes and their effects on input impedance, output impedance, and amplifier gain variation	3 Hours
4	Designing a FET-Based Amplifier	To design and evaluate the performance of an NMOS enhancement-mode MOSFET based amplifier	3 Hours
5	Designing Op-Amp-Based Precision Circuits	To investigate the use of feedback loop in designing precision rectifier of various configurations	3 Hours
6	Designing an Audio Equalizer	To design and evaluate the performance of an op-amp-based audio equalizer	3 Hours
7	Designing a High Sensitivity IR Detector	To study the use of op-amps in designing a highly sensitive IR detector circuit	3 Hours
8	Designing a High Precision Voltage Regulator	To study the use of op-amps in designing a high precision voltage regulator	3 Hours



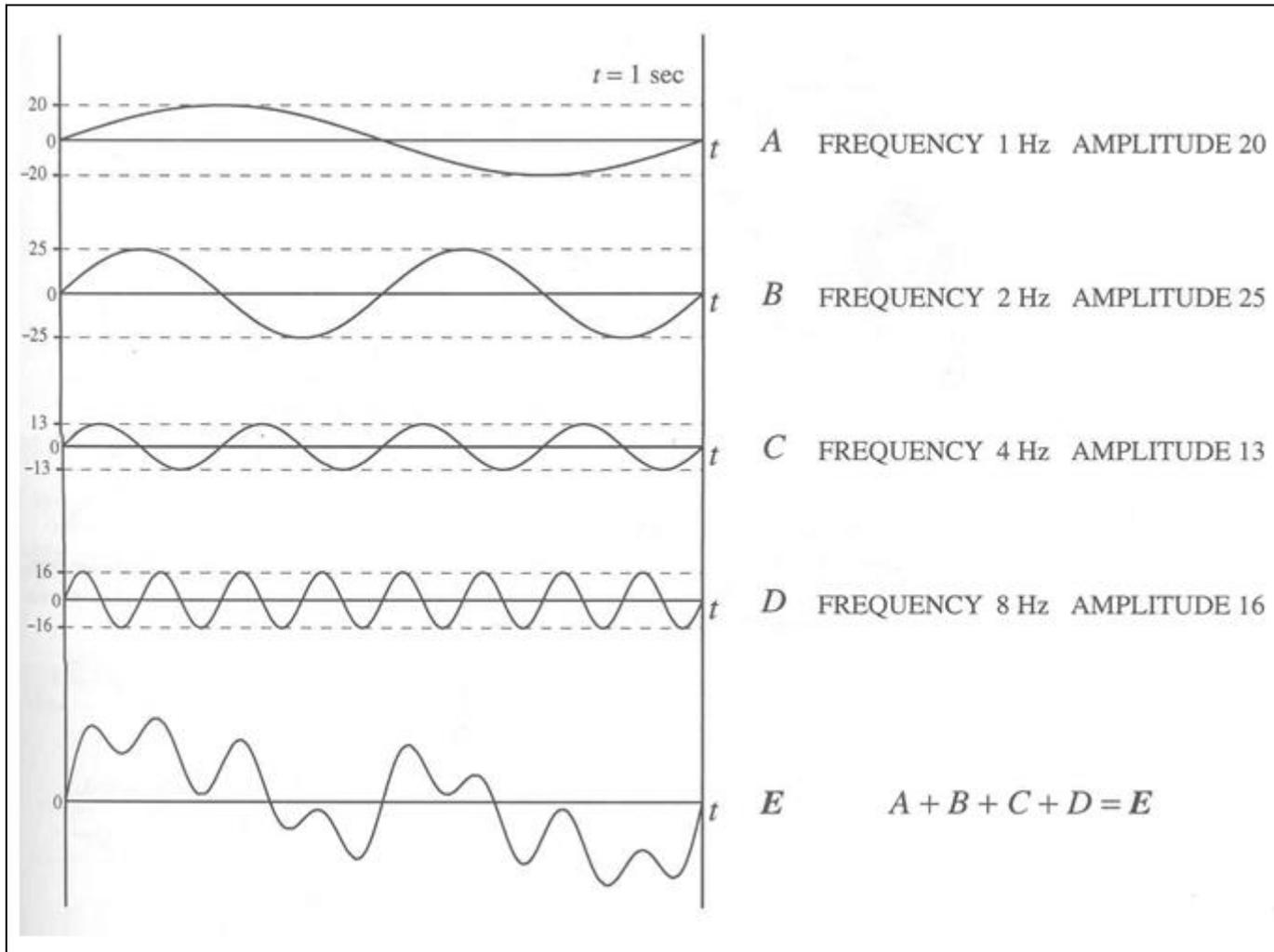
Sumário

- Introdução
- Controle de Graves
- Controle de Agudos
- Comentários
- Procedimento Experimental (Simulação)

Introdução

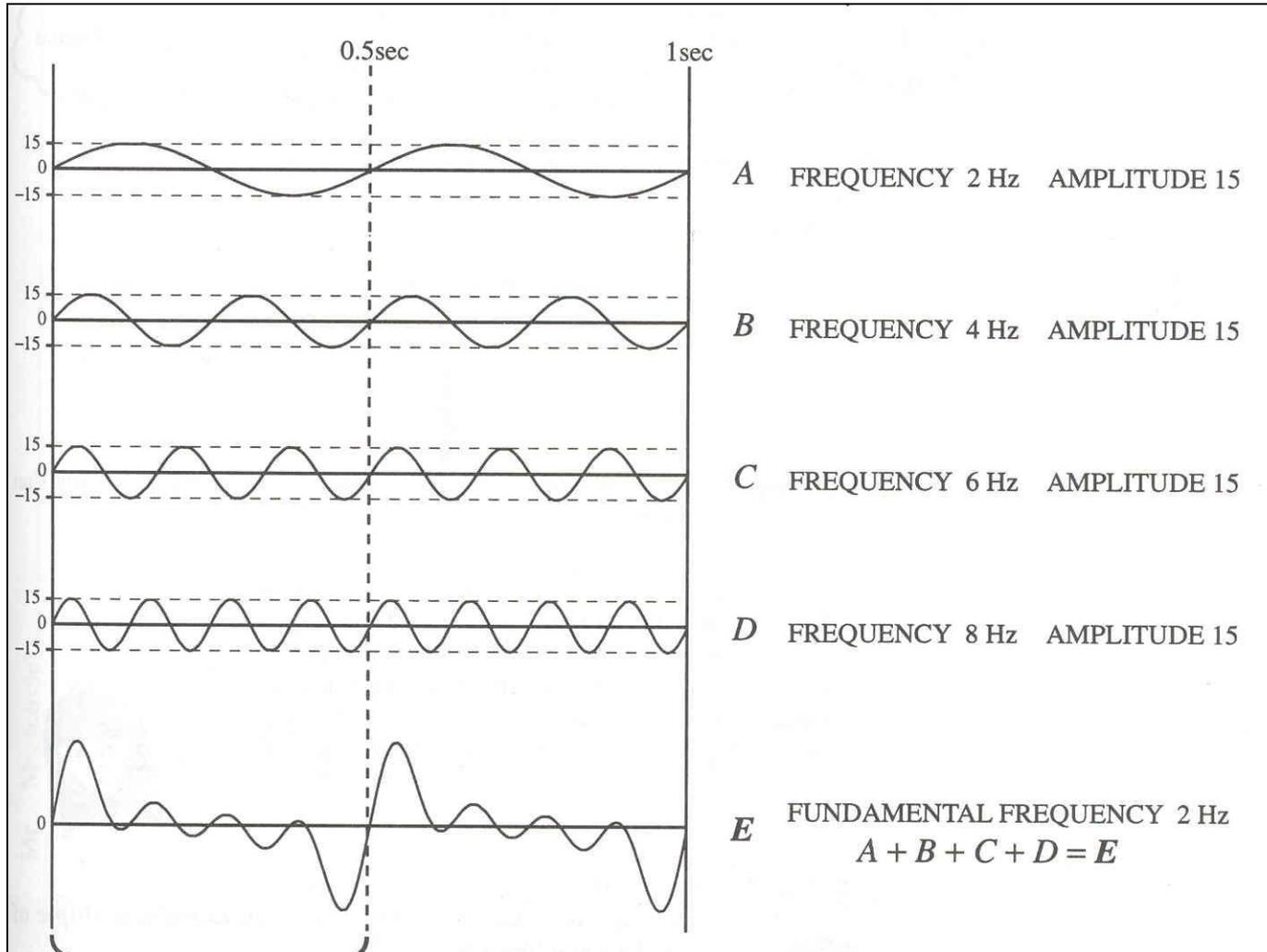
Série de Fourier

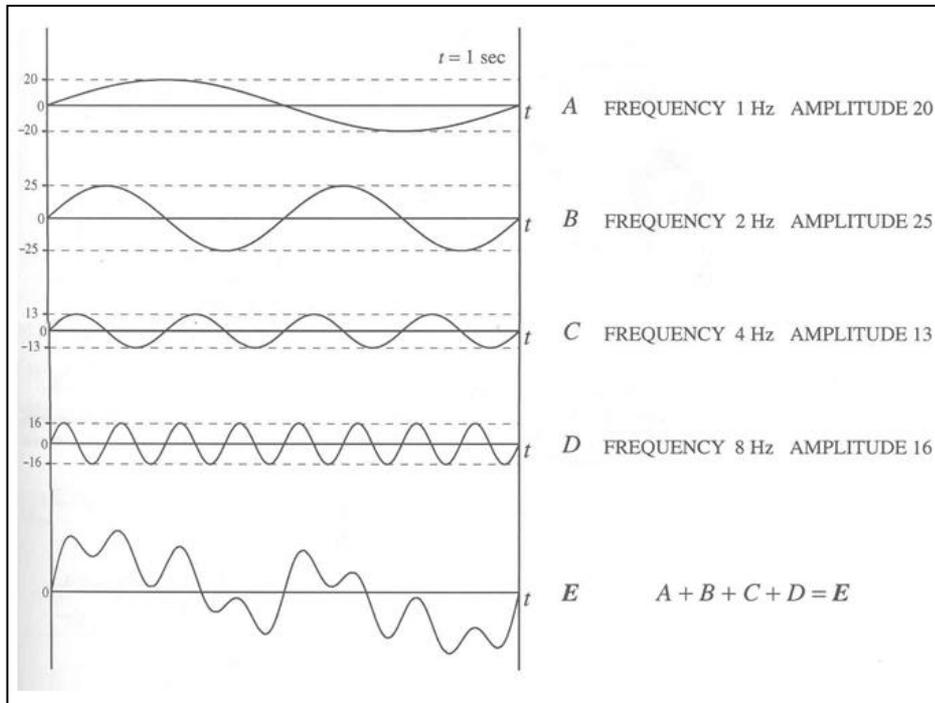
soma de ondas senoidais



Série de Fourier

soma de ondas senoidais





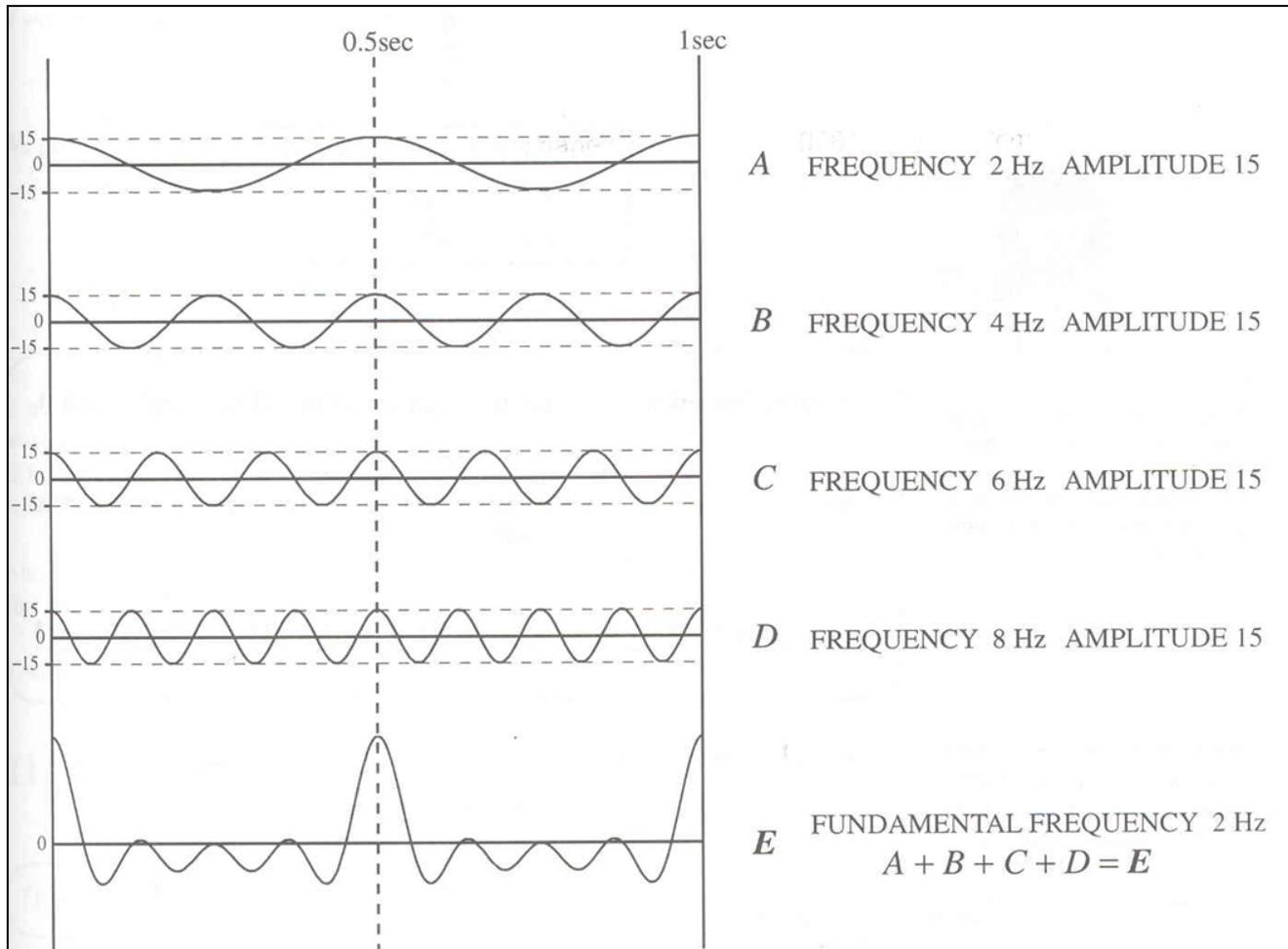
$$f_E(t) = 20 \sin 360 t + 25 \sin 720 t + 13 \sin 1440 t + 16 \sin 2880 t$$



$$f(t) = a_1 \sin \omega t + a_2 \sin 2\omega t + a_3 \sin 3\omega t \dots + a_n \sin n\omega t$$

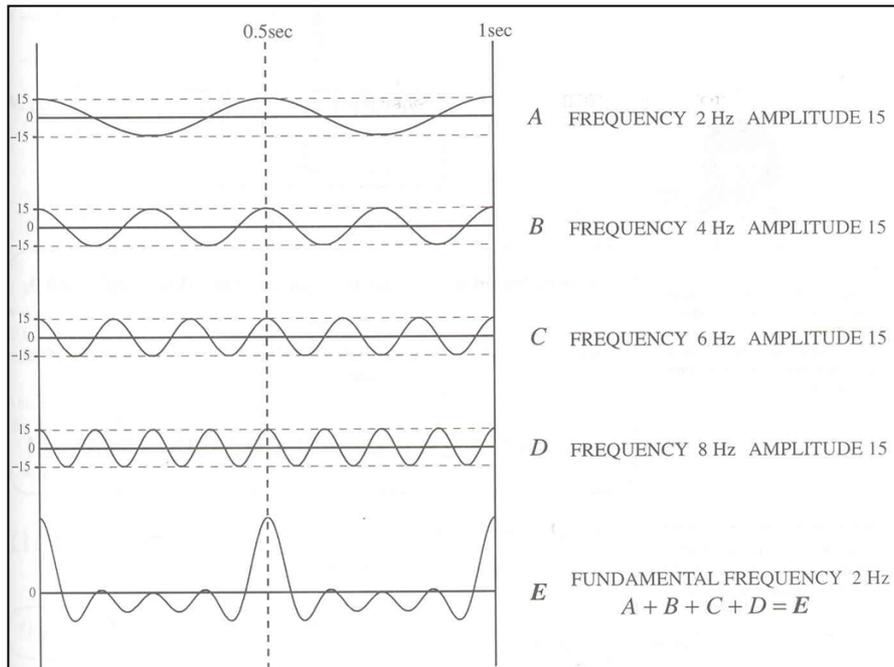
Série de Fourier

soma de ondas cossenoidais



Série de Fourier

soma de ondas cossenoidais



$$f(t) = a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t \dots + a_n \cos n\omega t$$

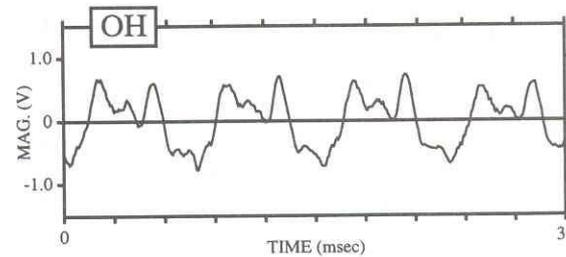
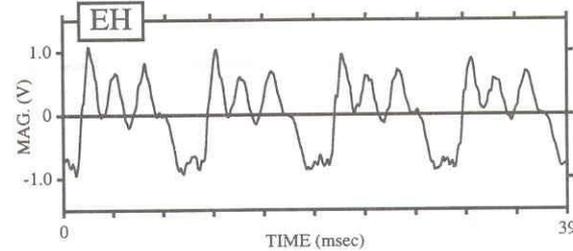
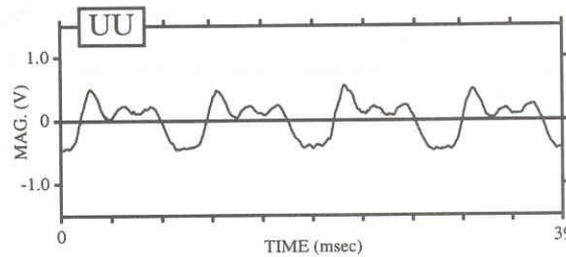
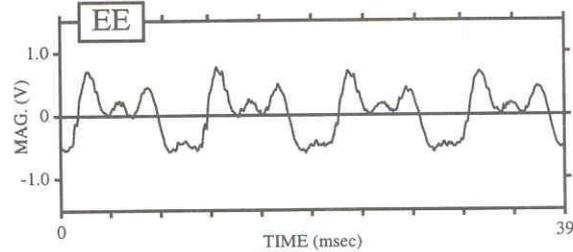
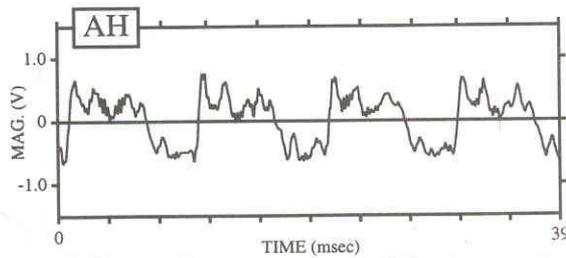
Série de Fourier



série	Coefficients: $n = 0, 1, \dots$
$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \sin(2\pi n f_0 t)]$	$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$ $a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$ $b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt$

Série de Fourier

The 5 Japanese Vowels

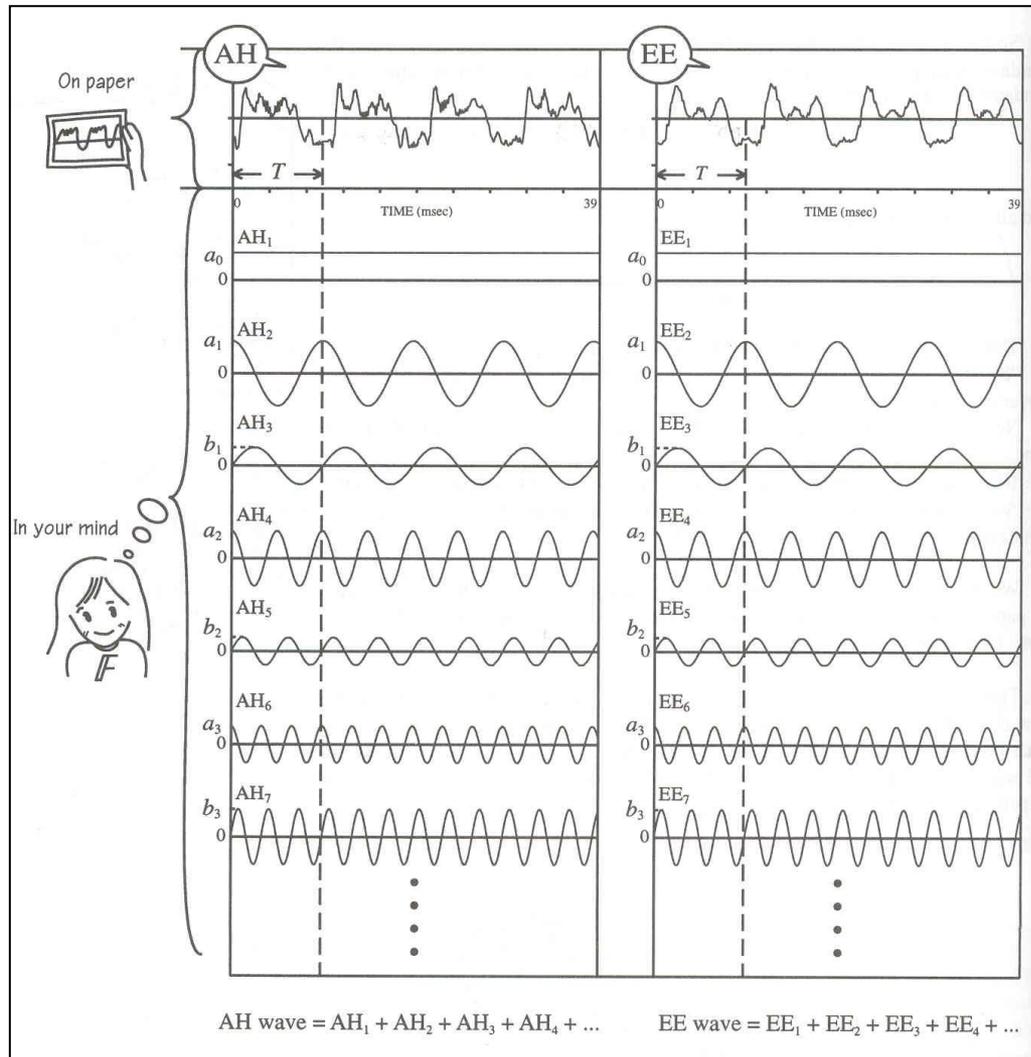


Just looking at these waves, about all we can say for sure is that they do look different, somehow...

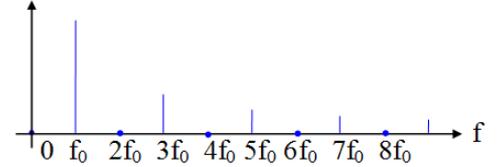
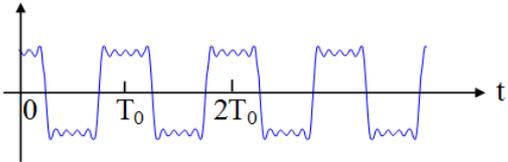
Hi, I'm Kiyomi.



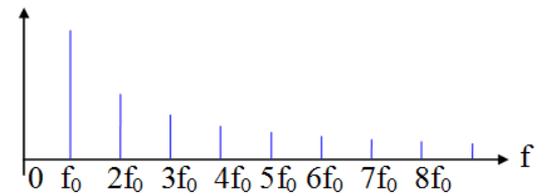
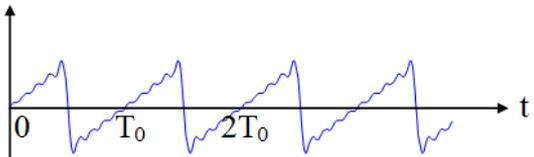
Série de Fourier



Série de Fourier



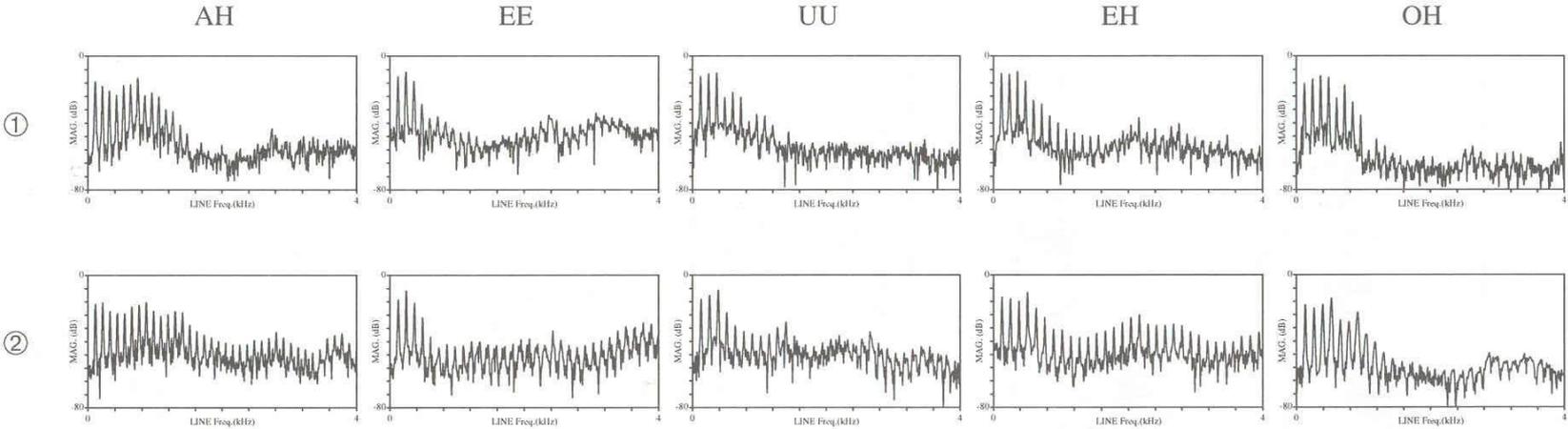
Spectrum Analyzer



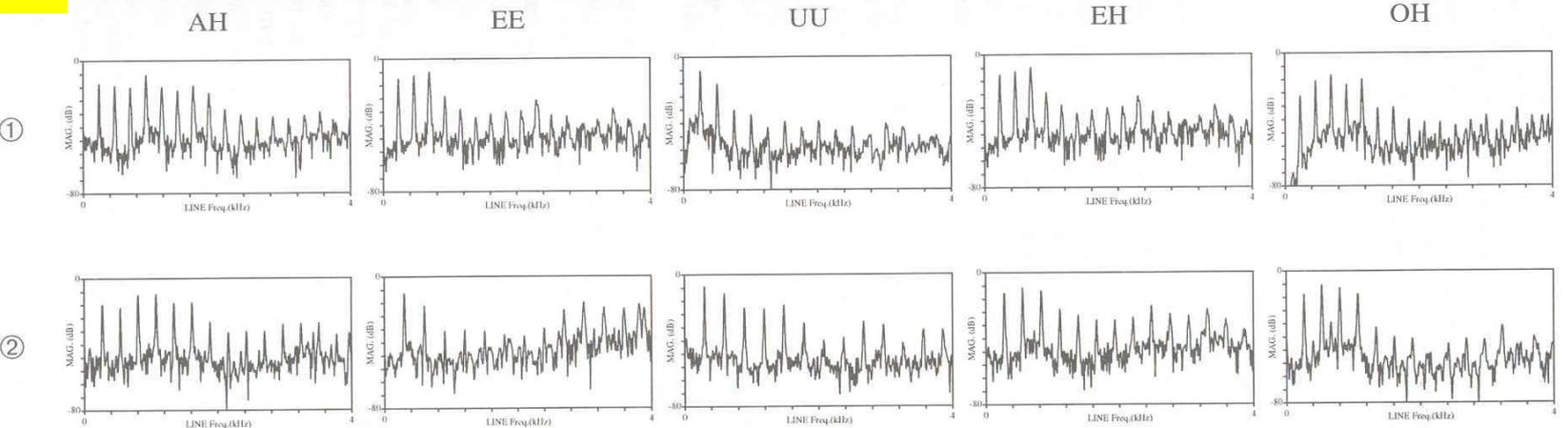
Spectrum Analyzer

Série de Fourier

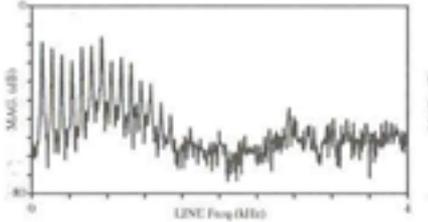
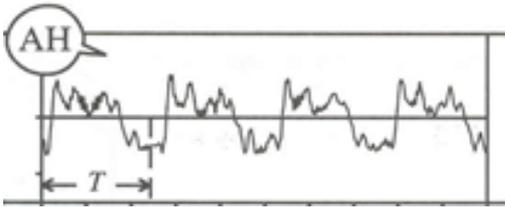
male



female



Série de Fourier

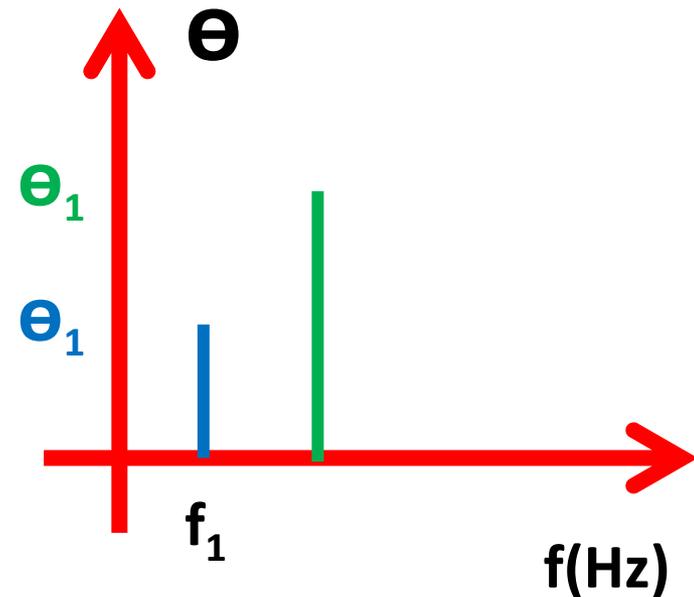
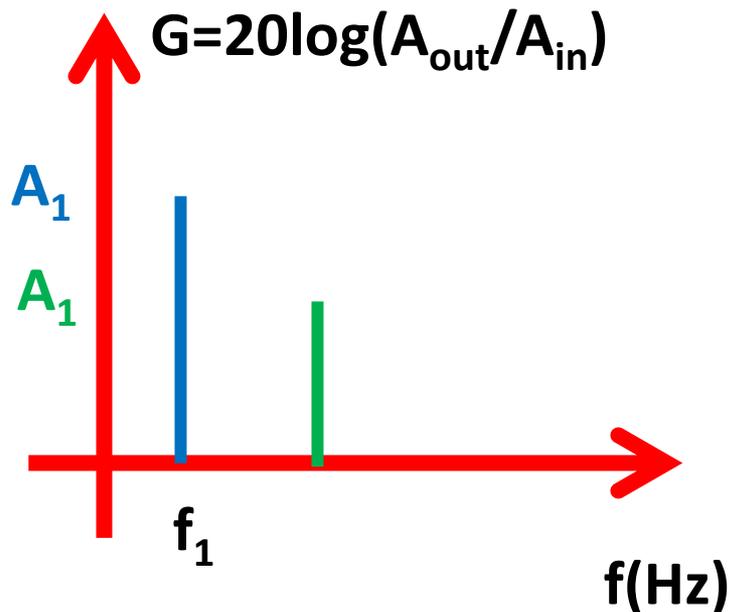


Spectrum Analyzer

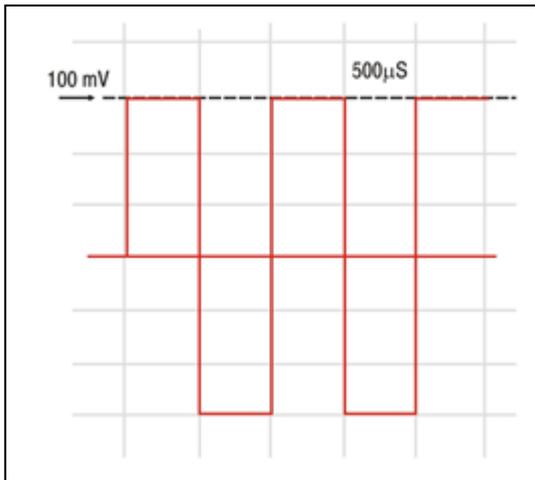
Série de Fourier



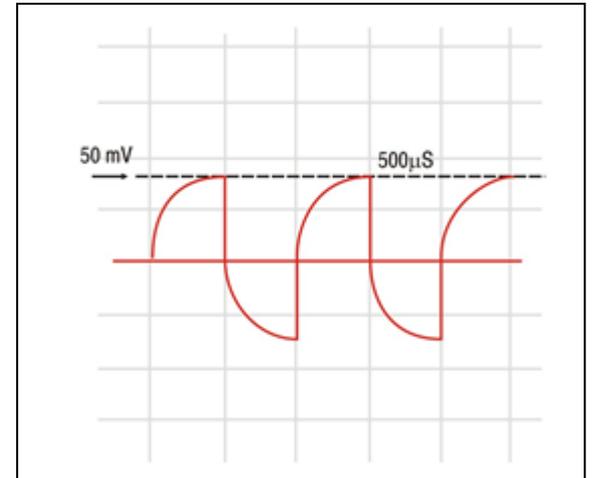
Desempenho do Filtro – Diagrama de Bode



Série de Fourier



Filtro



Pré-amplificadores de áudio são sistemas de processamento analógico de sinais que, a partir de transdutores como microfones, cápsulas ou captadores eletromagnéticos, sensores ópticos ou outras fontes de sinal, promovem amplificação, filtragem, equalização, controle de ganho, etc., com a máxima fidelidade possível.

A função de um pré-amplificador é acondicionar o sinal de áudio de maneira que ele possa ser aplicado convenientemente amplificadores de potência e serem reproduzidos em transdutores, como alto-falantes !

São três as características fundamentais do som: a **altura**, a **intensidade** e o **timbre**.

A ALTURA é a qualidade que permite distinguir um som grave de um som agudo.

O que determina a altura do som é a sua frequência.

Os sons graves são os de frequência baixa e os sons agudos são os de frequência alta.

A voz masculina é grave, enquanto a voz feminina é aguda.

As teclas de um piano produzem notas musicais de diferentes frequências.

No lado esquerdo do teclado o primeiro DÓ é um som de altura muito baixa, cuja frequência fundamental corresponde a 32 Hertz.

Na região central do teclado existe o LA natural cuja frequência é igual a 440 Hertz.

Na extremidade direita do teclado a última nota DO que existe apresenta uma frequência de aproximadamente 4.200 Hertz.

O violino produz notas de frequências mais altas.

O ser humano não é capaz de ouvir sons muito agudos. Acima de 20 KHz os sons se tornam inaudíveis.

Os sons extremamente graves ou infrassons também não são perceptíveis.

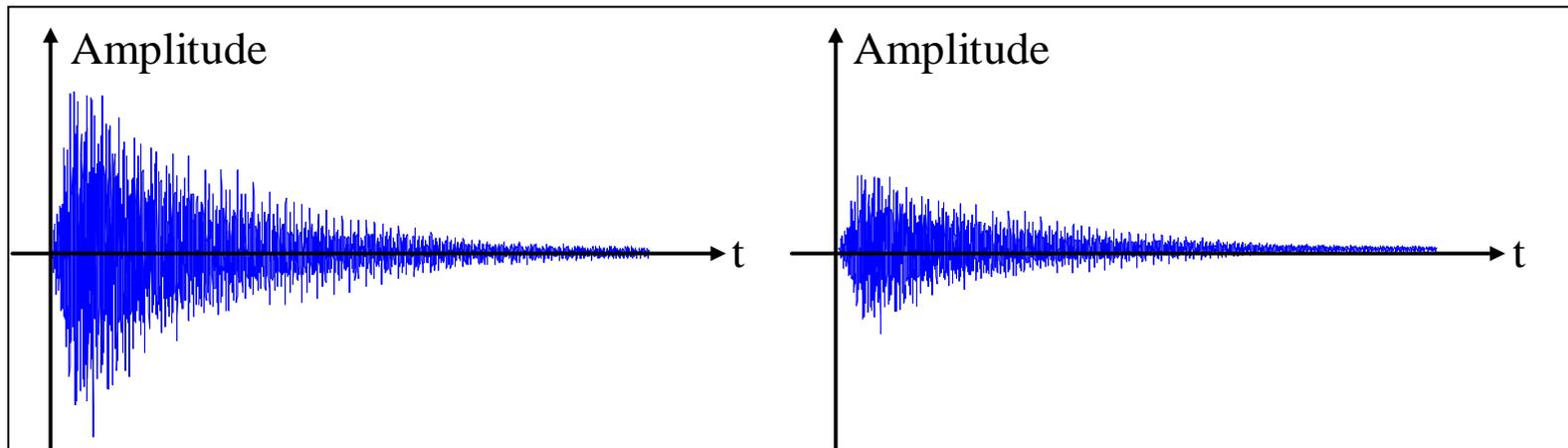
A faixa audível está aproximadamente entre 20 e 20 mil Hertz.

A INTENSIDADE ou o volume é a qualidade que permite distinguir sons fracos de sons fortes.

Batendo-se de leve na tecla do um piano, produz-se um som fraco.

Batendo-se fortemente na mesma tecla, produz-se um forte.

Na figura abaixo são representadas duas formas de onda produzidas por dois sons de mesma frequência mas de intensidades diferentes. A diferença entre eles está somente nas amplitudes.



O TIMBRE é determinado pelo número de harmônicos e as suas amplitudes !

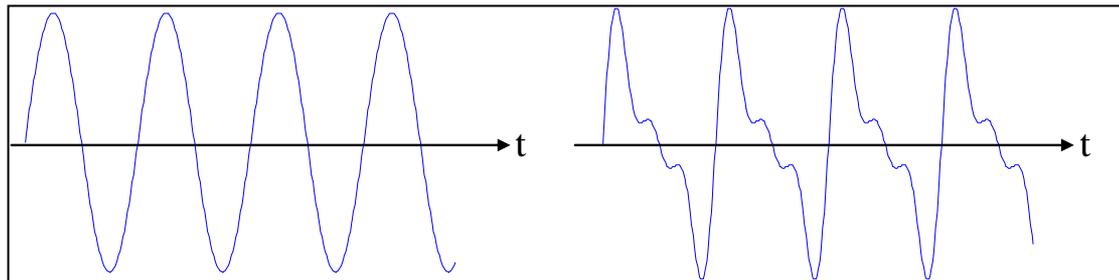
Em qualquer instrumento, o som produzido possui uma frequência principal, denominada frequência fundamental e uma porção de múltiplos dessa frequência denominados frequências harmônicas.

O som produzido não possui a forma senoidal mas uma forma mais complexa que depende do instrumento.

Na figura são mostradas duas formas de ondas que representam dois sons de mesma frequência, mesma amplitude, mas as formas de ondas são diferentes.

A forma de onda caracteriza, portanto, o timbre do som !

Quanto mais complexa for a forma, mais rico é o som em harmônicos, isto é, maior é o número de frequências que entram na sua composição.



1 **Espectro de Áudio:** $20 \text{ Hz} \leq f_{\text{áudio}} \leq 20 \text{ kHz}$

Graves: $f_G \leq 500 \text{ Hz}$

Agudos: $f_A \geq 2 \text{ kHz}$

Médios: $500 \text{ Hz} \leq f_m \leq 2 \text{ kHz}$

2 O ouvido humano é muito mais sensível à faixa de *médios* do que às faixas de *graves* e *agudos*.

3 A **voz humana**, $300 \text{ Hz} \leq f_{\text{voz}} \leq 3,4 \text{ kHz}$, tem seu espectro contido prioritariamente na faixa de *médios*.

4 **Sinais musicais**, no entanto, gravados em meios como o disco compacto, podem ter componentes de frequência em toda a faixa de áudio, isto é, $20 \text{ Hz} \leq f_{\text{áudio}} \leq 20 \text{ kHz}$

Equalizador Baxandall

1

Controle de tonalidade é um nome específico dado a um **processador analógico de sinais** muito usado em pré-amplificadores de áudio.

O objetivo desse processador é atuar nas faixas de frequências baixas (graves) e altas do espectro (agudos), sem causar perturbações significativas na faixa de frequências médias.

Na primeira metade do século passado, quando os primeiros projetos eletrônicos de reprodução sonora começaram a aparecer, os transdutores, chamados de alto-falantes, eram dispositivos rudimentares que possuíam muita deficiência na reprodução de *graves* e de *agudos*.

Somando-se as deficiências dos transdutores à deficiência do ouvido humano, tornou-se essencial que circuitos eletrônicos compensadores para essas faixas fossem criados. **Um físico chamado P.J. Baxandall em 1952 desenvolveu o chamado controle de tonalidade.**

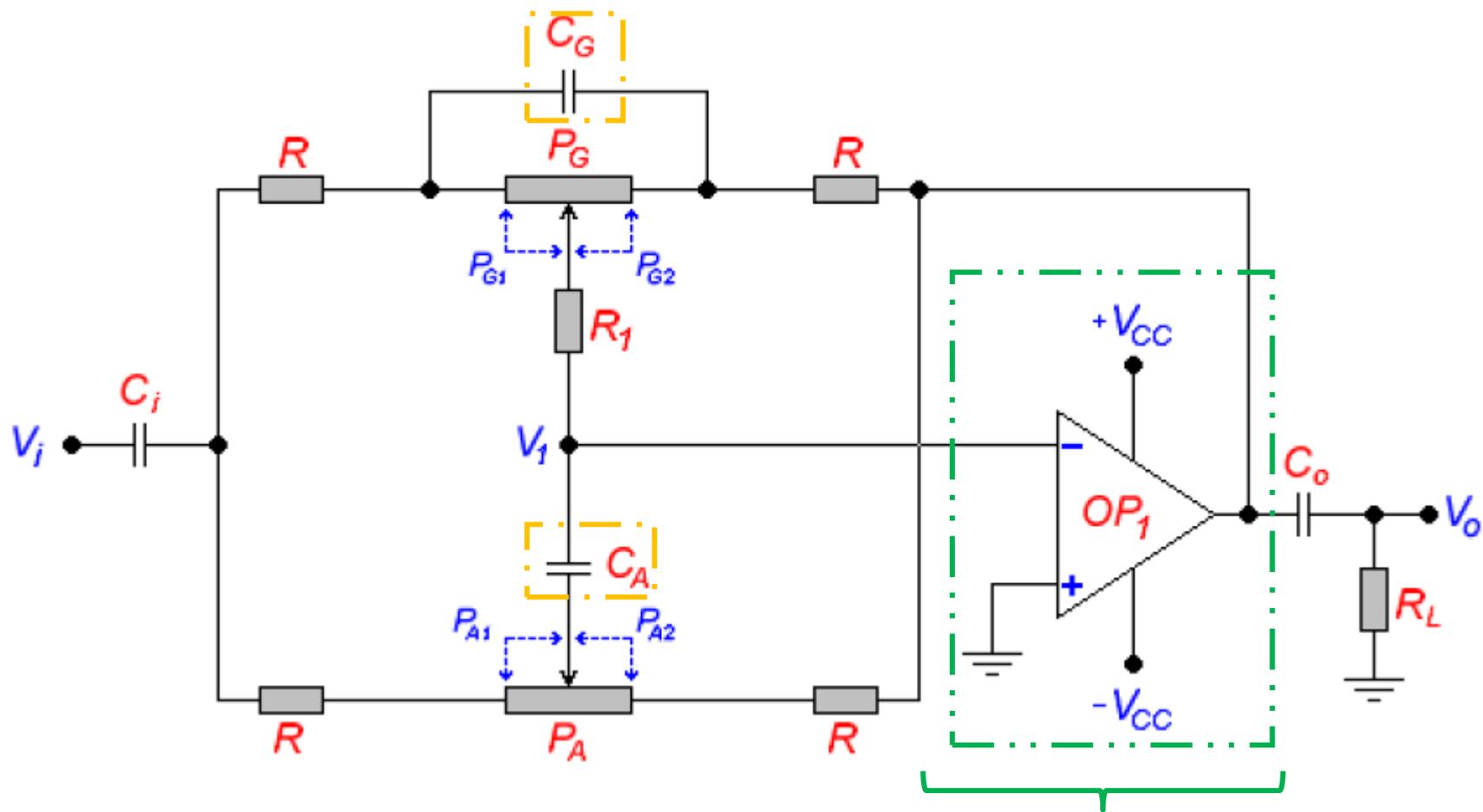
2

O **Controle de tonalidade** promove reforços ou atenuações de ganho nas faixas de *graves* e *agudos* ou podem ser ajustados para permanecerem com resposta plana. Na faixa de *médios* ele é praticamente inoperante.

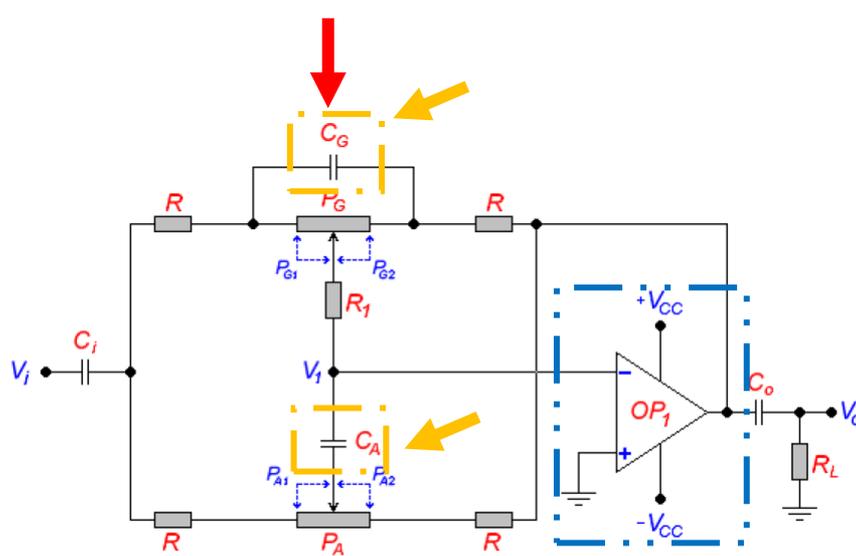
Nos dias atuais, com o desenvolvimento de alto-falantes e caixas acústicas com alto rendimento e resposta estendida, o controle de tonalidade perdeu um pouco sua importância, principalmente na faixa de *agudos*, na qual os **alto-falantes chamados tweeters** são de excelente qualidade.

Transdutores de graves, chamados **woofers**, ainda precisam de algum reforço de potência, principalmente se forem de pequenas dimensões.

Equalizador Baxandall



Amplificador Operacional



Se $P_{G1} = P_{G2} = P_G/2$ e $P_{A1} = P_{A2} = P_A/2$ $\Rightarrow G_v = -1 V/V$ (0 dB)

3

Quando os cursores são deslocados o ganho é maior ou menor do que a unidade, propiciando reforços ou atenuações.

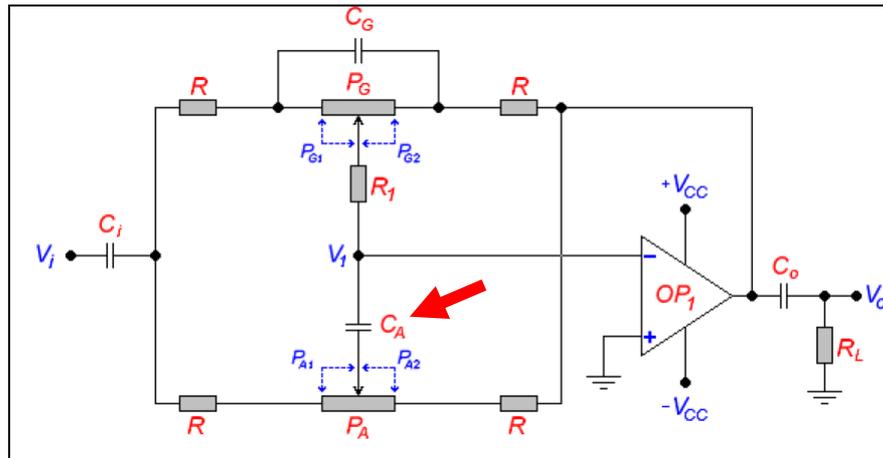
4

Os capacitores C_G e C_A , por possuírem reatâncias dependentes de frequência, garantem que esses reforços ou atenuações ocorram em faixas específicas.

5

O resistor R_1 é colocado para aumentar a isolação e diminuir a interação entre as malhas e deve valer, aproximadamente, $R_1 \approx P_G / 2$.

Controle de Graves

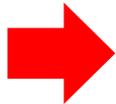


1

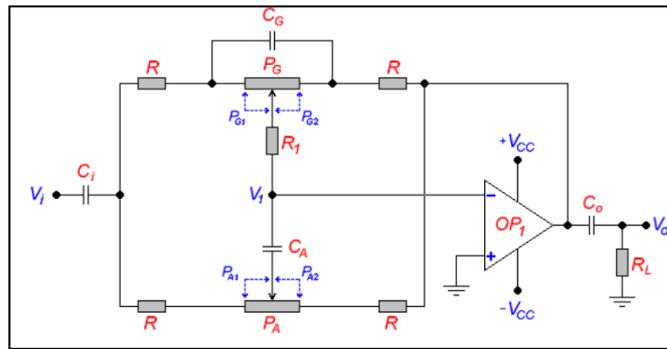
Nessa faixa de frequências, o capacitor C_A apresenta uma reatância muito alta e isola a malha de agudos do restante do circuito.

$$G_v = \frac{v_o}{v_i} = - \frac{S + \frac{R + P_{G2}}{C_G P_{G2}}}{S + \frac{R + P_{G1}}{C_G P_{G1}}} \times \frac{S + \frac{1}{C_G P_{G1}}}{S + \frac{1}{C_G P_{G2}}} \quad [\text{V/V}]$$

Se $S \rightarrow \infty$ ($f \rightarrow \infty$) $\Rightarrow G_v \rightarrow -1 \text{ V/V}$, $\forall P_{G1}$ e $\forall P_{G2}$.



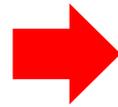
Se $S \rightarrow 0$ ($f \rightarrow 0$) $\Rightarrow G_v \rightarrow - \frac{R + P_{G2}}{R + P_{G1}} \quad [\text{V/V}]$.



2

Máximo Reforço ($P_{G1}=0$ e $P_{G2}=P_G$):

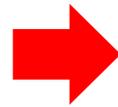
$$G_v = -\frac{S + \frac{R + P_G}{C_G R P_G}}{S + \frac{1}{C_G P_G}} \quad [\text{V/V}]$$



Pólo: $p_G = \frac{1}{2\pi C_G P_G} \quad [\text{Hz}]$

Zero: $\begin{cases} z_G = \frac{R + P_G}{2\pi C_G P_G R} \quad [\text{Hz}] \\ z_G = |G_{vmax}| \times p_G \end{cases}$

$$|G_v| = \sqrt{\frac{f^2 + z_G^2}{f^2 + p_G^2}} \quad [\text{V/V}]$$

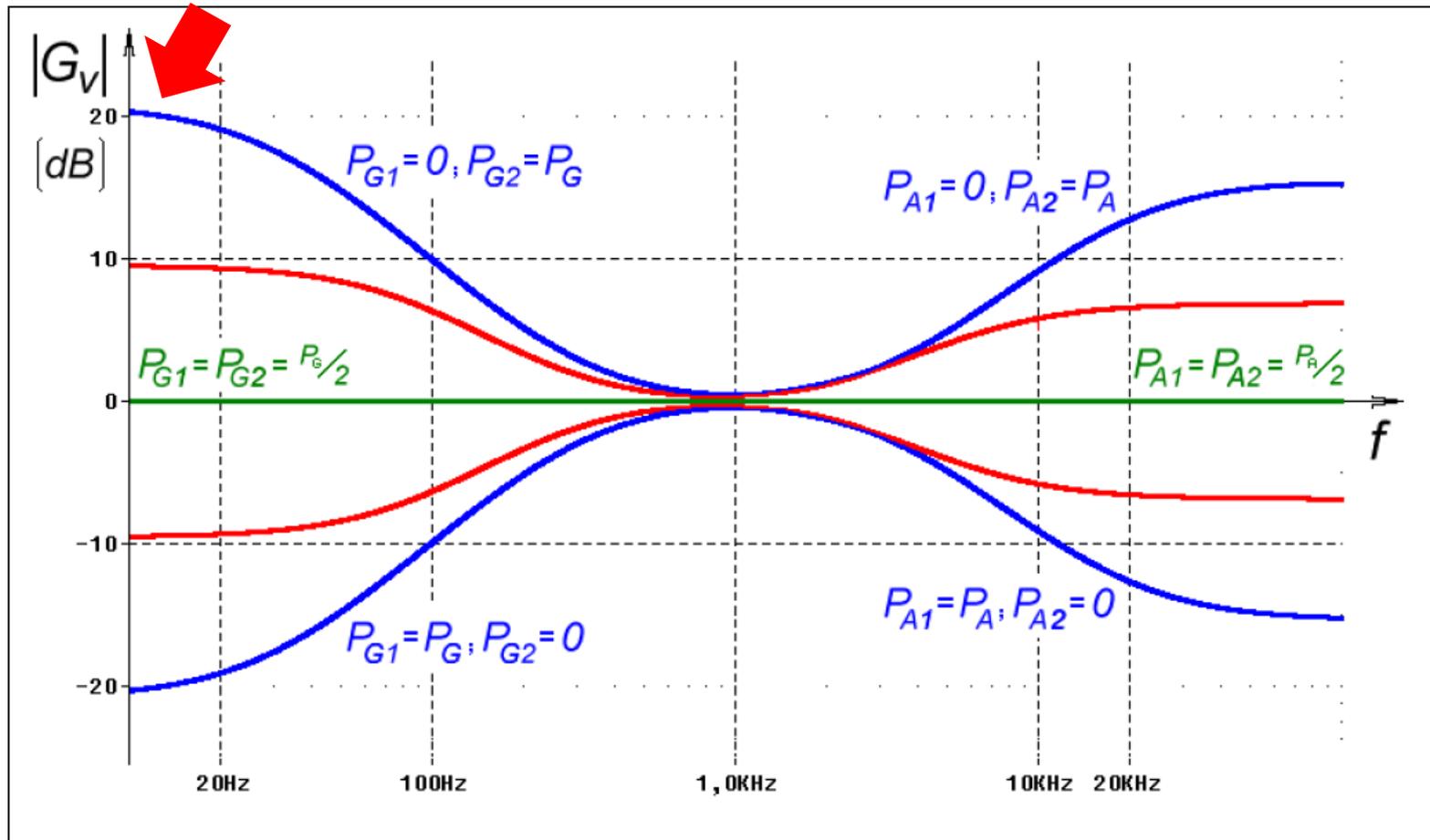


Se $S \rightarrow \infty$ ($f \rightarrow \infty$) $\Rightarrow G_v \rightarrow -1 \text{ V/V}, \forall P_G$.

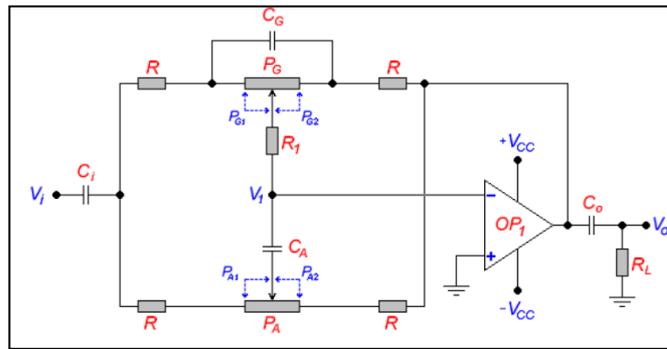
Se $S \rightarrow 0$ ($f \rightarrow 0$) $\Rightarrow G_v \rightarrow G_{vmax} = -\frac{R + P_G}{R} \quad [\text{V/V}]$.

Graves

Agudos

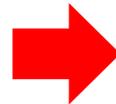


Nota-se que as curvas são perfeitamente simétricas em relação ao eixo horizontal, pois $G_{vmax} = 1/G_{vmin}$ e, portanto, em decibéis, $|G_{vmax}|(dB) = -|G_{vmin}|(dB)$.



3 Máxima Atenuação ($P_{G1}=P_G$ e $P_{G2}=0$):

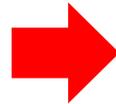
$$G_v = -\frac{S + \frac{1}{C_G P_G}}{S + \frac{R + P_G}{C_G R P_G}} \quad [\text{V/V}]$$



Pólo: $p_G = \frac{1}{2\pi C_G P_G} \quad [\text{Hz}]$

Zero: $\begin{cases} z_G = \frac{R + P_G}{2\pi C_G P_G R} \quad [\text{Hz}] \\ z_G = |G_{vmin}| \times p_G. \end{cases}$

$$|G_v| = \sqrt{\frac{f^2 + z_G^2}{f^2 + p_G^2}} \quad [\text{V/V}]$$

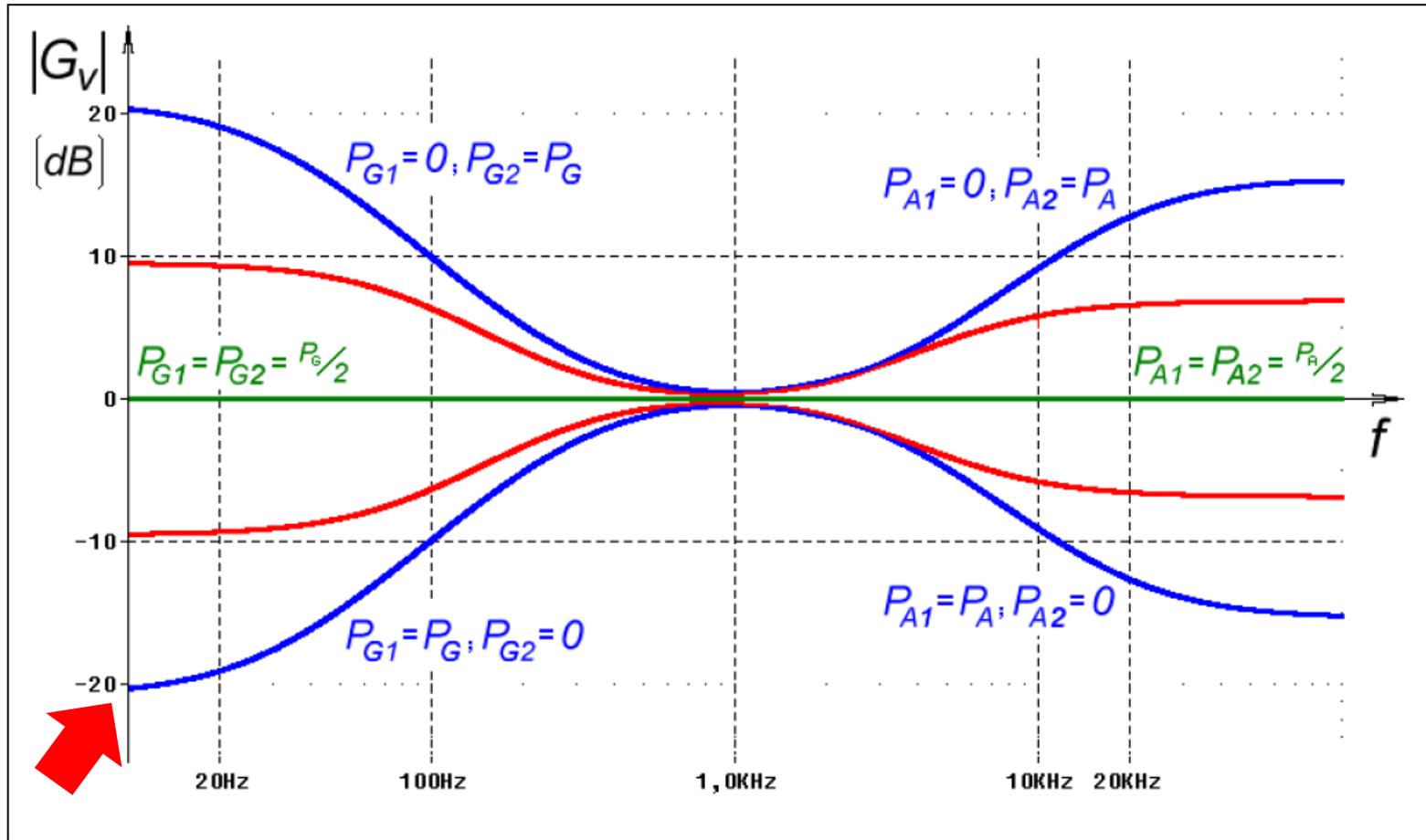


Se $S \rightarrow \infty$ ($f \rightarrow \infty$) $\Rightarrow G_v \rightarrow -1 \text{ V/V}, \forall P_G.$

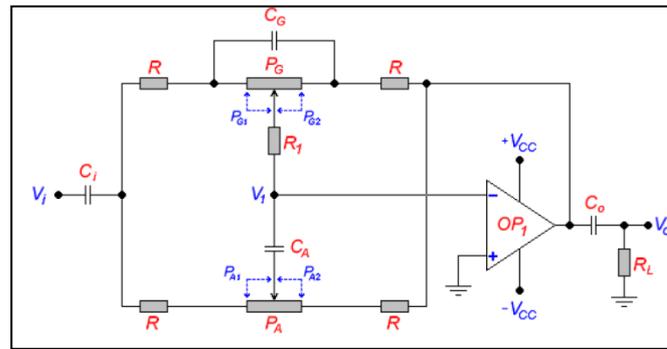
Se $S \rightarrow 0$ ($f \rightarrow 0$) $\Rightarrow G_v \rightarrow G_{vmin} = -\frac{R}{R + P_G} \quad [\text{V/V}].$

Graves

Agudos

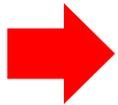


Nota-se que as curvas são perfeitamente simétricas em relação ao eixo horizontal, pois $G_{vmax} = 1/G_{vmin}$ e, portanto, em decibéis, $|G_{vmax}|(dB) = - |G_{vmin}|(dB)$.



3

Resposta Plana ($P_{G1}=P_G/2$ e $P_{G2}=P_G/2$):

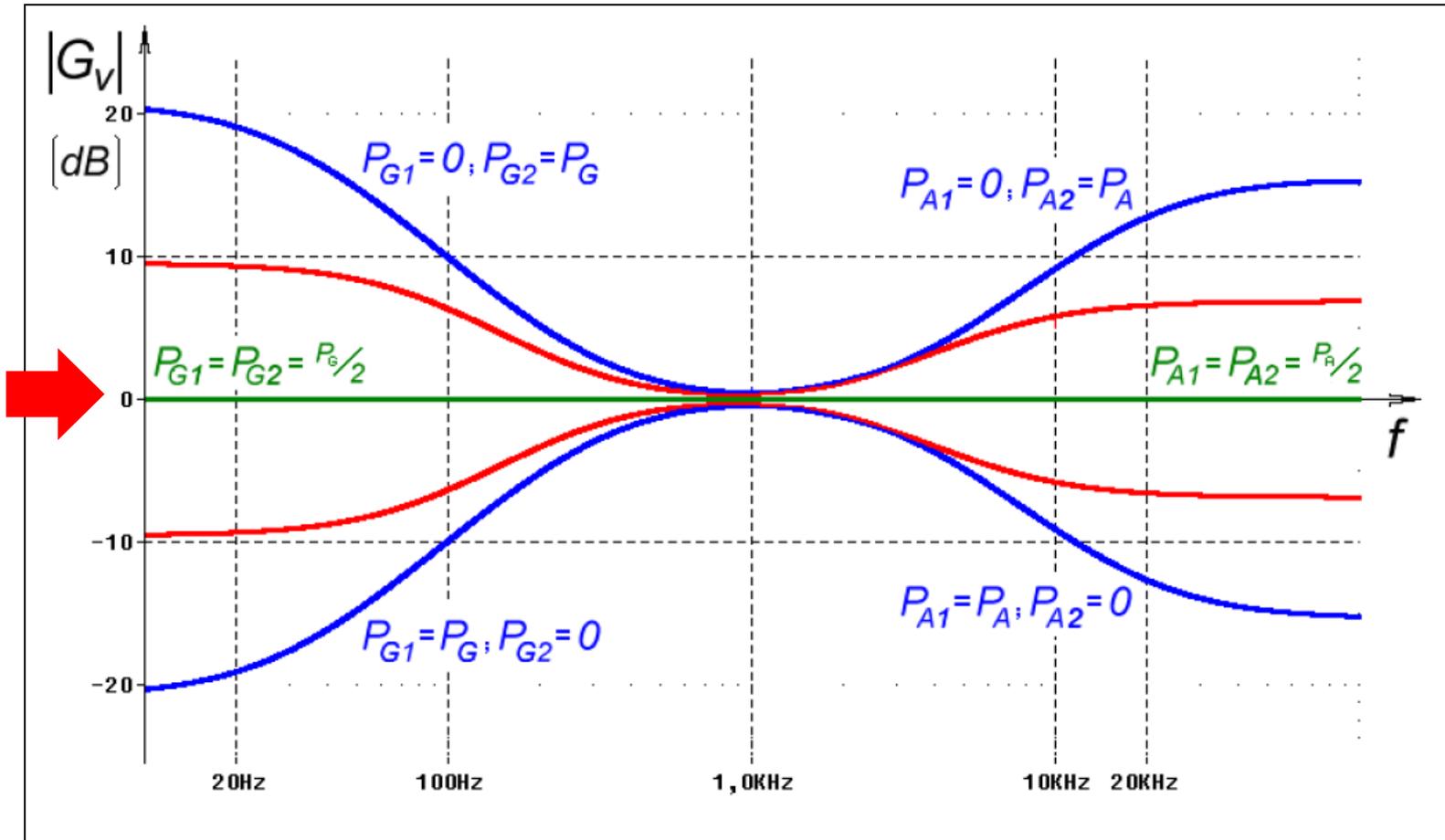


Se $S \rightarrow \infty$ ($f \rightarrow \infty$) $\Rightarrow G_v \rightarrow -1$ V/V, $\forall P_G$.

Se $S \rightarrow 0$ ($f \rightarrow 0$) $\Rightarrow G_v \rightarrow G_{v0} = -1$ V/V, $\forall P_G$.

Graves

Agudos



Nota-se que as curvas são perfeitamente simétricas em relação ao eixo horizontal, pois $G_{vmax} = 1/G_{vmin}$ e, portanto, em decibéis, $|G_{vmax}|(dB) = -|G_{vmin}|(dB)$.

Cálculo de C_G

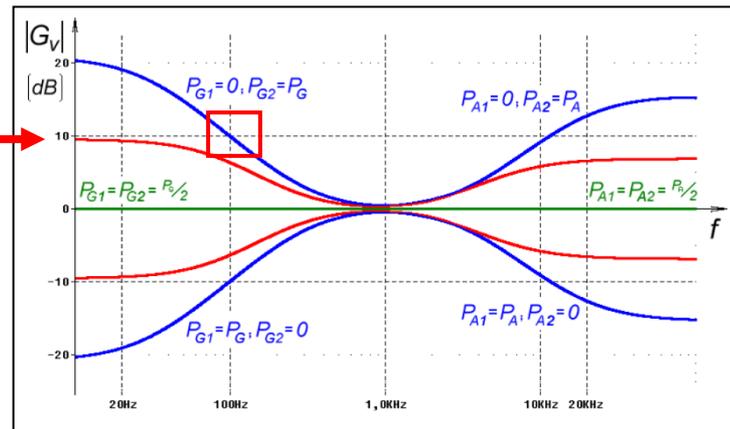
Em projetos como há mais incógnitas do que equações, normalmente escolhe-se o valor de P_G e de R e, posteriormente, calcula-se o valor adequado de C_G através da equação abaixo:

$$|G_v| = \sqrt{\frac{f^2 + z_G^2}{f^2 + p_G^2}} \quad |G_{vmax}| = \frac{R + P_G}{R} \quad p_G = \frac{1}{2\pi C_G P_G} \quad z_G = \frac{R + P_G}{2\pi C_G P_G R}$$

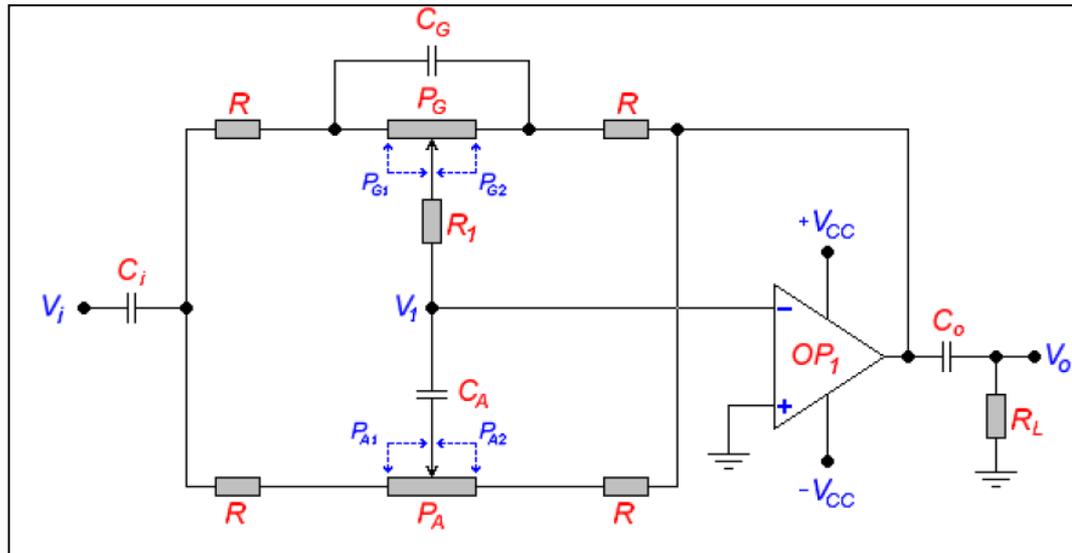


$$C_G = \sqrt{\frac{1}{(2\pi P_G)^2} \left[1 - \left(\frac{G_{vmax}}{G_v} \right)^2 \right] \frac{G_v^2}{(f^2 - G_v^2 f^2)}}$$

O capacitor C_G é calculado pela equação anterior para que $|G_{v(100Hz)}| \text{ (dB)} = 10 \text{ dB}$.



Controle de Agudos

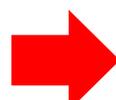


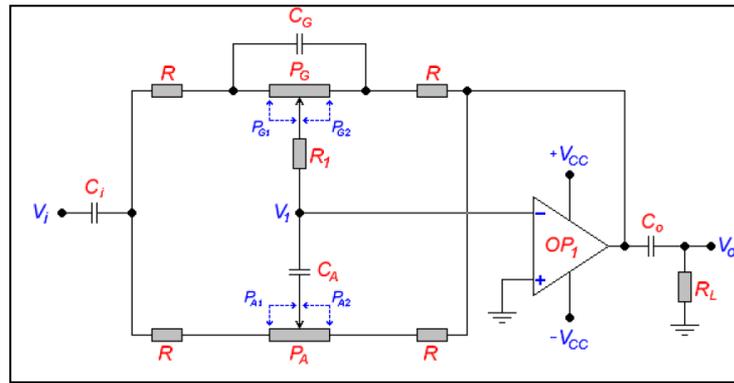
1

Para o cálculo da função de transferência do Equalizador na faixa de altas frequências deve-se equacionar o circuito considerando que o capacitor C_G nessa faixa já apresenta uma reatância muito baixa e pode ser considerado como um curto-circuito.

O resistor R_1 e os dois resistores R , da malha de *graves*, devem, no entanto, fazer parte do equacionamento.

$$G_v = - \frac{S + \frac{P_A + 2R}{C_A (P_{A1} + 2R + 2R_1) \times (P_{A2} + R)}}{S + \frac{P_A + 2R}{C_A (P_{A2} + 2R + 2R_1) \times (P_{A1} + R)}} \times \frac{(P_{A1} + 2R + 2R_1) \times (P_{A2} + R)}{(P_{A2} + 2R + 2R_1) \times (P_{A1} + R)} \quad [\text{V/V}]$$


{
 Se $S \rightarrow 0$ ($f \rightarrow 0$) $\Rightarrow G_v \rightarrow -1 \text{ V/V}, \forall P_{A1} \text{ e } \forall P_{A2}$.
 Se $S \rightarrow \infty$ ($f \rightarrow \infty$) $\Rightarrow G_v \rightarrow - \frac{(P_{A1} + 2R + 2R_1) \times (P_{A2} + R)}{(P_{A2} + 2R + 2R_1) \times (P_{A1} + R)} \quad [\text{V/V}]$.



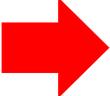
2

Máximo Reforço ($P_{A1}=0$ e $P_{A2}=P_A$):

$$G_v = - \frac{S + \frac{P_A + 2R}{2C_A(R + R_1) \times (P_A + R)}}{S + \frac{P_A + 2R}{C_A(P_A + 2R + 2R_1) \times R}} \times \frac{2(R + R_1) \times (P_A + R)}{(P_A + 2R + 2R_1) \times R} \quad [\text{V/V}]$$

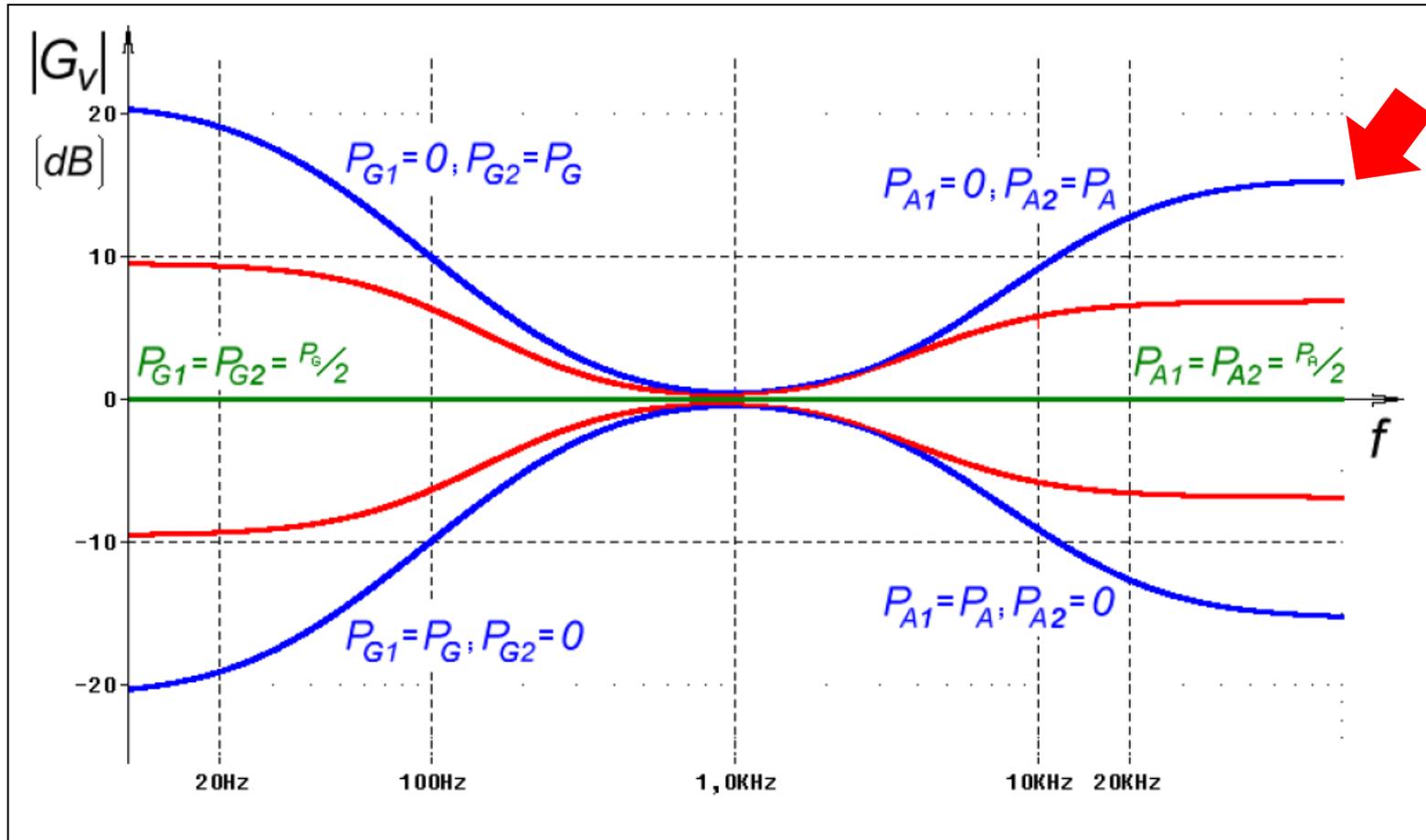
$$\left. \begin{array}{l} \text{Pólo: } p_A = \frac{P_A + 2R}{2\pi C_A (P_A + 2R + 2R_1) \times R} \quad [\text{Hz}] \\ \text{Zero: } z_A = \frac{P_A + 2R}{4\pi C_A (R + R_1) \times (P_A + R)} \quad [\text{Hz}] \end{array} \right\} \rightarrow p_A = |G_{v\max}| \times z_A$$

$$|G_v| = \sqrt{\frac{f^2 + z_A^2}{f^2 + p_A^2}} \times |G_{v\max}| \quad [\text{V/V}]$$

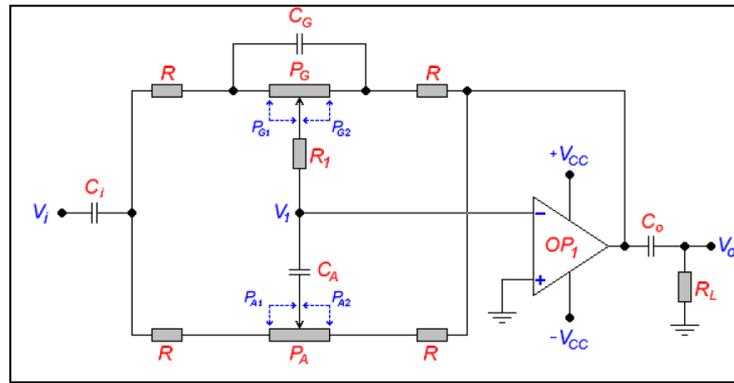

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Se } S \rightarrow 0 (f \rightarrow 0) \Rightarrow G_v \rightarrow -1 \text{ V/V}, \forall P_A. \\ \text{Se } S \rightarrow \infty (f \rightarrow \infty) \Rightarrow G_v \rightarrow G_{v_{\max}} = -\frac{2(R + R_1) \times (P_A + R)}{(P_A + 2R + 2R_1) \times R} \quad [\text{V/V}]. \end{array} \right.$$

Graves

Agudos



Nota-se que as curvas são perfeitamente simétricas em relação ao eixo horizontal, pois $G_{vmax} = 1/G_{vmin}$ e, portanto, em decibéis, $|G_{vmax}|(dB) = -|G_{vmin}|(dB)$.



2

Máxima Atenuação ($P_{A1}=P_A$ e $P_{A2}=0$):

$$G_v = - \frac{S + \frac{P_A + 2R}{C_A(P_A + 2R + 2R_1)} \times R}{S + \frac{P_A + 2R}{2C_A(R + R_1)} \times (P_A + R)} \times \frac{(P_A + 2R + 2R_1) \times R}{2(R + R_1) \times (P_A + R)} \quad [\text{V/V}]$$

{
}
Pólo: $p_A = \frac{P_A + 2R}{4\pi C_A(R + R_1) \times (P_A + R)} \quad [\text{Hz}] \quad \rightarrow \quad p_A = |G_{vmin}| \times z_A$

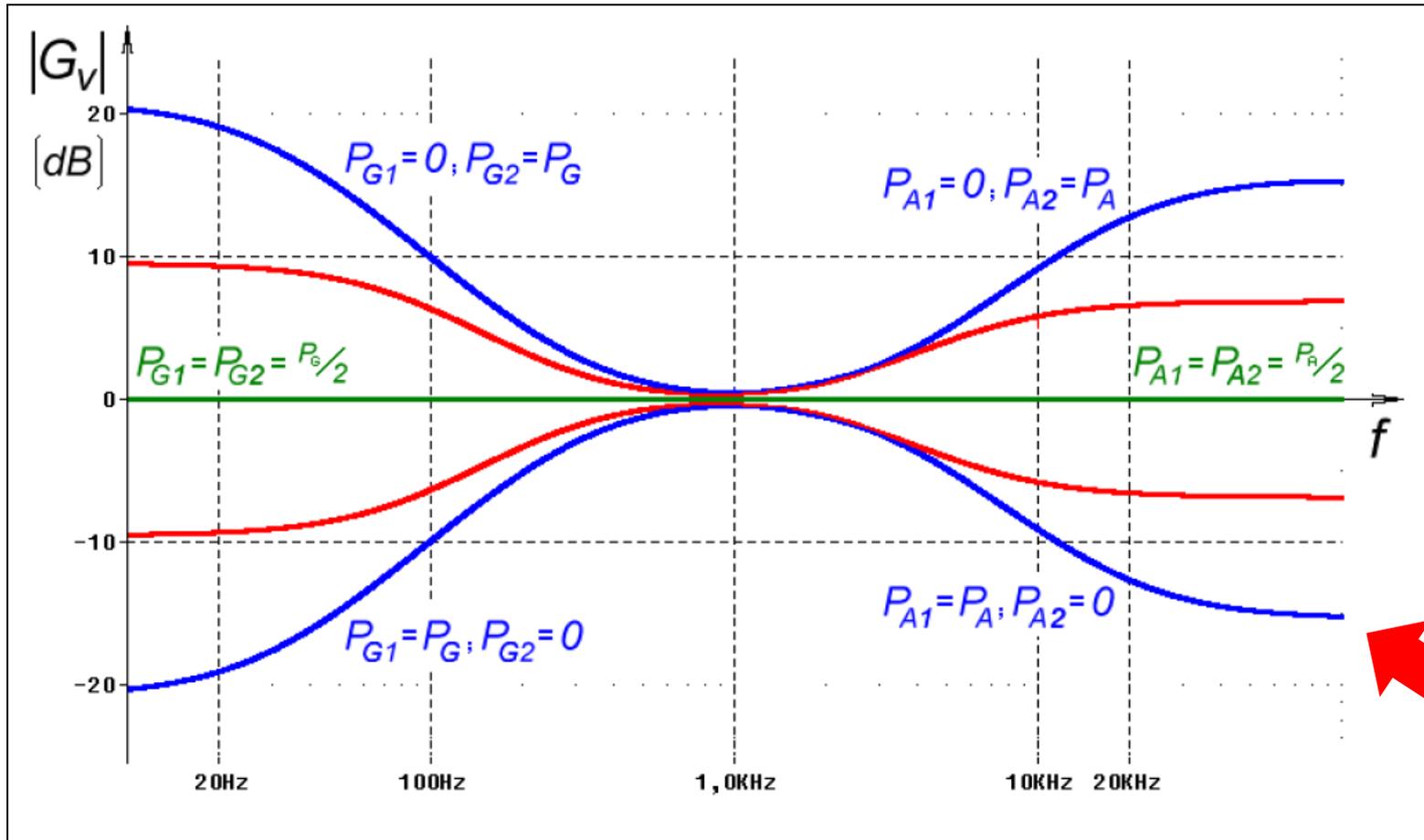
Zero: $z_A = \frac{P_A + 2R}{2\pi C_A(P_A + 2R + 2R_1) \times R} \quad [\text{Hz}]$

$$|G_v| = \sqrt{\frac{f^2 + z_A^2}{f^2 + p_A^2}} \times |G_{vmin}| \quad [\text{V/V}]$$


$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Se } S \rightarrow 0 (f \rightarrow 0) \Rightarrow G_v \rightarrow -1 \text{ V/V}, \forall P_A. \\ \text{Se } S \rightarrow \infty (f \rightarrow \infty) \Rightarrow G_v \rightarrow G_{v\min} = -\frac{(P_A + 2R + 2R_1) \times R}{2(R + R_1) \times (P_A + R)} \quad [\text{V/V}]. \end{array} \right.$$

Graves

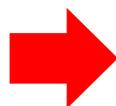
Agudos



Nota-se que as curvas são perfeitamente simétricas em relação ao eixo horizontal, pois $G_{vmax} = 1/G_{vmin}$ e, portanto, em decibéis, $|G_{vmax}|(dB) = - |G_{vmin}|(dB)$.

3 Resposta Plana ($P_{A1}=P_A/2$ e $P_{A2}=P_A/2$):

$$G_v = -1 \quad [\text{V/V}]$$

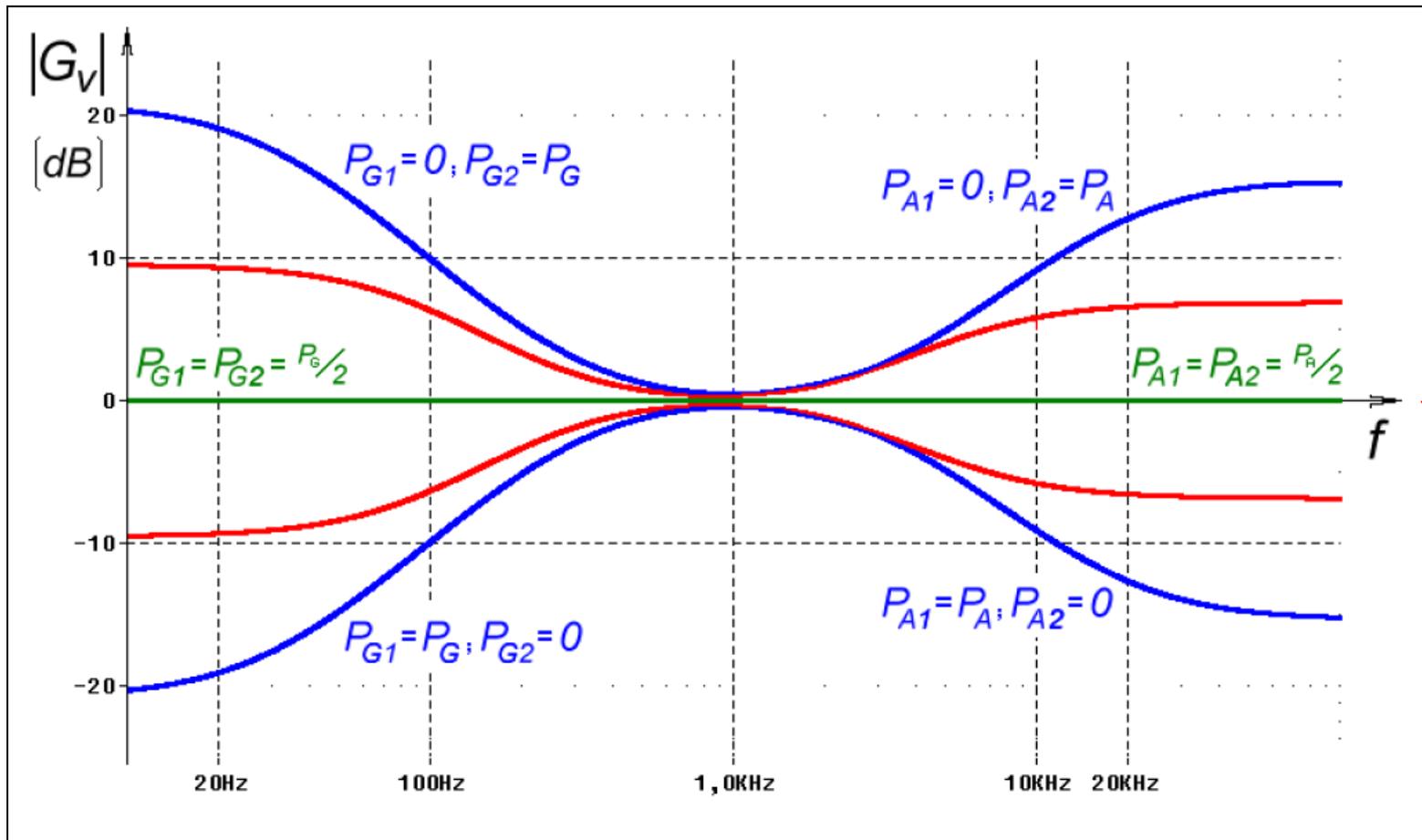


$$\text{Se } S \rightarrow 0 (f \rightarrow 0) \Rightarrow G_v \rightarrow -1 \text{ V/V}, \forall P_A.$$

$$\text{Se } S \rightarrow \infty (f \rightarrow \infty) \Rightarrow G_v \rightarrow G_{v0} = -1 \text{ V/V}, \forall P_A.$$

Graves

Agudos



Nota-se que as curvas são perfeitamente simétricas em relação ao eixo horizontal, pois $G_{vmax} = 1/G_{vmin}$ e, portanto, em decibéis, $|G_{vmax}|(dB) = -|G_{vmin}|(dB)$.

Cálculo de C_A

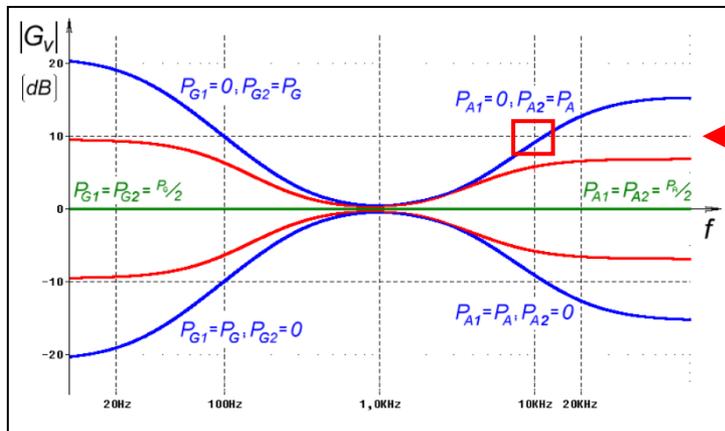
Em projetos como há mais incógnitas do que equações, normalmente escolhe-se o valor de P_G e de R e, posteriormente, calcula-se o valor adequado de C_A através da equação abaixo:

$$|G_v| = \sqrt{\frac{f^2 + z_A^2}{f^2 + p_A^2}} \times |G_{vmax}| \quad |G_{vmax}| = \frac{2(R + R_1)(P_A + R)}{(P_A + 2R + 2R_1)R}$$

$$p_A = \frac{P_A + 2R}{2\pi C_A(P_A + 2R + 2R_1)R} \quad z_A = \frac{P_A + 2R}{4\pi C_A(R + R_1)(P_A + R)}$$



$$C_A = \sqrt{\frac{(P_A + 2R)^2(G_v^2 - 1)}{[4\pi(R + R_1)(P_A + R)]^2 f^2 \left[1 - \left(\frac{G_v}{G_{vmax}}\right)^2\right]}}$$



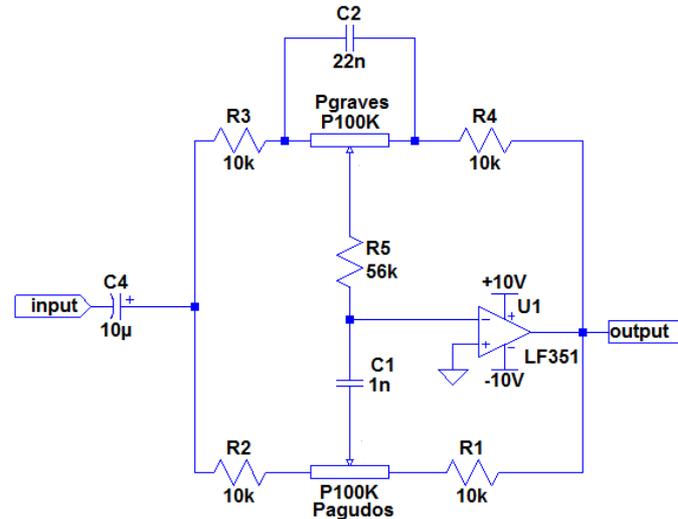
O capacitor C_A é calculado pela equação anterior para que $|G_{v(10KHz)}|(\text{dB}) = 10 \text{ dB}$.

Comentários

- 1 O circuito de controle de tonalidade analisado é um dos mais simples que podem ser implementados na prática. Usa um número reduzido de componentes e apresenta um desempenho aceitável.
- 2 Percebe-se que esse circuito não apresenta simetria de transferência em relação ao eixo de $f = 1 \text{ kHz}$, isto é, o máximo reforço de *agudos* é inferior ao máximo reforço de *graves*.
- 3 O importante é que, em torno de $f = 1 \text{ kHz}$, o ganho, em qualquer situação, é muito pouco afetado pelo circuito, variando em uma faixa máxima de $|G_u(1\text{kHz})| \text{ (dB)} = \pm 1 \text{ dB}$.
- 4 Os capacitores de acoplamento de entrada e de saída devem ser de baixa reatância em 20 Hz , ou seja, $C_i \geq 10 \text{ uF}$ e $C_o \geq 10 \text{ uF}$.

**Simulação
No LTSPice**

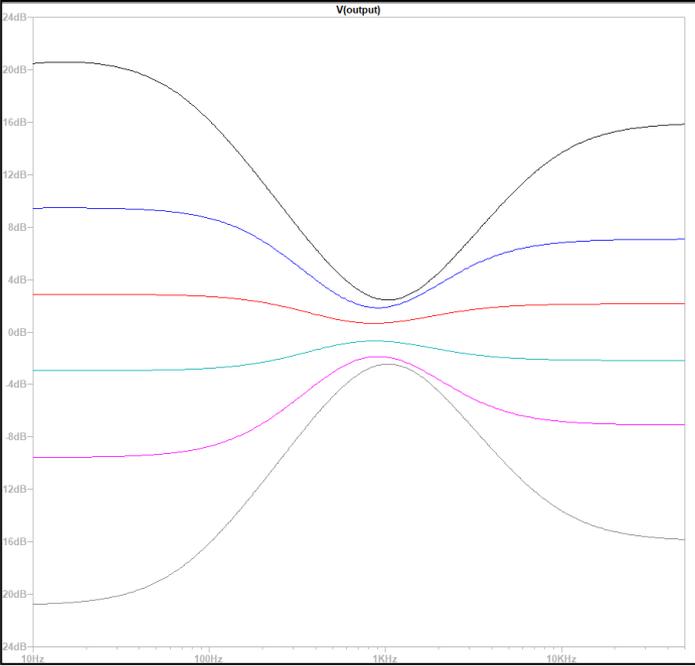
Equalizador Baxandall



Equalizador Baxandall (esquemático LTSPice)

- 1 Utilizar os componentes “p100ka” para o potenciômetro de agudos e “p100kg” para o potenciômetro de graves. Ambos são definidos pelo parâmetro **a** que pode ser definido ou excursionado pelos comandos do simulador.
- 2 Variar o potenciômetro de graves e de agudos para determinar o ganho em uma varredura em frequência de 100Hz à 50KHz.
- 3 Com um sinal de 1kHz realize excursões nos dois potenciômetros e verifique o ganho para essa frequência em função dos ajustes.
- 4 Fazer a análise do circuito com uma entrada real de áudio gerando uma saída real de áudio.

Resultado



Varredura em frequência de 100Hz à 50KHz