

**universidade federal de santa maria
centro de ciências naturais e exatas
curso de física bacharelado**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Projeto:

**ANÁLISE DINÂMICA DE UM SISTEMA PARA
REPRODUÇÃO DE CONTRABAIXO ELÉTRICO**

elaborado por
Cezar Augusto Gomes

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Everton Lüdke - Orientador, UFSM

Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara, UFSM

Prof. Dr. Lúcio Strazzabosco Dorneles, UFSM

Santa Maria, janeiro de 2010.

ANÁLISE DINÂMICA DE UM SISTEMA PARA REPRODUÇÃO DE CONTRABAIXO ELÉTRICO

Cezar Augusto Gomes

Orientador: Everton Lüdke

Laboratório de Rádio Interferometria e Eletrônica-LARIE

Resumo

Neste trabalho, apresenta-se um estudo realizado para verificar o desempenho de um sistema projetado para a reprodução de sinais acústicos de baixas frequências com definição melhorada para uso em contrabaixo elétrico. A análise foi feita empregando-se técnicas, equipamentos e espaço físico do Laboratório de Acústica do Centro de Tecnologia (CT) da UFSM, de acordo com as normas de medição acústica. Uma comparação entre ensaios com o sistema em câmara de reverberação e em campo livre foi feita para verificar o comportamento do sistema em ambas as situações.

Palavras-chave: Reprodução sonora; baixas frequências; contrabaixo elétrico; alta definição

Abstract

In this work, I present a study done to assess the performance of a system designed to reproduce low-frequency acoustical signals with improved definition to use with a electric bass. The analysis has been done by employing equipments and techniques from the Acoustic laboratory from the UFSM-Technology Centre (CT) according to standars of sound measurement. With this analysis, A comparison between assays with the system assembled in a reverberation chamber and the free open space has been done to study the beheaviour of the system in both situations.

Keywords: Sound reproduction; low frequencies; electric bass; high definition

Sumário

1	INTRODUÇÃO	7
2	SISTEMA DE REPRODUÇÃO	10
3	DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO ACÚSTICO DO SISTEMA	15
3.1	Medição em Campo Livre	18
3.2	Medições na Câmara Reverberante	25
4	COMPARAÇÃO ENTRE AS DINÂMICAS DE CADA CAIXA	30
4.1	Comparação subjetiva das curvas de potência	40
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

Lista de Figuras

1	Resposta do amplificador.	17
2	Posições de medição da caixa acústica (vista superior).	19
3	Posições de medição da caixa acústica (vista lateral).	20
4	Comparação entre NPS e \bar{R}_f	21
5	Potência acústica em campo livre.	24
6	Tempo de reverberação.	27
7	Resposta acústica das caixas.	29
8	Comparação câmara reverberante e campo livre.	32
9	Esquema da caixa acústica.	33
10	Caixa acústica aberta.	34
11	Caixa acústica fechada.	35
12	Caixa acústica comercial.	38

Lista de Tabelas

1	Posições recomendadas para colocação do microfone	22
2	Potência acústica dos sistemas medidos em reverberante.	36

1 INTRODUÇÃO

Um contrabaixo elétrico de quatro cordas, o mais popular dos contrabaixos elétricos, com afinação padrão em Mi (usando o Lá 440 Hz como padrão de afinação), tem como nota mais grave esta, com uma frequência de 82,407 Hz (FLETCHER H., ROSSING D., 1998). Existem ainda variações deste modelo de instrumento, como contrabaixos elétricos com cinco, seis e até sete cordas, onde pelo menos uma delas tem afinação mais baixa, próximo dos 60 Hz. Existem ainda combinações de duas notas (intervalos) que podem ser tocados neste instrumento, alguns destes resultando em uma nota mais baixa do que as outras envolvidas, exigindo assim que a caixa consiga reproduzir tal nota.

Sabe-se que duas ondas de frequências próximas se interferem sofrem do fenômeno do batimento, onde a frequência do batimento é igual a diferença entre as frequências das duas ondas. Sabe-se também que uma corda oscilando em um padrão estacionário tem uma série de harmônicos (modos normais de vibração) associados á vibração da corda. O primeiro harmônico (ou primeiro modo normal de oscilação) remete a "nota"na qual a corda está afinada, dando o tom desta, pelo fato de sua amplitude ser muito superior do que a amplitude dos outros harmônicos da série. Nesta condição, tem-se a equação 1,

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

onde λ é o comprimento de onda e L é o comprimento da corda. Pode-se generalizar esta equação, como mostra a equação 2:

$$L = \frac{n\lambda}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

ou

$$\lambda = \frac{2L}{n}. \quad (3)$$

A frequência f de uma onda é dada pela relação

$$f = \frac{v}{\lambda}, \quad (4)$$

onde v é a velocidade de propagação da onda. Substituindo o λ de (3) por (4)

tem-se que

$$f = \frac{vn}{2L} = \left(\frac{v}{2L}\right)n = (\text{constante}) \cdot n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

ou seja, como o comprimento da corda e a velocidade, esta dependendo da tensão dela, são constantes, a frequência de vibração da corda depende diretamente do número do harmônico da mesma. Quando $n = 2$ ocorre o intervalo perfeito, chamado de oitava, quando há uma repetição de toda a escala musical novamente, só que em frequências mais altas.¹ Quando $n = 3$, ocorre um intervalo de quinta perfeita, só que deslocado uma oitava acima da tônica (primeiro harmônico). Dividindo por dois este intervalo, afim de levá-lo à mesma oitava da tônica, encontra-se que o intervalo musical de quinta perfeita entre duas notas é de $3/2$.

Por exemplo, ao tocar-se um C_3 ² consecutivamente com um G_3 (Sol 196 Hz, que faz um intervalo de quinta perfeita com C_3) tem-se a seguinte relação de frequências:

$$f = G_3 - C_3 = \frac{3}{2}C_3 - C_3 = C_3\left(\frac{3}{2} - 1\right) = \frac{1}{2}C_3 = C_2 \quad (6)$$

onde C_2 está uma oitava abaixo do C_3 . Ou seja, tocando o intervalo de quinta perfeita mais baixo que um instrumento consiga, esta irá soar como se fosse a primeira nota do intervalo uma oitava mais abaixo, que vem a ser uma nota que está fora do alcance do instrumento, mas mesmo assim soa. E este é apenas um dos intervalos possíveis de serem usados para criar este efeito. Com isto, um contrabaixo elétrico de 5 cordas pode vir a gerar notas com frequências próximas do limite audível, se encontrados os intervalos corretos para tal.

Ainda precisa-se que o sistema de reprodução tenha uma resposta fiel nas frequências mais altas, onde os outros sistemas não são mais tão falhos. Um contrabaixo elétrico com 4 cordas e 24 casas (24 notas diferentes na escala para cada corda), com afinação padrão, terá como nota mais alta o G_5 (Sol 783,99 Hz). Este sistema, além de responder com definição nas frequências especificadas para cada nota, precisa ter uma resposta plana nas frequências dos harmônicos superiores de cada nota. São estes harmônicos superiores, cada um com sua intensidade

¹Como existem 7 notas musicais, ao fim da sétima nota da escala volta-se a primeira, só que esta com frequência dobrada, fechando um ciclo de 8 notas, que compreendem uma oitava. O ser humano é capaz de ouvir aproximadamente dez oitavas quando jovem.

²Dó 130,81 Hz na nomenclatura anglo-saxônica. Como ouvimos aproximadamente 10 oitavas, usa-se o índice numérico nas notas para definir em qual das oitavas que ela se encontra

relativa firmemente estabelecida, que definem o timbre do instrumento (OLSON, 1967).³

Para encontrar a frequência de um dado harmônico de uma corda vibrando, basta multiplicar a frequência do primeiro modo normal de oscilação pelo número do harmônico. Logo, o 10^o harmônico da nota Sol descrita acima terá uma frequência de 7.839,9 Hz. Contudo, quanto mais alto o número do harmônico, menor é sua intensidade relativa ao primeiro, tornando possível truncar a série a partir de algum momento. Quanto mais termos da série forem reproduzidos com definição, maior será a resolução do sistema de reprodução. Ou seja, para ter um sistema que reproduza o sinal com a perfeição matemática exigida, este deveria ter uma curva de resposta plana na faixa de frequência entre 20 Hz e 20 kHz, o que torna-se inviável. Mas uma resposta plana próxima dos 3 kHz já é o suficiente para reproduzir o som de um contrabaixo elétrico com definição, pois os harmônicos mais superiores da série, que ultrapassam esta faixa de frequência, dão uma contribuição mínima para o timbre do instrumento.

A partir disto, uma faixa de frequências boa para a resposta do sistema de reprodução seria entre 30 Hz e 3 KHz, aproximadamente.

³É a superposição dos harmônicos gerados por qualquer corpo que emite um pulso acústico que define o timbre característico que nos permite reconhecer o corpo ou o instrumento a partir do som emitido. Não existe na natureza corpo algum capaz de emitir uma onda sonora que seja descrita apenas por uma onda senoidal pura, mas sempre uma superposição de senoides.

2 SISTEMA DE REPRODUÇÃO

O sistema de reprodução de sinais acústicos provenientes de um contra-baixo elétrico consiste em um sistema de captação do sinal, um sistema de pré-amplificação, de amplificação de potência e uma caixa acústica como sistema de dispersão do sinal na forma de ondas sonoras. Para realizar os ensaios de modo a determinar a potência acústica em função da frequência para este sistema, usa-se sinais gerados por computador, mais especificamente de ruído branco.

O ruído branco consiste de uma soma de termos harmônicos de todas as frequências com a mesma intensidade relativa, o que torna muito mais viável as medições de resposta acústica da fonte. Fisicamente é inviável para um sistema gerar um sinal com esta forma, porém há aproximações bem razoáveis para este sinal. Quanto menor for o intervalo de entre frequências para este sinal, maior será a resolução deste. Com o sistema reproduzindo ruído branco, é possível verificar quais as faixas de frequências que o sistema favorece, tornando possível verificar a resposta deste.

O sistema eletrônico de amplificação e de pré-amplificação para reproduzir sinais harmônicos na faixa de frequências audíveis (20 Hz até 20 kHz) é muito simples. Componentes eletrônicos ativos, usados para realizar a amplificação do sinal, geralmente apresentam uma resposta plana nesta faixa de frequências, de modo que o principal problema envolvido neste tipo de estudo está na caixa acústica, encarregada de transformar o sinal elétrico em uma onda sonora. A caixa acústica faz uso de um transdutor, geralmente um alto-falante de bobina, para transformar o sinal elétrico em acústico. Porém, este transdutor apresenta partes móveis, das quais a produção da onda sonora depende. São as partes do sistema que são descritos pelas leis da mecânica que estão sujeitas a fenômenos que podem comprometer a reprodução de um sinal harmônico com definição.

Uma das partes principais da caixa acústica é o alto-falante. Este vem a ser o transdutor responsável, na maioria dos casos, pela transformação do sinal elétrico em acústico, apresentando, este, uma bobina densa, móvel, sob um ímã permanente, de modo que quando o sinal elétrico proveniente do amplificador atravessa esta, surge um campo magnético associado a corrente elétrica que por sua vez está associada ao sinal elétrico proveniente do instrumento (OLSON, 1967). Porém, esta bobina apresenta uma indutância, que quando ligada ao amplificador que a alimenta, interage com o circuito deste, fazendo com que este sistema se comporte como um filtro passivo (MALVINO, 1986). Este efeito pode ser minimizado se

escolhermos para o projeto componentes de boa qualidade assim como também os alto-falantes devem ser. O campo magnético associado a corrente que atravessa a bobina interage com o campo magnético do imã permanente, produzindo uma força magnética da forma $i\vec{L} \times \vec{B}$, onde i é a corrente elétrica que atravessa a bobina na direção \vec{L} e \vec{B} é o campo magnético do imã permanente, (REITZ J.R., MILFORD F.J., CHRISTY R.W., 1982) que atua no cone do alto-falante, força esta que terá um módulo, uma direção e um sentido que dependem apenas do sinal que está atravessando a bobina. O cone do alto-falante é dotado de uma suspensão elástica, de modo que ele possa oscilar em torno de um ponto de equilíbrio. Logo, o cone do alto-falante se comporta como um oscilador massa-mola, e obedece a equação

$$[(i\vec{L} \times \vec{B}) + (-k\Delta x)] = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (7)$$

onde Δx é o deslocamento do cone em relação ao ponto de equilíbrio e k é a constante elástica da suspensão deste, e i é da forma

$$i = A \text{ sen}(\omega t). \quad (8)$$

Com isso, o movimento do alto-falante é descrito pela equação diferencial

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \frac{dx}{dt} + kx = a \text{ sen}(\omega t) \quad (9)$$

onde α é o coeficiente de amortecimento do cone. Logo, a equação fica

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega^2 = A \text{ sen}(\omega t) \quad (10)$$

onde

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (11)$$

e

$$\beta = \frac{\alpha}{m}. \quad (12)$$

Como solução desta equação diferencial, temos

$$x(t) = a e^{-\delta+\gamma} + b e^{-\delta-\gamma} + \Gamma \cos(\omega t) \quad (13)$$

com

$$\Gamma = \frac{A}{2\delta\omega m} = \text{constante} \quad (14)$$

onde

$$\delta = \frac{k}{2\alpha}. \quad (15)$$

e

$$\gamma = \sqrt{\delta^2 - \omega^2}. \quad (16)$$

Se o coeficiente de amortecimento do cone do alto-falante for muito pequeno, de modo a

$$\omega > \delta, \quad \gamma = \sqrt{\omega^2 - \delta^2}i, \quad (17)$$

a solução da equação é descrita como uma combinação linear de senos e cosenos, apresentando uma oscilação subamortecida (BUTKOV, 1988), cuja frequência de oscilação dependerá das características do alto-falante, e não do sinal que ele deve reproduzir. Caso contrário, o sistema de amortecimento irá impor uma força de resistência ao movimento excessiva, fazendo com que uma parcela muito grande da energia imposta pelo sinal elétrico seja gasta apenas para impor movimento ao cone.

Outro fator de extrema importância para a reprodução de um sinal acústico com definição, e que também depende de fatores mecânicos é a própria caixa acústica, onde o alto-falante encontra-se instalado. Se um alto-falante, reproduzindo um sinal harmônico, sem estar instalado em alguma estrutura, haverá uma perda de sinal acústico proveniente interação ocorrida entre as frentes de onda produzidas pela parte frontal do cone e pelas produzidas pela parte de anterior. Se o alto-falante encontra-se instalado em uma caixa fechada, isolando as frentes de ondas produzidas pela parte anterior do cone, o movimento deste será freado pela diferença de pressão entre a parte de dentro e a parte de fora da caixa. Quanto maior for a amplitude do movimento do cone do alto-falante, maior será essa força associada a diferença de pressão. Uma solução simples é colocar um duto nesta caixa, de modo a equilibrar as pressões interna e externa da caixa acústica. Fazendo isso, o duto vai passar a emitir um pulso acústico que é equivalente ao fluxo de ar dentro do mesmo. Este fluxo de ar determinará uma onda harmônica, da mesma frequência da que está sendo reproduzida, só que em fase diferente. Estas, quando encontrarem-se, virão a se interferir. Há também o fato de que dentro do duto e dentro da caixa fechada aparecerão ondas estacionárias, assim como uma corda presa nas extremidades as tem.

Um tubo cilíndrico de comprimento L , fechado nas duas extremidades, apresentará uma onda estacionária igual a uma corda vibrando, com um nó em cada

extremidade. A quantidade de pontos de máximo no intervalo de 0 a L é que vai determinar o número do harmônico que está soando. No primeiro harmônico, o comprimento da onda terá o dobro do comprimento do tubo. Para uma frequência de 100 Hz, usando a relação

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (18)$$

tem-se $\lambda = 3,4\text{m}$, e que um tubo que tenha esta frequência como primeiro harmônico deverá ter um comprimento de 1,7 m. Também o diâmetro do tubo influencia neste cálculo, fazendo com que uma onda estacionária em um tubo cilíndrico "sente" o tubo como se ele tivesse $d/4$ a mais do que o comprimento que ele apresenta. Fazendo uso destes dados, é muito simples encontrar uma fórmula de recorrência que determina a frequência em função do comprimento L e do diâmetro d de um tubo cilíndrico, que é

$$f = \frac{v}{8L + 2d}. \quad (19)$$

Fica fácil também demonstrar que para um tubo aberto em uma das extremidades e fechado na outra, a frequência de ressonância é dada por

$$f = \frac{v}{4L + d} \quad (20)$$

e que para um tubo aberto nas duas extremidades é

$$f = \frac{v}{2L + d}. \quad (21)$$

Todas essas fórmulas de recorrência são para tubos cilíndricos. Caso o tubo for retangular, apenas troca-se o valor do diâmetro do tubo pelo valor da hipotenusa da seção reta deste.

Estas fórmulas simples são úteis para calcular a frequência de ressonância de tubos com formas regulares. Porém, estruturas das mais variadas formas também podem ressoar em frequências específicas, só que nestes casos, dependendo da forma assumida pela estrutura, calcular a frequência de ressonância desta vem a se tornar algo impraticável. Então, uma caixa acústica apresenta frequências nas quais ela ressoa, e essas frequências dependerão da geometria desta.

A caixa acústica desenvolvida apresenta ressonância devido a cavidade, na parte anterior ao alto-falante, à corneta que direciona as ondas sonoras para fora da caixa, e aos dutos de sintonia. Porém, estas ressonâncias ocorrem em baixas

frequências, sendo úteis para a reprodução do sinal de um contrabaixo elétrico.

3 DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO ACÚSTICO DO SISTEMA

A determinação do comportamento acústico deste sistema foi realizada em dois ensaios acústicos, onde em cada ensaio, fiz uso de técnicas diferentes, afim de comparar os resultados obtidos posteriormente.

Para alimentar o sistema de reprodução, usei ruído branco gerado pelo software livre Audacity. Este é um software disponível para Windows, Mac OS X e GNU/Linux. Com ele é possível gravar, editar e analisar sons, e gerar alguns tipos de sinal, entre eles o ruído branco. O sistema usado para realizar as medições consiste de um microfone para captar o nível de pressão sonora (NPS) imposto pelo sistema de reprodução do sinal acústico. O sinal é captado por um microfone condensador ligado a um medidor de nível de pressão sonora, modelo Blue Solo, marca 01 dB, e é decomposto via transformada de Fourier pelo software dBBAT, marca 01 dB, em 32 bandas de frequências diferentes, apresentando o nível de intensidade sonora em dB relativos a cada banda. Com isso, em apenas uma medição, o programa é capaz de estimar a resposta da fonte para frequências pré-estabelecidas.

Como parâmetros de comparação, fiz uso de um sistema de reprodução de contrabaixo elétrico comercial, marca Staner, modelo BS 150. Este sistema, usado por muitos contrabaixistas, apresenta um rendimento satisfatório, tendo uma potência por volta dos 120 W RMS. Para realizar os ensaios, deixei a equalização deste amplificador no modo "flat", ou seja, todas elas no meio do cursor, de modo a não alterar a intensidade da faixa de frequências estabelecidas para cada filtro.

O amplificador que usei para alimentar a caixa acústica de testes foi um Attack MA 560, com dois canais independentes de amplificação, cada um com 120 W RMS de potência. Para realizar as medidas de resposta deste amplificador, alimentei ele com um sinal senoidal puro, gerado por um gerador de funções, e usei como carga uma resistência de chuveiro, onde uma das combinações de resistores desta apresenta uma impedância de 7Ω . Com esta resistência imersa em uma cuba contendo um litro de óleo SAE 140 (usado em transmissão de tratores e outros veículos pesados) para refrigerá-la, liguei um dos canais de um osciloscópio em paralelo com a carga, de modo a determinar a potência do amplificador por frequências. O outro canal do osciloscópio liguei em paralelo com a entrada do si-

nal no amplificador, afim de determinar a resposta deste em função da frequência. Verifiquei a resposta extremamente plana entre 20 Hz e 20 KHz, como mostra a figura 1.

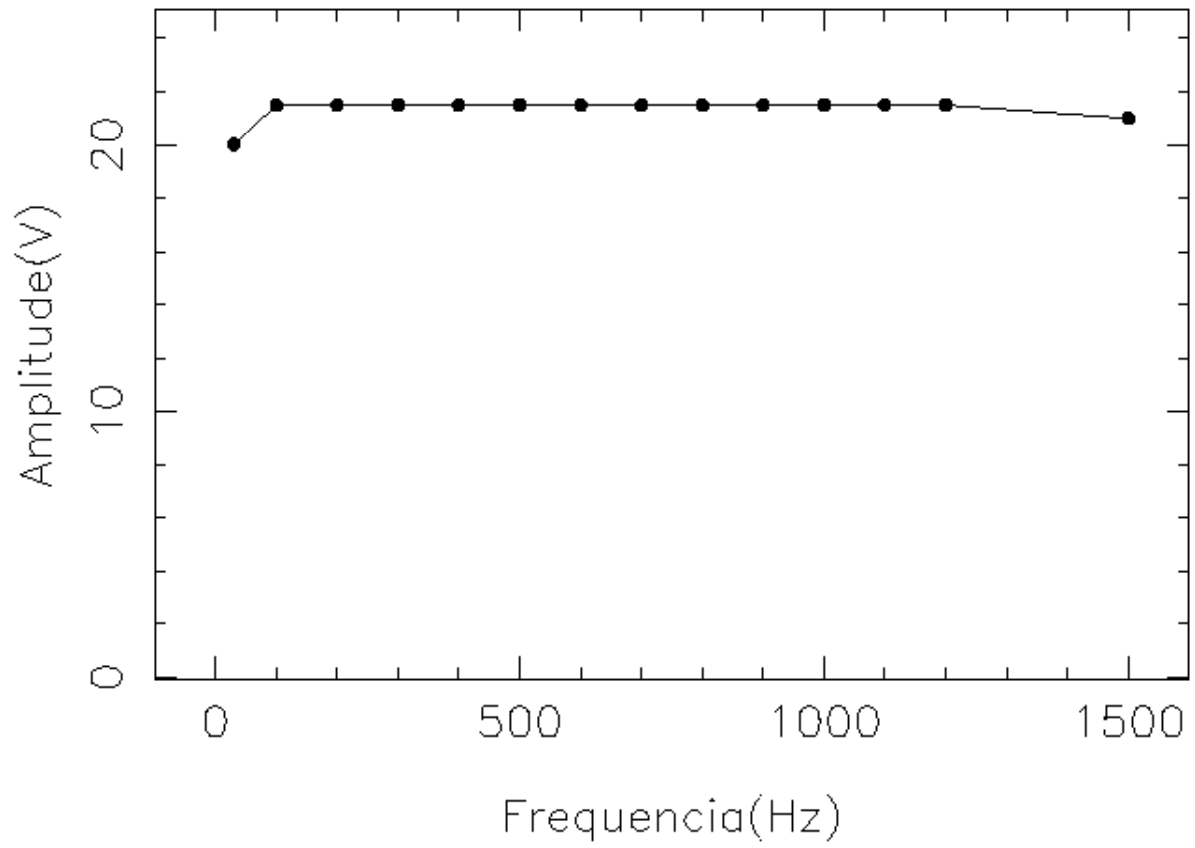


Figura 1: Resposta do amplificador.

3.1 Medição em Campo Livre

As medições do sistema de testes em campo livre foram realizadas na tarde do dia 15 de dezembro de 2009, em um campo de futebol do CEFD (Centro de Educação Física e Desporto), ao lado do prédio principal. Para realizar as medições, fiz uso das regras ditadas pela norma técnica ISO - 3744:1977(E) *Acoustics - Determination of sound power levels of noise source - Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms*.

Estes tipo de ensaio deve ser realizado em um lugar livre de reflexão sonora por objetos, exceto a reflexão do plano sob a fonte sonora. Este plano denominamos de plano semi-infinito. Uma das propriedades do plano semi-infinito, é que o plano de reflexão não deve ser menor do que a projeção da superfície de medição neste plano (ISO - 3744:1977 (E)). De acordo com a norma, estes ensaios devem ser realizados em uma câmara anecoica. Esta câmara tem a propriedade de recriar as condições acústicas de um campo livre, ou seja, as paredes dela são forradas com um material de tal maneira que há a absorção quase total da onda sonora incidente (GERGES 1992). Como não há uma câmara anecoica na UFSM, onde fosse possível realizar os ensaios, tive que recorrer ao campo livre. O problema de se fazer este tipo de ensaio em campo livre é que existe muita interferência de ruído externo, efeito que na câmara anecoica é minimizado por causa do isolamento acústico desta.

Para determinar o comportamento acústico do sistema em campo livre, realizei medidas dos níveis de pressão sonora (NPS) em dez pontos diferentes distribuídos no espaço em torno da caixa acústica.

De acordo com a proposta da norma, os 10 pontos estão esquematizados nas figuras 2 e 3, e suas coordenadas em função do raio estão relacionados na tabela 1. A caixa acústica encontra-se no centro da semi-esfera determinada pelas coordenadas dos pontos dados. O valor de r tem que ser aproximadamente duas vezes maior do que a maior dimensão da caixa acústica. Com isso, usei $r = 2$.

Realizei três medições de NPS em cada ponto, cada uma de um minuto, e ainda medições de ruído de fundo \bar{R}_f , uma no ponto 1, uma no ponto 4 e outra no ponto 10, afim de subtrair matematicamente a contribuição do ruído no sinal captado, e encontrar o nível de potência sonora NWS em função da frequência, de acordo com a equação

$$NWS = NPS + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S_2}{S_0} \right) + C, \quad (22)$$

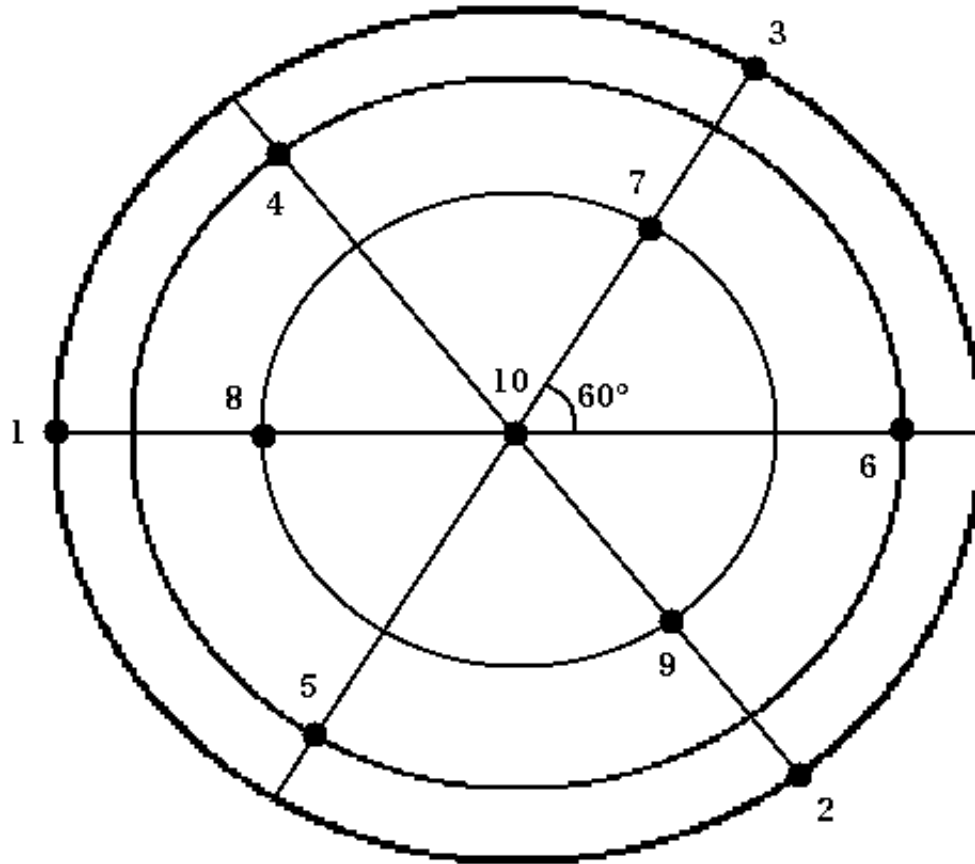


Figura 2: Posições de medição da caixa acústica (vista superior).

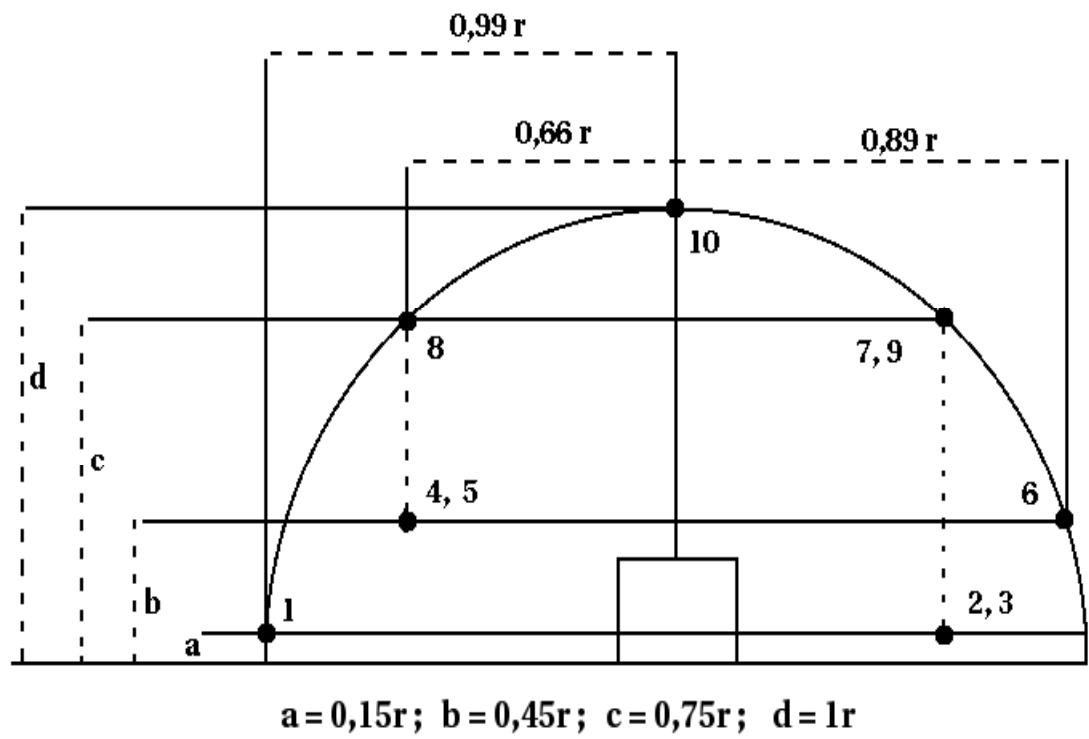


Figura 3: Posições de medição da caixa acústica (vista lateral).

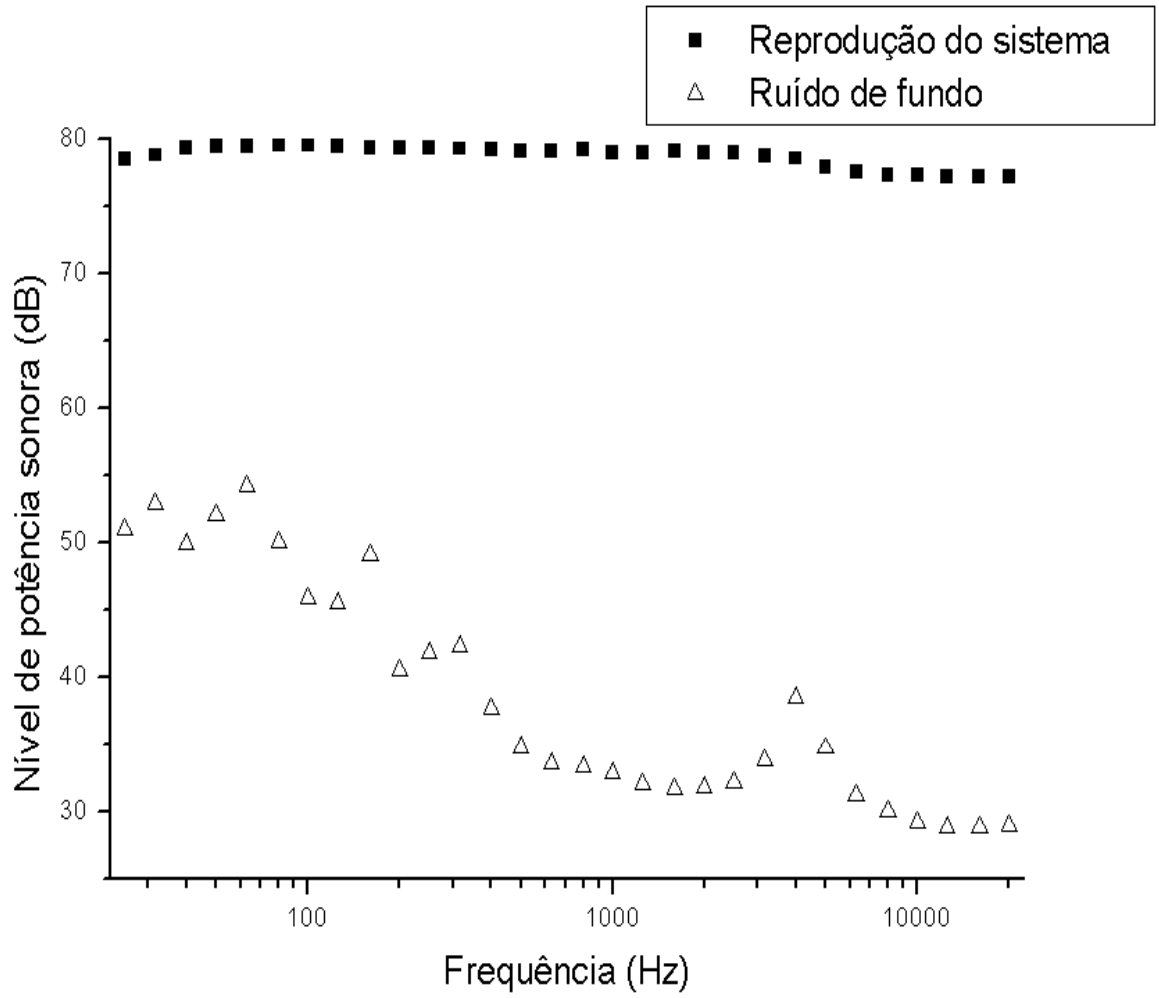
Figura 4: Comparação entre NPS e \bar{R}_f .

Tabela 1: Posições recomendadas para colocação do microfone

Ponto	x/r	y/r	z/r
1	0,16	- 0,96	0,22
2	0,78	- 0,60	0,20
3	0,78	0,55	0,31
4	0,16	0,90	0,41
5	- 0,83	0,32	0,45
6	0,83	- 0,40	0,38
7	- 0,26	- 0,65	0,71
8	0,74	- 0,07	0,67
9	- 0,26	0,50	0,83
10	0,10	- 0,10	0,99

onde $S_0 = 1\text{m}^2$ é a área de referência, S_2 é a área da semi esfera na qual a caixa encontra-se inserida, e é dada por

$$S_2 = 2\pi r^2 \text{ m}^2 \quad (23)$$

e C é o fator de correção dado por

$$C = -10 \cdot \log_{10} \left(\left(\frac{293}{273 - T} \right)^2 \cdot \frac{P}{10^3} \right) \quad (24)$$

onde T é a temperatura dada em graus Celsius e P é a pressão barométrica, dada em milibares.

O sinal que o microfone captou pode ser decomposto em duas partes, uma devido a reprodução do sinal pela fonte e outra devido aos ruídos externos. Ao sabermos como se comporta o padrão de ruído externo, podemos subtraí-lo da do sinal total captado, sobrando apenas a porção do sinal relativo a reprodução da fonte. O problema deste ensaio ao ar livre, é que a contribuição do ruído no sinal captado é muito grande, e não mantém um padrão definido. Ou seja, é um padrão aleatório, como mostra o gráfico da figura 4.

Por causa destes fatores, levamos praticamente a tarde inteira para realizar as medidas nos onze pontos diferentes (dez pontos de medição da fonte mais um ponto de medição de ruído de fundo). A maior causa de ruído eram os aviões caça da Base Aérea de Santa Maria, que insistiam em sobrevoar a região onde estávamos a realizar o ensaio. Outra grande fonte de ruído era proveniente de uma construção no Departamento de Solos da UFSM, onde em alguns momentos

os operários faziam uso de uma serra policorte, que emite um ruído muito intenso. E por último, e não menos problemático, havia também o ruído causado pelo fluxo de tratores e automóveis em geral através da estrada que tangencia o campo onde estávamos. Todas estas fontes de ruído aleatório, e mais inumeráveis outras de menores proporções, vieram a provocar distorções nos parâmetros medidos.

Notamos, a partir do gráfico da figura 5, que apesar das distorções ocorridas por causa do excesso de ruído externo, a potência acústica da caixa em função da frequência exibe um padrão de crescimento no início da escala, por volta dos 30 Hz, e se mantém razoavelmente constante até a faixa dos 3 KHz. De maneira geral, esta caixa acústica apresenta um comportamento esperado para reproduzir um contrabaixo elétrico.

Para trabalhar estes dados, fiz um rotina de programa em linux, usando linguagem de programação C. Este que criei lê uma matriz de dados 32 x 34, na forma de arquivo .txt, onde as 32 linhas remetem as 32 frequências diferentes que o programa de aquisição de dados separou via transformada de fourier no momento das medições, a primeira coluna do arquivo especifica quais são as frequências de cada linha, e as outras 33 colunas restantes dão os NPS medidos em cada ponto (três medidas em cada um dos onze pontos). Este programa, após ler os dados, separa cada coluna que representa o mesmo ponto (para isto a tabela já está ordenada por sequência de pontos), faz as médias logarítmicas das três medidas de cada ponto, e após isto realiza os cálculos necessários para a determinação da potência acústica da fonte.

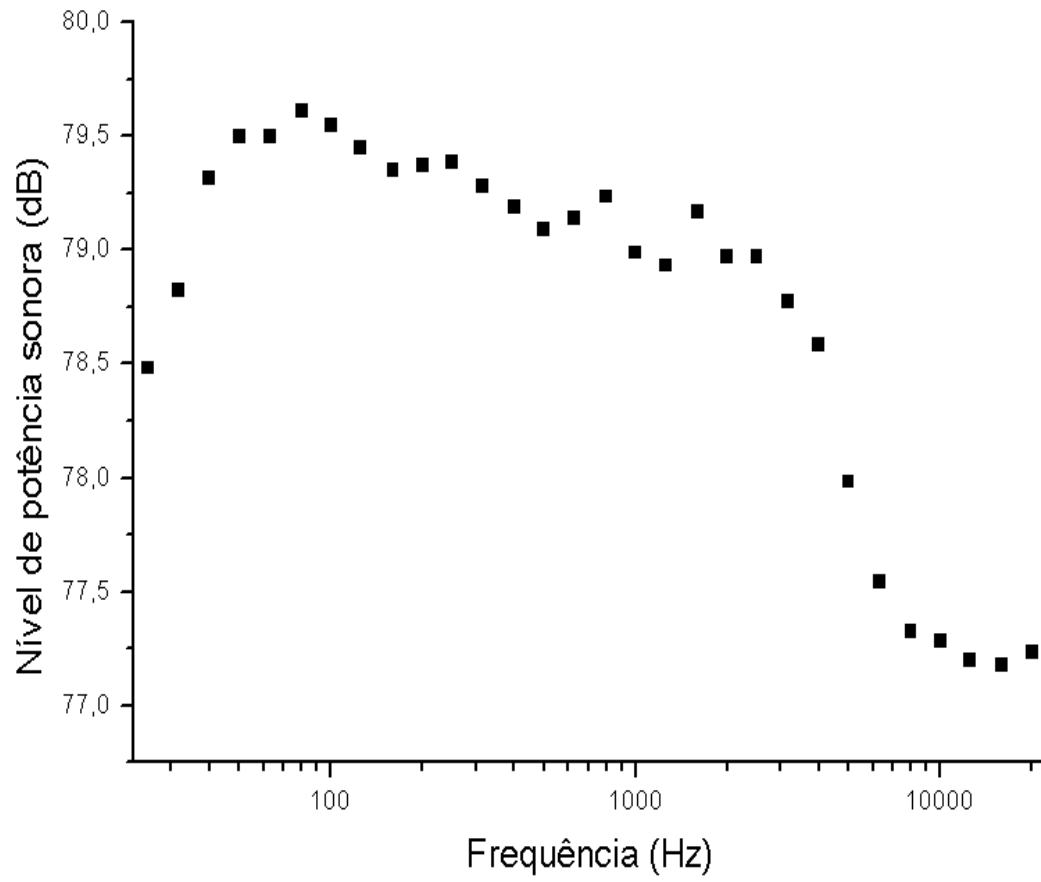


Figura 5: Potência acústica em campo livre.

3.2 Medições na Câmara Reverberante

A câmara reverberante é uma sala onde garante-se a existência de um campo acústico difuso, com energia sonora uniformemente distribuída em seu interior. Para isto, todas as superfícies da câmara são construídas com material tão duro e reflexivo quanto possível. As paredes dela não são paralelas, de modo a não tornar possível o aparecimento de modos estacionários de oscilação (GERGES, 1992). A câmara reverberante onde realizei os ensaios, no Laboratório de Acústica da UFSM, apresenta um volume total de 207m^3 e uma área interna de 210m^2 . A intensidade sonora total em uma câmara reverberante é a soma da intensidade direta com a contribuição do campo reverberante. Com isso,

$$NPS = NWS + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right), \quad (25)$$

onde r é a distância da fonte ao observador, Q é o fator de diretividade, A é a constante de absorção da câmara ($A = S\alpha$), onde S é a área total da câmara e α é o coeficiente de absorção médio da câmara.

Quando a câmara apresenta um coeficiente de absorção muito pequeno e podemos aproximar

$$\left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right) \ll \left(\frac{4}{A} \right) \quad (26)$$

e, substituindo na equação 25, temos

$$NPS = NWS + 10 \cdot \log \left(\frac{4}{A} \right), \quad (27)$$

onde NPS é o sinal medido pelo sistema de medição, em dB, e NWS é a potência sonora devido ao sistema de reprodução, também em dB. O tempo de reverberação da câmara depende, além da absorção sonora causada pelas paredes desta, da absorção do corpo que esta sendo medido dentro dela. Ou seja, a caixa acústica dentro da câmara também serve como um absorvedor de som, diminuindo o tempo de reverberação. Isto dificulta o uso da equação 11 para trabalhar os dados. Para contornar este problema, medimos o tempo de reverberação da câmara, por frequências, de modo a ter um valor direto desta grandeza. As medidas foram realizadas por frequências porque a absorção sonora dentro da câmara, devido as suas paredes e devido também a absorção da caixa acústica, não é a mesma em todo o intervalo de medição que nos interessa. Convenciona-se que o tempo de reverberação Tr é definido como sendo o tempo correspondente ao decaimento do

nível de intensidade sonora em 60 dB (GERGES, 1992). Realizei as medidas do tempo de reverberação para as duas caixas acústicas, onde estes estão apresentados no gráfico da figura 6.

Notamos que há uma maior absorção acústica por parte da caixa de teste do que da caixa de referência, isto devido, provavelmente, as maiores dimensões da caixa de teste. Então, fazendo uso destes dados, encontrei a resposta da fonte em função da frequência, com a equação

$$NWS = NPS - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{Tr}{Tr_0} \right) + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{V}{V_0} \right) + \Phi \quad (28)$$

onde V é o volume da câmara, em m^3 , $V_0 = 1m^3$ é o volume de referência, Tr é o tempo de reverberação, $Tr_0 = 1s$ é o tempo de reverberação usado como referência, e Φ é o termo de ajuste

$$\Phi = 10 \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{5\lambda}{8V} \right) - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{10^3} \right) - 14 \quad (29)$$

onde P é a pressão barométrica em milibares, e λ é o comprimento de onda, em metros, dado por

$$\lambda = \frac{331 + T \cdot 0,6}{f} \quad (30)$$

sendo T a temperatura. Na câmara reverberante, realizei três medições de 15 s cada, em dez pontos distribuídos pelo espaço de acordo com a figuras 2 e 3, e a tabela 1, de modo que qualquer distorção causada por alguma imperfeição da câmara seja minimizada após fazer a média logarítmica dos NPS medidos nos pontos diferentes. As caixas acústicas se encontravam no centro geométrico da câmara. A média logarítmica dos pontos é dada por

$$NPS \text{ medio} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N \frac{10^{\frac{NPS_i}{10}}}{N} \right) \quad (31)$$

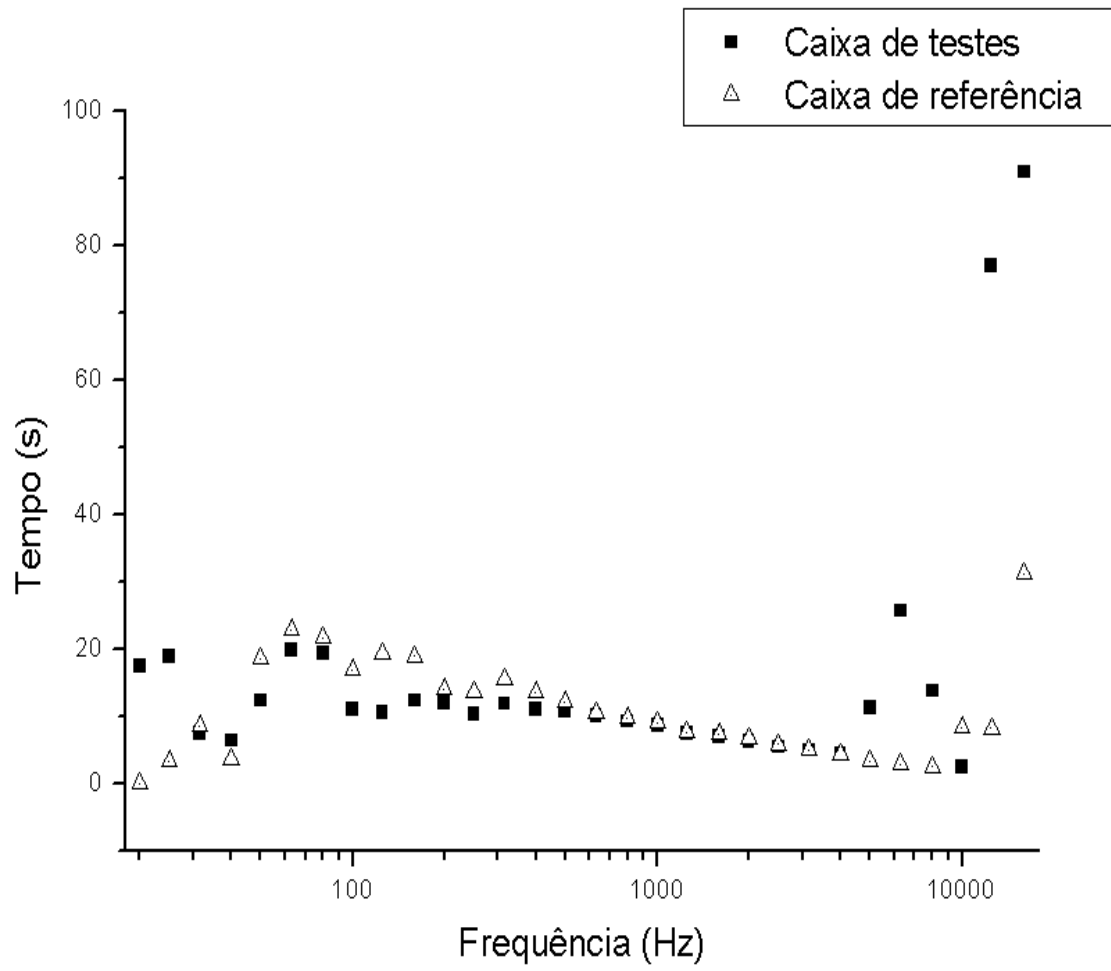


Figura 6: Tempo de reverberação.

A potência acústica da caixa, medida dentro da câmara reverberante, é apresentada no gráfico da figura 7. A partir deste gráfico, visualizamos que a caixa de teste apresenta uma curva de potência razoavelmente plana no intervalo de frequências compreendido entre 30 Hz e 3500 Hz, aproximadamente, o que é esperado para este sistema. Já o sistema de reprodução comercial atinge a plenitude da potência acústica acima de 1000 Hz, tendo uma perda considerável na eficiência nas frequências mais baixas, que são cruciais para a melhor definição na execução de um contrabaixo elétrico. Quanto ao limite superior, a caixa de teste apresenta uma queda suave na potencia acústica a partir de 1KHz, onde o sistema comercial atinge o patamar mais elevado de potência, faixa de frequências esta que não é de muito interesse para a execução de um contrabaixo elétrico.

Para trabalhar estes dados, criei outro programa, também em linguagem C, muito semelhante ao programa que realiza os cálculos para medições em campo livre. A diferença é que nas medições em câmara reverberante, o software de aquisição de dados gerou três matrizes de dados para cada medição completa realizada com cada fonte, uma matriz que dava os tempos de reverberação medidos, outra com as medições de ruído de fundo, e uma terceira com os níveis de intensidade sonora. E cada uma das matrizes era de ordem diferente.

Com isso, fiz um programa que lia separadamente cada arquivo, para realizar as respectivas médias (média logarítmica para os NPS e média aritmética para os tempos de reverberação, dados em segundos). Após realizada esta tarefa, o programa calcula a resposta da caixa por frequências, de acordo com as equações anteriores.

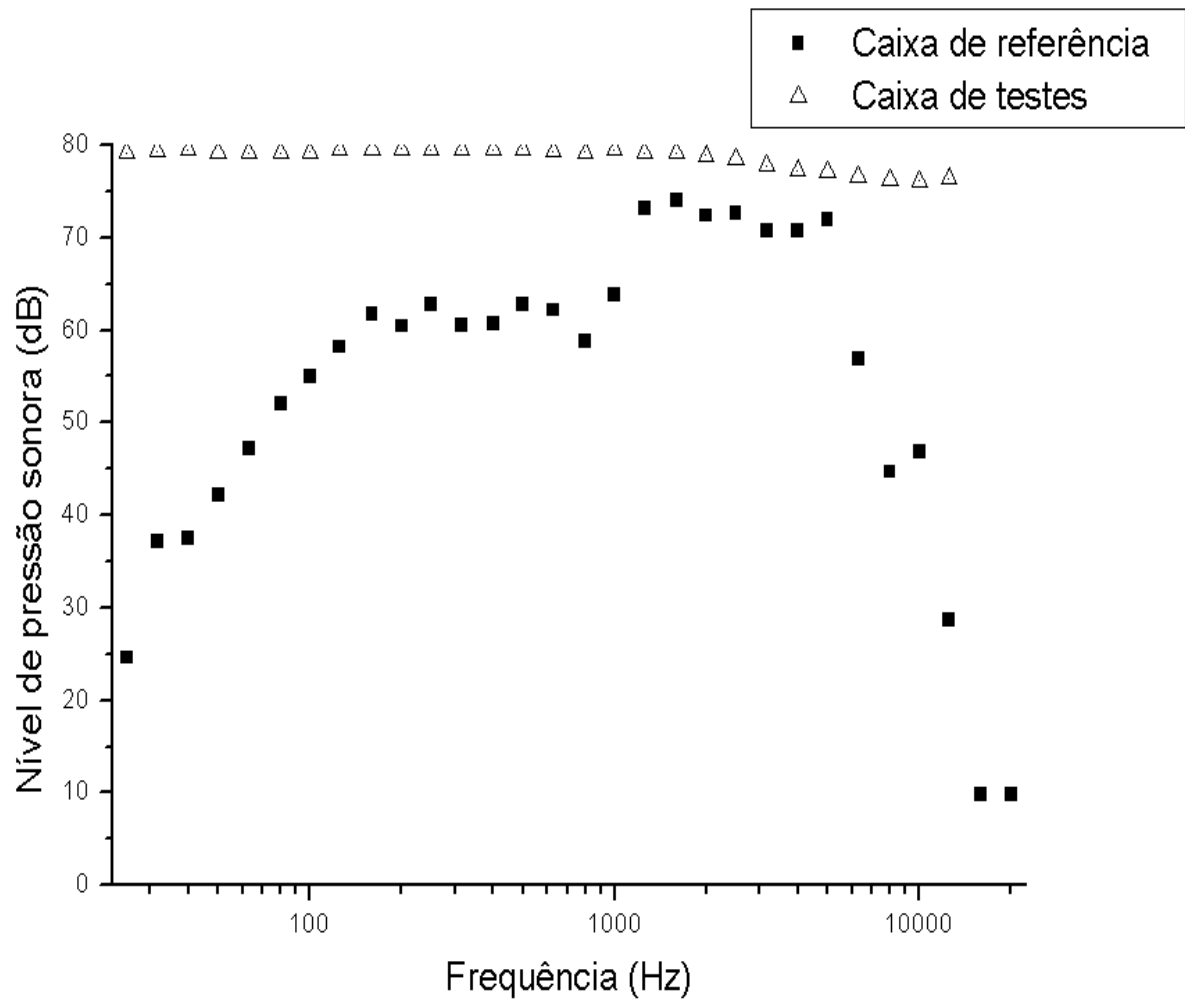


Figura 7: Resposta acústica das caixas.

4 COMPARAÇÃO ENTRE AS DINÂMICAS DE CADA CAIXA

Quando realizamos a comparação entre a potência acústica em função da frequência para a caixa de teste em campo livre e na câmara reverberante, notamos que as respostas são muito semelhantes, seguindo um padrão comum. As curvas são mostradas no gráfico da figura 8. Um problema reside no fato de que o ruído de fundo, nas medidas em campo livre, apresentavam um comportamento relativamente aleatório, porém isto não interferiu no padrão da curva.

A comparação a que devo chamar a atenção aqui é entre o sistema de reprodução de contrabaixo elétrico comercial e o sistema por mim desenvolvido. Por questões de falta de tempo, não consegui realizar as medições em campo livre da fonte comercial, porém, as medições realizadas em câmara reverberante são suficientes para realizar as comparações.

A caixa acústica de testes, apresenta um volume relativamente grande, de $0,58m^3$. Ela é do tipo cornetada, ou seja, o som gerado pelo alto-falante percorre um caminho determinado por uma geometria rígida antes de sair ao ar livre. A idéia básica deste projeto é fazer com que as cornetas desta caixa atuem basicamente como ressonadores, dando ênfase as frequências de reprodução que estão próximas das frequências de sintonia destas cornetas. Pelo grande volume desta, fazendo com que as cornetas desta tenham dimensões consideráveis, notamos que esta caixa apresenta baixa frequência de ressonância, respondendo melhor nesta faixa dos graves.

A potência acústica da caixa de teste é relativamente plana, mas apresenta alguns picos de intensidade devido a sua sintonia. Esta caixa acústica tem dutos na parte anterior do alto-falante, para permitir o fluxo de ar devido ao movimento do cone deste. Porém, estes dutos interferem na acústica da caixa, de modo a ressonarem em determinadas frequências especificadas pela geometria do próprio duto e das cavidades internas dela. Com isso, modificando estes parâmetros, podemos modificar estes pontos de ressonância, fazendo com que a caixa apresente uma curva ligeiramente diferente.

Outra questão importante neste projeto é o tipo de alto-falante utilizado. Nesta caixa acústica, uso um alto-falante tipo subwoofer marca Buster, linha Combat-SWF-1214C, de 4Ω de impedância. Estes transdutores são próprios para a reprodução de sinais harmônicos de baixas frequências, já que são construídos de modo ao cone trabalhar com uma amplitude relativamente grande, e apresentam um sistema de amortecimento pouco rígido, de maneira a não interferir na forma do sinal gerado. Se, em um caso destes, a suspensão do cone do alto-falante fosse rígida, este apresentaria uma amplitude muito pequena de oscilação em torno do ponto de equilíbrio e seria forçado demasiadamente a voltar a sua posição de origem cada vez que estivesse na posição de maior deslocamento.

Já a caixa acústica do sistema de reprodução comercial é uma caixa do tipo selada, ou seja, tem formato de um paralelepípedo, com a metade das dimensões da caixa de teste, onde em uma das faces se encontra um alto-falante para reprodução de médias frequências, e não tem dutos de sintonia. Pelo fato de ser caixa selada, há uma variação na pressão interna desta caixa proporcional a variação da posição do cone do alto-falante em torno da posição de origem. Quanto maior for a amplitude de deslocamento do cone, maior será a força contrária a este movimento. Com isto, a caixa acústica perde definição em baixas frequências, que é justamente onde há necessidade de um maior deslocamento de ar para que seja completado o período da onda harmônica. Quanto mais baixa a frequência, maior a quantidade de ar que se desloca para produzir um comprimento de onda.

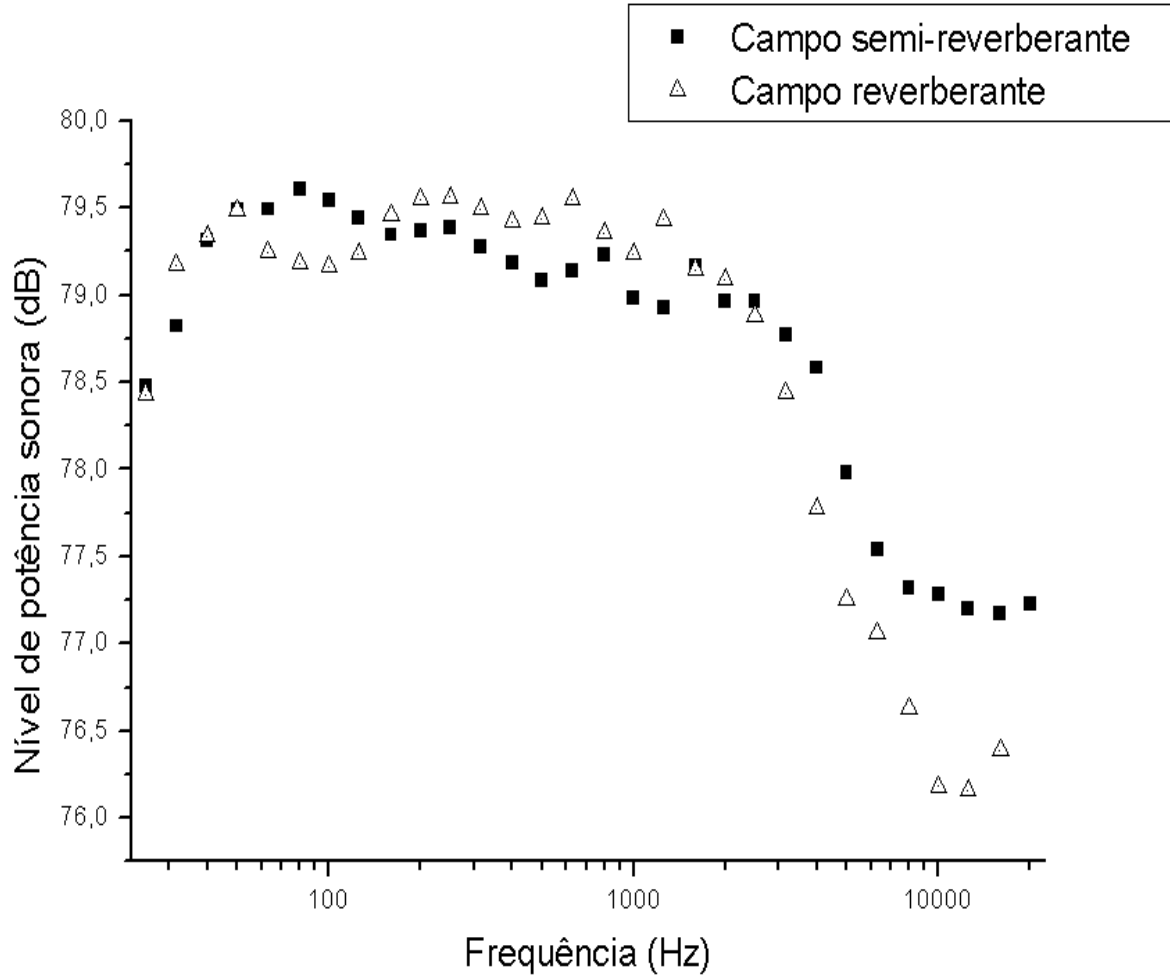
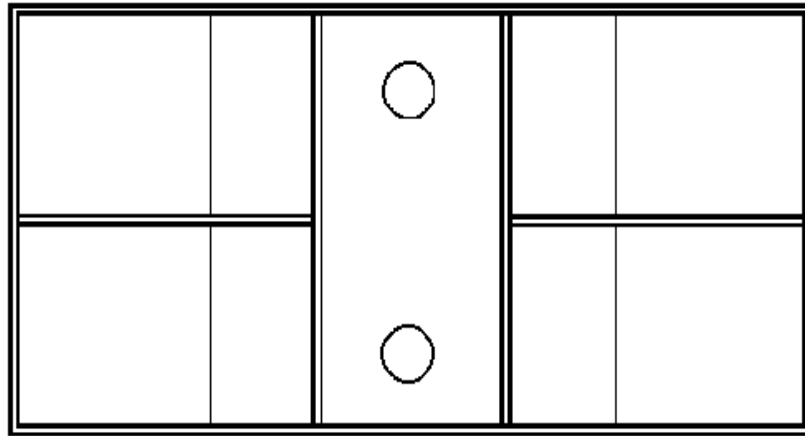


Figura 8: Comparação câmara reverberante e campo livre.



B

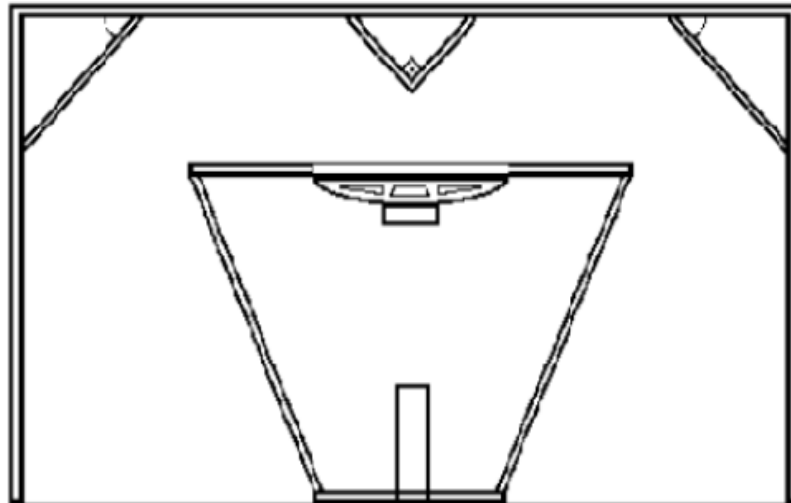


Figura 9: Esquema da caixa acústica.



Figura 10: Caixa acústica aberta.



Figura 11: Caixa acústica fechada.

Tabela 2: Potência acústica dos sistemas medidos em reverberante.

Frequência (Hz)	NPS caixa teste (dB)	NPS caixa referência (dB)
25	76.6350	24.6252
31,5	78.4250	37.0815
40	79.1757	37.4866
50	79.3343	42.1129
63	79.4831	47.2171
80	79.2483	52.0512
100	79.1817	54.9338
125	79.1637	58.1927
160	79.2382	61.7575
200	79.4566	60.4516
250	79.5489	62.7120
315	79.5631	60.4923
400	79.4919	60.7289
500	79.4196	62.7374
630	79.4377	62.1596
800	79.5531	58.8789
1000	79.3594	63.7591
1250	79.2373	73.1478
1600	79.4343	74.8148
2000	79.1480	72.4259
2500	79.0884	72.5737
3150	78.8852	70.7664
4000	78.4412	70.6529
5000	77.7777	72.0026
6300	77.2541	56.9317
8000	77.0576	44.6943
10000	76.6325	46.9252
12500	76.1804	28.6365
16000	76.1577	9.7550
20000	76.3865	9.7550

A frequência de ressonância desta caixa está algo mais acima do que a frequência de ressonância da caixa de teste, devido a suas menores proporções. Isto, na caixa de teste, se torna um inconveniente. Devido as suas gigantescas proporções, ela apresenta uma ótima distribuição da potência acústica nas frequências baixas, porém não a torna nem um pouco prática. O sistema comercial, por perder definição nas frequências mais baixas, apresenta uma série de filtros ativos para compensar esta não-linearidade. Como ela responde muito bem nas médias frequências, acima de 1 KHz, costuma-se diminuir eletronicamente a potência dela nesta faixa de frequências para compensar a parte falha da caixa em si, tornando-a mais simples e prática.

O amplificador que alimenta este sistema comercial também apresenta uma curva de resposta plana em função da frequência. O sistema eletrônico deste amplificador em questão é extremamente simples, e dotado de uma eficiência pouco evidente. Este tem uma potência relativamente alta (em torno de 120 Watts RMS), e uma resposta tão boa quanto a do outro amplificador testado, de maneira que as diferenças nas curvas de potência acústica aqui discutidas devem-se apenas as caixas acústicas dos projetos.

O transdutor usado nesta caixa comercial, uma peça importante para o bom funcionamento do sistema, é um alto-falante usado em reprodução de sinais harmônicos de médias frequências. Desconheço o motivo pelo qual os projetistas deste sistema não colocaram, ao invés deste, um subwoofer nesta caixa, de modo a aproximar a resposta dela das frequências mais baixas. Acredito seriamente que esta é uma maneira encontrada por eles de baixar custos na produção destes sistemas, já que o alto-falante usado é mais barato do que um subwoofer, que apresenta um custo maior para o projeto, remetendo a um preço maior na loja, posteriormente. Logo, este vem a ser um dos grandes motivos para este sistema apresentar uma curva de resposta tão deslocada para as médias frequências.

A tabela 2 apresenta a comparação por cada frequência da resposta das caixas testadas na câmara reverberante. Notamos, a partir desta, claramente que a caixa de teste, exatamente a partir de 40 Hz, apresenta uma resposta relativamente plana, com valores para os níveis de pressão sonora oscilando na faixa dos 79 dB, que se mantém até 2500 Hz. Podemos, com isso, facilmente aproximar a curva de potência desta como sendo plana entre 30 Hz e 3 KHz, enquanto o sistema comercial vem a apresentar uma curva plana a partir de 1250 Hz. Este, se mantém no patamar dos 70 dB até 5 KHz, faixa de frequências esta de pouco interesse para



Figura 12: Caixa acústica comercial.

a reprodução de um contrabaixo elétrico.

4.1 Comparação subjetiva das curvas de potência

Com o passar dos tempos, acompanhamos o surgimento de vários estilos e tendências musicais, com os instrumentos acompanhando tal avanço. Em alguns momentos, surgiram estilos musicais a partir do aparecimento de instrumentos novos, como em outros casos, os estilos já existiam e os novos instrumentos adaptaram-se a ele. Atualmente, temos uma enorme variedade de sonoridades e timbres, o que culminou com o aparecimento dos instrumentos eletrônicos na década de 70. No início eram apenas sintetizadores, que tentavam recriar de alguma maneira o som dos instrumentos acústicos, mas que por falta de tecnologia passavam muito longe do timbre destes. A partir disso, se começou a aceitar este tipo de sonoridade, e a criar-se novos timbres, baseados apenas em combinações harmônicas. Hoje em dia, com o avanço da tecnologia, já tornou-se uma realidade a simulação, com definição, do som de instrumentos acústicos e eletroacústicos dos mais variados, e simulação inclusive dos sons tirados pelos primeiros sintetizadores, que foram imortalizados por alguns artistas.

Isso é algo que aconteceu também, não tão claramente, com o contrabaixo elétrico. Existem alguns estilos musicais, como o rock progressivo, que faz uso em alguns momentos de contrabaixos distorcidos, ou com excesso de harmônicos médios. A partir disso, perde-se um pouco o sentido de se falar em um sistema ideal, genérico, para a reprodução de contrabaixo elétrico.

Durante um período, acompanhei o acadêmico do curso de Música da UFSM, Daniel Böhm, que sob orientação do Professor Dr. Amaro Borges, do departamento de Música, realizou um estudo de psicoacústica, usando como objeto de pesquisa justamente o meu sistema de reprodução para contrabaixo elétrico. Realizamos, em um ambiente propício para tal, a comparação perceptiva entre as respostas dinâmicas dos dois sistemas de reprodução para contrabaixo. Como os sistemas foram desenvolvidos para a reprodução do instrumento, colocamos estes dois no palco do bar Santa Ceva em três noites seguidas, cada noite com uma banda fazendo uma apresentação ao vivo, e cada uma com estilos diferentes.

Durante um curto período da apresentação, o instrumentista que estava mais perto das duas caixas acústicas era o responsável por trocar de caixa a cada música, por intermédio de uma chave permutadora, que eu construí para este fim, fazendo com que a cada música, uma das caixas reproduzisse o contrabaixo elétrico. Para minimizar os erros experimentais, chamamos uma caixa de "A" e outra de "B" durante o experimento, de modo que apenas eu e o Daniel soubesse qual das

duas caixas que era a "A" e qual delas que era a "B". Após isto, foi entregue um questionário para todos os espectadores presentes no bar, com uma questão objetiva, a qual fazia menção sobre qual das caixas acústicas que cada um preferiu.

A caixa de teste trabalhou com menor potência do que a caixa de referência, porém esta parecia soar muito mais do que a outra. Como a caixa de teste tem mais definição nas baixas frequências, e as baixas frequências são pouco direcionais (pela propriedade que as ondas tem de contornar obstáculos cujas dimensões são da mesma ordem de grandeza que seu comprimento de onda) esta parecia "encher" o bar inteiro com sua reprodução, enquanto que a caixa de referência não. Esta, por não apresentar uma boa resposta em baixas frequências, trabalha com maior potência, de modo a tentar compensar assim esta falha na resposta.

Durante os testes, tornava-se evidente qual das caixas que estava sendo executada. Em vários momentos notava-se as janelas do bar tremendo ao ser executada a caixa de testes, por esta atingir as suas frequências de ressonância. Das pessoas com que falei, muitas, principalmente músicos, me diziam com certeza qual dos sistemas que estava sendo executado naquele momento. Porém, para algumas pessoas, dependendo do estilo da banda que estava tocando e do estilo de música que gostam, obviamente, a caixa de teste soava com menos sonoridade do que a caixa comercial, destoando totalmente da opinião de outros.

Com este teste, percebi claramente que consegui atingir o meu objetivo com este sistema, ainda que não tenha agradado a todos. Porém, isto se torna inviável em vários aspectos. Faço uso destes argumentos apenas para demonstrar que houve uma aceitação deste sistema por parte de pessoas que eu esperava atingir com isto, e que a curva de potência acústica deste sistema, determinada por medições, está de acordo com a sensação produzida por esta.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Variações deste modelo de caixa acústica são largamente usados em sistemas de reprodução sonora de alta potência, como em espetáculos ao vivo realizados em lugares abertos para grandes platéias. Porém, estes sistemas não são usados com a finalidade de reproduzir o sinal proveniente de um contrabaixo com definição, apenas com potência suficiente para que possa ser ouvido pela multidão.

Este sistema que propus faz uso de uma das muitas variações para este modelo de caixa, só que, ao invés de trabalhar com alta potência, prezo pela definição do som. Os sistemas de reprodução para contrabaixo elétrico carecem, em grande parte, de melhor definição nesta faixa de frequências, e vimos que não é impossível projetar tal sistema. O problema é que perde-se muito na praticidade, pois as caixas acústicas se tornam muito grandes e desajeitadas, tornando inviável a compra de um sistema destes para ser usado em um bar, por exemplo.

Como uma solução para isto, as casas noturnas poderiam implementar sistemas destes, fixos, no palco, e fazendo uso otimizado do espaço. Daí, cada contrabaixista levaria apenas seu instrumento, pois o sistema de reprodução já estaria lá. E isso tudo vai da vontade e da criatividade de cada um.

Notamos também que, com mais tempo, poderíamos otimizar ainda mais a resposta desta caixa acústica por meio da sintonia dos dutos, e talvez da suavização das curvas internas, porém, isto é algo trabalhoso, e que pode vir a dar muito mais assunto futuramente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUTKOV, Eugene, *Física Matemática*. (1988)
Rio de Janeiro, RJ
- FLETCHER, H. Neville; ROSSING, D. Thomas, *The Physics of the Musical Instruments*. 2^a ed. (1998) Springer, U.S.A.
- GERGES, Samir N. Y., *Ruído: Fundamentos e Controle*, 1^a ed. (1992) Florianópolis, Brasil.
- INTERNATIONAL STANDARD ISO 3744 *Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure - Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane* Reference number ISO 3744:1994(E)
- MALVINO, Albert P., *Eletrônica*, 2^a ed., volume 1 (1986)
Mc Graw Hill.
- MORSE, Philip M.; INGARD, K. Uno, *Theoretical Acoustics*. 1^a ed. (1986).
Princeton University Press Published, New Jersey.
- OLSON, Harry F. *Music, Physics and Engineering*. 2^a ed. (1967) Dover Publications, NY.
- REITZ, John R.; MILFORD, Frederick J.; CHRISTY, Robert W, *Fundamentos da Teoria Eletromagnética* 3^a ed. (1982) Editora Campus, Rio de Janeiro, RJ.