



# Instituto de Física Gleb Wataghin

Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP

## CURSO F809 – INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO

### PERCEPÇÃO DO PITCH FANTASMA UTILIZANDO A SIRENE DE SEEBECK

Fabio Gomes Carneiro, ra.002966, e-mail: [fabio-carneiro@uol.com.br](mailto:fabio-carneiro@uol.com.br)

Orientador Prof. Dr. Marcelo Knobel.

Coordenador do curso Prof. Dr. José Joaquim Lunazzi.

#### Resumo

Já vem de muito tempo o estudo da percepção do som. Entre a primeira metade do século VI a.C. e o início do século V a. C, Pitágoras iniciava estudos sobre a percepção do som e da altura (*pitch*) [1]. Outros cientistas notáveis estudaram o assunto, obtendo progressos significativos na área.

Neste relatório será descrito sucintamente o método que será utilizado para a percepção do fenômeno conhecido como pitch fantasma, utilizando um modelo de sirene, que foi desenvolvida pelo alemão Louis Friedrich W.A. Seebeck (1805 - 1849). Foi montada uma sirene onde os conceitos podem ser estudados e identificados.

## Introdução

Altura ou *pitch* é a sensação subjetiva que cada indivíduo possui em relação à frequência de um determinado tom. E é o que determina se um som é alto ou baixo, ou seja, um som alto seria um som agudo e um som baixo um som grave. E está relacionado com a frequência do som, porém restrito à interpretação individual do ouvinte.

A sirene inventada por Friedrich W.A. Seebeck (1805-1849) é constituída por um gerador acústico feito de um grande disco de bronze, giratório, com um conjunto numeroso de furos passantes e eqüidistantes situados na face do disco, como pode ser observado na Fig.1. As vibrações acústicas são geradas se o disco for girado, e um jato do ar estiver dirigido aos furos. A frequência da onda pode ser constante ou variável, dependendo do raio escolhido para se colocar o jato de ar, esta frequência é determinada pelo número dos furos atravessados pelo jato do ar por unidade de tempo.



Fig.1 – Disco de Seebeck (Diâmetro 50cm)

Um tom harmônico complexo, produzido pela voz ou por muitos instrumentos musicais, pode ser analisado em seu fundamental ou parciais cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental. As formas de onda combinadas se repetem na frequência fundamental.

Ao escutar um tom holístico, ouvimos o harmônico fundamental como o *pitch* do tom. O que acontece se faltar a frequência fundamental, devido a uma máscara produzida por um ruído ou devido a um sistema de reprodução pobre, como por exemplo, o telefone ou um rádio do bolso? Geralmente, nós ainda ouviremos um harmônico fundamental, mesmo que ele não esteja lá!

A este fenômeno se dá o nome de “*Pitch Fantasma*”. Vários autores deram nomes diferentes ao *Pitch Fantasma*: passo baixo, passo residual, fundamental faltante. O fenômeno foi descoberto na primeira metade do século XIX: Seebeck usou uma sirene para gerar vários testes padrões periódicos, e encontrou um passo, correspondente ao que nós chamaríamos hoje o “período da forma de onda”, ele acreditou que o cérebro analisa a informação do sincronismo para determinar a altura, gerando a primeira “teoria de periodicidade” da percepção da altura. Helmholtz e seus seguidores acreditavam que o *pitch* fantasma era gerado própria orelha [Warren 84, p. 262]. Esta última hipótese foi comprovada não verdadeira por Schouten e outros [2].

### Historia do Estudo do *Pitch* (altura) de um som

O *pitch* já tem sido estudado há bastante tempo, por cientistas como Pitágoras, Helmholtz, Ohm e Bekesy. As primeiras teorias consideravam que o *pitch* era percebido no nível periférico do sistema auditivo, mas as teorias posteriores indicaram que era necessário o processamento auditivo central para essa percepção. Atualmente as teorias integram o processamento auditivo periférico e o central [3].

As principais teorias desenvolvidas são duas, conhecidas como “Teoria de Posição” (frequência) e “Teoria de Periodicidade” (tempo). E para compreender as teorias é necessário entender algumas idéias iniciais.

Um dos primeiros experimentos nesta diretiva foi o experimento da “Sirene de Seebeck”, que já foi apresentada anteriormente (Fig.1). Seebeck verificou que o som produzido pela sirene tinha uma altura muito clara, correspondente ao tempo de intervalo entre os sopros de ar. Ao dobrar a quantidade furos a Frequência do novo som também dobrava, como esperado. Porém, ao utilizar um disco com um número de furos menor que o primeiro e não periódicos, percebeu que a altura do som continuava idêntica a do primeiro (Fig.2). Concluiu assim que periodicidade é o determinante para a sensação da altura.

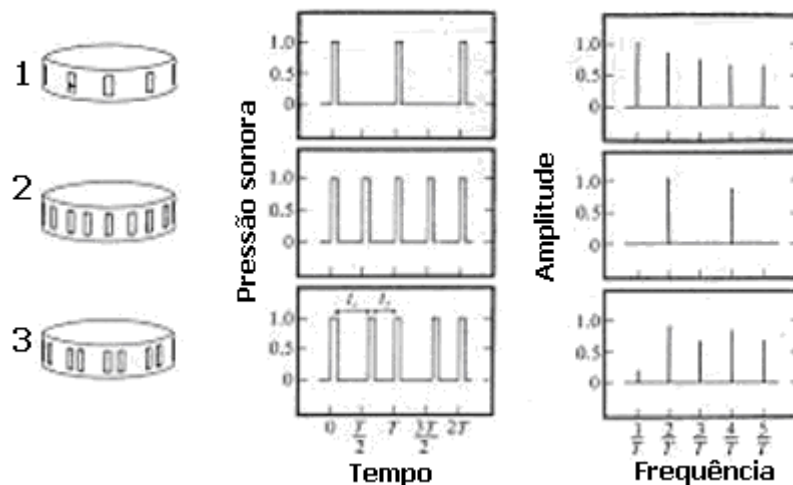


Fig2 – Gráficos Pressão sonora X Tempo e Amplitude X Frequência, para cada uma das máscaras.

Ohm também estudou o assunto e teve principalmente uma posição contrária à teoria de Seebeck, afirmando que certa altura só poderia ser percebida se a onda contivesse alguma componente naquela frequência. Mais tarde foi verificado que sentimos a altura mesmo quando o som tem uma fraca componente em determinada frequência, esse fenômeno foi mais tarde denominado pelo próprio Ohm como *ilusão acústica*.

Von Helmholtz dedicou-se ao assunto em 1862 e adicionou à teoria de Ohm a idéia dos produtos de distorção gerados no próprio ouvido. Para tons puros eles seriam harmônicos de do tom puro e para sons complexos a distorção produziria tons de tipo soma e diferença, resultando na geração de um harmônico fundamental forte, pois os tons provenientes dessa diferença ocorreriam para uma mesma frequência.

A partir de experimentos com cócleas, a Teoria da Posição foi posteriormente elaborada, e se baseia na idéia de que diferentes frequências estimulam diferentes regiões da membrana basilar que excitam de uma forma específica a atividade neuronal. Ela apresenta pontos deficientes como no caso da explicação sobre a discriminação dos sons em nosso sistema auditivo e sua grande velocidade de processamento, e ao por que atribuímos uma única altura a um som complexo.

Por outro lado, segundo a Teoria da Periodicidade, o ouvido é o responsável por uma análise temporal da onda sonora, que é decodificada pela distribuição temporal dos impulsos elétricos pelo nervo auditivo. Essa decodificação ocorreria no sistema nervoso central, através de um processo chamado *autocorrelação*.

Schouten [1940], também realizou um importante experimento sobre a percepção de sons complexos, eliminando o harmônico fundamental de um som complexo, mas mantendo a altura do som. Mais tarde adicionou um tom puro com altura próxima para identificar se os indivíduos testados ouviam algum tipo de batimento, isso não ocorreu e ele pode concluir que havia falhas na teoria de Helmholtz, pois o ouvido deveria gerar distorções que levariam ao batimento. Desse modo, desenvolveu as primeiras idéias da teoria do Tom Residual ou Pitch Fantasma.

### Percepção do som

Um som com uma única frequência é muitas vezes denominado tom. Interliga-se a frequência física de um tom à nossa sensação, denominada *pitch*, ou seja, determinada mudança na frequência implica uma mudança semelhante no *pitch*. Mas, além das ilusões ópticas, existem igualmente ilusões acústicas. A mais conhecida denomina-se escala de Shepard.

A escala de Shepard dá ao ouvinte a impressão de uma melodia que sobe continuamente, quando de fato isso não acontece. A discriminação do *pitch* de um som complexo é sempre subjetiva e varia de pessoa para pessoa. De fato para algumas pessoas um som com uma frequência constante podem parecer percepções diferentes da altura do som consoante este se apresenta pelo lado esquerdo ou direito (a este fenômeno chama-se "*binaural diplacusis*").

Em 1933 Fletcher e Munson demonstraram como está caracterizada a sensibilidade auditiva (Fig. 2).

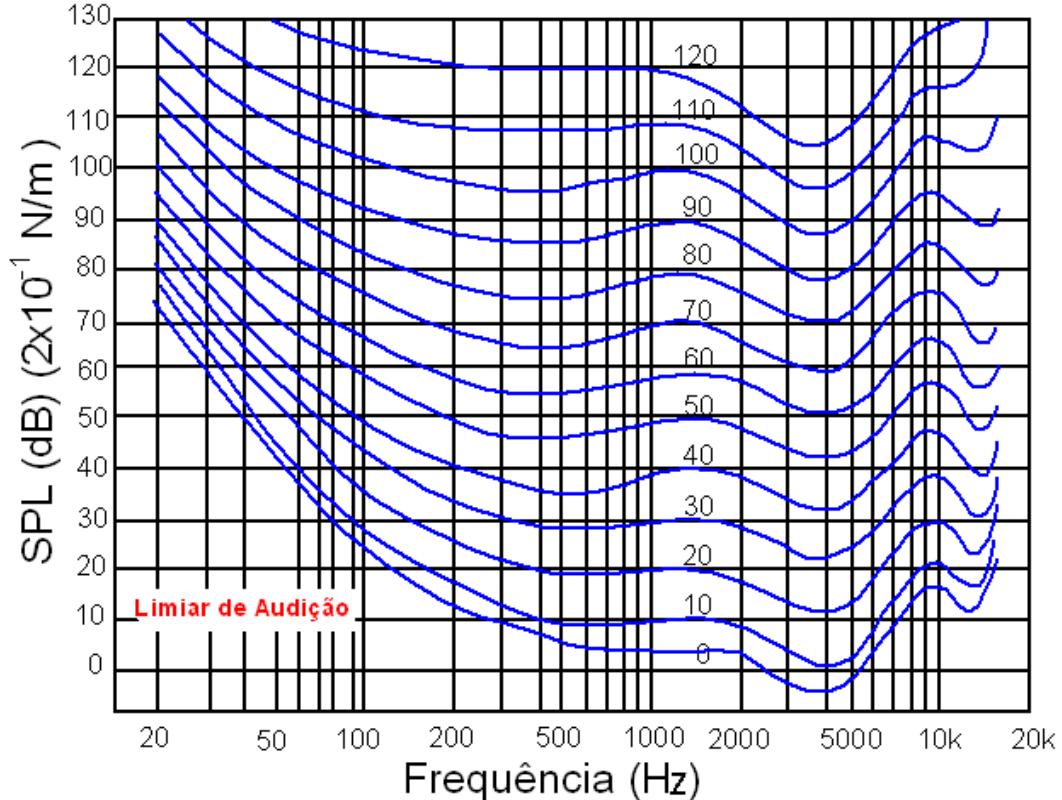


Fig.3 – Curvas de Fletcher e Munson  
(1 phon é a unidade de nível sonoro)

Note-se então que o ouvido apresenta-se bastante insensível a sons graves e a em a sua sensibilidade máxima entre os 3500 e os 4000 Hz, perto da primeira zona de ressonância que ocorre no ouvido externo. A segunda zona de ressonância ocorre perto dos 13 kHz. A capacidade de distinguirmos a mínima alteração no tom de um som depende da frequência, da intensidade sonora, da duração do som, da velocidade da alteração bem como do próprio treino auditivo do ouvinte. O ouvido humano é bastante sensível a diferenças de frequências entre dois sons. Em sons graves mudanças de frequência de 1 Hz podem ser detectadas. A diferença na frequência das duas notas mais graves do piano é de apenas 1,6 Hz.

Aos 1000 Hz a maior parte das pessoas é capaz de distinguir mudanças na frequência com o valor de 3 Hz. Aos 100 Hz mudanças na frequência podem ser notas a partir dos 0,3Hz. Ou seja o ouvido é sensível não propriamente a mudanças absolutas da frequência mas sim a uma razão entre a zona que frequências do som que se está a ouvir e da mudança efetuada. Estudos feitos por Stevens (1935) verificaram que sons puros, ou seja, tons sinusoidais de baixa frequência tendem a parecer mais graves ao aumentarmos a intensidade destes, sendo essa impressão mais acentuada por volta dos 150 Hz. Pelo contrário sons agudos tendem a parecer mais agudos do que são na realidade, sendo que essa impressão é mais acentuada por volta dos 8000 Hz. A Fig.3 mostra as diferenças

de tom em função do nível de pressão sonora (SPL) para sons puros entre as frequências de 200 Hz e 6000 Hz em que cada 100 centos corresponde a um semitom.

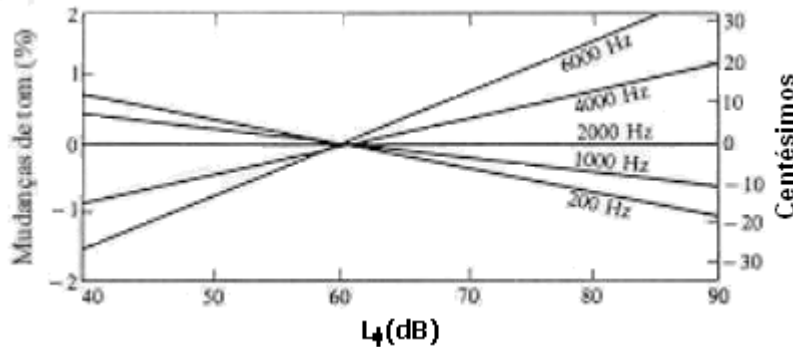


Fig.4 – Mudanças de tom de sons puros em função do Nível de Pressão Sonora.

Usando como fonte sonora não mais sons puros, mas instrumentos musicais, verificou-se que a alteração de altura do som é mínima, da ordem dos 17 centos quando a intensidade sonora passa dos 65 dB para os 95 dB, sendo que a predominância de harmônicas, abaixo ou acima dos 1000 Hz tem um papel fundamental na determinação se a altura do som aumenta ou diminui. Outro fenômeno de alteração de altura do som é igualmente observado no decaimento do som como, por exemplo, em órgãos de igreja em que se a altura do som parece aumentar quando o som decai. No que respeita à duração do som e a percepção da altura deste temos que ter em conta o princípio de incerteza acústica dada por  $\Delta f \cdot \Delta t = K$ , em que  $\Delta f$  é a incerteza na frequência e  $\Delta t$  a duração do som. Em condições exemplares K pode tomar o valor de 0,1. Se a duração do som for menor que 25 ms logo a incerteza na frequência é maior, ou seja, a altura do som parece que varia mais. O ouvido tem mais facilidade em detectar alterações na altura do som em sons puros do que em outros sons. Por exemplo, considere ruído centrado nos 1500 Hz com largura de banda de 10 Hz e o som puro de 1500 Hz. Nota-se que  $\Delta t$  tem um valor seis vezes maior para o ruído em relação ao som puro ou seja o som puro apresenta uma incerteza  $\Delta f$  bem menos elevada frequência.

Uma onda periódica pode ser decomposta, através da análise de Fourier, nas suas componentes parciais com frequências  $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ , etc, e em que  $f$  é a frequência fundamental. Pode acontecer que a fundamental tenha menor amplitude do que as outras harmônicas, como foi demonstrado por Seebeck.

Se o ouvido estiver a ouvir um som que contenha as harmônicas exatas, como por exemplo, um som que contenha as harmônicas parciais de 400, 600, 800, 1000 e 1200 Hz então o ouvido identificará a altura do som como sendo a fundamental, ou seja, neste caso 200 Hz. Ou seja, o ouvido tem a capacidade de identificar a frequência fundamental mesmo que esta tenha uma intensidade fraca ou que não exista. Este efeito possibilita então que seja possível ao ouvido humano reconhecer sons graves em alto-falantes de pequena dimensão ou rádios portáteis, isto porque para sons complexos com a fundamental até aos 200 Hz a altura do som é reconhecida fundamentalmente usando a quarta e quinta harmônica.

## Propriedades Psico-acústicas

Diferentes autores identificam distintos componentes do som. Os principais são: Intensidade do som (*loudness*), altura (*pitch*) e timbre.

A intensidade do som depende basicamente da amplitude da onda sonora, e é medida em decibels (dB). Os decibels são calculados em comparação com a pressão atmosférica normal e as alterações de pressão provocadas pela onda sonora emitida. O ouvido humano consegue distinguir milhões de graduações entre dois valores.

Por causa da grande variação de intensidades para as quais o ouvido é sensível, torna-se mais conveniente usar uma escala logarítmica do que aritmética. Assim sendo, o nível de intensidade  $\beta$  de uma onda sonora é definido pela equação.

$$\beta = 10 \cdot \log I/I_0$$

Onde  $I_0$  é uma intensidade de referencia arbitraria, de valor  $10^{-16} \text{Wcm}^{-2}$ , correspondendo grosseiramente ao som mais débil que se pode ouvir. Os níveis de intensidade são expressos em decibéis, abreviados para db.

Se a intensidade de uma onda sonora for igual a  $I_0$  ou  $10^{-16} \text{Wcm}^{-2}$ , seu nível de intensidade é zero. A intensidade máxima que o ouvido pode tolerar, cerca de  $10^{-4} \text{Wcm}^{-2}$ , corresponde a um nível de intensidade de 120db[4]. Abaixo temos o nível de intensidade em decibéis de vários ruídos, para uma breve avaliação.

Decibels: Descrição do som

1 a 5 dB O mais suave som possível de detectar;

25 a 45 dB - Um silencioso quarto numa cidade;

45 a 60 dB - Uma conversação normal;

70 a 95 dB - Uma orquestra sinfônica;

120 a 130 dB - Limite da dor;

140 dB Um motor de um avião a jato.

## Percepção do *Pitch*

Quando a diferença de freqüência entre os dois sons é muito pequena, ambos são julgados como tendo o mesmo *pitch*. Isto é válido para os julgamentos em todas as magnitudes psicológicas. Sempre que a variação de um estímulo físico é menor do que um certo limite, ou a diferença mínima evidente, a sensação associada é julgada como sendo a mesma. Assim que a variação exceda mínima evidente, a sensação de mudança é detectada.

O limiar da diferença para o *pitch* depende da frequência, nível sonoro e duração de um tom e a súbita mudança na frequência. Isso depende do treino musical do ouvinte e a ampliação de alguns métodos de medição. Algumas vezes, o termo resolução de frequências é usado para denotar o limiar da diferença dividido pela frequência ( $f/f_0$ ).

### O Pitch Fantasma

Apesar de ser um assunto estudado há séculos, a percepção de sons complexos é um tema onde ainda existem diversas dúvidas e controvérsias. Em particular, não se sabe com exatidão onde ocorre a percepção da altura (*pitch*), mas havia indícios experimentais de que um enorme processamento no sistema nervoso central era necessário para que o nosso cérebro se decida pelo valor apropriado. Entretanto, uma teoria recente que utiliza um sistema físico genérico parece indicar que a percepção da altura pode ocorrer em níveis mais baixos do sistema nervoso. Essas novas teorias podem ter uma importância fundamental no desenvolvimento e concepção de novos aparelhos auditivos. [5]

Um som complexo é composto por uma soma de sons de diversas frequências, mas ele é definido no nosso sistema auditivo principalmente pela sua altura mais baixa, conhecida como "frequência fundamental". As componentes com frequências maiores são conhecidas como sobretons, e as frequências são geralmente múltiplas da frequência (ou harmônico) fundamental. O mais interessante é que mesmo quando a frequência fundamental é removida de um som, os sobretons fazem com que o nosso sistema auditivo possa perceber a frequência fundamental da mesma maneira. Esse fenômeno é conhecido há muito tempo, e vem sendo conhecido como o problema do "tom residual", "harmônico ausente" ou "harmônico fantasma". Esse fenômeno é o que explica porque conseguimos entender uma música claramente, mesmo quando reproduzida em um radinho de pilha de péssima qualidade sonora, ou como conseguimos reconhecer uma música toda por sinos de uma igreja.

Fisicamente pode ser explicado de acordo com o espectro de frequências, onde no primeiro caso a fundamental correspondia a  $1/T$  (onde  $T$  é o período de espaçamento entre os furos no disco, neste caso entre os furos das mascaras como visto na Fig.5) E, portanto os harmônicos eram  $2/T$ ,  $3/T$ ,  $4/T$ ... Já no segundo caso a fundamental era tida como  $2/T$ , e seus harmônicos como  $4/T$ ,  $6/T$ ..., sendo a altura duas vezes maior. No terceiro caso, período  $T$  é o correspondente a soma dos intervalos de sopros  $t_1$  e  $t_2$  que se alternam, portanto  $T = t_1 + t_2$ , fazendo com que a altura percebida seja a mesma do primeiro caso, mesmo com a fundamental de amplitude diferente, ou seja, um timbre de som diferente.



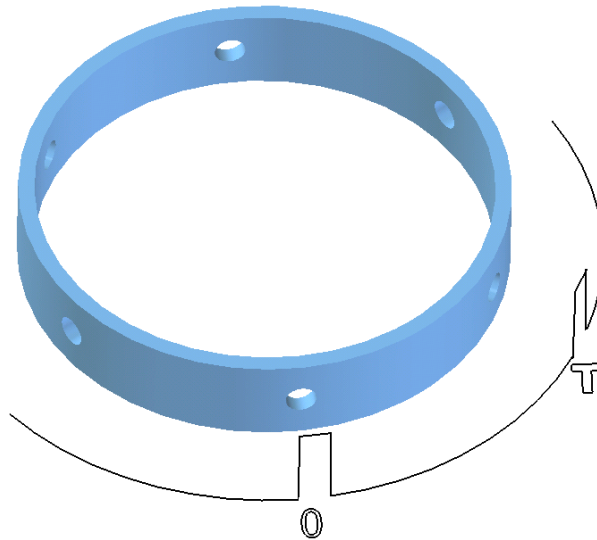


Fig.5 – Figura ilustrativa da periodicidade gerada por uma Mascara

### Montagem experimental

Para a sirene de Seebeck é necessário ter um sopro de ar contínuo nos furos do disco, o que pode ser conseguido através de ar comprimido, por exemplo. Porém, seria muito mais trabalhoso termos um compressor junto ao aparato experimental e tornaria mais difícil a utilização didática do experimento em alguns lugares.

Pensando nisto foi desenvolvido um disco que fará o papel do ar comprimido, este disco possui internamente um formato parecido com o de uma turbina fazendo o ar soprar por suas cavidades (Fig.6).

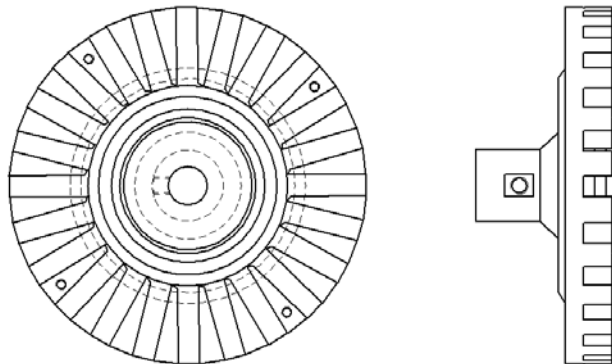


Fig.6 – Disco utilizado para gerar o ar que passa através dos furos (ROTOR)

Este disco é coberto por outro dispositivo (Fig.7) que funciona como o disco de Seebeck, mas este ficar parado, ou seja, funciona como se o disco de Seebeck ficasse parado e a fonte de ar ficasse girando.

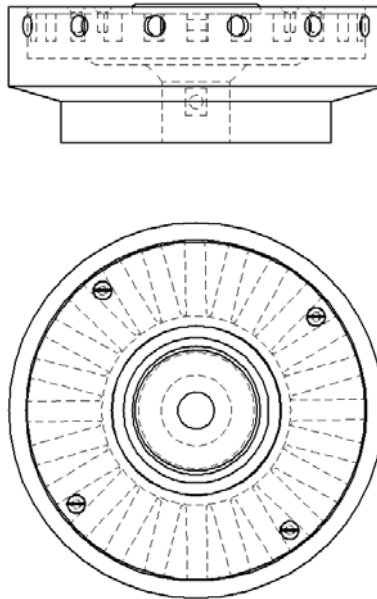


Fig.7 – Dispositivo utilizado para emitir o som

Este dispositivo então é montado em um motor que terá o rotor em seu eixo giratório, e este motor por sua vez possui conectado a ele um inversor de frequência.

O inversor de frequência tem como função neste experimento, fornecer um aumento na frequência do rotor. Gerando uma diferença no *pitch*. Está montagem pode ser vista na Fig. 8.

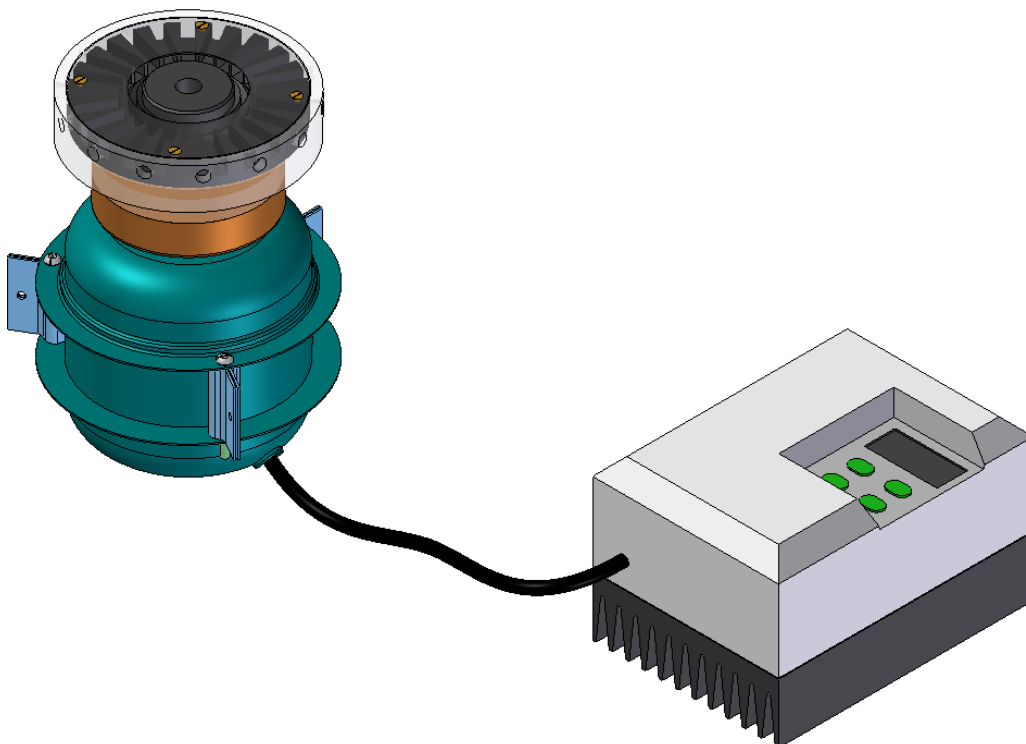


Fig.8 - Montagem do experimento

## Descrição do Experimento

Como uma primeira parte da demonstração, fazemos o seguinte: utilizando o inversor variamos a frequência do rotor e com isso podemos verificar a validade, da teoria que diz que a altura do som depende diretamente a frequência, ou seja, aumentando a frequência do rotor, aumentaremos a frequência do som e teremos um som mais agudo, e diminuindo a frequência do rotor diminuiremos a frequência do som e como resultado teremos um som mais agudo.

E para observarmos o pitch fantasma, utilizando a mesma montagem experimental, utilizaremos então uma variação com três máscaras, A primeira com 12 furos igualmente espaçados, a segunda com a metade do número de furos do primeiro e a terceira com os espaçamentos entre os furos intercalando o espaçamento da primeira máscara e da segunda.

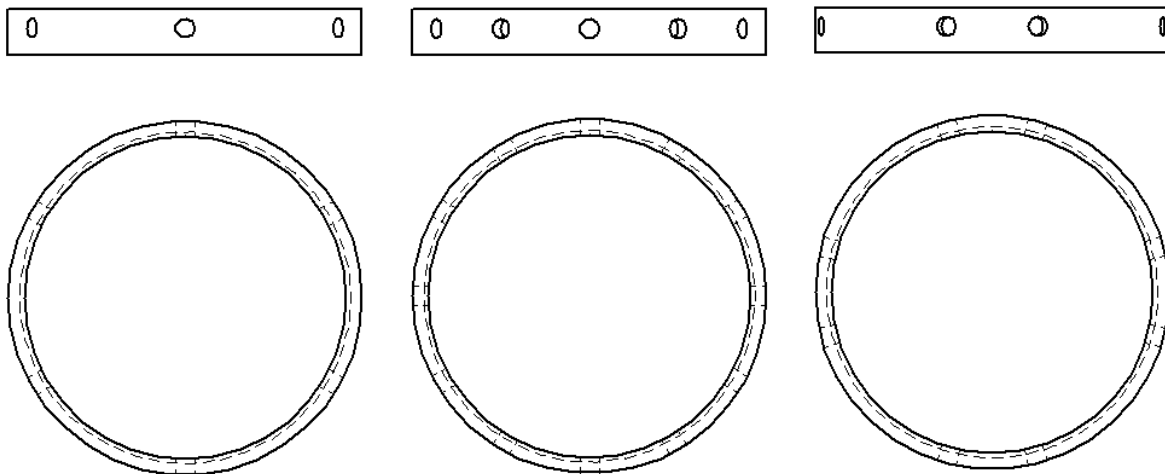


Fig.9 – Na seqüência máscara nº1, nº2 e nº3.

Primeiramente, utilizando a máscara nº1, deixe o rotor em uma frequência que produza um som facilmente audível, ou seja, se o experimento estiver sendo realizado em um local com bastante silêncio em redor, a frequência do rotor pode ser baixa. Observe então o som gerado por esta frequência, coloca-se a máscara nº2 e observe que há um aumento na altura do som. Após a segunda observação, retire a máscara nº2 e insira a máscara nº3 será possível notar que teremos um som igual ao ouvido no primeiro caso.

A partir destas observações podemos notar que apesar de existir mais furos na máscara nº3 temos um som igual à máscara nº1. Observando novamente a Fig.2 podemos ver graficamente a frequência gerada pelo equipamento.

A Fig.5 auxilia no entendimento dos gráficos contidos na Fig.2. Como visto anteriormente, um som complexo é composto por uma soma de sons de diversas frequências, mas é definido principalmente pela sua altura mais baixa, ou frequência fundamental. As frequências são geralmente múltiplos da frequência (ou harmônico) fundamental. O que devemos observar é que com a máscara nº3 ouvimos o som do harmônico mesmo sem que ele esteja sendo produzido, pois

para esta máscara temos dois períodos diferentes  $t_1$  e  $t_2$ . Onde  $t_1+t_2 = T$ , e o som que ouvimos é o som produzido com um número espaçados em  $T$ .

### Considerações Finais

Este projeto possui uma finalidade estritamente didática, e é justamente por isso que o projeto foi apresentado de uma forma mais simples, uma vez que para este é um assunto que para um projeto de pesquisa poderia ser muito melhor elaborado e seria necessário, um maior estudo e discussão dos fatores envolvidos, como por exemplo a fisiologia auditiva.

### Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Marcelo Knobel - Primeiramente por aceitar me orientar, uma vez que sou aluno do curso noturno e não tenho como vir durante o dia e nem muito tempo para trabalhar sobre o projeto.

Ao Sr. Walter A. Valongo, técnico do Laboratório de Materiais e Baixas Temperaturas – Que me ajudou muito, usando as peças que compunham o conjunto.

Ao Sr. Abelardo de Souza Carneiro da empresa Degussa – Que me ajudou em alguns testes para avaliação do desenvolvimento da sirene, pelo fornecimento do motor, e pelo empréstimo do inversor de frequência.

### Bibliografia e Referências

- [1] <http://www.educ.fc.ul.pt/icm/icm2001/icm23/biografiapitagoras.htm>
- [2] <http://www.mmk.ei.tum.de/persons/ter/top/virtualp.html>
- [3] <http://www.neurophys.wisc.edu/~ychen/textbook>
- [4] Física – Volume 2 – Calor, ondas e óptica, Frank W. Sears e Mark W. Zemansky.
- [5] <http://www.ifi.unicamp.br/~knobel/radar/pitch.html>
- [6] <http://students.fct.unl.pt/users/ascb/ouvido.html>
- [7] *The Science of Sound*, Thomas D. Rossing, Addison-Wesley Publishing Company (Menlo Park), second Edition 1990.