

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



PRÉ-AMPLIFICADOR PARA ESTUDO DE ACÚSTICA

Aluno: Rodrigo Luiz Carniato Francalacci
Orientador: Newton Cesário Frateschi

RESUMO

Construímos aqui um pré-amplificador direcionado para o estudo de acústica. Para que sirva para este fim, o equipamento tem que ter certas características como: linearidade, fidelidade espectral e sensibilidade.

Trabalhamos o conceito de pré-amplificador, definindo as suas funções e mostrando como ele trata um sinal qualquer para que possa ser utilizado por um dispositivo subsequente tal como um amplificador por exemplo. Em seguida foram definidos os elementos que caracterizam a qualidade do dispositivo. Estudamos a teoria sobre sinal analógico, e sua decomposição espectral através da série de Fourier. Posteriormente montamos um circuito pré-amplificador, escolhendo seus componentes de forma a se adequar a motivação inicial respondendo as características necessárias. Em seguida testamos o circuito com a utilização de um osciloscópio com analisador de espectro, a partir daí construímos gráficos e tabelas e determinamos por fim que o circuito satisfaz os fatores de qualidade.

1 .CONCEITO DE PRÉ-AMPLIFICADOR

Podendo operar com sinais vindos de fontes de diversas impedâncias, fornece uma saída de intensidade suficiente para excitar a maioria dos amplificadores comuns. Este pré-amplificador possui características para operar com microfones condensadores, magnéticos, assim como fonocaptadores de diversos tipos. Os amplificadores comuns são circuitos que necessitam de um sinal de determinada intensidade mínima para operarem satisfatoriamente. Bem como no caso de um instrumento de medida de sinal em um estudo de acústica. Essa intensidade de sinal depende fundamentalmente de dois fatores: da tensão de saída que a fonte de sinal fornece e de sua impedância.

É preciso então que a fonte de sinal, um microfone, por exemplo, forneça não só a intensidade mínima de um sinal que o amplificador precisa como também que tenha uma impedância que combine com a entrada do amplificador ou dispositivo de interesse.

Se ligarmos um microfone de impedância em torno de 200 ohms e que fornece uma saída de alguns milivolts na entrada de um amplificador que possui uma impedância de 100 Kohms e que precisa de pelo menos 100mV para ser excitado, o resultado é que, mesmo com todo o volume aberto, o som que teremos na saída será muito fraco. Por esse motivo os amplificadores só funcionam satisfatoriamente quando alimentado com fontes de sinal intensos.

É neste ponto que entra em ação o pré-amplificador, adaptando as características da fonte de sinal as características da entrada do amplificador. O sinal pode ser transferido com melhor rendimento.

O pré-amplificador também aumenta a intensidade do sinal vindo da fonte de modo que o mesmo possa excitar convenientemente o amplificador obtendo assim toda a sua potencia de saída quando isso for necessário. Este equipamento apenas eleva o nível do sinal (aumenta a voltagem do sinal), mas não confere potência ao mesmo, ou seja, a saída de um pré-amplificador não é indicada para uma conexão direta à autofalantes, por exemplo, que possuem em torno de 4 ohms. Este nível de sinal apenas garante uma entrada de valor considerável, para que o mesmo se destaque do ruído presente em qualquer captação elétrica. O pré-amplificador visa qualidade e não quantidade.

Para ilustrar, vamos supor uma situação hipotética e simplificada, onde tenhamos dois circuitos distintos como mostram as figuras 1a e 1b. Nos circuitos a DDP 0.1 V volts representa um sinal qualquer, oriundo de um microfone. "R1" representa a impedância do microfone, e "R2" representa a impedância do pré-amplificador. A corrente é denotada por "i". O valor V medido pelo voltímetro seria a quantidade de sinal que entra no pré-amplificador. Note que quanto maior "R2", mais sinal entra no pré-amplificador.

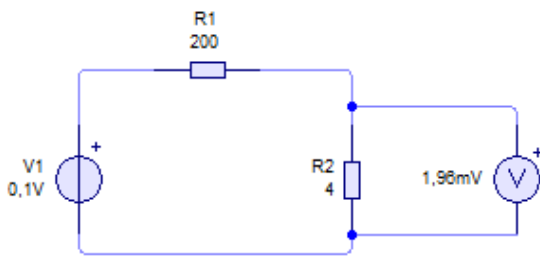


Figura 1a) Perceba que quando a resistência R2 que representa a impedância do pré-amplificador é muito menor que a impedância R1 do microfone, quase sinal nenhum é medido pelo voltímetro. Ou seja, o pré-amplificador recebe muito pouco do sinal.

Considere as medidas das resistências em unidade de ohms.

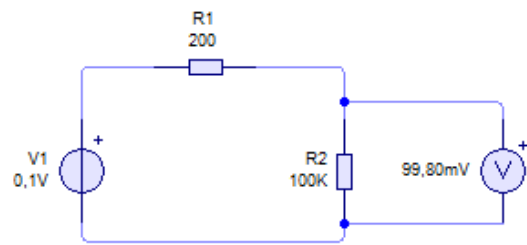


Figura 1b) Agora a impedância R2 é muito maior do que a R1, e notamos que quase todo o sinal é medido pelo voltímetro.

R1 em ohms e R2 em Kohms.

No caso de um pré-amplificador estamos interessados no esquema da figura 1b), pois é lá que temos a maior porcentagem de sinal transmitido. E perceba também que neste caso R2= 100kohms, que é aproximadamente o valor da impedância de entrada dos amplificadores. E isso não é coincidência. Podemos demonstrar que o sinal é transmitido com máxima potência para um amplificador, quando o valor da impedância de saída do pré-amplificador é igual ao valor da impedância de entrada do amplificador.

Considere a partir de agora que R1 representa a impedância do pré-amplificador, e, R2 a do amplificador.

A potência máxima transferida para R2 (entrada do amplificador) também pode ser calculada:

$$i = \frac{V_1}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$P = Vi \quad (2)$$

$$P = (V_1 - R_1 i) \cdot \left(\frac{V_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (3)$$

$$P = \left(V_1 - R_1 \cdot \left(\frac{V_1}{R_1 + R_2} \right) \right) \cdot \left(\frac{V_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dP}{dR_2} = 1 + \frac{2 \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

$$P_{\max} \Rightarrow \frac{dP}{dR_2} = 0 \quad (6)$$

$$1 + \frac{2 \cdot R_1}{R_1 + R_2} = 0 \quad (7)$$

$$R_1 = R_2 \quad (8)$$

Teremos uma transferência máxima de potencia para o amplificador, pois houve um casamento de impedâncias.

Assim, resumidamente, um pré-amplificador transforma um sinal de baixa impedância para um sinal de alta impedância.

Alguns fatores podem ser utilizados para caracterizar a qualidade do pré-amplificador:

Sensibilidade: Um pré-amplificador deve ter uma sensibilidade alta, ou seja, o ruído gerado pelo próprio pré-amplificador deve ser muito pequeno em relação ao sinal de entrada. Em outras palavras o circuito deve ser construído de tal forma a gerar um ruído muito menor do que o sinal gerado pelo microfone e pela a amplificação. A amplitude do sinal de ruído gerado pelo circuito cria uma espécie de “chão” que define a sua sensibilidade. Quando o sinal de entrada está perto desse “chão” então nosso pré-amplificador deixa de ser sensível a ele. A sensibilidade, portanto, é ditada pela amplitude do ruído gerado pelo circuito. Quanto melhor a sensibilidade melhor "relação sinal/ruído".

O parâmetro "relação sinal/ruído" (signal/noise ratio) indica a diferença entre o nível mais alto de sinal que o equipamento pode operar e o nível de ruído existente no aparelho (normalmente o ruído é de origem térmica ou magnética). Os níveis são medidos em dB (decibel), que é uma medida relativa (baseada numa relação entre dois valores). No caso da relação sinal/ruído, mede-se a intensidade do ruído presente na saída do equipamento, sem sinal na entrada, e depois a intensidade do maior sinal que pode ser aplicado sem distorção. A diferença entre eles é mostrada em decibéis. A relação sinal/ruído geralmente é adotada para indicar também a faixa dinâmica (dynamics range) do equipamento, ou seja, a gama de intensidades que podem ocorrer no mesmo, e que vai desde o menor sinal (que está próximo do "piso" do ruído) até o máximo sinal sem distorção.

Linearidade: Diz respeito de como o circuito se comporta para sinais de entrada com diferentes amplitudes. A amplificação de um amplificador linear não deve depender da amplitude. Todo amplificador tem uma faixa de linearidade. Fora dela, a dependência com a amplitude leva à mistura de frequências e à distorção.

Fidelidade Espectral : Significa que o pré-amplificador tem uma resposta igual para sinais de todo o espectro, ou seja, o sinal que sai tem proporcionalmente a mesma decomposição espectral do sinal que entra. Através de um analisador de espectro de frequências podemos ver se isso está realmente acontecendo. Algumas vezes a passagem do sinal pelo pré-amplificador pode criar distorções harmônicas no sinal.

Fidelidade Espectral Dinâmica: Seria a fidelidade espectral de um sinal variando no tempo.

2. O SINAL ANALÓGICO E SUA DECOMPOSIÇÃO ESPECTRAL

2.a) Definição de sinal analógico

Um sinal analógico é aquele que varia no tempo de forma contínua. Como por exemplo o sinal elétrico gerado por um microfone.

Os fenômenos que nos rodeiam são quase todos contínuos, isso que dizer que, quando esses fenômenos são quantificáveis, eles mudam de valor, sem descontinuidade. Assim, quando queremos reproduzir os valores do fenômeno, devemos gravá-lo em um suporte para poder interpretá-lo, a fim de reproduzir o fenômeno original, da forma mais exata possível. Quando o suporte físico pode assumir valores contínuos, falamos de gravação analógica. Por exemplo, um cassete de áudio, um vídeo cassete ou um LP são suportes analógicos. A representação de um sinal analógico é uma curva, enquanto que um sinal digital pode ser visto como um histograma.

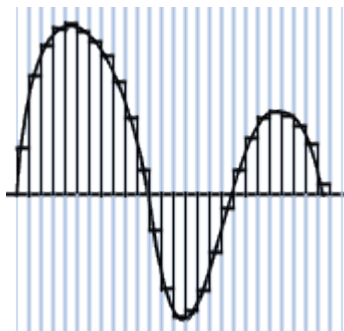


Figura 2: o Sinal analógico é representado pela linha contínua enquanto que o sinal digital é discretamente representado pelos pontos.

2.b) Das Ondas Sonoras aos Sinais Eléctricos

Primeiro, vamo-nos concentrar na passagem de sonoro para eléctrico e na recuperação final para sonoro. Os equipamentos que as executam designam-se genericamente de **transdutores**. Está-se a falar, evidentemente, d um microfone. No caso da recuperação basta que exista um circuito electromagnético que, pela passagem de corrente, produza afastamentos e aproximações de uma membrana. Estes movimentos, por sua vez, produzem as perturbações sonoras equivalentes. Está-se agora a falar dos altifalantes. Como pode ver as coisas são muito parecidas. Se imaginarmos que um altifalante (ou uma membrana do microfone) está na sua posição de repouso num certo ponto, as perturbações provocam que a membrana se desloque para trás e para a frente desse ponto. Se monitorássemos todas essas posições ao longo do tempo, poderíamos traçá-las num gráfico em função do tempo (admitindo, por exemplo, que afastamentos para um lado do ponto de repouso são negativos, e para o outro são positivos). A Figura 3 representa uma possível hipótese. A primeira observação da Figura 3 é que, se quiséssemos representar esta linha por uma função do tempo, teríamos uma tarefa muito complicada, pois ela não se assemelha a nenhuma função matemática simples conhecida (como seno, logaritmo, exponencial, etc.). A seu tempo vamo-nos preocupar com o assunto de como representar funções destas... Admitindo que a relação entre os sinais eléctricos e os movimentos das membranas é de proporcionalidade directa, podemos aceitar que afinal, a linha da Figura 3 também representa o sinal eléctrico correspondente à perturbação sonora do emissor, aparte um fator de escala. Podemos encará-la como o valor da tensão, ou da corrente. Então, a nossa tarefa está terminada, pois basta enviar esse sinal eléctrico por uma linha (ou pelo ar), o receptor apanha-o e envia-o para o altifalante.

Infelizmente, a transmissão provoca sempre alterações no sinal, tornando-o, por vezes irrecuperável. Os motivos principais são o ruído, as interferências e as características do meio de transmissão (espaço, metal, ou fibra óptica).

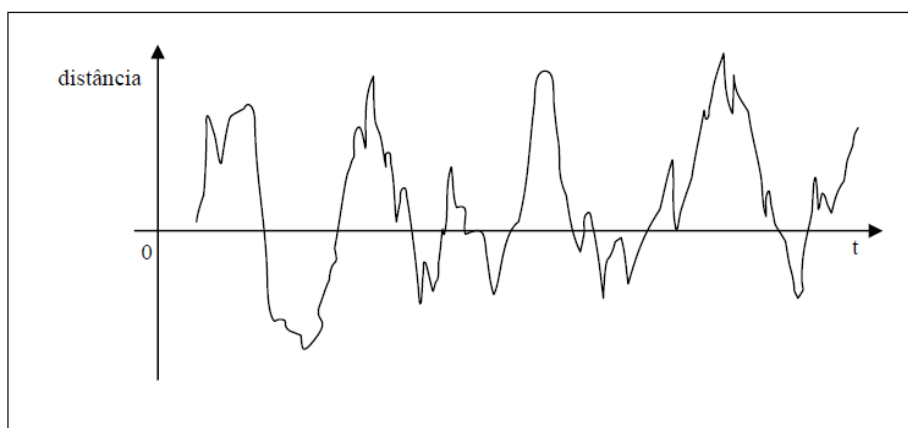


Figura 3

Representação da posição da membrana de um altifalante ao longo do tempo, em relação ao seu ponto de repouso.

Os meios de transmissão eléctricos (se estivermos a falar de um fio metálico) ou electromagnéticos (se estivermos a falar do espaço) têm também fenómenos do “mesmo tipo” que vão afetar a progressão do sinal:

(1) Vai existir ruído eléctrico e electromagnético. Por exemplo, perto de uma central de produção de energia, ou de um posto de transformação eléctrico. É importante saber qual a relação que existe entre a potência do sinal e a do ruído.

(2) Vai existir atenuação. Do mesmo modo que as perturbações sonoras perdem potência com a distância, também a potência do sinal eléctrico vai sendo cada vez menor com a distância. O mais grave é que o sinal é afectado de maneiras diferentes nas várias frequências que possui. Isto é, certas

frequências perdem mais potência com a distância do que outras.

2.c) Descrição de sinais nos domínios do tempo e da frequência

Sinais estariam completamente descritos se conheçermos:

-> a frequência,

-> a amplitude máxima e

-> a fase

A isto chama-se a **descrição do sinal no domínio da frequência**, ou **espectro do sinal**. É uma descrição em função da variável frequência. **Descrições dos sinais no domínio do tempo** mostram o valor da amplitude do sinal ao longo do tempo. Por exemplo, a descrição gráfica do sinal da Figura 4 no domínio da frequência é representada por **dois gráficos**: um para a **frequência** e outro para a **fase**, como mostra a Figura 5. O primeiro gráfico mostra que o sinal tem apenas uma frequência, a f_0 , e a amplitude é A (a amplitude máxima do coseno da Figura 4). O segundo gráfico mostra que na frequência f_0 , (a única que o sinal tem) a fase vale θ . Ao primeiro gráfico chama-se a **representação de amplitude** (ou **espectro de amplitude**) e ao segundo a **representação de fase** (ou **espectro de fase**).

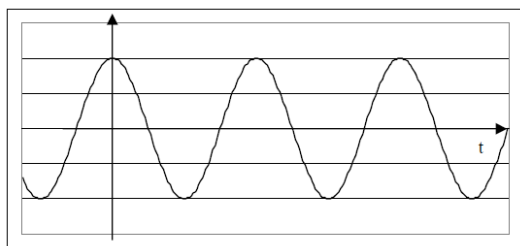


Figura 4
Representação da posição da membrana de um altifalante ao longo do tempo, em relação ao seu ponto de repouso,

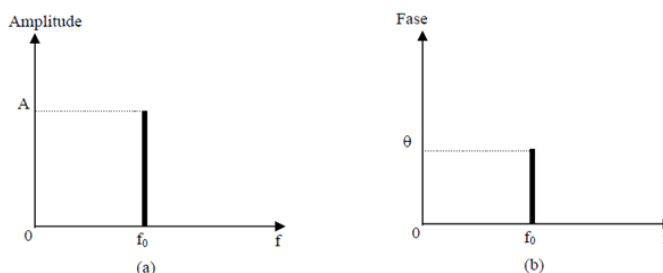


Figura 4
Representação do espectro do sinal (a) representação da amplitude; (b) representação da fase.

Na Figura 6 estão representadas duas notas musicais produzidas por geradores de frequência, uma mais grave e outra mais aguda. Para simplificar, ambas têm a mesma amplitude, e a mesma fase, diferente de zero.

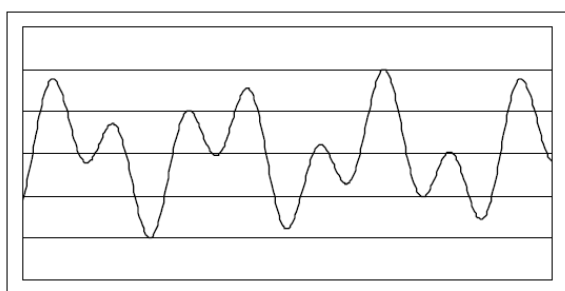


Figura 6
Representação de duas ondas com frequências f_0 e f_1 .

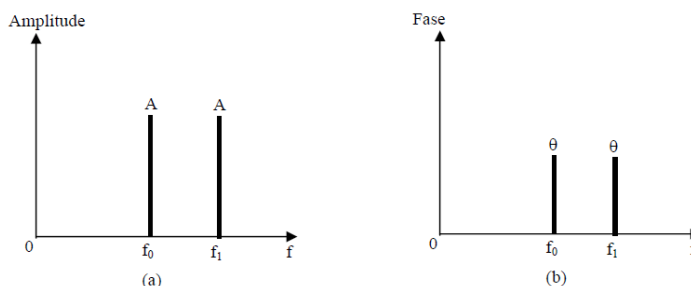


Figura 7
Espectro das duas ondas cuja representação no tempo está mostrada na Figura 6.

A função da Figura 6 parece complicada. No entanto são apenas duas frequências puras. Se as representássemos pelo seu espectro seria apenas como está mostrado na Figura 7. Como se pode ver, mesmo que fosse apenas usado para as representações de funções, o espectro pode ser uma alternativa muito interessante. Mas a importância do espectro excede largamente a representação de funções, como se irá ver.

2.d) Decomposição espectral e série de Fourier

Esta seção é um resumo da referencia bibliográfica número "1".

O objetivo da análise de Fourier é conseguir representar uma função na variável tempo usando outra base que não os eixos cartesianos. A nova base é constituída por funções seno e cosseno. O processo inverso a esse já foi descrito. Partindo-se do conhecimento que um cosseno gera uma frequência pura e uma linha com certa amplitude no espectro de amplitude, podia-se pensar que um espectro contínuo como o da Figura 6 e da Figura 7 pudesse ser o limite da existência de infinitas frequências puras e o sinal no tempo seria assim uma soma de infinitos componentes cossenos em que cada componente teria o peso do valor da amplitude do espectro de amplitude. O espectro de fase iria determinar o valor da fase de cada cosseno.

Outra maneira de tentar perceber o problema da representação é o que acontece com a televisão em cores. Cada ponto do écran é representado pela intensidade de vermelho, verde e azul que a sua cor tem. Neste caso as bases não são infinitas, são três, nem são funções, mas de qualquer modo uma certa cor é transformada em três pesos com este processo, como mostra a seguinte expressão

$$cor = p_r \text{vermelho} + p_g \text{verde} + p_b \text{azul} \quad (1)$$

se soubermos os três pesos, p_r , p_g e p_b saberemos a cor. Se soubermos a cor poderemos determinar os pesos.

De um modo simplista, a grande diferença quando as bases são funções é que podemos pensar nelas como funções de outra variável, a frequência, e os pesos dão o valor da função nesse novo espaço de variáveis. Vai-se ver primeiro o caso de funções periódicas, que têm um espectro discreto.

Agora, usando os senos e cossenos, vamos nos ater a descrição espectral feita por uma expansão em série de Fourier. Seja $g_n(t)$ uma função periódica com o período T_0 . Assim, tem-se que $g_p(t) = g_p(t+nT_0)$ com n inteiro.

A representação desta função usando uma soma infinita de senos e cossenos, a série de Fourier, tem a representação genérica mostrada na Eq. 2. Os coeficientes a_n e b_n da Eq. 2 representam as amplitudes (os pesos) não conhecidos dos termos seno e cosseno. Para cada função em particular é preciso achar os valores dessas amplitudes, tal como para o caso da televisão em cores. A quantidade n/T_0 representa a *harmónica* de ordem n da *frequência fundamental* (ou primeira harmónica) $f_0=1/T_0$.

Cada seno e cosseno da Eq. 2 tem o nome de *função base*. Vê-se já outra diferença relativamente ao exemplo da televisão em cores. Se no caso da televisão o vermelho, o verde e o azul eram cores constantes e fixas, as bases neste caso começam com a frequência da primeira harmónica, $f_0=1/T_0$, em que T_0 é o período da função periódica, e vão tomando valores múltiplos desses, n/T_0 (com $n = 2, 3, 4 \dots$). Assim, para funções periódicas com períodos diferentes vão existir funções base que oscilam (pois são senos e cossenos) com frequências diferentes.

$$g_p(t) = a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) \right] \quad (2)$$

As funções base podem formar, ou não, um *conjunto ortogonal*. Entende-se por isto que o seu produto cruzado é nulo. Ora, as funções seno e cosseno formam um conjunto ortogonal no intervalo do seu período, T_0 . Assim, o seu produto cruzado é nulo como mostram as três equações seguintes. A vantagem desta propriedade é que vão simplificar grandemente os cálculos na determinação dos coeficientes dos senos e cossenos.

$$\int_{-T_0/2}^{T_0/2} \cos\left(\frac{2\pi mt}{T_0}\right) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) dt = \begin{cases} T_0/2 & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases} \quad (3)$$

$$\int_{-T_0/2}^{T_0/2} \cos\left(\frac{2\pi mt}{T_0}\right) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) dt = 0 \quad \text{para todo o } m \text{ e } n \quad (4)$$

$$\int_{-T_0/2}^{T_0/2} \sin\left(\frac{2\pi mt}{T_0}\right) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) dt = \begin{cases} T_0/2 & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases} \quad (5)$$

A tarefa então, é saber como calcular os coeficientes correspondentes a um dado sinal. Para se calcular o coeficiente a_0 , integram-se ambos os lados da Eq. 2 no período. O integral de um seno, ou de um cosseno, no período completo é nulo, pelo que todos os termos do somatório se anulam. a_0 tem, assim, o valor dado pela Eq. 6. Como se pode ver por esta equação, a_0 não é mais do que o *valor médio* do sinal periódico $g_p(t)$ no período T_0 .

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} g_p(t) dt \quad (6)$$

Para determinar os coeficientes a_n , multiplicam-se ambos os lados da Eq. 2 por $\cos(2\pi nt/T_0)$ e integram-se no período, tal como para a_0 , entre o intervalo $-T_0/2$ e $T_0/2$. Usando as Eq. 3 e 4 muitos dos termos ficam nulos, e tem-se para a_n o seguinte valor.

$$a_n = \int_{-T_0/2}^{T_0/2} g_p(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) dt \quad n=1,2,K \quad (7)$$

De um modo idêntico se calcula o valor de b_n . Multiplica-se agora pelo seno e depois integra-se e usasse o facto das funções bases serem um conjunto ortogonal no espaço de integração que é igual ao período.

$$b_n = \int_{-T_0/2}^{T_0/2} g_p(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T_0}\right) dt \quad n=1,2,K \quad (8)$$

Portanto, se tivermos a função $g_p(t)$ usamos as expressões 6, 7 e 8 e calculamos os coeficientes. Para aplicar a representação em série de Fourier é suficiente que dentro do intervalo de $-T_0/2$ e $T_0/2$ a função $g_o(t)$ satisfaça as seguintes condições:

1. A função $g_o(t)$ toma valores únicos para t .
2. A função $g_o(t)$ tem um número finito de descontinuidades
3. A função $g_o(t)$ tem um número finito de máximos e de mínimos
4. A função $g_o(t)$ é absolutamente integrável, isto é

$$\int_{-T_0/2}^{T_0/2} |g_p(t)| dt < \infty$$

em que é assumido que $g_o(t)$ possa ser complexa. Essas condições são satisfeitas pelos nossos sinais elétricos em estudo.

2.e) Decomposição espectral dinâmica

Teremos também que estudar como responde o pré-amplificador quando introduzimos um sinal que varia com o tempo. Para tal, temos que analisar a decomposição espectral do sinal em intervalos de instantes ΔT . Para achar um valor adequado de ΔT , temos que definir o espectro que será analisado. Neste caso estaremos estudando frequências sonoras audíveis, e logo o espectro está entre 20 Hz e 20000 Hz. O período da menor frequência é de 1/20 segundos, todos os outros períodos são menores. De forma que um $\Delta T = 1s$ parece ser adequando. Com amostragens de 1 s é possível termos a resolução de 1 Hz no espectro.

3. MATERIAL

Os materiais utilizados foram:

- ➔ Os componentes do circuito, que serão apresentados em detalhes na sessão 4.
- ➔ Um protoboard.
- ➔ Um gerador de sinal como mostrado na figura 8.
- ➔ Um osciloscópio com analisador de espectro.



Figura 8 – Gerador de sinal.

- ➔ Multímetro
- ➔ Equipamentos para montagem na caixa, que serão apresentados em detalhes na sessão 6.

4. O CIRCUITO PRÉ-AMPLIFICADOR

O circuito construído está ilustrado na figura 9.

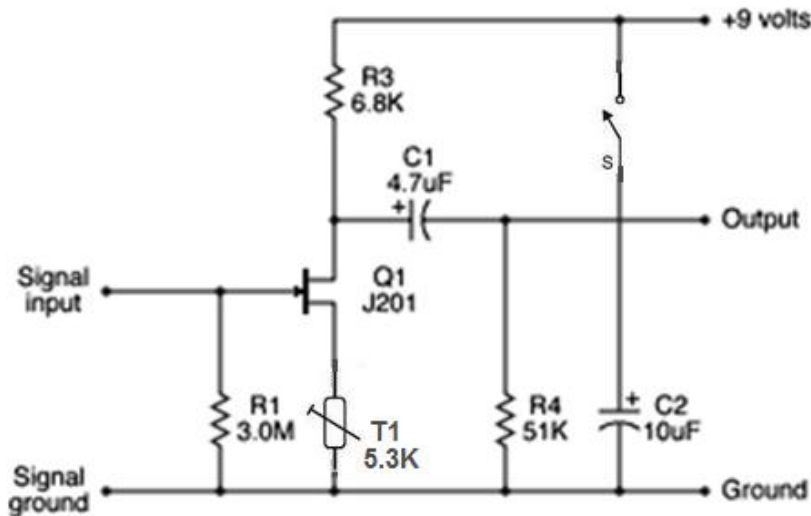


Figura 9 – Esquema do circuito pré amplificador.

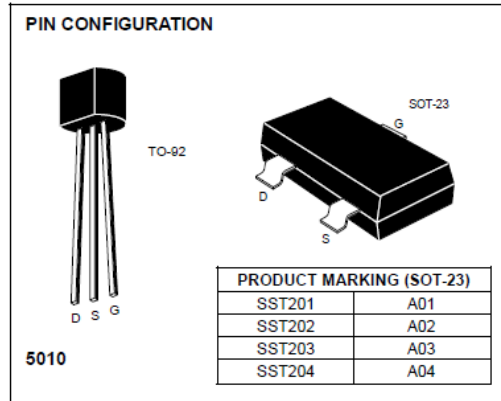
Abaixo consta uma breve descrição dos componentes do circuito:

Q1 – J201 N-channel JFET. Cujas características constam abaixo.

J201 – J204 / SST201 – SST204

FEATURES

- High Input Impedance
- Low I_{GSS}



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Gate-Source or Gate-Drain Voltage	.....	-40V
Gate Current	.....	50mA
Storage Temperature Range	.....	-55°C to $+150^\circ\text{C}$
Operating Temperature Range	.....	-55°C to $+135^\circ\text{C}$
Lead Temperature (Soldering, 10sec)	.....	$+300^\circ\text{C}$
Power Dissipation	.....	360mW
Derate above 25°C}$	.....	3.3\text{mW}/^\circ\text{C}$

NOTE: Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ORDERING INFORMATION

Part	Package	Temperature Range
J201-204	Plastic TO-92	-55°C to $+135^\circ\text{C}$
SST201-204	Plastic SOT-23	-55°C to $+135^\circ\text{C}$

For Sorted Chips in Carriers see 2N4338 series.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

SYMBOL	PARAMETER	201			202			203			204			UNITS	TEST CONDITIONS		
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX				
I_{GSS}	Gate Reverse Current (Note 1)			-100			-100			-100			-100	pA	$V_{DS} = 0, V_{GS} = -20V$		
$V_{GS(off)}$	Gate-Source Cutoff Voltage	-0.3		-1.5	-0.8		-4.0	-2.0		-10.0	-0.3		-2.0	V	$V_{DS} = 20V, I_D = 10nA$		
BV_{GSS}	Gate-Source Breakdown Voltage	-40			-40			-40			-25				$V_{DS} = 0, I_G = -1\mu A$		
I_{DSS}	Saturation Drain Current (Note 2)	0.2		1.0	0.9		4.5	4.0		20	0.2		1.2	3.0	mA	$V_{DS} = 20V, V_{GS} = 0$	
I_G	Gate Current (Note 1)		-10			-10			-10			-10			pA	$V_{DS} = 20V, I_D = I_{DSS(min)}$	
g_{fs}	Common-Source Forward Transconductance (Note 2)	500			1,000			1,500			500	1,500			μS	$V_{DS} = 20V, V_{GS} = 0$	
g_{os}	Common-Source Output Conductance		1			3.5			10				2.5			$f = 1kHz$	
C_{iss}	Common-Source Input Capacitance		4			4			4				4			pF	$f = 1MHz$ (Note 3)
C_{rss}	Common-Source Reverse Transfer Capacitance		1			1			1				1				$f = 1MHz$ (Note 3)
E_n	Equivalent Short-Circuit Input Noise Voltage		5			5			5				10			$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$	$V_{DS} = 10V, V_{GS} = 0$

NOTES: 1. Approximately doubles for every 10°C increase in T_A .
 2. Pulse test duration = 2ms.
 3. For design reference only, not 100% tested.

Foi escolhido esse transistor por ter uma alta impedância de entrada e baixo ruído.

R1 – 3.0M ohm ¼-watt 5% resistor. Esta resistência garante que o sinal vá quase todo para o transistor.

T1 – 5.3K ohm ¼-watt 5% trimpot. Necessário para controlar o ganho

R3 – 6.8K ohm ¼-watt 5% resistor. Regula a tensão que segue para o transistor.

C1 – 4.7 uF capacitor eletrolítico. Associado com a resistência R4 funciona como um filtro passa alta, para filtrar sinais subgraves. A frequência de corte é dada por $f_{corte} = 1/R_4C_1 = 1/(4.7\mu F) \cdot (51Kohm) = 4.17 \text{ Hz}$.

R4 – 51K ohm ¼-watt 5% resistor. Função já descrita em C1.

C2 – 10uF capacitor eletrolítico. Protege o circuito da fonte de tensão (bateria).

Bateria de 9 Voltz – Utilizamos bateria para evitar ruídos vindo da rede elétrica pois transformador de alimentação irradiam com grande intensidade sinais na frequência da rede de energia. O campo magnético em torno de um transformador de alimentação é suficientemente forte para poder gerar tensões nos circuitos de entrada, conforme mostra a figura 10.

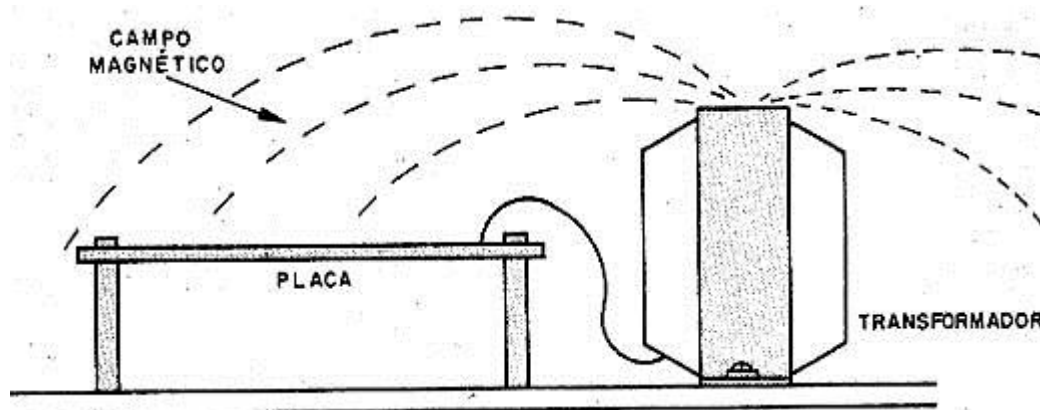


Figura 10 – Campo magnético de um transformador atingindo uma placa circuito.

O circuito foi primeiramente montado em um protoboard e testado. Nos testes procurou-se verificar os fatores de qualidade citados até agora: Linearidade, fidelidade espectral, e, sensibilidade.

5. TESTES E RESULTADOS

1º Teste: Sensibilidade

O teste de sensibilidade é simples. Basta ligar o circuito, pegar a saída (output na figura 8) do pré-amplificador e conecta-la diretamente a entrada de um osciloscópio, em seguida, sem sinal na entrada mede-se o sinal na saída, que é por sua vez o valor do ruído. A sensibilidade portanto é grande quando o valor do ruído (voltagem) é baixo em comparação com o sinal que é proposto para a entrada do circuito.

No caso deste circuito o sinal do ruído medido no osciloscópio foi de 90 μ V. O que é bem menor do que a voltagem de saída de microfones condensadores que está em torno de 500mV. De forma que o circuito satisfaz o primeiro teste.

2º Teste: Linearidade

A linearidade diz respeito de como o circuito se comporta para sinais de entrada com diferentes amplitudes. A amplificação de um amplificador linear não deve depender da amplitude. Todo amplificador tem uma faixa de linearidade. Fora dela, a dependência com a amplitude leva à mistura de frequências e à distorção. Também precisamos verificar se o ganho é o constante para todas as frequências, de forma que o sinal ao sair do circuito esteja com a mesma equalização que o sinal original.

Primeiramente procurou-se descobrir qual a máxima amplitude (voltagem) de entrada que o pré-amplificador pode ter sem que o sinal saia distorcido na saída, ou seja, sem que existam distorções harmônicas. Para isso seguiu-se o roteiro abaixo

(1) Através do gerador de sinal gerar um sinal senoidal de frequência “f” e amplitude “V = 500 mV”. Em seguida, utilizando o analisador de espectro coletar dados e plotar um gráfico V x f, este gráfico é a distribuição espectral do sinal original.

(2) Conectar a saída do gerador de sinal a entrada do pré-amplificador, e, conectar a saída do pré-amplificador na entrada do analisador de espectro.

(3) Agora o objetivo é pegar o sinal na saída do pré-amplificador. Contudo, vamos variar a amplitude do sinal de entrada. Para cada voltagem “V” na entrada do pré-amplificador vamos fazer uma decomposição espectral do sinal na saída deste. Para tal escolhemos as seguintes amplitudes 500mV, 850mV, 1000mV, 1400mV e 1500mV.

(4) Analisar a partir de qual tensão “V” de entrada o sinal começa a se descaracterizar (distorcer) na saída, ou seja, para qual voltagem de entrada aspecto do sinal de saída deixa de ser igual o aspecto do sinal de entrada. O sinal de entrada tomado como referência é sempre o sinal medido no item (1) do roteiro.

Os gráficos e tabelas dos testes C e D realizados estão todos na seção **APENDICE I – TESTES LINEARIDADE**. Os teste A e B não constam aqui para não estender de mais o tamanho do texto, contudo foram feitos exatamente como os testes C e D.

Os testes abaixo seguem o roteiro acima para cada frequência: 60Hz, 500Hz, 3000Hz, 8100Hz

Teste A => Foram feitas as etapas do roteiro acima para a frequência f = 60Hz.

Teste B => Idem teste A para f = 500 Hz

Teste C => Idem teste A para f = 3000 Hz

Teste D => Idem teste A para f = 8000 Hz

Acompanhando os dados no APENDICE I verifica-se que os resultados obtidos foram:

Para todas as frequências analisadas notou-se que o sinal distorce quando a amplitude do sinal de entrada atinge 1400 mV. Assim, o circuito está de acordo com o que se espera, pois para a proposta de estudo em acústica, os sinais virão de um microfone o qual fornece apenas de 300mV a 800mV de intensidade.

3º Teste: Fidelidade Epectral

Neste caso estamos interessados em verificar se o ganho do sinal é o mesmo em todas as frequências. Se o circuito tiver fornecer mais ganho em 400Hz do que em 1000Hz por exemplo, então estamos mudando a equalização do sinal, e conseqüentemente modificando o sinal o que o torna inútil para o estudo de acústica.

Para testar a fidelidade espectral pegamos o gerador de sinais e criamos uma onda quadrada em 60Hz e em 3000Hz. Escolhemos a onda quadrada pois a decomposição espectral dela fornece mais frequências.

O procedimento foi o seguinte: O analisador de espectro fornece a amplitude em Volts de cada frequência no espectro. A ideia é ver se para varias frequências “f” a razão entre a amplitude do sinal amplificado e o sinal normal (sem amplificação) se mantém constante. No caso utilizamos ondas quadradas de 60Hz e 3000Hz, e dessa forma conseguimos cobrir bem o espectro.

Os gráficos e tabelas deste teste encontram-se no **APENDICE II – TESTES FIDELIDADE ESPECTRAL**.

Após o tratamento dos dados, podemos verificar pelo gráfico E1, no apêndice II. Que o pré-amplificador se comporta de uma forma bem linear. Seu ganho gira em torno de 2,2.

Sendo linear o circuito satisfaz a última condição para que seja útil em um estudo de acústica. O próximo passo foi então construí-lo.

6. MONTAGEM NA CAIXA

Uma vez pronto e testado o circuito no protoboard, seguimos para a montagem. O tempo para montar foi curto, portanto o acabamento não ficou muito bom, entretanto o equipamento funciona.

Na montagem foi necessário a utilização de:

- Uma solda, e estanho.
- Fios
- Dois jacks fema P10, para entra e saída do audio
- Uma chave seletora, para ligar e desligar a bateria. Como não tive tempo de comprar, utilizei uma destas que tem em rádios antigos para passar de 110V ara 220V. Oque não é muito bom, pois estas chaves são feitas ara correntes mais altas.
- Uma caixa de madeira que eu mesmo construí com oque tinha disponível no momento.
- Uma furadeira.
- Cola de madeira.

As imagens abaixo ilustram a montagem do equipamento na caixa:



Figura 11 – Soldando os componentes.



Figura 12 – Construindo a parte de cima da caixa onde ficam os jacks para conexão.

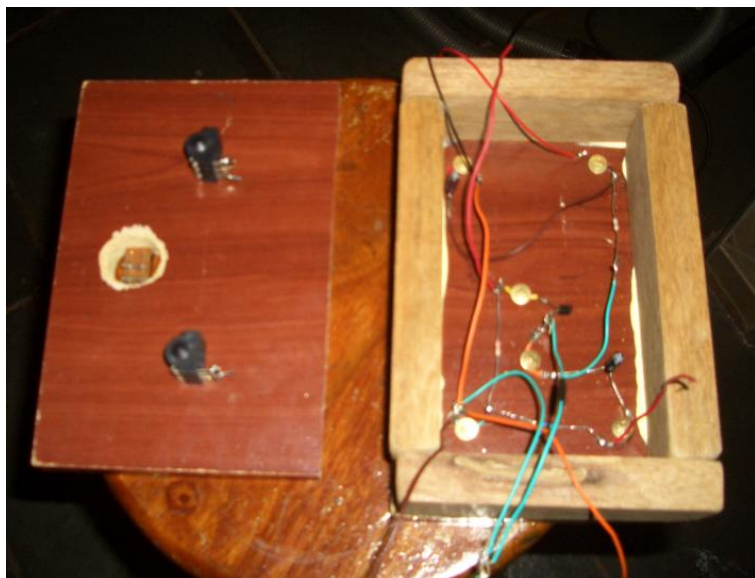


Figura 13 – Soldando o circuito com a tampa de cima.

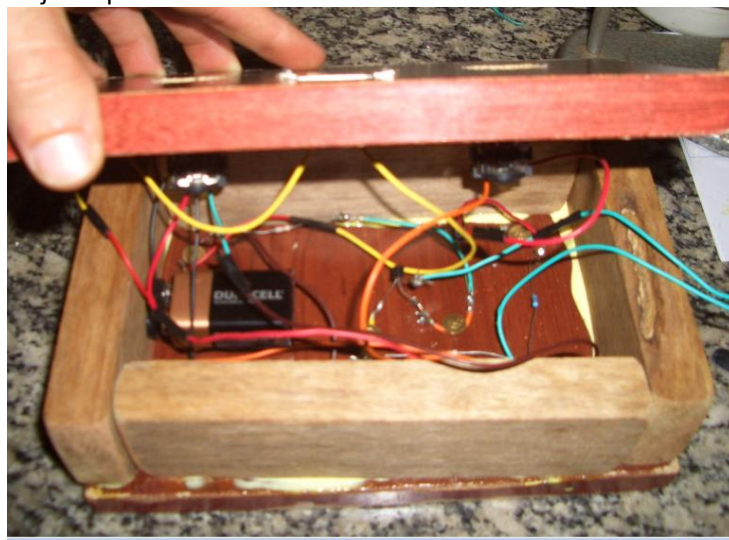


Figura 14 – Caixa pronta.

Avaliação do orientador (Newton C. Frateschi):

Considero o trabalho do aluno Rodrigo bastante interessante. Ele certamente aprendeu muito sobre as bases teóricas de análise de sinais acústicos e de circuitos eletrônicos. Particularmente, seu trabalho no laboratório foi extremamente proveitoso.

Seu relatório está bem escrito. Creio que de forma geral, avalio seu desempenho com muito bom e atribuo uma nota 9,0 para seu trabalho.

APÊNDICE – I

Teste

Linearidade

(Teste C)

SINAL GERADO: $f = 3000\text{Hz}$

ANTES DA AMPLIFICAÇÃO – Tensão $V = 50000$ microVolt

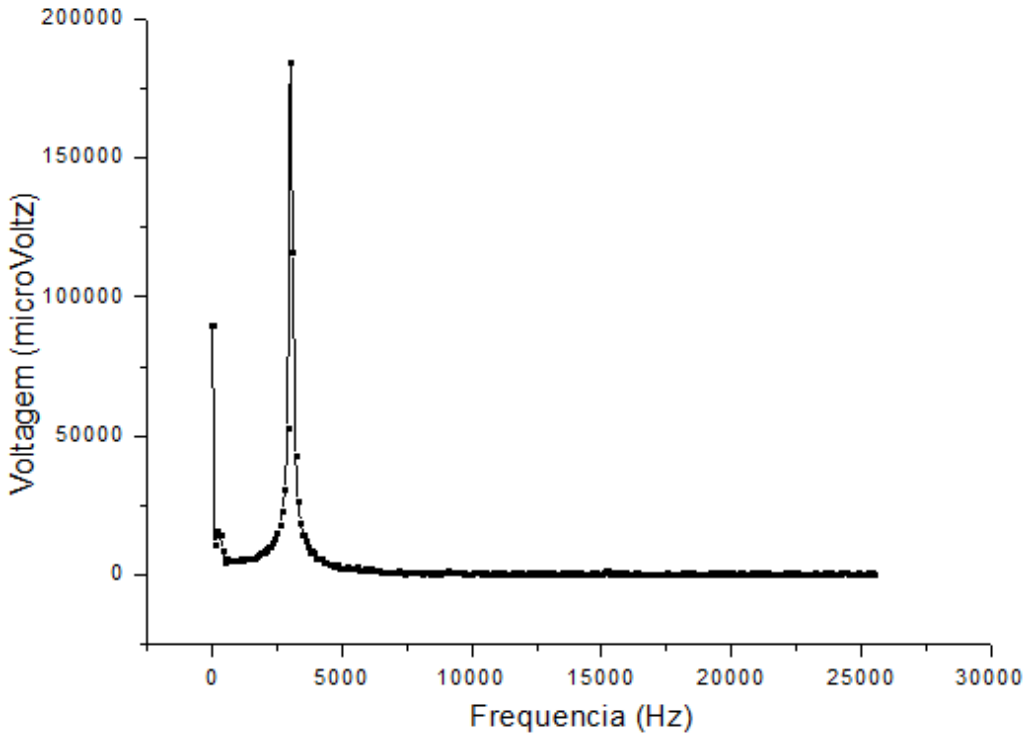


Gráfico C1 – Este é o aspecto da decomposição espectral do sinal senoidal de 500mV e 3000Hz gerado pelo nosso gerador de sinais.

Frequencia Hz	Voltagem microVolts
3000	184598
3100	116100
0	89897
2900	52794
3200	43093
2800	30559
3300	26503
2700	22654
3400	18750
2600	18282
200	16013
2500	15002
300	14676
3500	14154
2400	12760
3600	12272
2300	11267

Tabela C1 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal antes de ser amplificado.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO COM TENSÃO DE ENTRADA $V = 50000$ microVolt

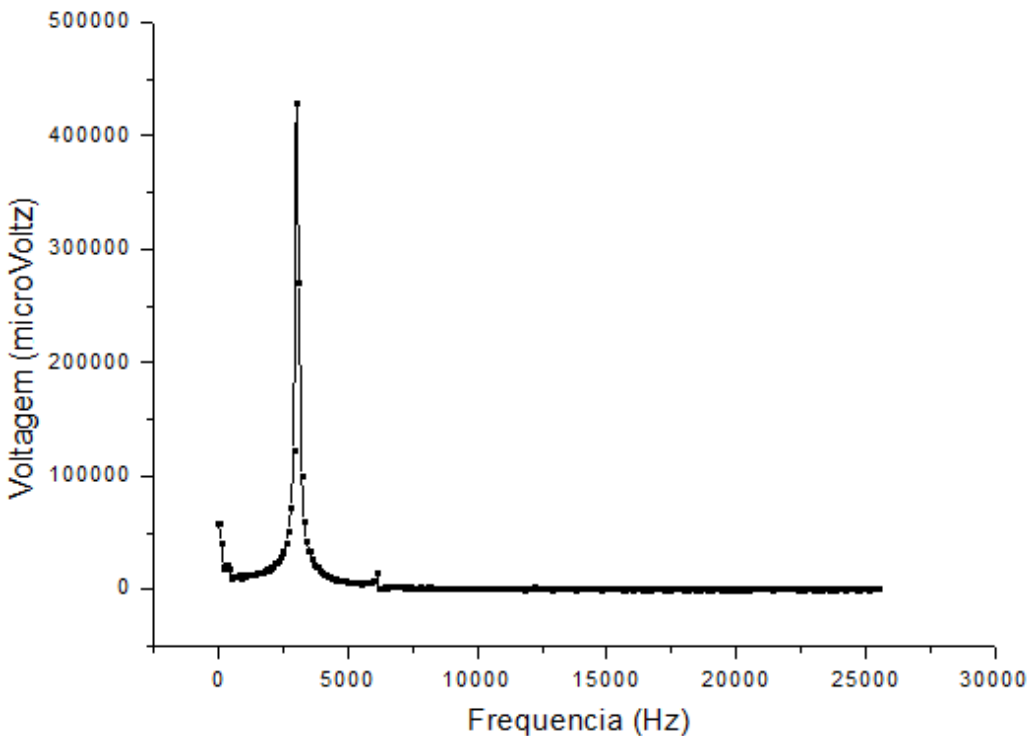
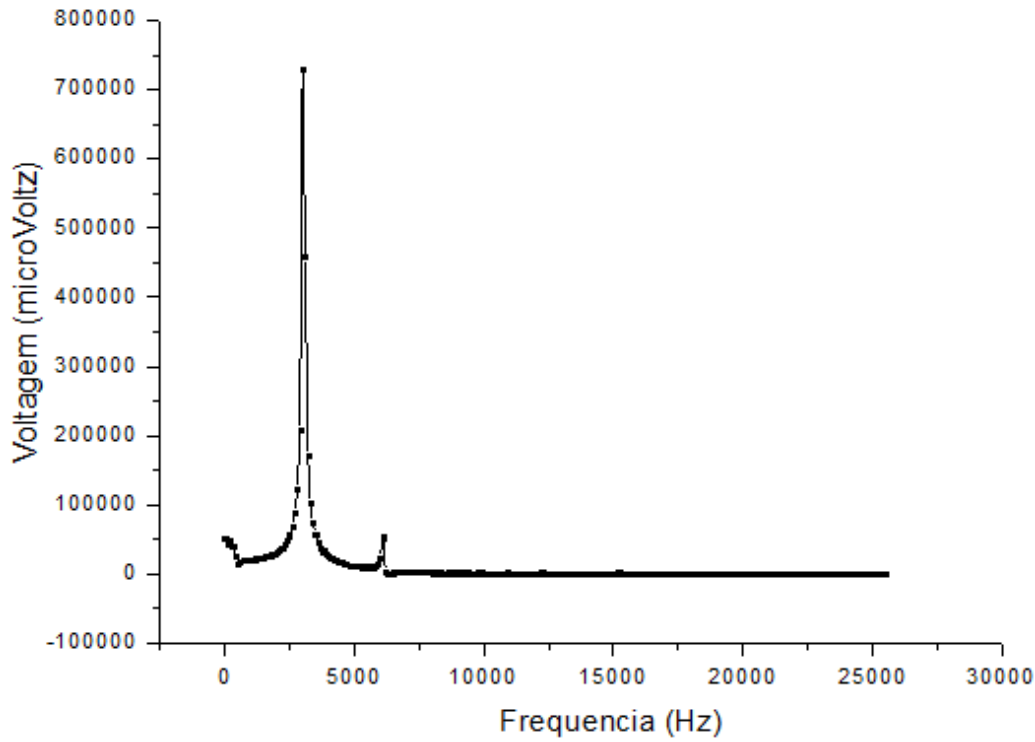


Gráfico C2 - Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada um sinal senoidal de 500mV e 3000Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Comparando o aspecto deste gráfico com o aspecto do gráfico C1 notamos a presença discreta de um harmônico em 6100 Hz. Contudo isso ainda não estraga nosso sinal. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou a frequência subgrave em torno de zero hertz.

Frequencia Hertz	Voltagem microVolts
3000	430047
3100	270426
2900	122351
3200	100627
2800	72608
3300	60371
0	57913
2700	52102
3400	43097
100	41133
2600	40715
3500	33523
2500	33149
2400	29154
3600	26684
2300	25848
2200	23398

Tabela C2 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal amplificado.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO COM TENSÃO DE ENTRADA V = 850000 microVolt

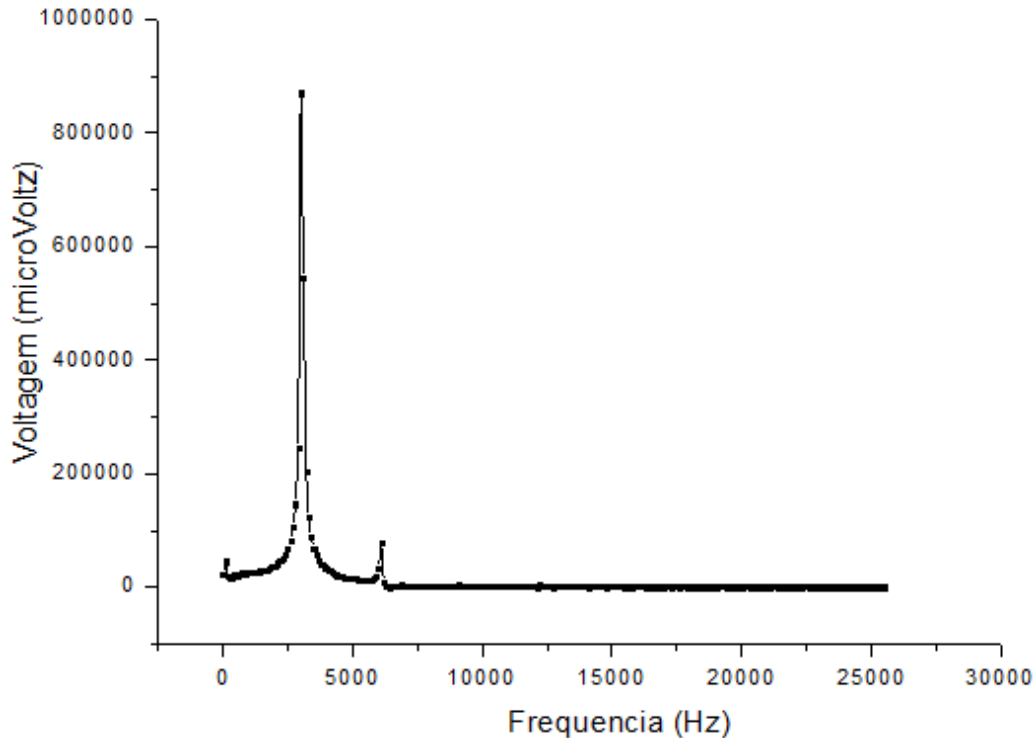


frequencia Hz	voltagem microVolt
3000	731239
3100	458736
2900	207742
3200	171687
2800	122409
3300	103638
2700	87854
3400	74335
2600	69352
3500	57415
2500	56275
6100	53233
0	51859
200	50147
2400	48919
3600	45807
100	43848

Gráfico C3 – Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada um sinal senoidal de 850mV e 3000Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Comparando o aspecto deste gráfico com o aspecto do gráfico C1 notamos a presença de um harmônico em 6100 Hz (vide tabela C3). Contudo isso ainda não estraga nosso sinal. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou a frequência subgrave em torno de zero hertz.

Tabela C3 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO COM TENSÃO DE ENTRADA V = 1000000 microVolt



Frequencia Hz	Voltagem microVolt
3000	870772
3100	546692
2900	246728
3200	202979
2800	146708
3300	124796
2700	105956
3400	89557
2600	83424
6100	78608
3500	68890
2500	68458
2400	58875
3600	56776
2300	51836
3700	47365
2200	46337

Gráfico C4 – Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada um sinal senoidal de 1000mV e 3000Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Comparando o aspecto deste gráfico com o aspecto do gráfico C1 notamos a presença de um harmônico em 6100 Hz (vide tabela C4). Contudo isso ainda não estraga nosso sinal. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou a frequência subgrave em torno de zero hertz.

Tabela C4 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal amplificado.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO COM TENSÃO DE ENTRADA V = 1400000 microVolt

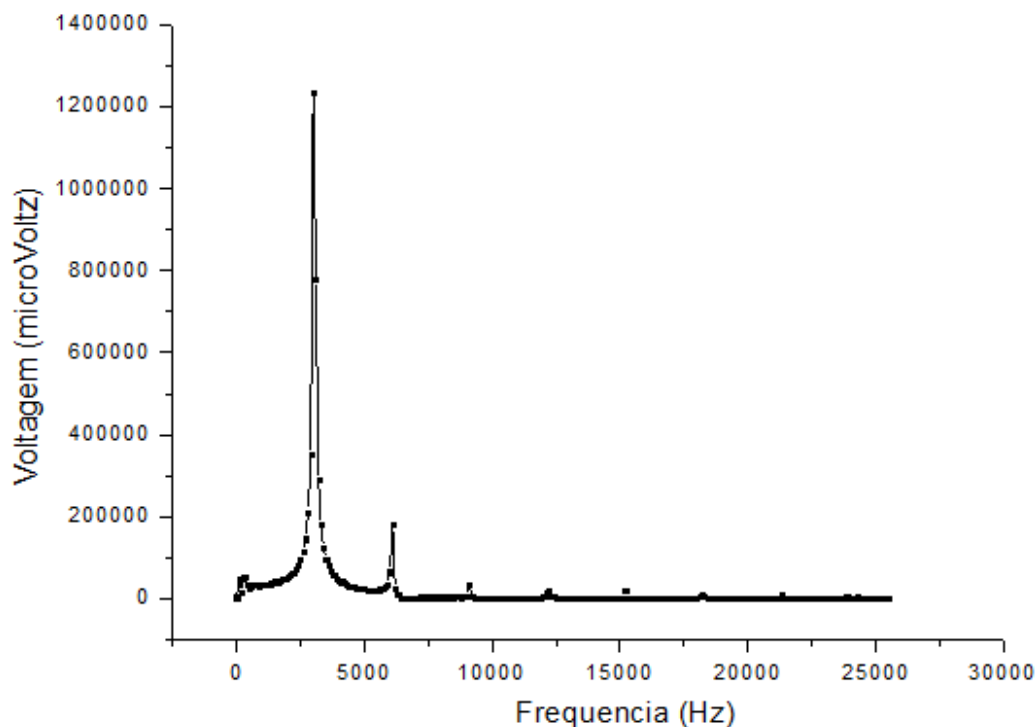


Gráfico C5 – Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada um sinal senoidal de 1400mV e 3000Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Comparando o aspecto deste gráfico com o aspecto do gráfico C1 notamos a presença mais forte de um harmônico em 6100 Hz (vide tabela C5) além de o surgimento de outros harmônicos. Isso já é o suficiente para distorcer o sinal. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou a frequência subgrave em torno de zero hertz.

Frequencia Hz	Voltagem microVolt
3000	1,24E+06
3100	778537
2900	351311
3200	290731
2800	211909
3300	182924
6100	179598
2700	146434
3400	126137
2600	116083
3500	96798
2500	96286
2400	81716
3600	80925
2300	72645
3700	67400
6000	65132

Tabela C5 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal antes de ser amplificado.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO COM TENSÃO DE ENTRADA V = 1500000 microVolt

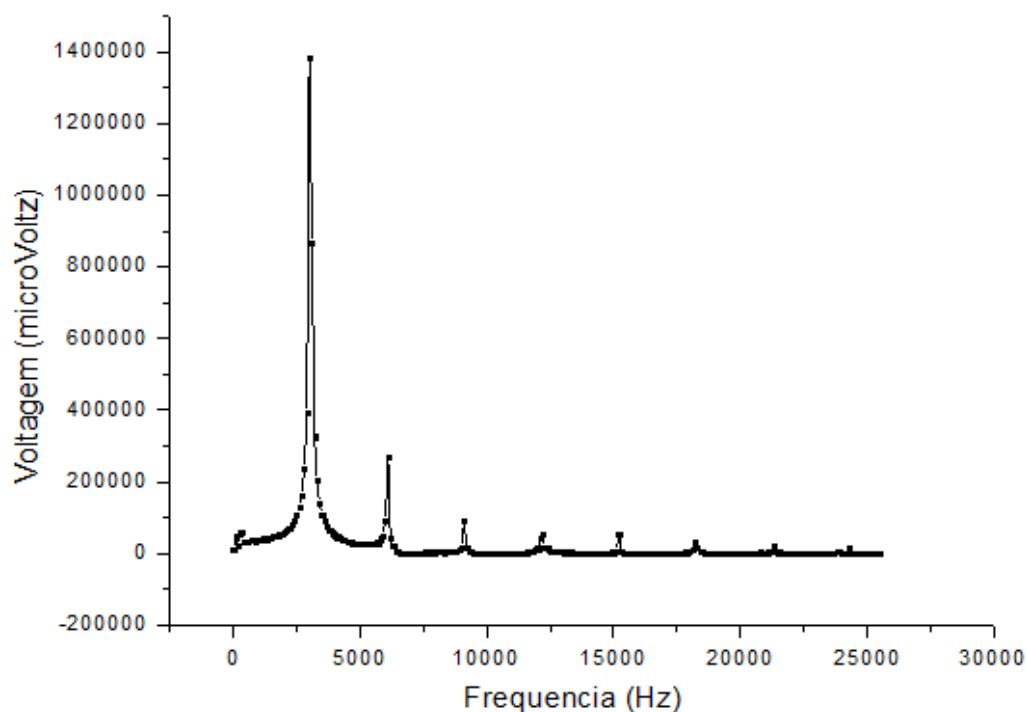


Gráfico C6 - Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada um sinal senoidal de 1400mV e 3000Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Comparando o aspecto deste gráfico com o aspecto do gráfico C1 notamos a presença bem forte de um harmônico em 6100 Hz (vide tabela C6) além de uma maior manifestação dos outros harmônicos. Isso já é o suficiente para distorcer o sinal. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou a frequência subgrave em torno de zero hertz.

Frequencia Hz	Voltagem microVolt
3000	1,39E+06
3100	868876
2900	394759
3200	326475
6100	269345
2800	237932
3300	207673
2700	160532
3400	140570
2600	129130
3500	109881
2500	107226
9100	94710
6000	92053
2400	91976
3600	90268
2300	80718

Tabela C6 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal amplificado.

(Teste D)

SINAL GERADO: $f = 8000\text{Hz}$

ANTES DA AMPLIFICAÇÃO – Tensão $V = 500000$ microVolt

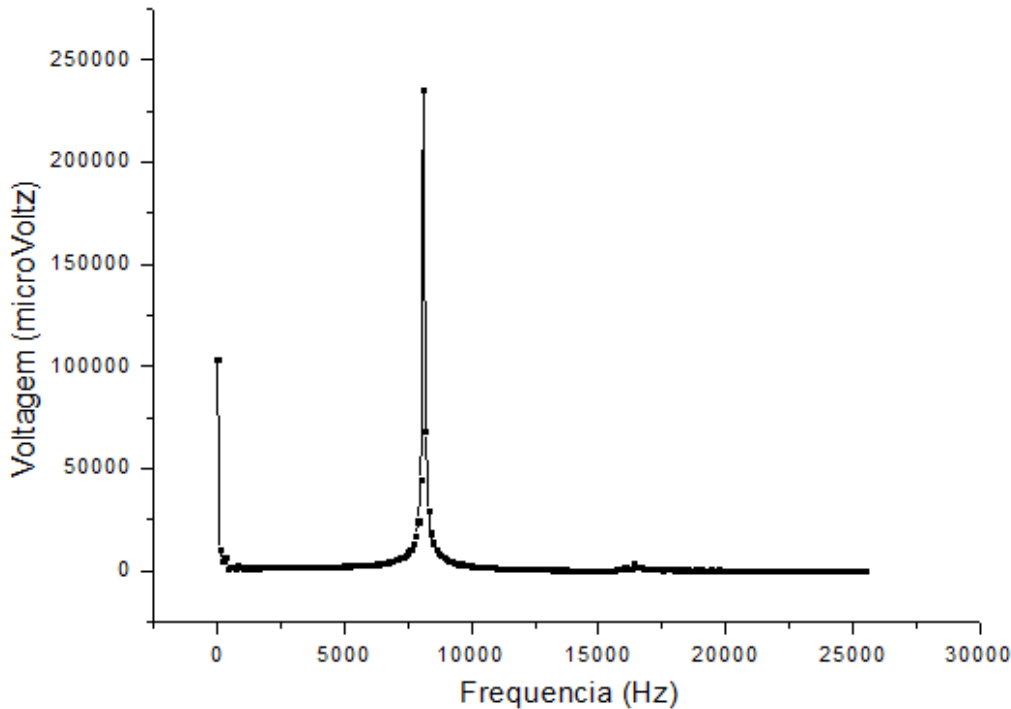


Gráfico D1 – Este é o aspecto da decomposição espectral do sinal senoidal de 500mV e 8000Hz gerado pelo nosso gerador de sinais.

Frequencia Hz	Voltagem microVolt
8100	235948
8200	67971
8000	44539
8300	29753
0	29360
7900	24137
8400	18470
7800	17195
8500	13727
7700	13054
8600	10748
100	10735
7600	10716
7500	9029
8700	8812
7400	7929
8800	7448

Tabela D1 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal antes de ser amplificado.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO COM TENSÃO DE ENTRADA $V = 500000$ microVolt

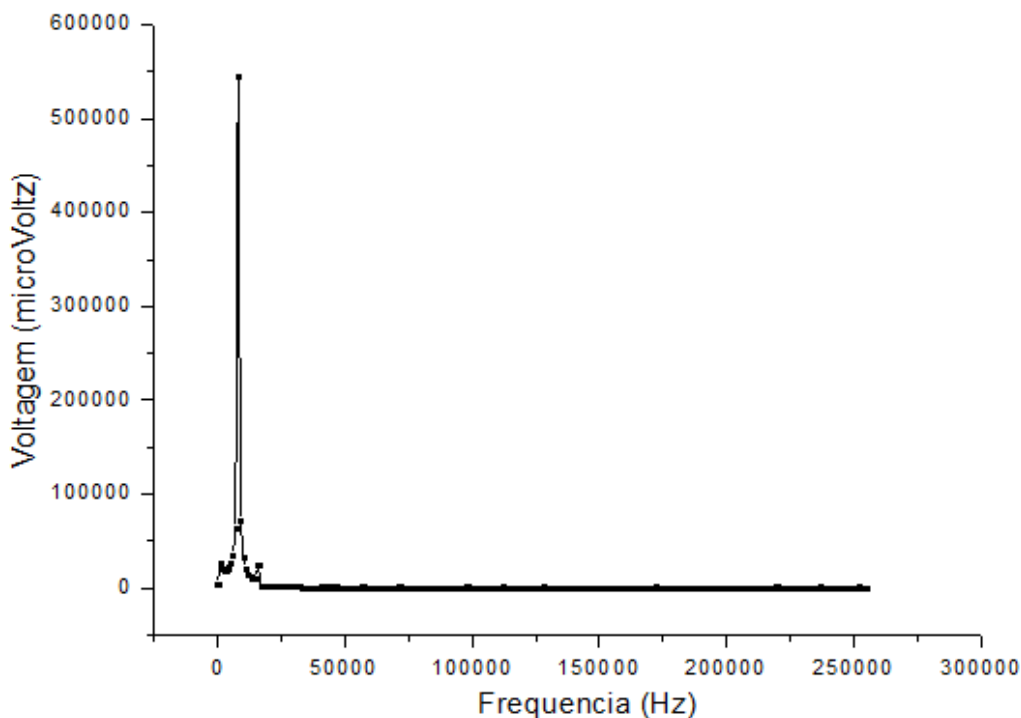
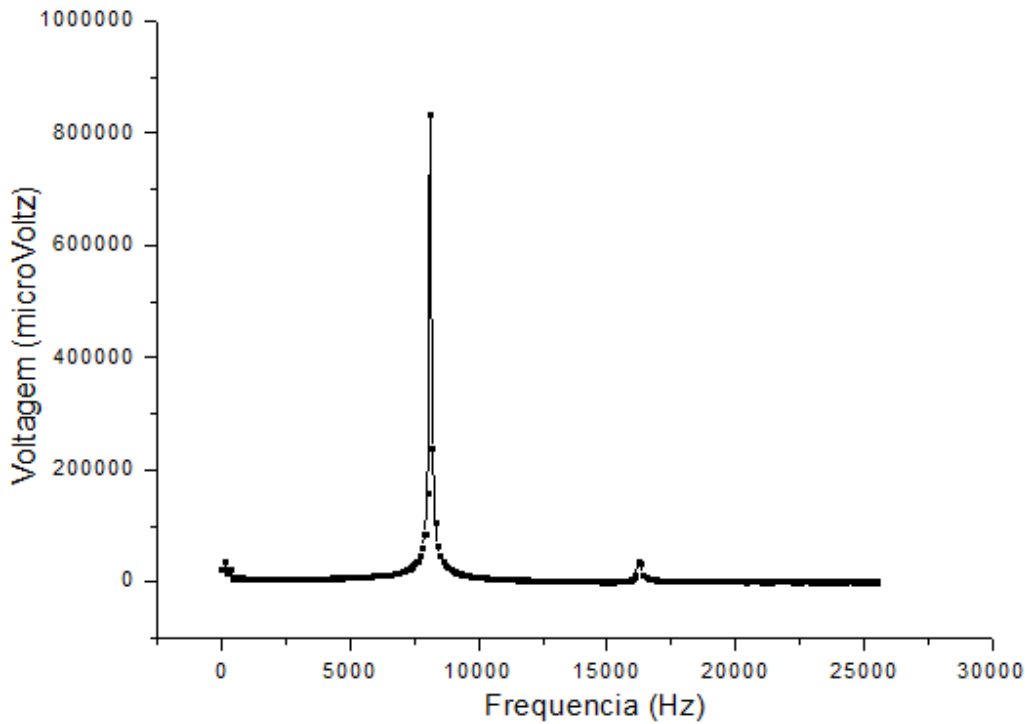


Gráfico D2 - Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada um sinal senoidal de 500mV e 8000Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Comparando o aspecto deste gráfico com o aspecto do gráfico D1 notamos a presença discreta de um harmônico em 16000 Hz. Contudo isso ainda não estraga nosso sinal. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou a frequência subgrave em torno de zero hertz.

Frequencia Hz	Voltagem microVolt
8000	5,45E+05
9000	72959
7000	62958
6000	35767
10000	32909
1000	27348
5000	26245
16000	24425
4000	21809
11000	20745
2000	20217
3000	18895
12000	14896
13000	11309
14000	10575
15000	10211
0	4709

Tabela D2 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal amplificado.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO COM TENSÃO DE ENTRADA V = 850000 microVolt

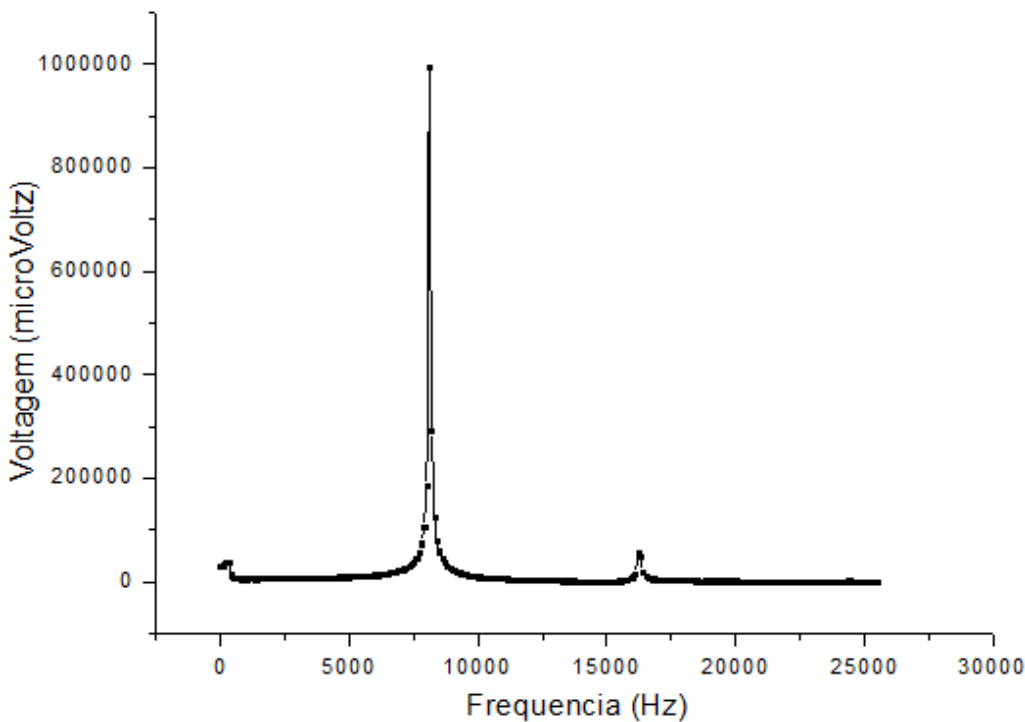


Frequencia Hz	Voltagem microVolt
8100	8,34E+05
8200	240268
8000	157439
8300	105173
7900	85320
8400	65291
7800	60783
8500	48525
7700	46146
8600	37994
100	37948
7600	37881
16200	37587
16300	33093
7500	31917
8700	31150
7400	28029

Gráfico D3 - O pré-amplificador recebeu na entrada um sinal senoidal de 850mV e 8100Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Comparando o aspecto deste gráfico com o aspecto do gráfico D1 notamos a presença ainda discreta de um harmônico em 1600 Hz (vide tabela C3). Contudo isso ainda não estraga nosso sinal. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou a frequência subgrave em torno de zero hertz.

Tabela D3 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal amplificado.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO COM TENSÃO DE ENTRADA V = 1000000 microVolt

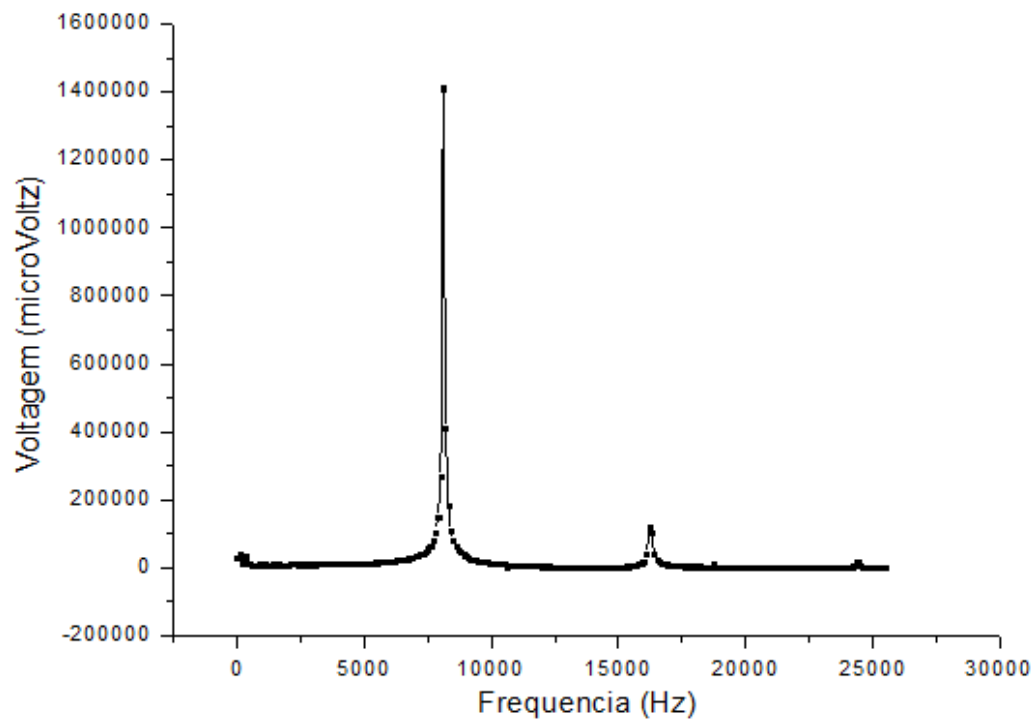


Frequencia Hz	Voltagem microVolt
8100	9,95E+05
8200	290953
8000	186596
8300	124810
7900	104931
8400	78711
7800	74201
8500	58634
7700	56537
16200	54982
16300	48674
7600	46321
8600	46152
200	39494
7500	38437
300	37964
8700	37714

Gráfico D4 - Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada um sinal senoidal de 1000mV e 8100Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Comparando o aspecto deste gráfico com o aspecto do gráfico C1 notamos a presença de um harmônico em 16200 Hz (vide tabela D4) além de uma maior manifestação dos outros harmônicos. Isso já é o suficiente para distorcer o sinal. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou a frequência subgrave em torno de zero hertz.

Tabela D4 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal amplificado.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO COM TENSÃO DE ENTRADA V = 1400000 microVolt

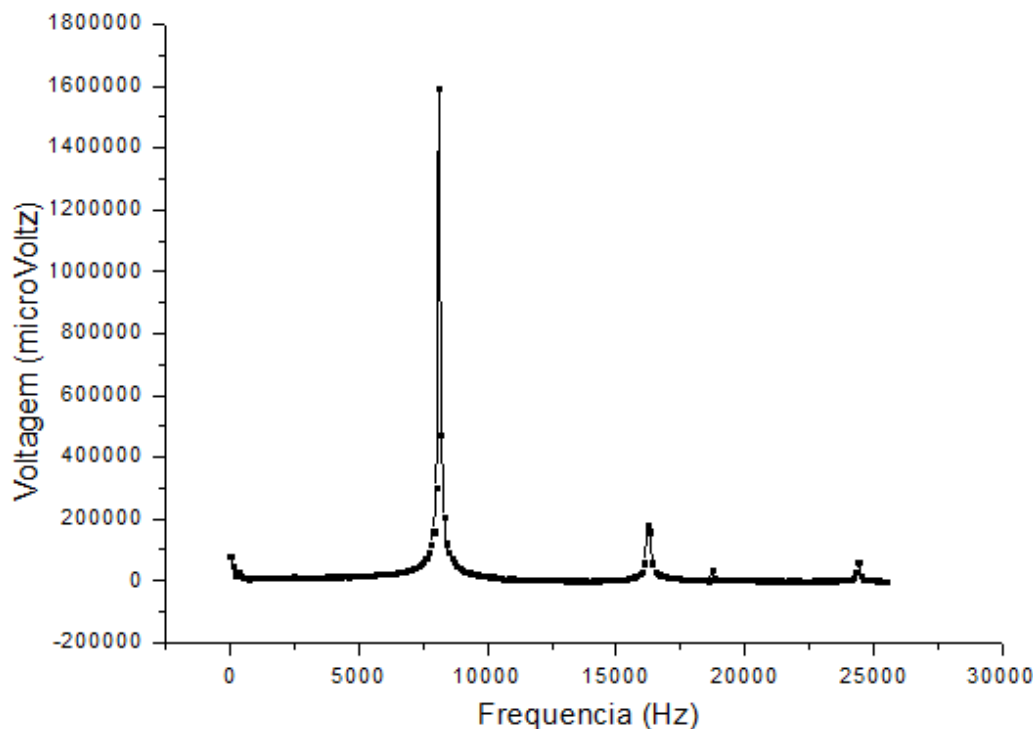


Frequencia Hz	Voltagem microVolt
8100	1,41E+06
8200	413777
8000	270620
8300	181618
7900	147220
16200	119507
8400	111617
7800	105911
16300	104622
8500	82765
7700	81020
8600	65674
7600	65362
7500	55656
8700	52847
7400	48796
8800	44684

Gráfico D5 - Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada um sinal senoidal de 1400mV e 8100Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Comparando o aspecto deste gráfico com o aspecto do gráfico D1 notamos a presença de um harmônico em 16200 Hz (vide tabela D5) além de uma manifestação dos outros harmônicos. Isso já é o suficiente para distorcer o sinal. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou a frequência subgrave em torno de zero hertz.

Tabela D5 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal amplificado.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO COM TENSÃO DE ENTRADA V = 1500000 microVolt



Frequencia Hz	Voltagem microVolt
8100	1,59E+06
8200	472690
8000	302464
8300	208283
16200	184311
16300	160122
7900	160019
8400	121276
7800	120159
7700	93145
8500	92229
0	80602
8600	73794
7600	73515
7500	63650
24400	62632
8700	59001

Gráfico D6 - Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada um sinal senoidal de 1500mV e 8100Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Comparando o aspecto deste gráfico com o aspecto do gráfico D1 notamos a presença bem forte de um harmônico em 16200 Hz (vide tabela D6) além de uma maior manifestação dos outros harmônicos. Isso já é o suficiente para distorcer o sinal. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou a frequência subgrave em torno de zero hertz.

Tabela D6 – Em ordem decrescente as dezessete primeiras frequências mais presentes do sinal amplificado.

APÊNDICE – II
Teste
Fidelidade Espectral

(Teste E)

ANTES DA AMPLIFICAÇÃO – FREQUENCIA $f = 60\text{Hz}$

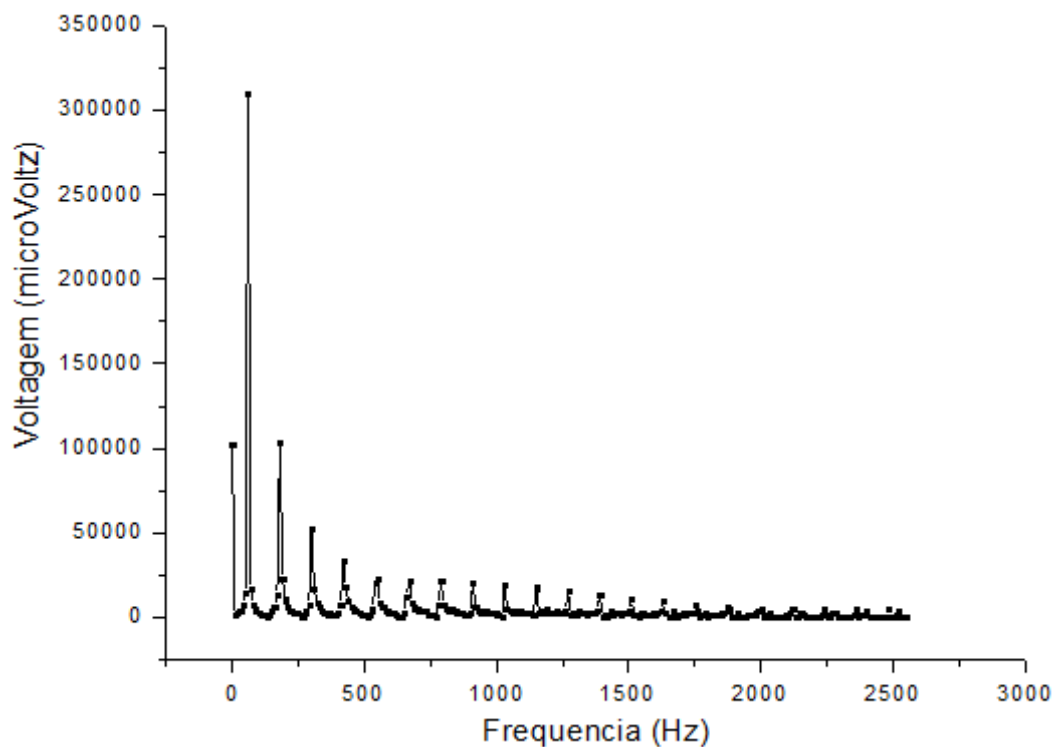


Gráfico E1 – Decomposição espectral de uma onda quadrada de 500mV e $f=60\text{Hz}$, gerada pelo gerador de sinais. Nela percebemos varias frequências além da fundamental 60Hz.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO – FREQUENCIA $f = 60\text{Hz}$

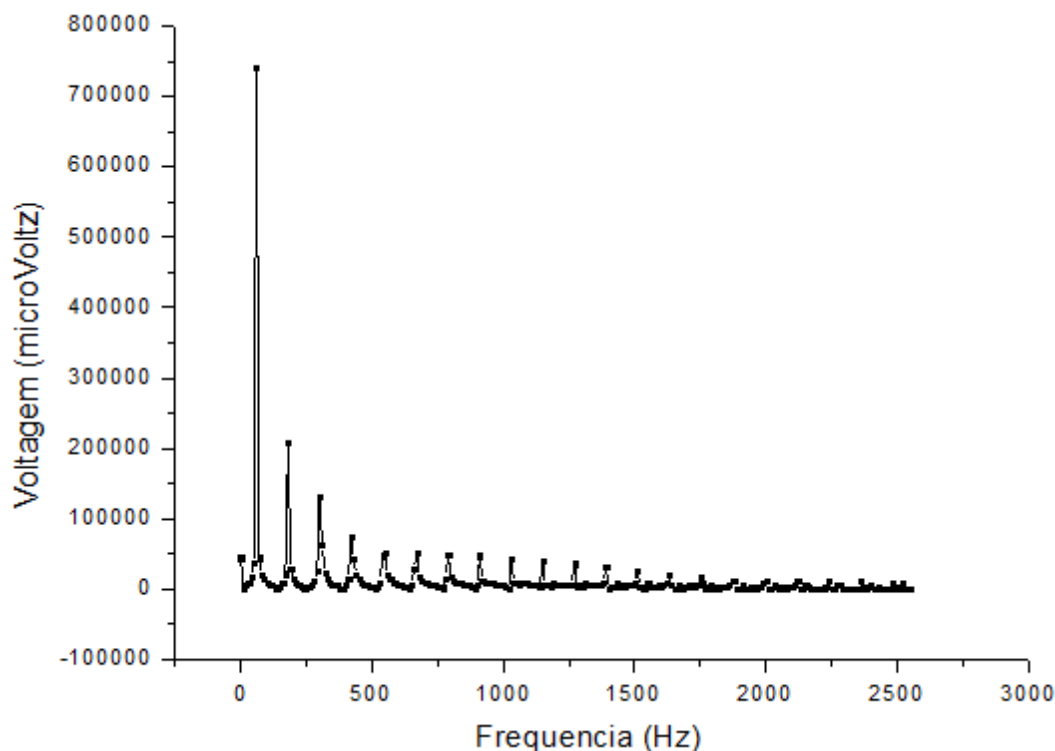


Gráfico E2 - - Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada uma onda quadrada com 500mV e 60Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Qualitativamente é possível ver, comparando este gráfico com o gráfico E1, que o ganho foi igual em todas as frequências. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou as frequências subgraves em torno de zero.

ANTES DA AMPLIFICAÇÃO – FREQUENCIA $f = 3000\text{Hz}$

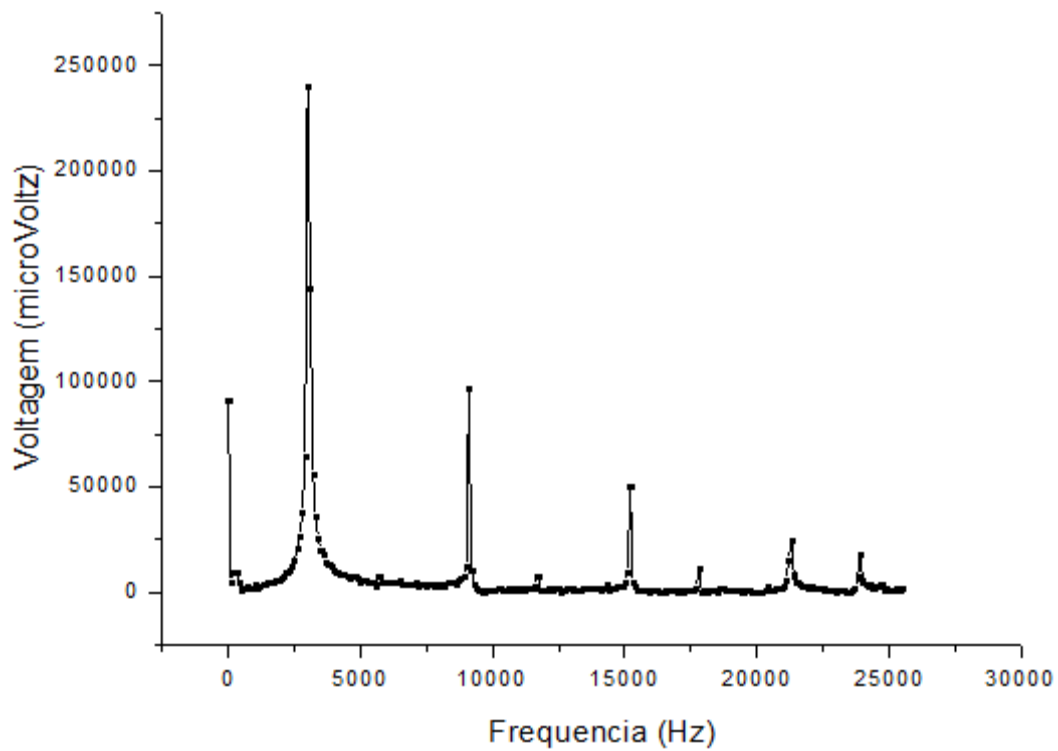


Gráfico E3 – Decomposição espectral de uma onda quadrada de 500mV e $f=3000\text{Hz}$, gerada pelo gerador de sinais. Nela percebemos varias frequências além da fundamental 3000Hz.

APÓS A AMPLIFICAÇÃO – FREQUENCIA $f = 3000\text{Hz}$

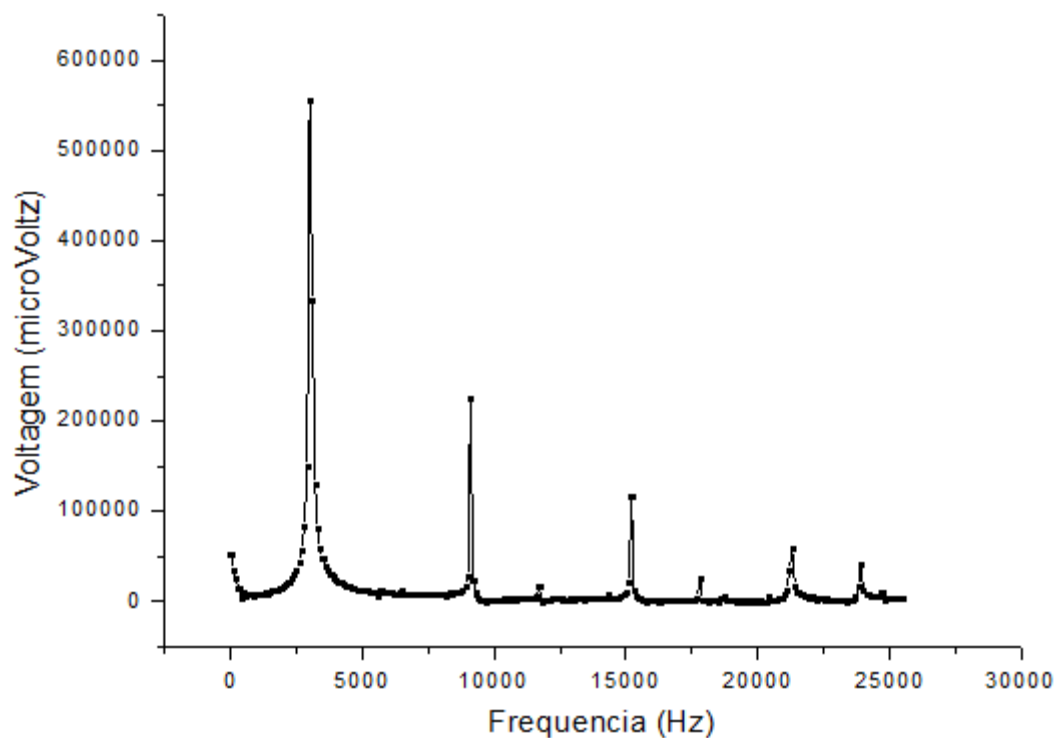


Gráfico E4 - Aqui o pré-amplificador recebeu na entrada uma onda quadrada com 500mV e 3000Hz. O gráfico mostra a decomposição espectral deste sinal após sair do pré-amplificador. Qualitativamente é possível ver, comparando este gráfico com o gráfico E3, que o ganho foi igual em todas as frequências. Nota-se também que o filtro passa alta atenuou as frequências subgraves em torno de zero.

A partir dos dados fornecidos pelo analisador de espectro conseguimos o valor da amplitude em volts para cada frequência antes e depois da amplificação. Foram então escolhidas as frequências com maior voltagem e foi calculada a razão entre o sinal amplificado e o sinal normal. Essa razão é o próprio ganho

Frequencia Hz	Amplitude do sinal normal microVolt	Amplitude do sinal amplificado MicroVolt	Ganho = Amplificado/Normal
60	310409	740349	2,385075819
180	104112	208583	2,00344821
300	52097	130842	2,51150738
420	33349	75790	2,272631863
550	22441	51158	2,279666682
670	21625	52081	2,408369942
790	21265	49237	2,315400893
910	20832	47480	2,279185868
1030	19189	44444	2,31611861
1150	17570	40117	2,283266932
1270	15448	36244	2,346193682
1510	10655	25540	2,396996715
1630	9370	21390	2,282817503
1750	7293	16404	2,249280132
2000	5248	12005	2,28753811
2480	4752	10174	2,140993266
2900	64307	149261	2,321069246
3000	240186	556076	2,315189062
3100	144444	334842	2,318144056
3200	56377	131193	2,327066002
3300	36420	81727	2,244014278
3600	17670	39490	2,234861347
3900	12474	27109	2,17324034
4000	10859	23317	2,147251128
5200	5564	11811	2,122753415
6400	4667	9639	2,065352475
6500	5622	11917	2,119708289
7500	3298	7493	2,27198302
8400	4688	9427	2,141087884
9100	96659	225683	2,334836901
15100	9145	21395	2,339529798
15200	49975	117129	2,343751876

Tabela E1 – Mostra a amplitude de cada frequência antes e após passar pelo circuito pré-amplificador. Bem como mostra também o ganho em cada frequência.

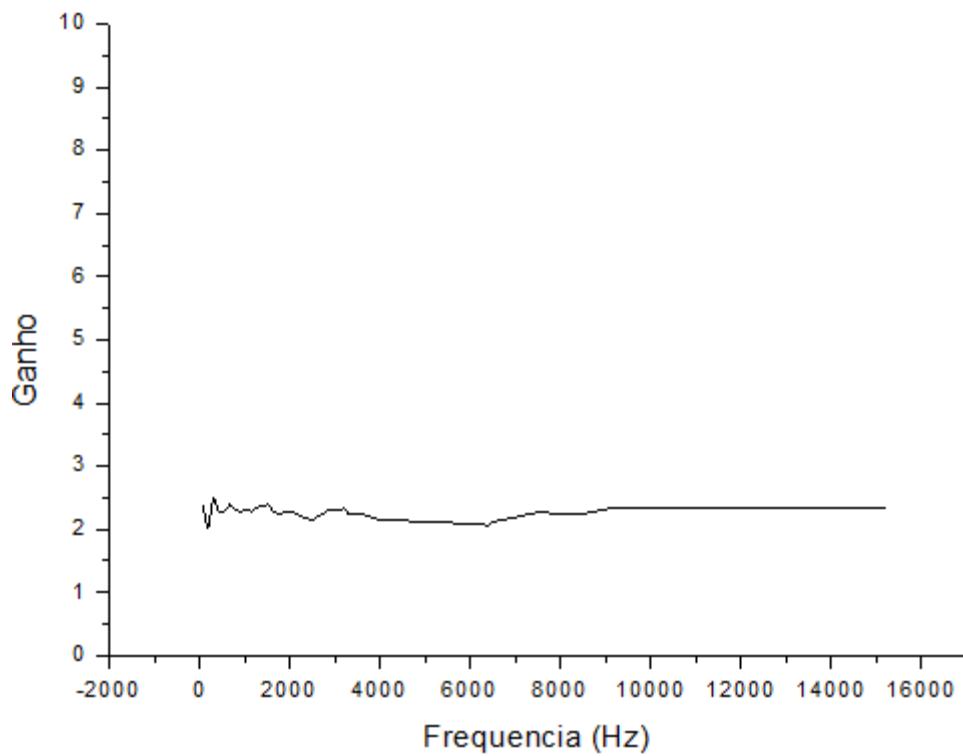


Gráfico E1 – Mostra o ganho do pré-amplificador em função da frequência.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - http://tele1.dee.fct.unl.pt/it_2011_2012_2sem/pages/folhas_disciplina.asp
- 2 - <http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/140.pdf>
- 3 - <https://woc.uc.pt/matematica>
- 4 - http://pt.wikipedia.org/wiki/Sinal_anal%C3%B3gico
- 5 - http://telecom.inescn.pt/research/audio/cienciaviva/processamento_som.htm
- 6 – Paul E. Gray / Campbell L. Searle - Princípios de Eletrônica