

# Relatório final F609



## Órgão artesanal de balão: construção e aplicações

**Aluno: Renato Pacheco Villar 046144**

**Renatopvillar x gmail.com**

**Orientador: Prof. Dr. José Antonio Brum**

**Brum x ifi.unicamp.br**



**UNICAMP**

Campinas, 10 de Novembro de 2010

## 1) Resultados obtidos.

### 1.1) Montagem

O projeto “Órgão de balão: construção e aplicações” se deu início com a aquisição dos materiais necessários para a sua construção. Podemos dar por encerrada esta etapa do projeto e seguem imagens de alguns materiais.

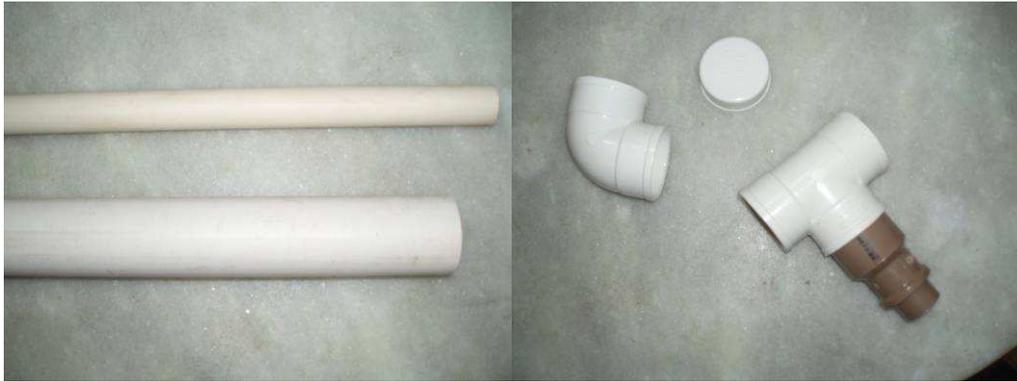


Figura 2: Canos de PVC de diferentes diâmetros, cotovelos e ligações e tubos e final de tubo de PVC



Figura 3: Esguichos e flautas.



Figura 4: Bomba de ar cola adesiva para plástico PVC, massa do tipo Durepoxi, balão grande de festa, fita adesiva e mangueira.

No tubo de PVC de maior diâmetro foram feitas aberturas com a intenção de fixar as válvulas de entrada de ar (esguichos). Estas aberturas foram feitas aquecendo-se uma barra de ferro no fogo como ilustra a figura 5.



Figura 5: Processo de perfuração do tubo de PVC.

Após perfurar, foram colocados um esguicho em cada abertura feita. O resultado apresenta-se na Figura 6



Figura 6: Esguichos fixados no tubo de PVC.

Para garantir a fixação dos esguichos e vedar a saída de ar, foi utilizado cola adesiva para plásticos e massa do tipo Durepoxi. Com o sistema já bem fixado e com a

passagem de ar vedada, juntou-se um prolongamento do tubo de PVC com um cotovelo. Esta parte será onde serão anexados o balão de festas e a bomba de ar.

Todo este sistema descrito acima está fixado em um suporte feito com madeira de reciclagem para minimizar as chances de quebrar e estragar as vedações futuramente. O suporte de madeira é composto por pedaços de madeira provindos de uma casinha velha de cachorro que estão presas por arame e fita adesiva.

Das flautas descritas nos materiais só foram utilizados os bocais, que estão servindo como fonte emissora de som. Os esguichos estão ligados a bocais de flautas através de mangueiras como ilustra a Figura 7.



Figura 7: Sistema de interligação entre o esguicho e a boca de flauta.

Para finalizar o projeto, acoplou-se o balão de festas (balão grande) e a bomba para abastecer o sistema todo de ar.

Com o instrumento pronto, partiu-se para a etapa de afinação das saídas de ar. Para isso, pegou-se um tubo de PVC e cortou-se no comprimento aproximadamente igual ao de uma flauta completa. Com a ajuda de um afinador (dispositivo usado por músicos para detectar a altura das notas tocadas em instrumentos musicais, e

assim afinar seu instrumento), mediu-se a nota emitida e a partir daí, cortou-se o tubo de PVC ate atingir o tamanho em que, acoplado ao órgão emitia um som aproximadamente semelhante ao de uma nota da escala harmônica. A partir deste comprimento, cortava-se outro tubo de PVC que era diminuído gradativamente ate atingir a próxima nota da escala. Este processo foi repetido ate completar-se um intervalo de uma oitava.

O Resultado final do órgão completo encontra-se na seção 2.2.

## 1.2) Resultados e discussão.

Após a construção do órgão, para a obtenção da frequência das ondas emitidas pelo instrumento foi utilizado o programa que captura o sinal sonoro TrueRTA adquirido gratuitamente na internet. O programa não faz análise do sinal recebido, ele simplesmente transforma o sinal sonoro em uma onda.

O programa TrueRTA serve apenas para transformar o sinal sonoro em uma onda digitalizada, mas não calcula a frequência, amplitude, fase, etc. da onda. Através de aproximações, obtém-se o período da onda e consequentemente, a frequência de cada uma.

A medida do período foi feita do seguinte maneira:

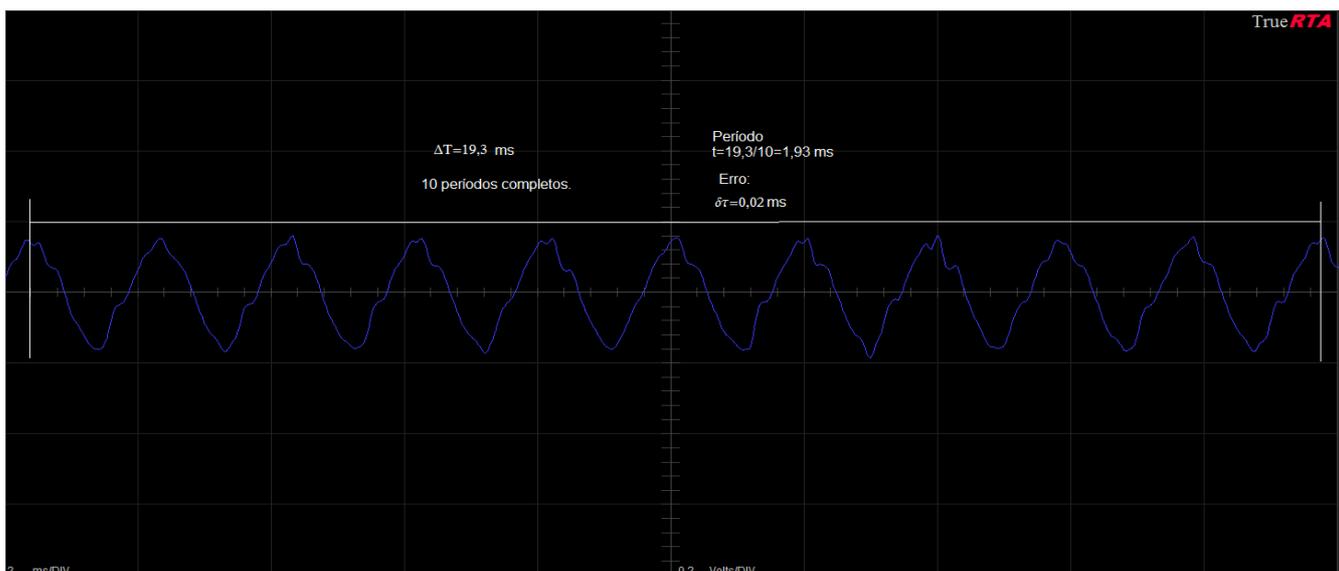


Figura 8: imagem obtida no programa TrueRTA com método de análise.

Para o período, o erro considerado foi calculado a partir da metade da menor medida presente no gráfico. Para aumentar a precisão da medida e erro, considerou-se o maior número possível de picos presentes nas imagens. O período total dividido pelo número de períodos. E o valor da menor medida dividido pelo número de períodos do trem de onda.

Com o período medido, foi possível obter o valor da frequência correspondente. Todas as imagens obtidas e as respectivas frequências estão no apêndice 9.5.

Os comprimentos dos tubos de PVC foram medidos com ajuda de uma trena. O comprimento total considerado é composto do comprimento do tubo de PVC acrescido do comprimento da parte da flauta que ele está acoplado até a abertura da mesma. Como todas as flautas são idênticas, acresceu-se 8,5cm no comprimento dos tubos.

Para o erro do comprimento, considerou-se a menor medida do instrumento (0,05 cm).

Os dados obtidos encontram-se na tabela 1.

Nota	Período (ms)	Erro (ms)	Frequência (Hz)	Erro (Hz)	Frequência na literatura (Hz)	Comprimento do tubo (cm)	Erro (cm)
Dó	1,93	0,02	518,1	5,4	523,2	28,9	0,1
Ré	1,73	0,06	578,0	20,0	587,3	25,2	0,1
Mi	1,55	0,05	645,2	20,8	659,2	22,7	0,1
Fá	1,46	0,04	684,9	18,8	698,2	21,1	0,1
Sol	1,30	0,04	769,2	23,7	783,0	18,7	0,1
Lá	1,16	0,04	862,1	29,7	880,0	16,6	0,1
Si	1,03	0,03	970,9	28,3	987,7	14,9	0,1
Dó(2)	0,96	0,02	1041,7	21,7	1046,5	14,0	0,1

Tabela 1: Dados

Primeiramente, fez-se um gráfico do Comprimento do tubo x Período, onde utilizando a fórmula  $f = \frac{nc}{2L}$ , ou ainda,  $\tau = \frac{2L}{nc}$ . No gráfico temos como

coeficiente angular da reta  $2/nc$ . À partir daí, podemos estimar a velocidade do som, fazendo  $n=1$ . A teoria que embasa este raciocínio encontra-se na seção 5.

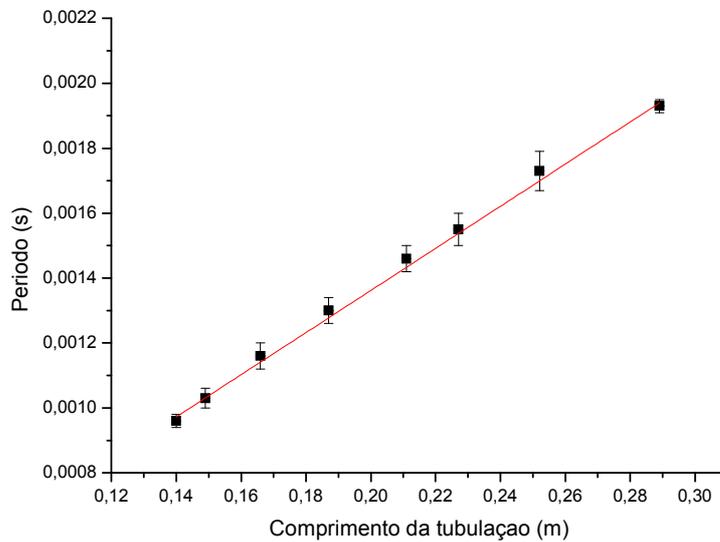


Gráfico 1: Comprimento da tubulação x Período da onda

Equation	$y = a + b \cdot x$		
Adj. R-Square	0,99841		
		Value	Standard Error
a	Intercept	6,39E-05	2,07E-05
b	Slope	0,00649	9,77E-05

Tabela 2: valores do coeficiente linear e do coeficiente angular da reta do gráfico 1.

Como era de se esperar, o coeficiente linear da reta é aproximadamente igual a zero ( $a=0,000064$ ). Sabemos ainda que a velocidade do som no ar é constante e podemos encontra-lo.

O valor encontrado para a velocidade do som foi  $c=(308,2 \pm 4,1)\text{m/s}$  que né razoável quando comparado com o valor encontrado na literatura  $c'=340\text{m/s}$ , podendo concluir portanto que a aproximação utilizada é bastante razoável.

O gráfico, frequência x comprimento do tubo fica:

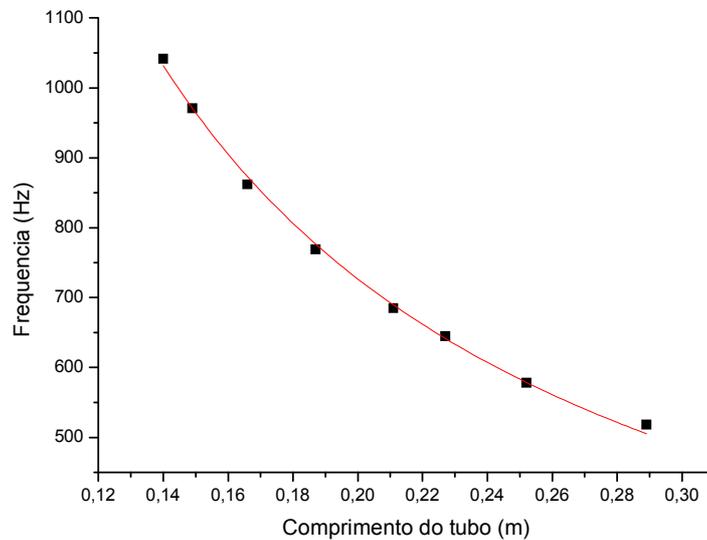


Gráfico 2: Comprimento do tubo x Frequência da onda.

Como era de se esperar, segue uma função do tipo  $f = \frac{1}{\tau}$ .

Se fizermos uma extrapolação do gráfico 1, é possível prever o comprimento necessário que um tubo deve ter para conseguir obter a próxima nota da escala, ou ainda, qualquer frequência desejada.

Foi observado ainda que, dependendo da intensidade que se soltava o ar no primeiro Dó, obtinha-se a oitava. Isto também está sendo considerado na teoria, uma

vez que temos como equação final  $f = \frac{nc}{2L}$ , ou seja, para  $n=1$  temos o primeiro modo de vibração do ar para aquele comprimento do tubo, já para  $n=2$  temos o segundo modo de vibração do ar para aquele mesmo comprimento de tubo, ou seja, a oitava da nota. O que está de acordo com a teoria. Quando  $f_2 = 2f_1$ , temos a oitava.

A intensidade e velocidade do ar são fatores que interferem no modo de vibração. Existe uma intensidade tal que, o segundo modo de vibração do ar para o

mesmo comprimento do tubo é atingida. Quanto maior for o tubo, mais fácil é atingir o segundo modo de vibração.

## 2) Fotos do experimento no estado em que se encontra

2.1) Estado em que o experimento se encontrava na data de entrega do Relatório Parcial.



Figura 9: Atual (10/10/10) configuração do instrumento.

## 2.2) Estado final do experimento.



Figura 10: Configuração final do instrumento.

## 3) Dificuldades encontradas.

As dificuldades encontradas até o momento na confecção do instrumento foram principalmente ligadas à vedação das partes, uma vez que vazamentos de ar podem interferir drasticamente no resultado.

Outra grande dificuldade é a respeito da afinação das saídas de ar. As saídas de ar estão conectadas a bocas de flauta que pelo princípio de Bernoulli emitem som e a afinação do som emitido está ligada diretamente com o comprimento dos tubos de PVC anexados às bocas. É extremamente complicado conseguir cortar os tubos de PVC de modo que a afinação do som seja exatamente igual a um harmônico da escala harmônica.

Esta etapa foi cumprida na tentativa e erro com ajuda de um afinador. Cortou-se um tubo de PVC aproximadamente do comprimento da flauta completa, e a partir daí,

com a ajuda do afinador foi-se cortando o tubo aos poucos ate atingir aproximadamente uma das notas.

#### **4) Sobre as referencias**

[1] <http://www.youtube.com/watch?v=MDTygFNhA5A>, acessado em 20/08/2010. O vídeo mostra um órgão de balão artesanal e foi a fonte inspiradora do projeto.

[2] [http://www.das.inpe.br/~alex/FiscadaMusica/fismus\\_instrumentos.htm](http://www.das.inpe.br/~alex/FiscadaMusica/fismus_instrumentos.htm), acessado em 22/08/2010. Link interessante que trás a física por trás os instrumentos musicais, desde as fontes sonoras, passando por timbre entre outros.

[3] H. Moysés Nussenzveig “Curso de Física Básica vol. 2”. Esta fonte é um livro de física básica utilizado nos cursos básicos de física e contem um embasamento teórico sobre ondas, ondas sonoras, propagação de onda, o som de instrumentos e etc.

[4] [http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%93rg%C3%A3o\\_\(instrumento\\_musical\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%93rg%C3%A3o_(instrumento_musical)), acessado em 20/09/2010. Nesta referencia, encontra-se um breve histórico do instrumento musical Órgão. Encontra-se também uma breve descrição do funcionamento básico de um Órgão.

[5] [http://caraipora.tripod.com/esc\\_temp\\_freq\\_.htm](http://caraipora.tripod.com/esc_temp_freq_.htm), acessado em 03/11/2010. Nesta referencia encontra-se a imagem que esta anexada no apêndice. Nela esta contida as frequências contidas na literatura e mais algumas informações adicionais.

[6] <http://www.cdcc.usp.br/ondulatoria/musica2.html>, acessado em 03/11/2010. Nesta referencia encontram-se algumas informações sobre as frequências musicais.

[7] [http://pt.wikilingue.com/es/Princ%C3%ADpio\\_de\\_Bernoulli](http://pt.wikilingue.com/es/Princ%C3%ADpio_de_Bernoulli), acessado em 03/11/2010. Como curiosidade e complementação do trabalho, nesta referencia encontra-se alguns conceitos envolvidos no principio de Bernoulli.

## **5) Descrição do trabalho**

### **5.1) Resumo**

O trabalho contemplará a construção de um órgão de balão com flautas. Pretende-se com este trabalho estudar propagação de onda sonora em tubulações abertas e fechadas, diferenciar os conceitos de intensidade, altura e timbre do som. O objetivo final do trabalho é correlacionar o comprimento das tubulações de saída de ar com a frequência da onda sonora emitida e na medida do possível calcular a velocidade do som no ar.

### **5.2) Introdução**

Este trabalho tem como foco aprofundar o estudo de ondas, principalmente o que diz respeito a ondas sonoras. Enfatizar-se-á aspectos relacionados ao conceito de altura de um som, mas antes deve-se introduzir brevemente alguns conceitos de teoria de ondas.

Em um sentido bastante amplo, uma onda é qualquer sinal que se transmite de um ponto a outro de um meio, com velocidade definida. Em geral, fala-se de onda quando ocorre a transmissão de um sinal entre dois pontos sem que haja transporte direto de matéria entre esses dois pontos.

Uma onda se caracteriza entre outras coisas pela sua velocidade de propagação, pela frequência de propagação, pela sua intensidade, pela sua direção de propagação entre outras. A Figura 11 traz algumas características básicas de uma onda.

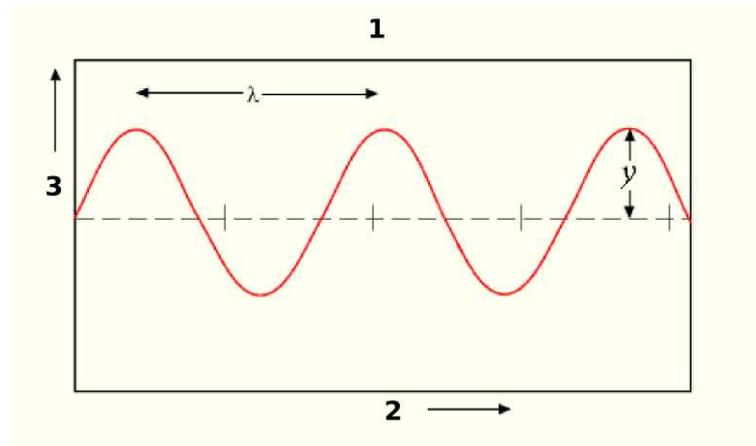


Figura 11: representação de uma onda.

Na Figura 11 temos ilustrada uma típica onda transversal, onde estão representados o seu comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a sua amplitude ( $y$ ).

Alguns conceitos podem ser expressos através destes conceitos apresentados.

A velocidade de uma onda por exemplo é dada por  $v = \frac{\lambda}{\tau}$ , onde  $\tau$  é o período de propagação da onda. Através do conceito de período, podemos expressar o conceito de frequência:  $f = \frac{1}{\tau}$ .

As ondas podem ser longitudinais ou transversais, dependendo da sua direção de propagação e podem depender de um meio material para se propagar ou não. A onda sonora é um exemplo de onda longitudinal que necessita de um meio para se propagar. A luz é uma onda eletromagnética e é um exemplo de onda transversal que não precisa de um meio material para se propagar.

### 5.3) A natureza do som

O som se propaga em fluidos como já falamos anteriormente, portanto se propaga tanto na atmosfera, como em líquidos e sólidos. Este fato vinculado com o fato de que não há transporte de matéria de um ponto a outro na propagação do som, já é uma indicação de sua natureza ondulatória.

Oscilações harmônicas podem produzir sons audíveis pelo ouvido humano somente num intervalo limitado de frequência, aproximadamente entre 20 Hz e 20 KHz.

A característica que distingue um som musical de um ruído é a periodicidade. O que não significa que um som musical tenha de corresponder a uma onda harmônica senoidal, mas sim que seja periódico. As qualidades que somos capazes de distinguir num som musical são sua intensidade, altura e timbre. Como já foi falado anteriormente, a qualidade que será tratada neste trabalho é a altura, mas diferenciara-se as qualidades brevemente para fins de esclarecimento.

A intensidade ( $I$ ) do som esta diretamente ligado a amplitude da onda. Quanto maior a amplitude da onda, maior a intensidade. A intensidade é a qualidade que relaciona-se com o volume do som.

A unidade de nível de intensidade é o *bel* (nome dado em homenagem a Alexander Graham Bell): dois sons diferem de 1bel quando a intensidade de um é 10 vezes maior que a do outro. Na pratica, usa-se decibel = 0,1bel. Toma-se como intensidade de referencia o valor da intensidade  $I_0 \approx 10^{-12} W / m^2$ , que corresponde ao nível zero de intensidade (limiar de audibilidade), definimos o nível de intensidade  $\alpha$  por:

$$\alpha = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) db$$

A altura de um som musical corresponde à sensação que nos permite distinguir entre sons mais graves e mais agudos. A frequência da onda é a característica física que esta relacionada com a altura. Quando maior for a frequência, mais agudo é o som e conseqüentemente sons mais graves correspondem a frequências mais baixas.

A altura do som, portanto é o que caracteriza as notas e escalas musicais. Notas musicais são sons com certas frequências bem determinadas que obedecem convenções estabelecidas historicamente. O intervalo entre duas notas musicais de frequência  $f_1$  e  $f_2$  é definido pela razão das frequências  $f_2/f_1$ . Em particular, quando

$f_2 = 2f_1$ , dizemos que é um intervalo de oitava, e os dois sons são percebidos como a “mesma” nota musical em alturas diferentes.

Uma aproximação razoável que se pode fazer para obtenção das notas musicais é:

COMPARAÇÃO ENTRE AS FREQUÊNCIAS MUSICAIS							
	DÓ	RÉ	MI	FÁ	SOL	LÁ	SI
<b>Frequência</b>	$f$	$9f/8$	$5f/4$	$4f/3$	$3f/2$	$5f/3$	$15f/8$
<b>Intervalo acústico</b>	$9/8$	$10/9$	$16/15$	$9/8$	$10/9$	$9/8$	

Tabela 3: comparação entre as frequências musicais.

Dois sons musicais de mesma intensidade e altura ainda podem diferir por outra qualidade, que chamamos de timbre do som. Com o timbre nossos ouvidos distinguem claramente a diferença entre a mesma nota emitida por diferentes instrumentos. Alguns autores dizem que o timbre representa uma espécie de “coloração” do som. A explicação física das diferenças de timbre é que nosso ouvido reconhece como a mesma nota duas ondas periódicas de mesma frequência  $f$ , muito embora os perfis de onda correspondentes possam ser muito distintos.

#### 5.4) O órgão e a física dos instrumentos musicais

O instrumento musical denominado “órgão” (do grego *organon*, instrumento, ferramenta) é classificado pela organologia (disciplina que trata da descrição e classificação de qualquer instrumento musical) como *aerofone*, classe de qualquer instrumento musical em que o som é produzido principalmente pela vibração do ar, sem a necessidade de membranas e cordas e sem que a própria vibração do corpo do instrumento influencia significativamente no som produzido. Basicamente, o órgão funciona com a passagem de ar comprimido em tubos de diferentes tamanhos, sendo que o caráter ondulatório forma-se quando o feixe de ar atinge a “boca” desses tubos, e vibra pela diferença de pressão variável segundo princípio de Bernoulli. O ar

comprimido provém de um fole, e o caminho que ele percorre (diferentes tubos para diferentes notas) é guiado pelos registros (teclas) acionados pelo instrumentista.

O Órgão artesanal é composto por oito bocais de flauta de plástico, cada uma acoplada a um esguicho de mangueira. Os esguichos podem ser acionados para permitir ou não a passagem de fluidos (funcionando como registros), e são todos acoplados a um tubo de PVC com uma das extremidades fechadas, e a outra ligada a uma bomba de ar. No meio desse tubo ainda é acoplada a um balão de festas.

Acionando a bomba, quando todos os esguichos estão fechados, o ar preenche todo o tubo de PVC e, devido à pressão interna que é gerada, ele começa a encher o balão, que é o único caminho possível para expansão. Com o balão bem cheio, abrindo um ou mais esguichos, o ar começa a fluir com velocidade praticamente constante (devido à pressão no balão) para o(s) bocal(s) de flauta respectiva(s), sendo gerado assim o som referente à aquela saída.

O bocal de flauta esta neste experimento servindo de fonte ativadora do som. Ele, assim como um tubo de órgão emite som por diferença de pressão do ar, enunciado no princípio de Bernoulli (vide apêndice 5.4).

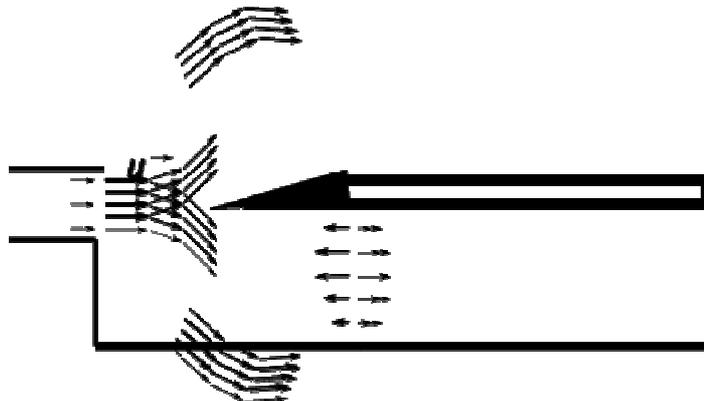


Figura 12: Representação esquemática de um bocal de flauta.

Considerando apenas o tubo de PVC acoplado ao bocal da flauta, que é onde o ar possui caráter ondulatório e tem potencial de oscilar em frequências audíveis, pode-se aproximar um modelo para o processo físico. Supondo a entrada de ar no bocal da flauta uma extremidade aberta e sabendo que a extremidade inferior do tubo é aberta

(ou seja, ambas as extremidades abertas), o primeiro modo normal de vibração do tubo tem comprimento de onda  $\lambda$  igual ao dobro do comprimento tubo  $L$ , o segundo igual ao comprimento do tubo, o terceiro igual metade do comprimento, e assim por diante. A figura 13 ilustra esses três primeiros modos do caso.

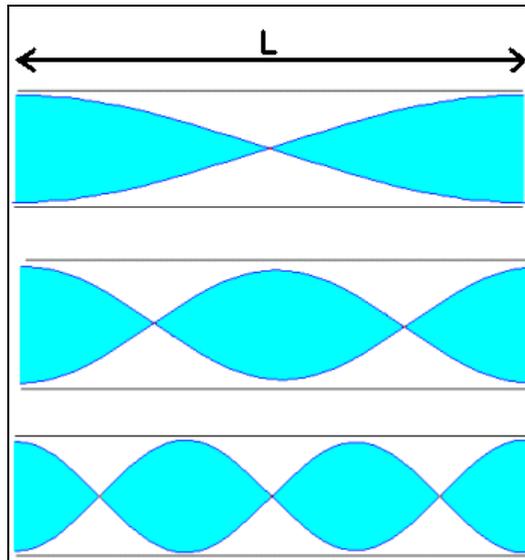


Figura 13: Três primeiros modos de vibração em uma tubulação

Assim, temos a seguinte equação geral:

$$\lambda = 2L / n .$$

Tendo a equação fundamental da ondulatória:

$$v = \lambda f ,$$

onde  $v$  é a velocidade do som no ar e  $f$  é a frequência. Assim, podemos expressar a frequência em função do comprimento do tubo:

$$f = \frac{nc}{2L}$$

### 5.5) Sugestões para próximos trabalhos.

Fica como sugestão para um próximo trabalho de instrumentação para ensino a continuidade deste trabalho. Tal continuidade pode ser dada pela substituição das bocas de flautas por membranas vibrantes, como fonte emissora de som.

A fonte de som “membrana vibrante” segue o mesmo princípio de cornetas. A corneta é de construção bem simples: formada por dois tubos de plástico, um interno ao outro, unidos por uma base fixa na extremidade inferior, e uma membrana na base superior, que é presa apenas ao tubo externo (como esse é ligeiramente menor que o interno, quando esticada a membrana fica em contato com a extremidade superior dos dois tubos).

Quando o ar entra pelo orifício, ele preenche o espaço entre os tubos. Criando pressão suficiente, o ar empurra a membrana pra cima, e adentra no tubo interno, vazando assim para fora, pela boca da corneta. Esse vazamento faz com que a pressão interna da corneta diminua, e a membrana volte a entrar em contato com a extremidade superior do tubo interno, fechando novamente o espaço entre os tubos. Se o ar é inserido constantemente pelo orifício da corneta, a membrana entra em vibração e a coluna de ar que vaza da boca passa a ter caráter ondulatório.

Considerando apenas o tubo interno da corneta, que é onde o ar possui caráter ondulatório e tem potencial de oscilar em frequências audíveis, pode-se aproximar um modelo para o processo físico.

Acoplando-se este sistema a base do órgão, pode-se ter um resultado semelhante, porém teremos agora um órgão de balão e cornetas.

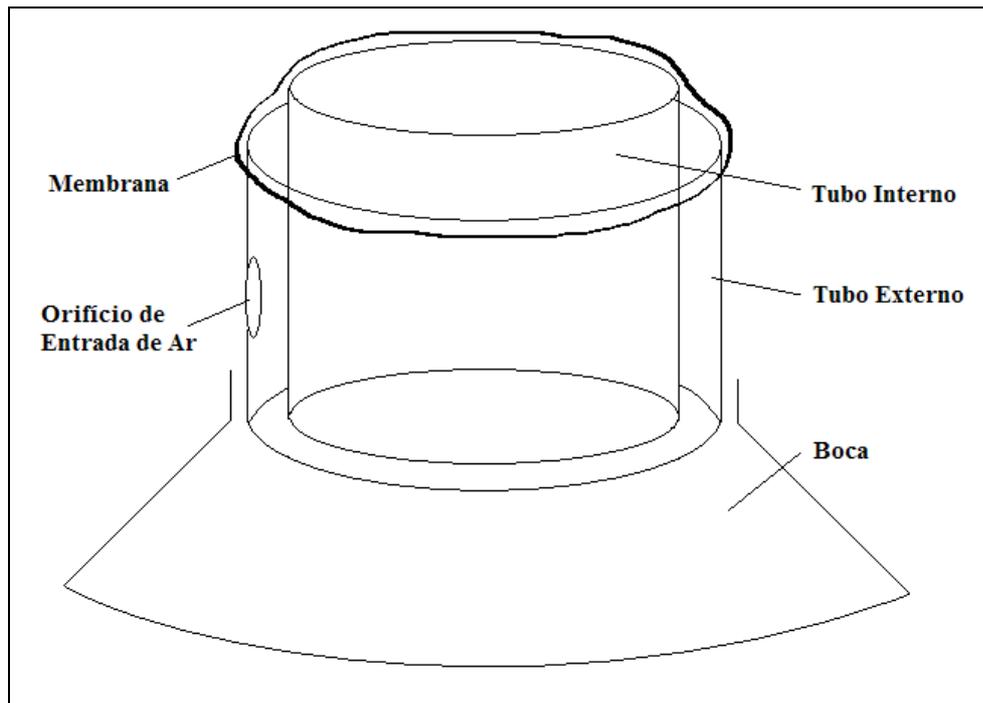


Figura 14: Esquema de uma corneta.

## 6) Opinião do orientador (RP)

Meu orientador concorda com o expressado neste relatório parcial e deu a seguinte opinião:

“O estudante realizou um ótimo trabalho até o momento. Desde a procura dos materiais, investigação das soluções possíveis e escolha da mais adequada para o projeto, ele mostrou iniciativa e boa metodologia na execução do trabalho. A montagem está avançada e deve ser concluída sem problemas. A compreensão teórica do experimento e sua "tradução" em diversos níveis de linguagem estão também sendo bem sucedida.”

## **7) Opinião do orientador (RF).**

O meu orientador realizou os seguintes comentários:

“O trabalho proposto foi concluído com sucesso. O estudante fez o projeto, buscou as soluções, e executou-as com grande destreza experimental e conhecimento teórico. Durante todo o trabalho, ele mostrou iniciativa e metodologia adequada. Ele também estudou os princípios teóricos do problema e expressou-os em diferentes níveis, com o cuidado pedagógico ao qual o projeto se propõe. O resultado final foi muito interessante, obtendo uma ótima definição nas notas musicais obtidas com o instrumento fabricado. Pessoalmente, devo admitir que o resultado me surpreendeu positivamente, levando em conta a proposta do instrumental utilizado (simples) e a resolução nas notas musicais obtidas. Considero o resultado final excelente.”

## **8) Horário da apresentação**

Primeiro horário do segundo dia, ou seja, 11 de novembro das 16h às 18h.

## **9) Apêndices.**

### **9.1) [http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%93rg%C3%A3o\\_\(instrumento\\_musical\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%93rg%C3%A3o_(instrumento_musical))**

O órgão é um instrumento musical tocado por meio de um ou mais manuais e uma pedaleira. O som é produzido pela passagem do vento (ar comprimido) através de tubos de metal e madeira.

Os órgãos variam imensamente em tamanho, indo desde uma pequena caixa até a monumentais caixas do tamanho de casas de 5 andares. Encontram-se sobretudo nas igrejas, mas também em salas de concertos, escolas e casas particulares.

Os executantes deste instrumento chamam-se organistas. Os seus construtores organeiros.

## *História*

---

O órgão é um dos instrumentos musicais mais antigos da tradição musical do Ocidente. Foi o primeiro instrumento de teclas.

O antepassado do órgão é o hydraulos, ou órgão hidráulico, inventado no século III a.C. pelo engenheiro grego Ctesíbio de Alexandria, responsável pelo cruzamento da flauta típica grega, o aulos, com o sistema hidráulico de injeção de ar comprimido nos tubos.

A mecânica consistia em abrir a passagem do ar para os tubos através de uma válvula parecida com uma tecla. Para que tal acontecesse o ar era mantido em pressão por processos hidráulicos (pressão de água). O órgão possuía apenas uma fila com 7 tubos de diferentes comprimentos, correspondendo cada tubo a uma nota.

Este instrumento esteve muito em voga no Império Romano. Alcançando uma forte amplitude sonora (volume), era apto ser usado ao ar-livre: em jogos, no circo, nos anfiteatros. Nesta altura o hydraulos era já denominado como organum hydraulicum em latim ou organon hydraulikon em grego.

A fila de tubos duplicou e triplicou, até que foi incorporado um mecanismo de selecção dessas filas de tubos, que mais tarde se vêm a chamar registos. O conjunto de tubos de uma fila tem o mesmo formato e características, emitindo um timbre próprio. Assim sendo, num órgão existem tantos timbres diferentes, quanto o número de registos (filas) existentes.

O sistema hidráulico usou-se até ao século V, tendo surgido no século IV o sistema pneumático de foles. Trata-se do órgão pneumático. Como já não havia a componente hidráulica, o instrumento passou simplesmente a ser denominado Organus.

A introdução de órgãos nas igrejas é tradicionalmente atribuída ao Papa Vitalian no século VII. Pelo vínculo que estabeleceu ao serviço do culto, prestado ao

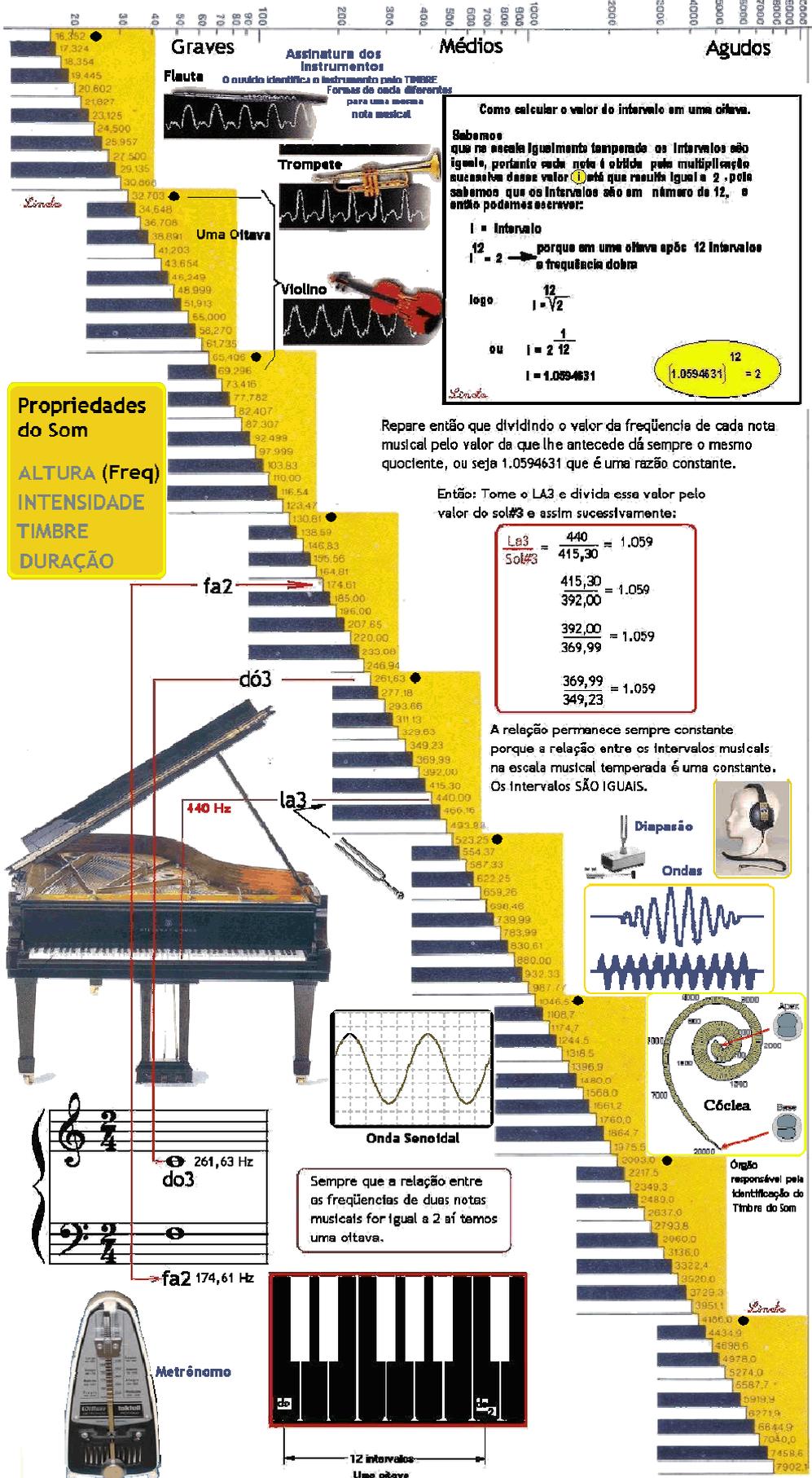
longo de séculos na Liturgia Cristã, carrega uma estatuto inigualável no compto da Música Sacra.

Foi o instrumento de trabalhos de maior parte dos compositores da História da Música Ocidental, até ao aparecimento do piano. J. S. Bach elevou a técnica e o virtuosismo de execução ao ponto mais alto da história deste instrumento.

9.2) [http://caraipora.tripod.com/esc temp freq .htm](http://caraipora.tripod.com/esc_temp_freq.htm)

# ALTURA - ou FREQUÊNCIAS DAS NOTAS (Hz)

Hz 12000



**Propriedades do Som**  
 ALTURA (Freq)  
 INTENSIDADE  
 TIMBRE  
 DURAÇÃO

**Como calcular o valor do intervalo em uma oitava.**  
 Sabemos que na escala igualmente temperada os intervalos são iguais, portanto cada nota é obtida pela multiplicação sucessiva desse valor (1) até que resulte igual a 2, pois sabemos que os intervalos são em número de 12, e então podemos escrever:  
 $I = \text{Intervalo}$   
 $12$   
 $I = 2$  porque em uma oitava após 12 intervalos a frequência dobra  
 logo:  
 $I = \frac{12}{2}$   
 ou  $I = 2^{\frac{1}{12}}$   
 $I = 1.0594631$  (1.0594631)<sup>12</sup> = 2

Repare então que dividindo o valor da frequência de cada nota musical pelo valor da que lhe antecede dá sempre o mesmo quociente, ou seja 1.0594631 que é uma razão constante.

Então: Tome o LA3 e divida esse valor pelo valor do sol#3 e assim sucessivamente:

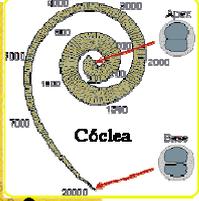
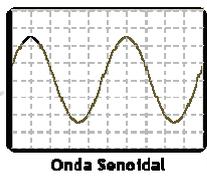
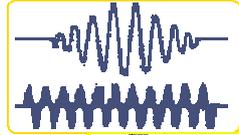
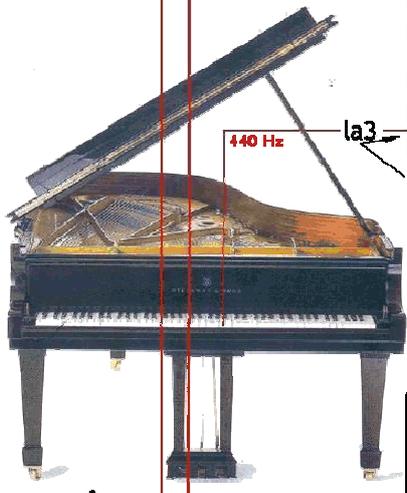
$$\frac{\text{La}\#3}{\text{Sol}\#3} = \frac{440}{415,30} = 1,059$$

$$\frac{415,30}{392,00} = 1,059$$

$$\frac{392,00}{369,99} = 1,059$$

$$\frac{369,99}{349,23} = 1,059$$

A relação permanece sempre constante porque a relação entre os intervalos musicais na escala musical temperada é uma constante. Os intervalos SÃO IGUAIS.

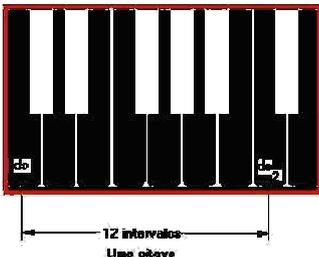


do3 261,63 Hz

fa2 174,61 Hz

Sempre que a relação entre as frequências de duas notas musicais for igual a 2 aí temos uma oitava.

Órgão responsável pela identificação do Timbre do Som



### 9.3) Propagação de erros.

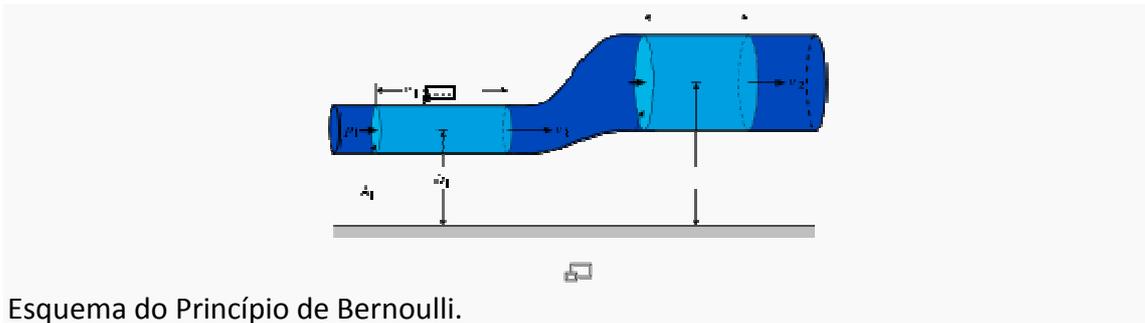
Foram utilizadas as seguintes relações no cálculo da propagação do erro.

$$\delta(a \cdot b) = (a \cdot b) \sqrt{\left(\frac{\delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\delta b}{b}\right)^2}$$

$$\delta\left(\frac{a}{b}\right) = \left(\frac{a}{b}\right) \sqrt{\left(\frac{\delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\delta b}{b}\right)^2}$$

$$\delta(ka) = k\delta a$$

### 9.4) Princípio de Bernoulli. ([http://pt.wikilingue.com/es/Princ%C3%ADpio\\_de\\_Bernoulli](http://pt.wikilingue.com/es/Princ%C3%ADpio_de_Bernoulli))



Esquema do Princípio de Bernoulli.

O princípio de Bernoulli, também denominado equação de Bernoulli ou Trinômio de Bernoulli, descreve o comportamento de um fluido se movendo ao longo de uma linha de corrente. Foi exposto por Daniel Bernoulli em sua obra Hidrodinâmica (1738) e expressa que em um fluido ideal (sem viscosidade nem rozamento) em regime de circulação por um conduto fechado, a energia que possui o fluido permanece constante ao longo de seu percurso. A energia de um fluido em qualquer momento consta de três componentes:

1. Cinético: é a energia devida à velocidade que possui o fluido.
2. Potencial gravitacional: é a energia devida à altitude que um fluido possui.
3. Energia de fluxo: é a energia que um fluido contém devida à pressão que possui.

A seguinte equação conhecida como "Equação de Bernoulli" (Trinomio de Bernoulli) consta destes mesmos termos.

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \textit{constante}$$

onde:

- V = velocidade do fluído na secção considerada.
- g = aceleração gravitatoria
- z = altura na direcção da gravidade desde uma cota de referência.
- P = pressão ao longo da linha de corrente.
- $\rho$  = densidade do fluído.

Para aplicar a equação devem-se realizar os seguintes supostos:

- Viscosidad (fricción interna) = 0 Isto é, considera-se que a linha de corrente sobre a qual se aplica se encontra em uma zona 'não viscosa' do fluído.
- Volume constante
- Fluído incompressível, onde  $\rho$  é constante.
- A equação aplica-se ao longo de uma linha de corrente.

Ainda que o nome da equação deve-se a Bernoulli, a forma acima exposta foi apresentada em primeiro lugar por Leonhard Euler.

Um exemplo de aplicação do princípio encontramos-lo no fluxo de água em tubería.τ

9.5) Imagens obtidas com o programa TrueRTA das diferentes notas do órgão.

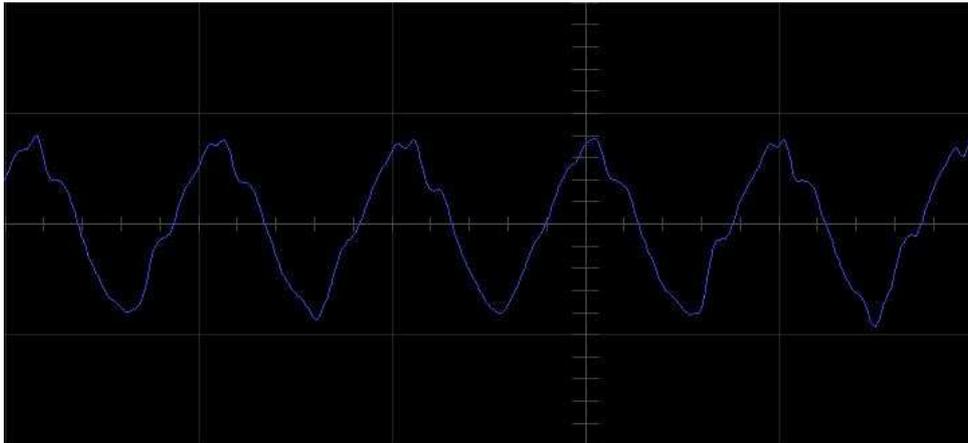


Figura 15: Dó ( $f= 518,13\text{Hz}$ ).

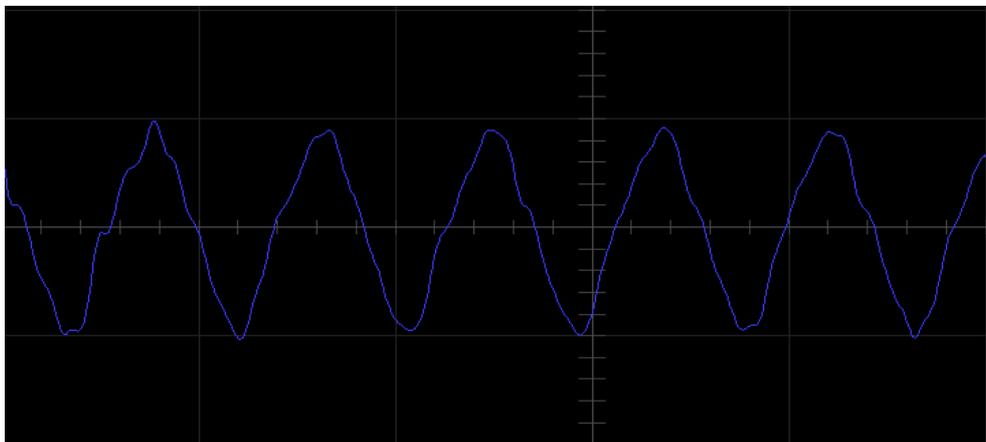


Figura 16: Ré ( $f= 578,03\text{Hz}$ ).

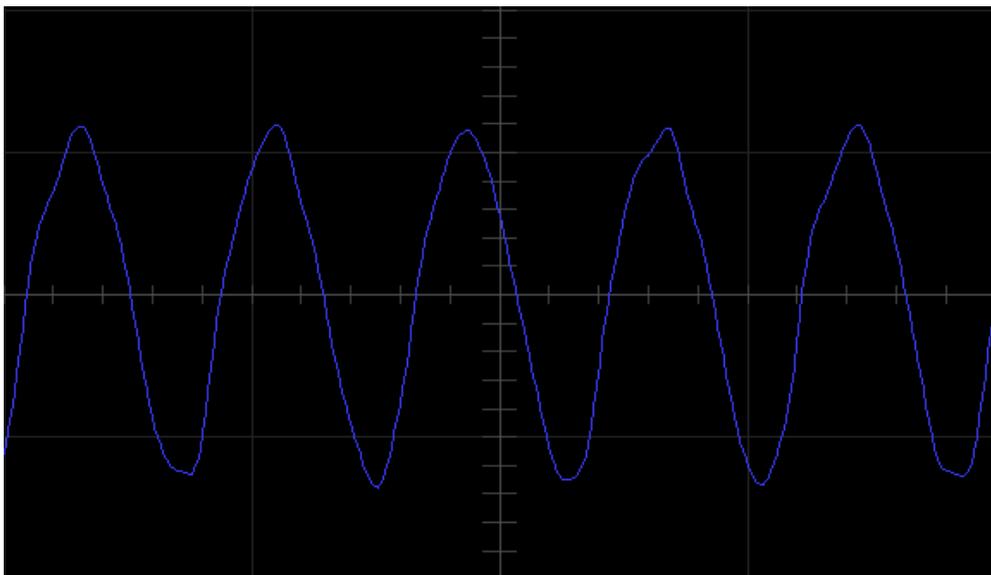


Figura 17: Mi ( $f= 645,16\text{Hz}$ ).

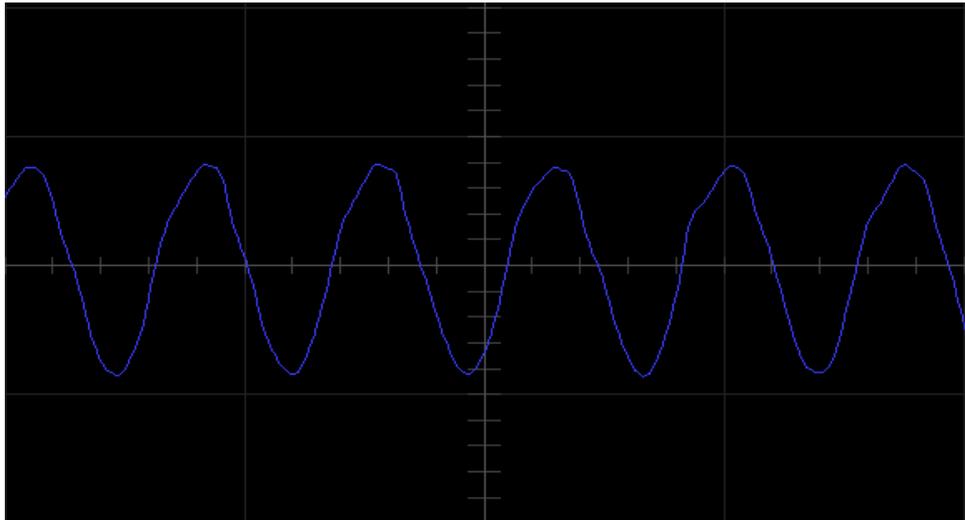


Figura 18: Fá ( $f= 684,93\text{Hz}$ )

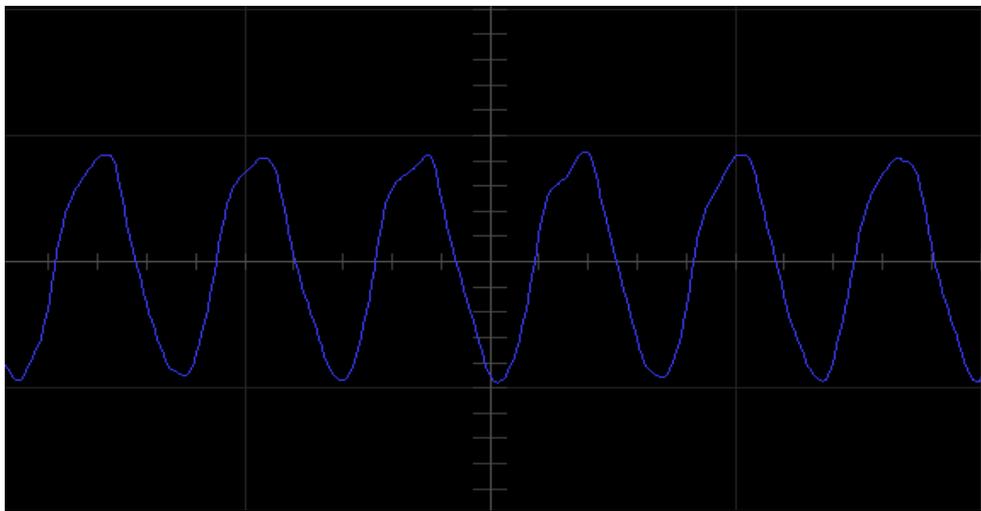


Figura 19: Sol ( $769,23\text{Hz}$ )

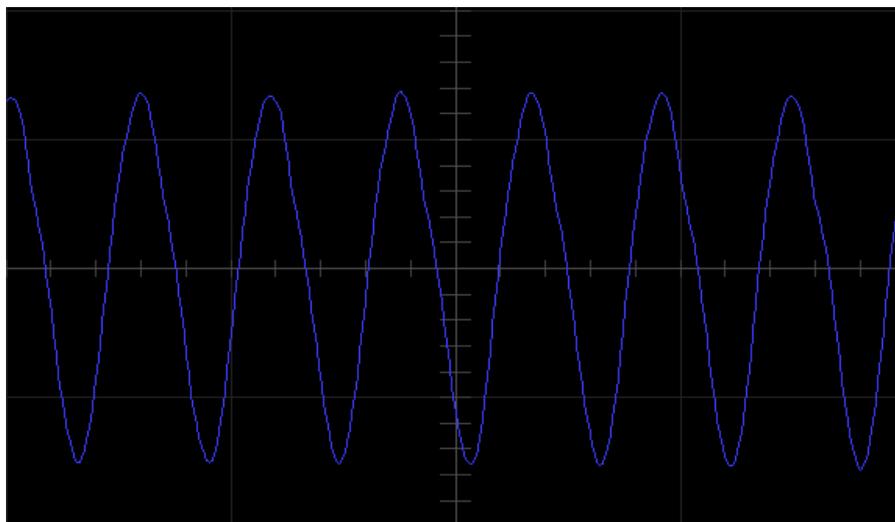


Figura 20: Lá ( $862,07\text{Hz}$ )

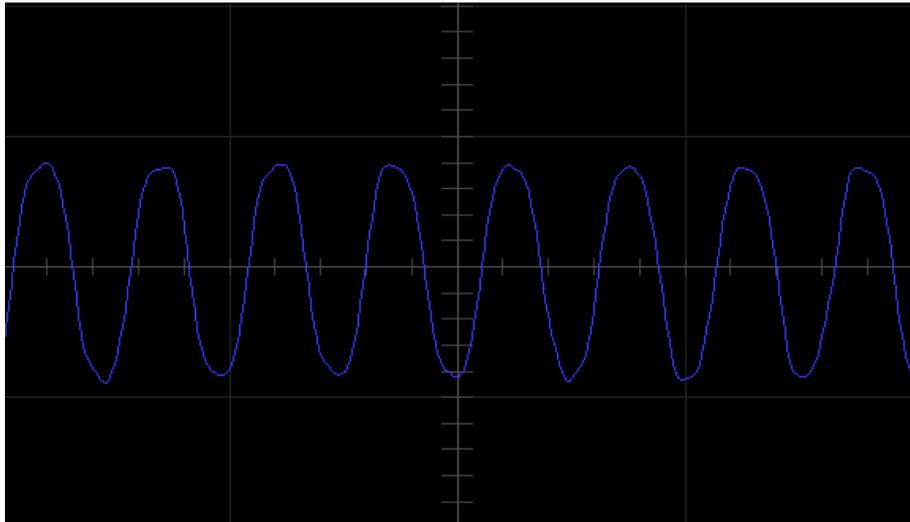


Figura 21: Si (970,87Hz)

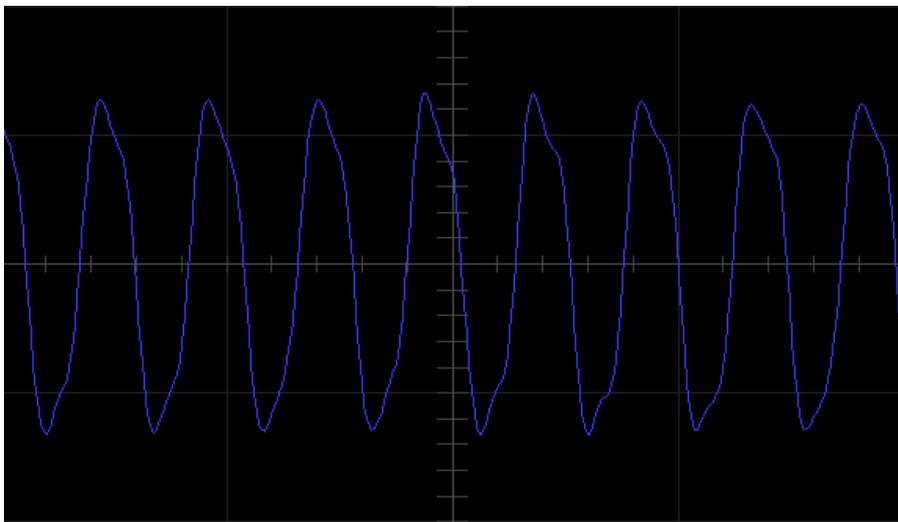


Figura 22: Dó (2) (f= 1041,67Hz)

### 9.6) Diferentes timbres.

Como complementações do trabalho foram obtidas imagens utilizando o mesmo programa (TrueRTA) de uma mesma nota, porém provinda agora de um violão. Com isso, é possível observar que para uma mesma nota musical temos diferentes timbres para os diferentes instrumentos.

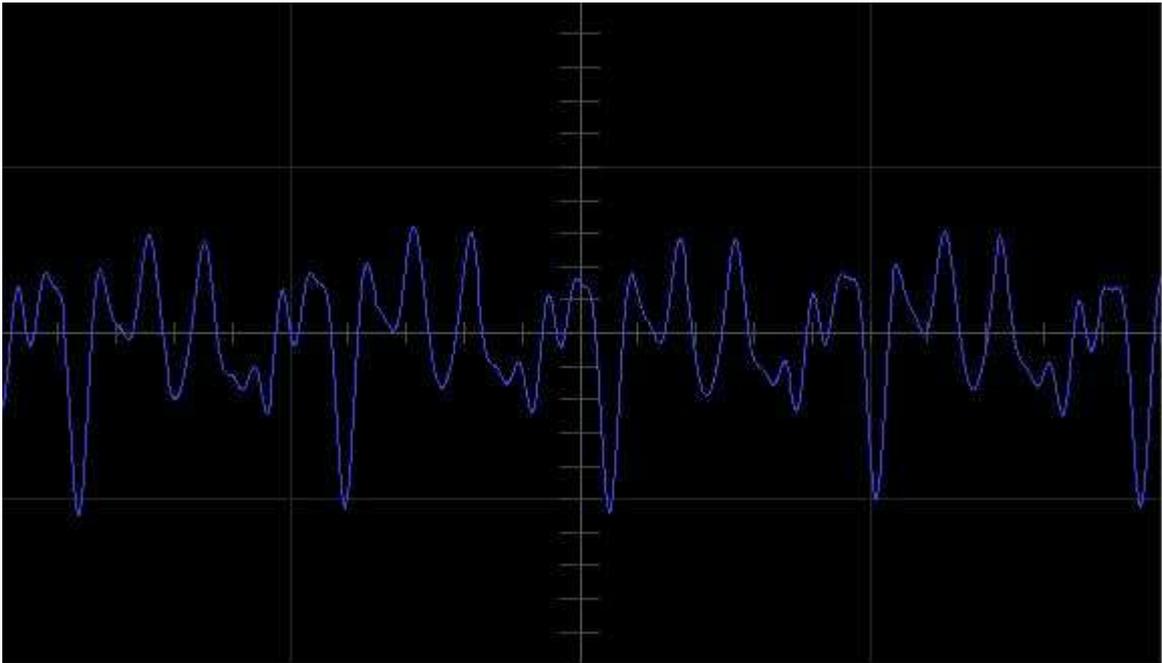


Figura 23: Lá do violão.

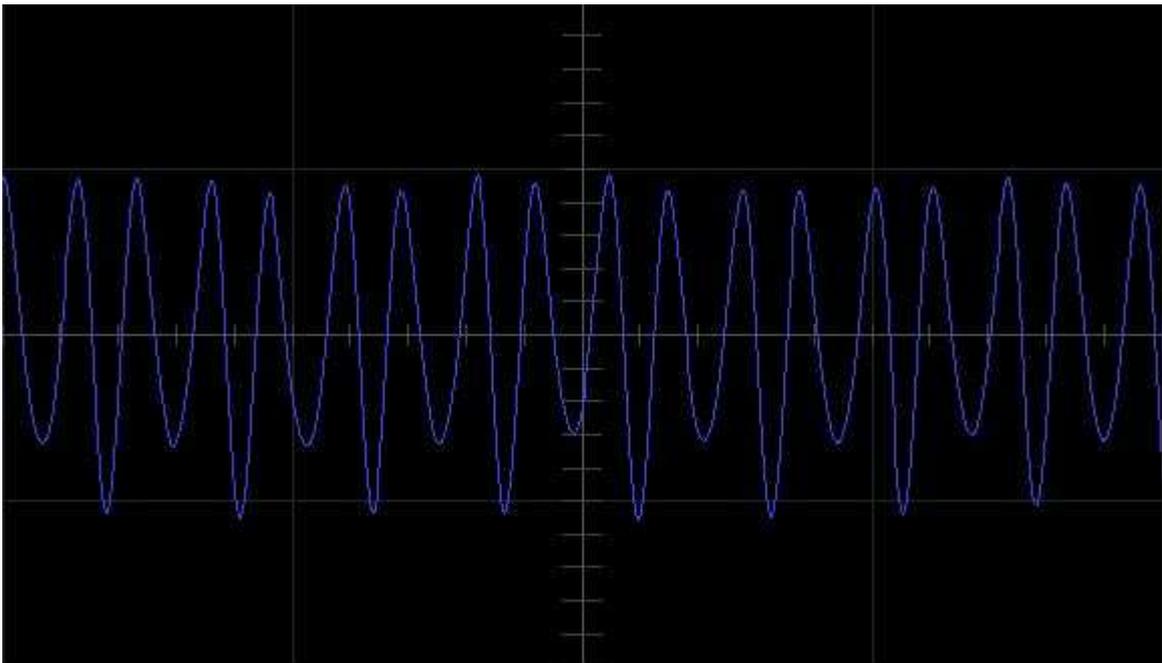


Figura 24: Lá harmônico do violão.

Observa-se ainda que não há perda de periodicidade, sendo a diferença apenas o timbre. A intensidade não interfere no som que é ouvido.

## **10) Considerações finais e agradecimentos**

Acredito que este experimento possa auxiliar no ensino de ondas, visto a sua simplicidade. É possível com ele observar conceitos básicos de física que algumas vezes não são tão claros quando explicados apenas na teoria. Conceitos como por exemplo:

- A velocidade do som é bem definida;

- O som se propaga como uma onda;

- O som tem características que o diferem de outros sons como timbre, altura e intensidade.

Este trabalho não seria possível sem a ajuda de algumas pessoas. Gostaria de agradecer imensamente ao Prof. Dr. José Antonio Brum pela excelente orientação neste trabalho e pela amizade. Gostaria de agradecer também ao meu grande amigo Rodolfo Thomazelli que me ajudou em todas as etapas do trabalho, com sugestões e auxílio na confecção do instrumento.