

JOÃO CARLOS RIBEIRO DO NASCIMENTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
ELETROACÚSTICO PARA SONORIZAÇÃO DE
AMBIENTES – ESTUDO DE CASO EM UMA IGREJA**

FLORIANÓPOLIS, 2011

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA – CAMPUS
FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE
PRODUTOS ELETRÔNICOS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
ELETROACÚSTICO PARA SONORIZAÇÃO DE
AMBIENTES – ESTUDO DE CASO EM UMA IGREJA**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia
de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do
título de Pós-Graduação em
Desenvolvimento de Produtos
Eletrônicos.

Professor Orientador: GOLBERI
DE SALVADOR FERREIRA

FLORIANÓPOLIS, 2011

Nascimento, João Carlos Ribeiro do

Desenvolvimento De Um Sistema Eletroacústico Para Sonorização De Ambientes – Estudo De Caso Em Uma Igreja / Nascimento, João Carlos Ribeiro do – Florianópolis: Instituto Federal de Santa Catarina, 2012. 67 f.

Monografia – Instituto Federal de Educação de Santa Catarina. Pós-Graduação. Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos *lato sensu*.

Orientador: Golberi de Salvador Ferreira, Dr.

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
ELETROACÚSTICO PARA SONORIZAÇÃO DE
AMBIENTES – ESTUDO DE CASO EM UMA IGREJA**

JOÃO CARLOS RIBEIRO DO NASCIMENTO

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

**Golberi de Salvador Ferreira, Dr. Eng.
Orientador**

Banca Examinadora:

Luiz Alberto de Azevedo, Dr. Eng.

Fernando Santana Pacheco, Dr. Eng.

NASCIMENTO, João Carlos Ribeiro do. **Desenvolvimento De Um Sistema Eletroacústico Para Sonorização De Ambientes – Estudo De Caso Em Uma Igreja**, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

RESUMO

Os sistemas de sonorização estão presentes na maioria dos ambientes públicos e em eventos. Na contramão do avanço tecnológico dos equipamentos de áudio, os projetores acústicos, que são dispositivos que convertem energia elétrica em sonora, não apresentaram uma evolução significativa e nem tiveram seus custos diminuídos. O que se propõe é um sistema de projetores acústicos com características de projeção sonora que amenizam os problemas de acústica de grandes ambientes. Este sistema se destaca para uso em Igrejas, colocando-se como opção de baixo custo, tendo em vista que os sistemas comerciais com tais características são inacessíveis para a maioria deste tipo de instituições.

Palavras-chaves: Sonorização, arranjo em linha, acústica, sistema eletroacústico.

NASCIMENTO, João Carlos Ribeiro do. **Desenvolvimento De Um Sistema Eletroacústico Para Sonorização De Ambientes – Estudo De Caso Em Uma Igreja**, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

ABSTRACT

The sound systems are present in most public places and events. Contrary technological advance of audio equipment, acoustic projectors, which are devices that convert electrical energy into sound, showed no significant change, nor had their costs reduced. What is proposed is a system of acoustic projectors with sound projection characteristics that mitigate the problems of large acoustic environments. This system stands out for use in churches, standing as low-cost option, given that commercial systems with such features are inaccessible to the majority of such institutions.

Keywords: Sound, line array, acoustics, electroacoustic system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Compressão e rarefação do ar.....	19
Figura 2 - Formas de onda de diapasão e trompete.....	20
Figura 3 – Contornos de mesma audibilidade.....	22
Figura 4 – Curvas de ponderação.....	23
Figura 5 – Reflexão em superfícies curvas.....	24
Figura 6 – Reflexão e difração das ondas sonoras.....	25
Figura 7 – Absorção e refração das ondas sonoras.....	26
Figura 8 – Tubo de impedância portátil.....	28
Figura 9 – Câmara reverberante.....	29
Figura 10 – Representação do tempo de reverberação.....	30
Figura 11 - Tempos de reverberação recomendados.....	31
Figura 12– Alto-falante e principais componentes.....	35
Figura 13 – Alto-falante em movimento.....	36
Figura 14 – Modelos de caixas acústicas.....	37
Figura 15 – Construção geométrica da equação de Olson...	39
Figura 16 – Formas de dispersão acústica.....	40
Figura 17 – Dispersão sonora de uma caixa comum.....	41
Figura 18 – Dispersão sonora de uma caixa de arranjo em linha.....	42
Figura 19 - Modelos de caixas comerciais.....	46
Figura 20 – Ambiente a ser sonorizado.....	47

Figura 21 – Divisão da área a ser sonorizada.....	51
Figura 22 – Ligação dos alto-falantes.....	54
Figura 23 – Resposta em frequência do alto-falante selecionado.....	56
Figura 24 – Resposta em frequência caixa fechada x Qtc....	58
Figura 25 - Caixa proposta finalizada e instalada.....	58
Figura 26 – Analisador de áudio PAA3.....	59
Figura 27 – Diagrama polar horizontal e vertical.....	60
Figura 28 – Resposta em frequência em campo aberto.....	61
Figura 29 – Posicionamento das caixas.....	62
Figura 30 – Posição da caixa em relação ao piso e o primeiro ouvinte.....	62
Figura 31 - Resposta média em frequência no ambiente.....	63
Figura 32 – Equalizador Gráfico de 15 bandas.....	64
Figura 33 – Curva de resposta recomendada.....	65
Figura 34 – Resposta do sistema após ajustes no equalizador.....	65
Figura 35 - Sistema de som instalado.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de pressão sonora de referência para atividades.....	33
Tabela 2 - Limites de tolerância para ruído.....	34
Tabela 3 – Comparativo de custos.....	44
Tabela 4 – Custo de produção da caixa.....	45
Tabela 5– Tabela para cálculo do coeficiente de absorção.	48
Tabela 6 – Relação do número de projetores e ângulo vertical.....	53

SUMÁRIO

RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE LUSTRAÇÕES.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	X
SUMÁRIO.....	XI
1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Problema de pesquisa.....	15
1.3 Objetivo Geral.....	15
1.4 Objetivos Específicos.....	16
2 EMBASAMENTO TEÓRICO.....	17
2.1 Noções de Acústica.....	17
2.1.1 Conceito.....	17
2.1.2 Propagação.....	18
2.1.3 Forma de Onda, Frequência e Intensidade.....	19
2.1.4 Timbre, Audibilidade e Altura.....	20
2.1.5 Reflexão.....	23
2.1.6 Difração.....	24
2.1.7 Absorção e Refração.....	25
2.1.8 Reverberação.....	29

2.1.9	Decibel.....	31
2.1.10	Nível de Pressão Sonora.....	32
2.2	Caixa Acústica.....	35
2.3	Arranjo em Linha.....	37
3	METODOLOGIA.....	42
4	DESENVOLVIMENTO.....	43
4.1	Pesquisa de Mercado.....	43
4.2	Projeto de Sonorização.....	47
4.2.1	Características do Ambiente.....	48
4.3	Especificação da Caixa.....	51
4.4	Projeto da Caixa.....	52
4.4.1	Escolha do Alto-falante.....	53
4.4.2	Desenho mecânico.....	55
4.5	Resultados.....	58
4.5.1	Testes de campo.....	59
4.5.2	Testes no Ambiente.....	61
4.6	Recomendações Futuras.....	66
5	Considerações Finais.....	66
6	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um sistema eletroacústico para sonorização de ambientes, que como estudo de caso será projetado um sistema para uma Igreja. O sistema proposto possui características diferenciadas que amenizam os problemas de acústica de grandes ambientes e apresenta-se como uma opção de baixo custo.

Nos últimos anos tem havido uma grande evolução dos equipamentos de áudio. Os microfones se tornaram mais leves e com características específicas para as mais diversas aplicações, os amplificadores têm maior rendimento e menor tamanho e peso, os periféricos possuem processamento digital de áudio e os alto-falantes têm maior sensibilidade e resposta em frequência. Os trabalhos de alguns pesquisadores, somados à evolução dos equipamentos permitem que se desenvolvam caixas acústicas específicas para atender às diferentes necessidades de sonorização.

Por outro lado, a construção de muitas Igrejas foi realizada há mais de cem anos, e as obras um pouco mais recentes procuraram manter o estilo empregado nos primeiros tempos. Nesta época, a tecnologia de amplificação da voz humana ainda não estava disponível e por esta razão a arquitetura era responsável pela propagação da fala no ambiente por eco e reverberação. Com a disponibilidade dos equipamentos de áudio, surgiram as primeiras instalações em Igrejas como reforço acústico para a voz e também os primeiros problemas envolvendo os projetores de som e o ambiente. Mesmo com a evolução tecnológica dos equipamentos de áudio, a inteligibilidade de alguns sistemas instalados é tão baixa que muitas vezes não se consegue entender nenhuma palavra do orador, e o problema se repete em alguns ginásios, salões, e muitos outros ambientes. Estes problemas, em sua maioria, estão relacionados com a arquitetura, que só podem ser resolvidos com tratamento acústico, o que nem sempre é possível. Somente com o uso de técnicas e equipamentos

adequados, o problema poderia ser amenizado. Para o desenvolvimento deste será necessário um levantamento detalhado das características do ambiente, determinação das áreas ocupadas pelos ouvintes e do nível adequado de pressão sonora para desenvolver um sistema de reforço acústico dentro de níveis considerados satisfatórios.

1.1 Justificativa

Os sistemas eletroacústicos comerciais em sua maioria são projetados dentro de um padrão que visa atender a maioria das necessidades dos usuários; as caixas acústicas apresentam ângulos de cobertura acústica horizontal e vertical iguais para a maioria das frequências, volume, peso e formas de fixação inadequadas para instalações fixas.

Alguns fabricantes produzem equipamentos em série com características acústicas que atendam às necessidades específicas das Igrejas, mas o custo é relativamente alto para a maioria dos orçamentos disponíveis. Além disso, quase na totalidade são importados e estão disponíveis somente em grandes centros, contribuindo ainda mais para que estes produtos não sejam considerados no momento da escolha dos equipamentos para uma instalação, restando caixas acústicas comuns como única opção.

A solução seria projetar um modelo de caixa acústica de baixo custo, empregando as técnicas utilizadas nos modernos sistemas eletroacústicos de grandes shows, inovando e promovendo uma melhoria considerável na qualidade da sonorização de uma Igreja, que também pode ser empregado em outros ambientes com características similares.

O desafio foi desenvolver um sistema adequado a este tipo de ambiente e com um custo acessível, sem prejuízo da qualidade.

1.2 Problema de pesquisa

A arquitetura das Igrejas não foi projetada para receber um sistema de captação, amplificação e projeção sonora. Os modelos tradicionais de caixas acústicas quando instalados em ambientes com problemas de ordem acústica apresentam um resultado que causa constrangimento para o instalador e insatisfação para os usuários. Os problemas de acústica são o eco e a reverberação, causados pela reflexão do som nas paredes, teto e piso.

Os componentes utilizados na confecção dos projetores de som determinam os ângulos de dispersão acústica, que nem sempre coincidem com os ângulos necessários para atender às necessidades impostas pelo projeto. Desta maneira, o projetista fica sem opção para desenvolver um sistema adequado.

O propósito desta pesquisa é buscar e aplicar técnicas desenvolvidas por diversos pesquisadores que se dedicaram ao longo dos últimos anos a estudar e compreender o comportamento das ondas sonoras, a projetar, testar e aperfeiçoar os projetores acústicos, para embasar o dimensionamento de novos projetores acústicos, adequados para ambientes reverberantes.

1.3 Objetivo Geral

Desenvolver e construir um modelo de caixa acústica com características de projeção sonora que possibilite sonorizar ambientes com tempos de reverberação acústica considerados inadequados para reprodução da fala e que permitam obter qualidade sônica satisfatória, com baixo custo.

1.4 Objetivos Específicos

- Levantar as características físicas e acústicas do ambiente a ser sonorizado.
- Identificar as necessidades dos usuários (músicos, palestrantes e ouvintes).
- Dimensionar e construir as caixas acústicas para atender as necessidades dos usuários.
- Definir os demais componentes que irão compor o sistema eletroacústico.
- Construir e instalar o sistema.
- Ajustar o sistema, medir e confrontar os resultados com os propósitos.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

É impossível projetar um sistema eletroacústico sem a conceituação de som e do comportamento acústico do ambiente e a sua influência no funcionamento dos equipamentos de áudio. Esta interação do sistema com o ambiente quando não levada em consideração na fase inicial do projeto pode levar a resultados nada satisfatórios.

2.1 Noções de Acústica

A acústica é um dos ramos da física. É a ciência que estuda o som, suas propriedades, propagação e produção. Cada ambiente possui características próprias quando se analisa o comportamento do som quando se propaga neste. Este tratamento que o ambiente impõe ao som, comumente chamado de acústica, é uma interferência imposta no som gerado pelas caixas acústicas até ele chegar aos nossos ouvidos (CYSNE, 1991). Quando esta interferência é negativa, na linguagem popular diz-se que a acústica não é boa, o que pode ser solucionado com um tratamento acústico, o que não é objeto de estudo deste trabalho. Assim, o projetista terá de desenvolver um sistema de reforço sonoro que seja adequado para operar nas condições acústicas impostas por estes ambientes.

2.1.1 Conceito

A natureza física do som é energia em forma de onda em movimento oscilatório ou vibratório em meios que possam se deformar, como ar, água ou outros meios sólidos ou gasosos. A natureza fisiológica é quando esta forma de energia é percebida pelo ouvido humano, possuindo as qualidades de intensidade, timbre e frequência (BALLOU, 1988).

2.1.2 Propagação

O som não se propaga no vácuo, somente em meios que possam se deformar, ou seja, meios elásticos. Com a vibração do diafragma (cone) do alto-falante as partículas de ar a sua volta são deslocadas de sua posição original, e este deslocamento é transmitido para as partículas vizinhas. Estas partículas voltam para a sua posição original, assim como as demais. As partículas vibram sobre a sua posição, repassando para as outras por colisão estas vibrações e assim por diante (BALLOU, 1988). Na Figura 1 é mostrado o alto-falante, que ao se mover para frente comprime as partículas de ar criando áreas de compressão e ao se mover para trás cria áreas de rarefação.

A compressibilidade, temperatura e densidade do meio influem diretamente na velocidade de propagação da onda sonora. No ar, a 21°C, a velocidade média do som é de 344 m/s, na água esta média é de 1480 m/s e no alumínio é de 5150 m/s.

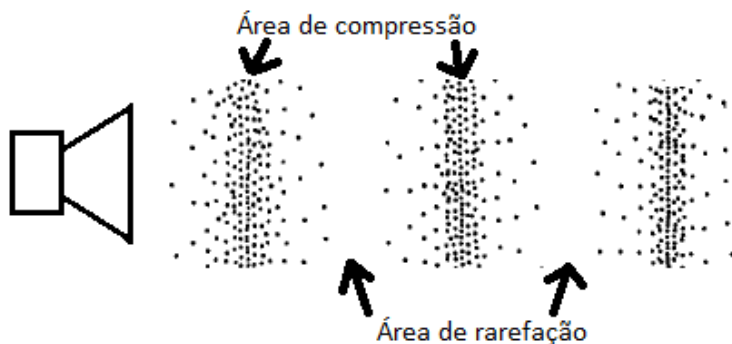


Figura 1- Compressão e rarefação do ar.

Fonte: CYSNE, 1991.

2.1.3 Forma de Onda, Frequência e Intensidade

A propriedade física do som que o quantifica é a intensidade, que é definido como o fluxo de energia sonora por unidade de área, podendo ser apresentada em watts acústicos/cm² (CYSNE, 1991).

A quantidade de oscilações de uma fonte sonora, ou seja, quantas vezes o cone de um alto-falante vai para frente e para trás em 1 segundo é o que determina a frequência, que pode ser expressa em Hertz (Hz) ou seu múltiplo de 1000, quilohertz (kHz).

A natureza de um som é definida pela sua forma de onda. A Figura 2 mostra as formas de onda de um diapasão e de um trompete, ambas com intensidade e frequência semelhantes.

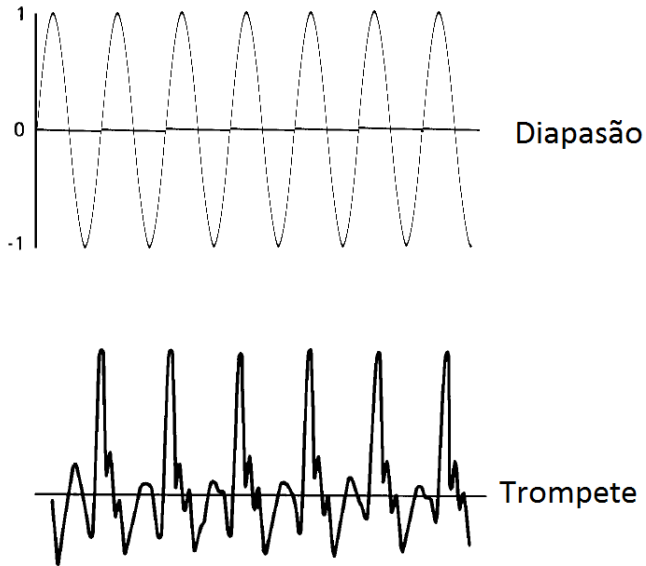


Figura 2 - Formas de onda de diapasão e trompete.

Fonte: CYSNE, 1991.

2.1.4 Timbre, Audibilidade e Altura

As propriedades físicas do som: frequência, intensidade e forma de onda, provocam sensações em nossos ouvidos chamadas correspondentemente de: altura, audibilidade e timbre, identificados como propriedades psicofísicas do som (CYSNE, 1991).

A percepção da forma de onda é o timbre, que nos permite identificar quem nos fala, ou um determinado instrumento musical.

A audibilidade, também chamada de *loudness*, é a percepção da intensidade do som.

A frequência de um sinal de áudio é percebida pelo ouvido humano como altura. Uma experiência realizada pelo Dr. Harvey Fletcher concluiu resumidamente, que a nossa percepção de altura não se pode relacionar matematicamente com frequência, ou seja, dependendo da intensidade do som, é diferente a nossa percepção de uma mesma frequência. A mesma conclusão se aplica para a audibilidade. Existe uma variação da sensibilidade da audição humana com a pressão sonora e a frequência. Robinson e Dadson em uma experiência em 1956 levantaram as curvas mostradas na Figura 3, chamadas de contornos de mesma audibilidade. A variação de sensibilidade aumenta a medida que se aproxima dos extremos de cada curva e, a medida que aumenta o nível de pressão sonora, as diferenças de sensibilidade diminuem (CYSNE, 1991).

O phon é a unidade que relaciona a resposta de frequência psicofisicamente, percebida pelo ouvido humano, com dB SPL (nível de pressão sonora em decibéis). Por definição, as medidas em dB e phon para a frequência de 1 kHz são correspondentes, as demais frequências são resultados de experimentos com voluntários que relacionaram a intensidade de sinais de frequências puras com o nível percebido na frequência de referência de 1 kHz (EVEREST, POHLMANN, 2001).

Este estudo provocou na indústria de equipamentos de som a introdução de um circuito para contorno da curva de resposta selecionável pelo usuário chamada de *loudness*, que aumenta a resposta de baixas e altas frequências, compensando a deficiência dos nossos ouvidos nestas regiões do espectro auditivo.

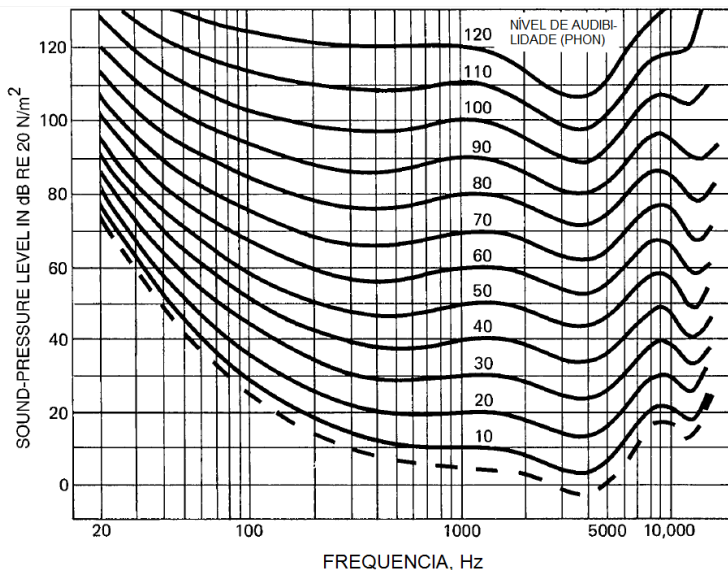


Figura 3 – Contornos de mesma audibilidade.

Fonte: CYSNE, 1991.

Os decibelímetros, medidores de níveis de pressão sonora, incorporam nos seus circuitos curvas de ponderação, cujo objetivo é reproduzir nos medidores o comportamento aproximado do ouvido humano (CYSNE, 1991). São três curvas: A, B e C (Figura 4). A curva de ponderação “A” é baseada na curva de 40 phon da Figura 3 (contornos de mesma audibilidade) e é usada para medir níveis de pressão sonora situados na faixa de 20 a 55 dB. A curva de ponderação “B” está baseada na curva de 70 phon, e é utilizada para medir níveis na faixa de pressão de 55 a 85 dB e a curva “C” é praticamente plana, utilizada para medir níveis de 85 a 140 dB.

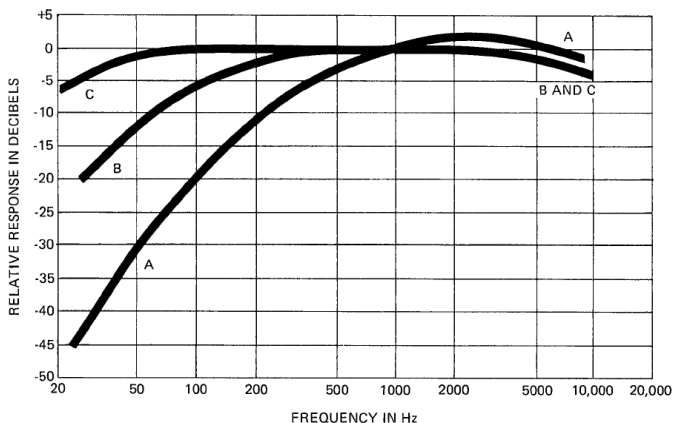


Figura 4 – Curvas de ponderação.

Fonte: CYSNE, 1991.

2.1.5 Reflexão

Sempre que uma onda sonora encontra uma superfície maior que o seu comprimento de onda, esta é refletida com o mesmo ângulo de incidência, assim como ocorre com a luz. Por esta característica, as formas dos ambientes a serem sonorizados são de grande interferência no resultado, pois as superfícies côncavas concentram as ondas refletidas, consideradas uma das formas mais prejudiciais para a acústica do ambiente (Figura 5). Ao contrário, a forma convexa distribui o som por todo o ambiente, muito utilizado para obter um campo acústico difuso em estúdios e salas de espetáculos (CYSNE, 1991).

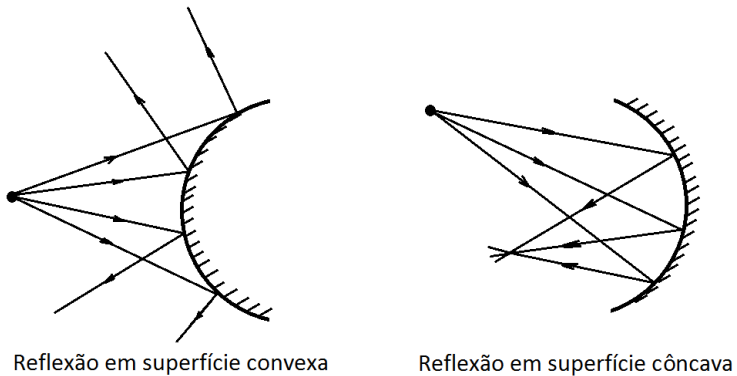


Figura 5 – Reflexão em superfícies curvas.

Fonte: CYSNE, 1991.

2.1.6 Difração

A difração é a mudança de direção e de intensidade de uma onda sonora quando esta encontra uma superfície que possui uma abertura ou o canto de um obstáculo. Esta mudança de direção e de intensidade do som refletido depende da relação do comprimento do som incidente e do tamanho e da forma do obstáculo (BALLOU, 1988). A Figura 6 ilustra o comportamento das ondas e os efeitos de difração e reflexão.

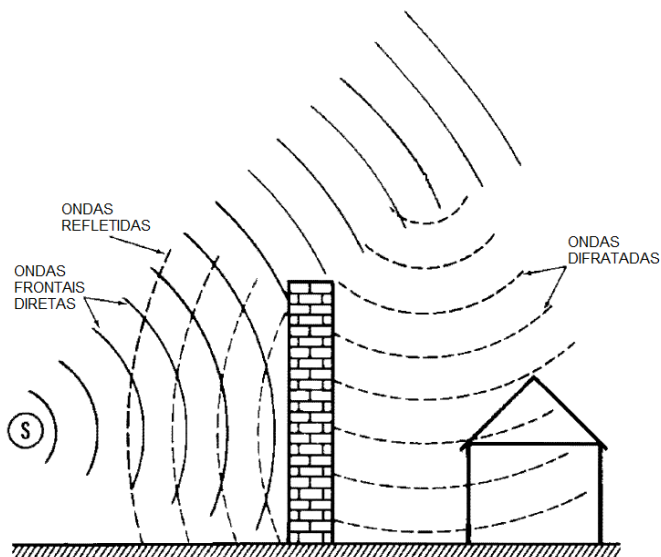


Figura 6 – Reflexão e difração das ondas sonoras.

Fonte: BALLOU, 1998.

2.1.7 Absorção e Refração

Ao atingir uma superfície de separação entre dois meios com características acústicas diferentes, parte da onda sonora é refletida, outra parte é absorvida e se transforma em calor, e uma terceira parte é transmitida para o outro lado da superfície após sofrer uma refração acústica, uma mudança de direção. O coeficiente de absorção acústica de um material é a relação entre o som que é absorvido e o que incide. Estes coeficientes possuem valores que podem variar entre 0 e 1. Em um ambiente ou material, onde nenhum som é refletido, há 100% de absorção,

o valor do coeficiente é 1. Todos os materiais possuem um coeficiente de absorção acústica que varia de acordo com a frequência do som incidente (CYSNE, 1991).

No momento em que uma onda sonora atinge a superfície de um material absorvedor, ocorre um amortecimento das vibrações do ar nos poros dessa superfície e acontece um rápido decaimento do som. Em alguns materiais que não são bons absorvedores haverá também reflexão, e caso este material seja suficientemente fino ocorrerá a refração, uma propagação para o outro lado (Figura 7), com atenuação (ACIOLI, 1994).

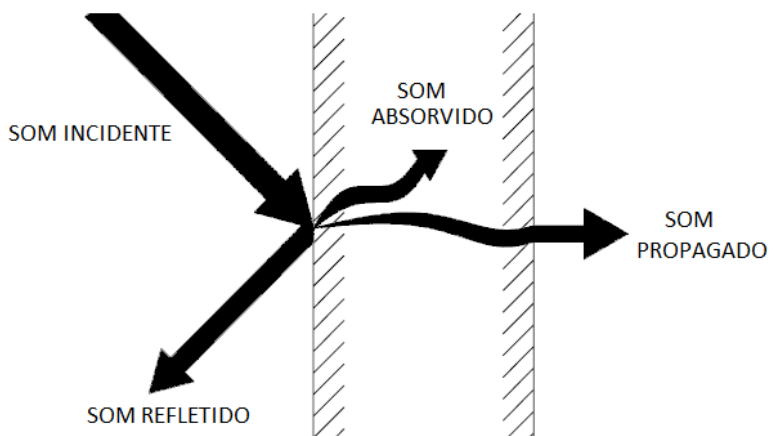


Figura 7 – Absorção e refração das ondas sonoras.

Fonte: Autor.

Os materiais utilizados para o tratamento acústico de superfícies são indicados para bandas de frequência de uma oitava, com frequências centrais: 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz. Os materiais que revestem as paredes de um recinto determinam o tempo de reverberação que pode ser medido ou calculado. O físico Wallace Clement Sabine desenvolveu a

equação para estimar o tempo de reverberação em um ambiente por meio de cálculo, sendo utilizada também para calcular o coeficiente de absorção dos materiais ensaiados:

$$RT60 = 0,161V \div S\tilde{\alpha}$$

Onde:

RT60 é o tempo de reverberação em segundos.

V é o volume da sala em metros cúbicos.

S é a área da sala em metros cúbicos.

ã é o coeficiente de absorção média.

Foram desenvolvidos vários métodos para a determinação do coeficiente de absorção, os mais usados são o método da câmara reverberante e o método de tubo de onda estacionária. Também conhecido como tubo de impedância, o tubo de onda estacionária permite determinar o coeficiente de absorção dos materiais. O método da câmara reverberante tem maior custo por depender de laboratórios que possuam câmara reverberante.

O tubo de impedância é composto de um tubo com um alto-falante numa das extremidades e na outra a amostra do material a ser testado (Figura 8). Neste método, o alto-falante é excitado com um ruído branco e é medida a pressão sonora, no interior do tubo, em duas posições pré-determinadas. Os sinais obtidos são processados por um analisador digital de frequência, com dois canais, e posteriormente pós-processados em um programa computacional específico para se determinar a curva de absorção acústica do material, em função da frequência (VASCONCELOS, MAIRINK, OLIVEIRA, TEODORO, 2005).



Figura 8 – Tubo de impedância portátil.

Fonte: Grupo Alava Ingenieros, 2011.

Na câmara reverberante (Figura 9) primeiramente é realizada uma medição do tempo de reverberação com a câmara vazia. Para medição é utilizada uma fonte de ruído para criar um campo sonoro difuso produzido por uma caixa acústica. Os tempos de reverberação são medidos. Na sequência coloca-se o material a ser ensaiado e efetua-se novamente a medição dos tempos de reverberação. Através do equacionamento de Sabine relacionam-se os tempos de reverberação com e sem amostra e determina-se o coeficiente de absorção (MILLER, 1982).



Figura 9 – Câmara reverberante.

Fonte: CCADET-UNAM, 2011.

2.1.8 Reverberação

O som refletido dentro de um ambiente por um determinado tempo é chamado de reverberação, uma

persistência do som (BALLOU, 1988). Esta é uma das características do ambiente que precisa ser avaliada antes de iniciar o projeto do sistema de sonorização, chamada de tempo de reverberação, abreviado como RT_{60} (*Reverberation Time 60 seconds*). Numa sala a ser analisada, liga-se uma fonte sonora e a energia neste ambiente começa a crescer até atingir um limite. Neste instante, desliga-se a fonte sonora e marca-se o tempo e monitora-se o nível de pressão sonora. Registra-se o tempo decorrido desde o desligamento da fonte até o nível de pressão sonora chegar a 60 dB menor que o nível marcado inicialmente. A Figura 10 mostra graficamente o tempo de reverberação (RT_{60}).

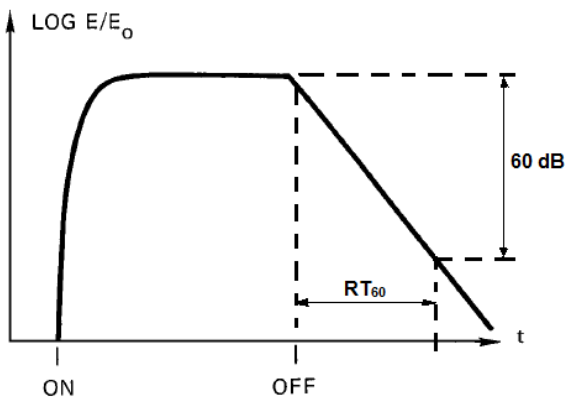


Figura 10 – Representação do tempo de reverber:

Fonte: CYSNE, 1991.

Esta análise pode ser feita em todo o espectro de áudio ou por faixas de frequências. A segunda opção permite identificar em que faixa de frequência é necessário efetuar algum tratamento acústico no ambiente, auxiliando, por exemplo, na escolha dos materiais absorventes. Os especialistas em

acústica recomendam tempos de reverberação adequados para diversos programas a serem reforçados e com uma relação direta com o tamanho do ambiente (CYSNE, 1991). A Figura 11 mostra um gráfico que relaciona os tempos de reverberação recomendados com o tipo de programa e o volume do ambiente. Por exemplo: um sistema eletroacústico instalado em um ambiente de 10 mil metros cúbicos com um RT_{60} de 1,6 segundos é o recomendado para a reprodução de música, mas seria inadequado para uma palestra, onde o tempo de reverberação ideal seria de 1 segundo.

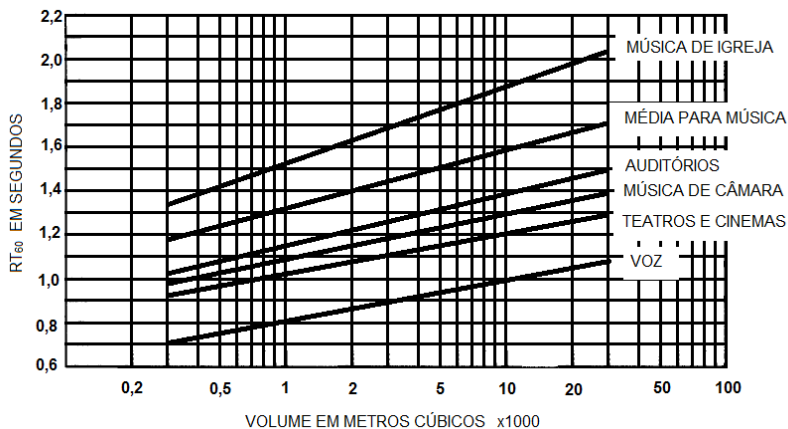


Figura 11 - Tempos de reverberação recomendados.

Fonte: CYSNE, 1991.

2.1.9 Decibel

O bel é uma unidade de medida definida como o logaritmo de base 10 de uma relação de duas potências

elétricas. Na prática, o bel, uma homenagem a Alexander Graham Bell, não se tornou muito prático; o decibel, correspondente a um décimo do bel, é a unidade utilizada (dB). Por estar relacionado com dois níveis de potência elétrica, é possível estabelecer um desses níveis como referência e expressar decibéis em função desta referência. As indústrias norte-americanas em 1939 estabeleceram a referência de 1 miliwatt (775 mV em 600 ohms). Estes decibéis são indicados em dBm, sendo o “m” a referência a 1 miliwatt. O nível de potência de 1 miliwatt convertido para dBm é igual a 0 dBm. Da mesma forma, 1 watt é dBW. Para os níveis de pressão acústica, a referência é $20 \mu\text{m/m}^2$, equivalente ao limiar de audibilidade, e é expresso em dBSPL (CYSNE, 1991).

2.1.10 Nível de Pressão Sonora

Ao se produzir um som, a pressão atmosférica normal é alterada para um novo valor chamado de pressão atmosférica dinâmica. Após se estabelecer um valor de referência para esta pressão é possível expressar outros valores de pressão atmosférica em decibéis. O valor de referência atual do nível de pressão sonora (SPL – *Sound Pressure Level*) é $20 \mu\text{m/m}^2$, equivalente ao nível de pressão a partir do qual começamos a escutar os sons (CYSNE, 1991). A Tabela 1 mostra uma referência de atividades e equipamentos em operação com o nível de pressão gerado medido com decibelímetro com curva de ponderação “A” (Figura 4) em dB(A).

Tabela 1 – Níveis de pressão sonora de referência para atividades.

Fonte: CYSNE, 1991.

dB (A) ref. $20 \mu\text{N/m}^2$	ATIVIDADE
0	Limiar da audição para jovens, entre 1 e 4 kHz
35	Suspiro suave
40	Música funcional em ambiente silencioso
60	Música de fundo (ambiente)
60	Nível de conversa
75	Nível de conversa preferido para máxima inteligibilidade
90	Concerto Musical
93	Picos de contrabaixo, a 2 metros
94	Picos de clarineta, a 3 metros
95	Picos de piano, posição do músico
96	Picos de pistão, a 3 metros
105	Nível de monitoração durante gravação de música Pop
110	Música muito alta
115	Níveis de picos durante concertos de Rock

A exposição a níveis altos de pressão sonora ou contínuo deve ser avaliada para não prejudicar a audição. Há limites relacionados aos níveis e tempos de exposição, quanto maior o nível menor é o tempo recomendado. A Tabela 2 mostra os nível de pressão sonora em dB(A) e o tempo máximo de exposição diária de uma pessoa.

Tabela 2 - Limites de tolerância para ruído.

Fonte: MACHADO, 2004.

NÍVEL DE RUÍDO dB (A)	MÁXIMA EXPOSIÇÃO DIÁRIA PERMISSÍVEL
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	15 minutos
114	10 minutos
115	8 minutos

2.2 Caixa Acústica

O alto-falante (Figura 12) é um diafragma (cone) que se movimenta, por conta de um campo eletromagnético modulado em amplitude, que atua com um ímã permanente (DICKASON,1991).

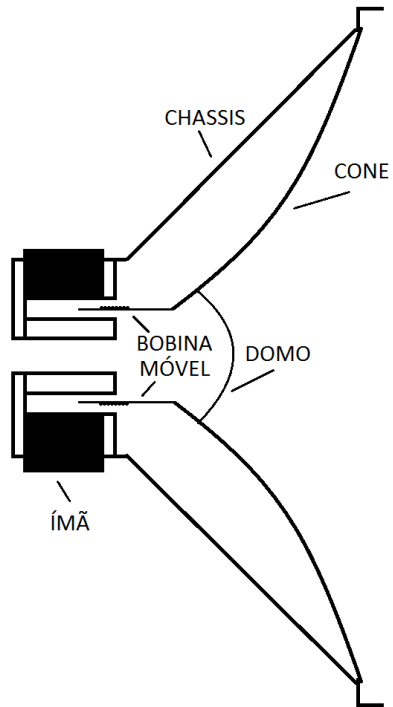


Figura 12– Alto-falante e principais componente

Fonte: Autor.

A função da caixa acústica é acomodar o alto-falante e isolar sua parte dianteira da traseira. Operando fora de uma caixa acústica, o alto-falante ao se movimentar provoca o deslocamento do ar diante e atrás do seu cone. Comprime o ar de um lado e o deixa rarefeito do lado oposto. Quando a camada de ar comprimido entra em contato com a rarefeita, elas se cancelam (Figura 13). Com o isolamento da caixa acústica este efeito é eliminado (CYSNE, 1991).

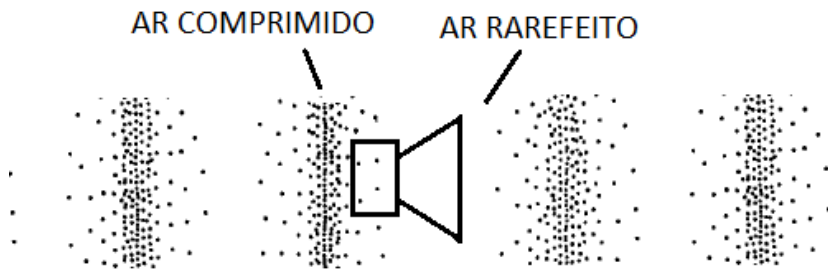


Figura 13 – Alto-falante em movimento.

Fonte: Autor.

Existem diversos modelos de caixas acústicas: caixa fechada, refletor de graves, radiador passivo e linha de transmissão (Figura 14). A caixa fechada é mais simples de todos os modelos, pela facilidade de obter os valores corretos para os parâmetros construtivos. Pontos fracos deste modelo são o baixo rendimento e uma excursão longa da bobina do alto-falante.

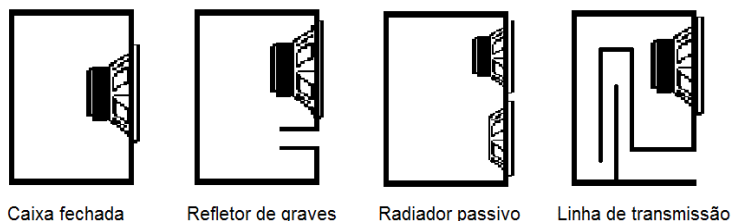


Figura 14 – Modelos de caixas acústicas.

Fonte: Autor.

O refletor de graves é o modelo de caixa que faz o uso de um duto proporcionando ao sistema menor distorção e um menor deslocamento da bobina, além de um maior rendimento comparado a caixa fechada. A desvantagem deste modelo é a dificuldade de projetar o sistema.

O radiador passivo tem o funcionamento similar ao refletor de graves e com suas vantagens e desvantagens, onde um dos alto-falantes é composto somente de um cone sem bobina e aranha.

A linha de transmissão apresenta uma resposta de graves acentuada, superior aos demais modelos citados, mas possui um baixo rendimento, dificuldade de dimensionamento e construção (DICKASON,1991).

2.3 Arranjo em Linha

O arranjo em linha de alto-falantes é frequentemente utilizado para proporcionar maior diretividade, geralmente no plano vertical. Para melhor desempenho, estas matrizes em linha

empregam alto-falantes especialmente concebidos para a formação de uma fonte de linha quase contínua (URED, 2001).

Aumentando a quantidade de transdutores alinhados diminui-se o ângulo de dispersão vertical, desta forma o nível de pressão sonora aumentará na área de cobertura. Quanto menores os alto-falantes utilizados melhor é o acoplamento das altas frequências, fazendo com que o sistema tenha uma boa resposta nesta faixa de áudio.

Quase todas as análises do arranjo em linha são referenciadas em várias obras apresentadas em seminários a partir do final de 1920 a 1960. Um arranjo em linha pode ser modelado como um segmento de pequenas linhas distribuídas ao longo de uma linha. Harry Olson equacionou a diretividade da pressão acústica radiada por um arranjo em linha, que é:

$$R(\alpha) = \frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi l}{\lambda} \sin \alpha}$$

Onde:

$R(\alpha)$ é o ângulo de diretividade vetical;

l é o comprimento do arranjo em linha;

λ é comprimento de onda da frequência reproduzida pelo sistema.

Este equacionamento tem sua construção geométrica mostrada na Figura 15, o que permite calcular o ângulo de cobertura para cada frequência (URED, 2001).

A construção do arranjo em linha é feita com o alinhamento dos alto-falantes formando uma coluna. Este formato de caixa acústica até hoje é utilizado, principalmente em ambientes com muita reverberação por apresentarem um baixo ângulo de dispersão sonora vertical, concentrando o som para a plateia e evitando a sua propagação para as paredes e teto. A

Figura 16 mostra as formas de dispersão de uma caixa acústica comum e uma de arranjo em linha.

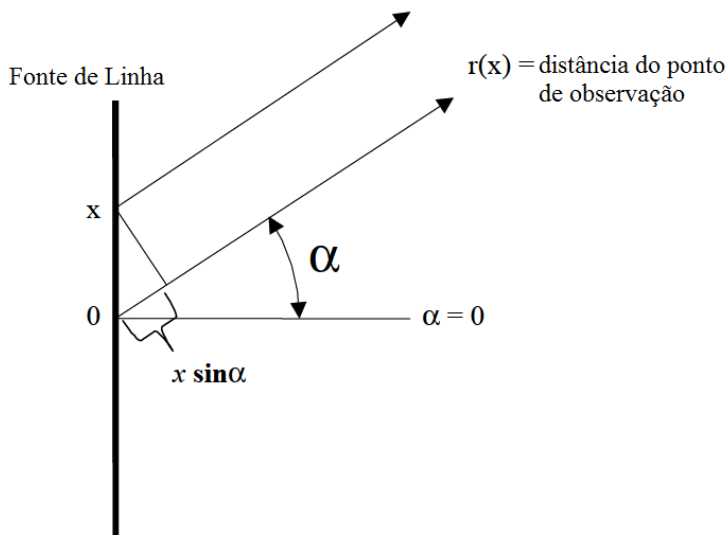


Figura 15 – Construção geométrica da equação de Olson.

Fonte: Adaptada de UREDA, 2001.

forma de dispersão do arranjo em linha, além de amenizar os problemas de reflexão sonora, é mais eficiente, tendo em vista que uma caixa comum emite som, em campo aberto, em todas as direções em formato de esfera.

O formato esfera de propagação, mostrado na Figura 17, faz com que cada vez que se dobra a distância da origem do som, temos uma redução de quatro vezes no nível de pressão sonora, o que equivale a -6 dB, visto que a área onde se encontra o ouvinte é correspondente a uma superfície esférica, que tem sua área aumentada em quatro vezes cada vez que o

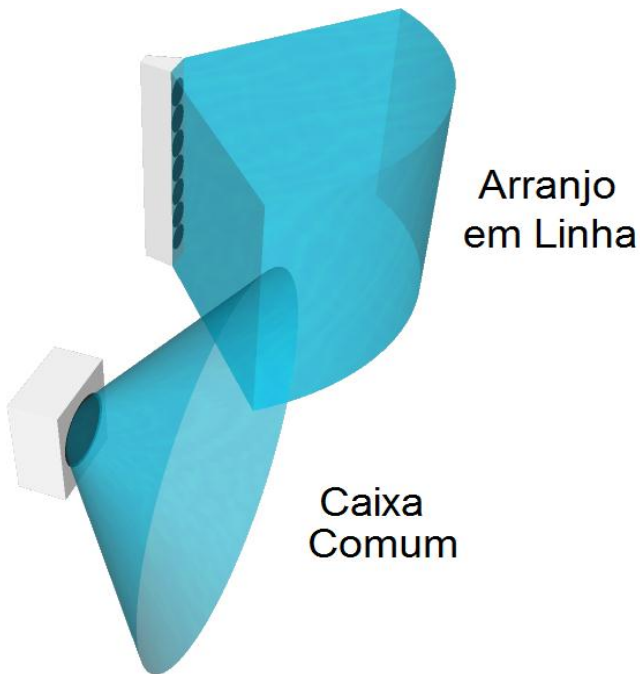


Figura 16 – Formas de dispersão acústica.

Fonte: Autor.

raio dobra de tamanho (BALLOU, 1988). A área da superfície de uma esfera é $4\pi R^2$, tomando como exemplo a área A da Figura 17 e considerando que a distância da origem do som seja de dois metros, teremos uma área de $50,27 \text{ m}^2$, da mesma forma consideramos que a área $4A$ esteja a quatro metros da origem, a área será de $201,06 \text{ m}^2$. A quantidade de energia (QE) presente nas duas áreas é a mesma, logo a atenuação é calculada por:

$$Aten = 10 \log \frac{\frac{QE}{50,27}}{\frac{QE}{201,06}} = 10 \log 4 = 6,0 \text{ dB}$$

Esta é a lei dos inversos dos quadrados, onde o nível de pressão sonora cai 6 dB cada vez que se dobra a distância da fonte sonora (CYSNE, 1991).

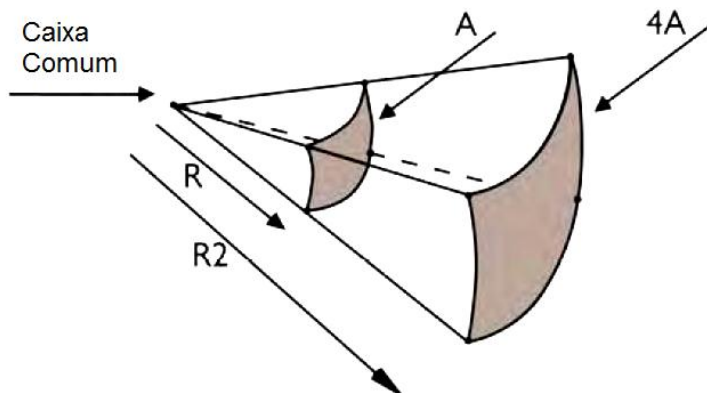


Figura 17 – Dispersão sonora de uma caixa comum.

Fonte: <http://www.l-acoustics.com/>

Em uma caixa de arranjo em linha, a dispersão tem a forma de um cilindro, com uma superfície equivalente a metade da área da esfera (Figura 18).

Usando como referência o exemplo anterior, a área do cilindro é dada por $2\pi Rh$. Considerando a altura da coluna de 1 metro e a distância da origem do som seja de dois metros, teremos uma área de $12,56 \text{ m}^2$; da mesma forma consideramos que a área $2A$ esteja a 4 metros da origem, a área será de $25,14 \text{ m}^2$. A quantidade de energia (QE) presente nas duas áreas é a mesma, logo a atenuação é calculada por:

$$Aten = 10 \log \frac{QE}{\frac{12,56}{QE}} = 10 \log 2 = 3,0dB$$

$$\frac{QE}{25,14}$$

Por este motivo a queda no nível de pressão sonora é de 3 dB a cada vez que a distância da origem do som nas caixas de arranjo em linha é dobrada(UREDA, 2001).

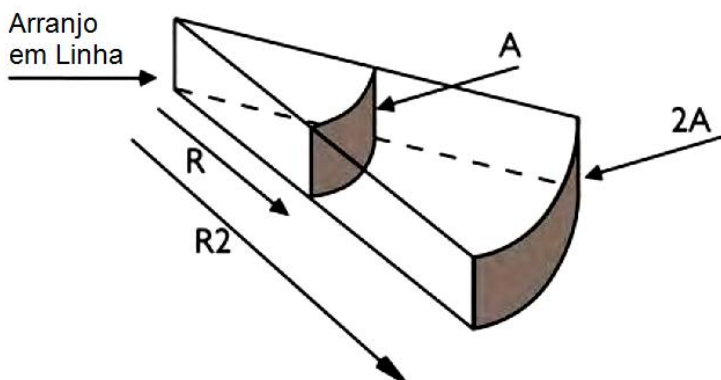


Figura 18 – Dispersão sonora de uma caixa de arranjo em linha

Fonte: <http://www.l-acoustics.com/>

3 METODOLOGIA

Efetuar um estudo teórico e prático para conhecer do comportamento de um sistema eletroacústico no ambiente, o

qual não foi projetado para receber um sistema de reforço sonoro, o que permitirá desenvolver uma caixa acústica que visa atender as necessidades do projeto.

Realizar uma pesquisa qualitativa exploratória é a metodologia empregada para obter informações de produtos similares e justificar o trabalho de desenvolver um novo produto e comparar seus custos e características com o modelo a ser proposto.

Para sonorizar um ambiente é necessário conhecê-lo acusticamente através de medições e testes, por este motivo deverão ser levantadas as necessidades dos usuários (músicos e palestrantes) e com estas informações dimensionar o sistema eletroacústico. Será necessário desenvolver e construir caixas acústicas adequadas a estas características, inovando a forma de sonorizar estes ambientes, mantendo-se dentro do orçamento. Além disso, é necessário determinar sua potência acústica, ganho, resposta de frequência e cobertura sônica. Após a instalação do sistema, efetuar testes e medições para verificar os resultados e se estes atendem as especificações do projeto.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Pesquisa de Mercado

Desde a publicação dos trabalhos dos australianos Thiele e Small em 1961, que definiram o comportamento do alto-falante num conjunto padronizado de parâmetros, somente em 1983 que Joseph D'Appolito sugeriu o uso de caixas acústicas de faixa

completa em arranjo de linha. Somente nos meados da década de noventa é que surgiu o primeiro produto comercial utilizando este conceito para uso em áudio profissional. O arranjo em linha dos transdutores eletroacústicos faz com que o ângulo de dispersão acústica vertical chegue a zero, enquanto o ângulo horizontal se mantém inalterado, tornando-se ideal para serem empregados em ambientes com muita reverberação, a exemplo de ginásios de esportes, Igrejas e grandes salões. O mercado a que se destina a caixa aqui analisada é de Igrejas, templos e outros ambientes que não exijam um nível muito alto de pressão sonora e apresentam problemas com a acústica. Nesta categoria apresentamos os modelos mais comercializados e na Tabela 3 temos um comparativo de custo com o modelo proposto.

Tabela 3 – Comparativo de custos.

Fonte: Autor.

Paranay MA-12	R\$ 6.100,00
BLA-124	R\$ 3.690,00
KR-200	R\$ 6.800,00
Meteoro	R\$ 3.750,00
Modelo Proposto	R\$ 1.600,00

Para a comparação dos custos dos modelos comerciais e o modelo proposto foi efetuada uma previsão dos custos para a fabricação da caixa para uma produção de 10 unidades (Tabela 4).

Tabela 4 – Custo de produção da caixa.*Fonte: Autor.*

Alto-falantes	R\$ 960,00
Gabinete + Montagem	R\$ 180,00
Tela + Pintura	R\$ 110,00
Acessórios + Impostos	R\$ 350,00
Modelo Proposto	R\$ 1.600,00

4.1.1 Modelos comerciais

A empresa americana Bose desenvolveu e comercializa uma série de caixas acústicas em arranjo em linha, destacamos o modelo Panaray MA-12 por ter características similares ao modelo aqui apresentado, resposta em frequência de 155 Hz a 12 kHz, nível máximo de pressão sonora de 113 dB a 1 metro, dispersão horizontal de 160⁰ e vertical 10⁰ e potência de 300 W.

A Btech, uma empresa brasileira, disponibiliza um modelo em arranjo em linha, BLA-124, com potência de 360 W, dispersão horizontal de 160⁰ e vertical de 10⁰, resposta em frequência de 150 Hz a 20 kHz.

A k-array, uma fabricante italiana, possui o modelo KR200, com dispersão de 120⁰ na horizontal e 7⁰ na vertical, pressão sonora máxima de 127 dB, resposta em frequência de 150 Hz e 19 kHz e potencia de 500 W.

O fabricante nacional Meteoro disponibiliza o modelo Vertical Line System com resposta entre 180 Hz a 15 kHz e potência de 240 W.



Figura 19 - Modelos de caixas comerciais

Fonte: <http://global.bose.com>; <http://www.btechaudio.com.br>;
<http://www.k-array.net>;
<http://www.amplificadoresmeteoro.com.br>;

4.2 Projeto de Sonorização

Ao se realizar um projeto de sonorização é necessário estabelecer alguns requisitos indispensáveis: cobertura sônica em toda a área a que se destina o reforço sonoro, nível de pressão sonora no ouvido da pessoa mais remota da fonte sonora, estabelecer um nível mínimo de inteligibilidade, na utilização de microfones evitar realimentação acústica e estabelecer resposta de frequência adequada para o tipo de programa a ser reforçado (CYSNE, 1991). O início de um projeto de sonorização acontece com o levantamento das características do ambiente. As primeiras informações levantadas foram as dimensões do ambiente e reproduzidas num programa de desenho tridimensional, uma ferramenta auxiliar para determinar o posicionamento e ângulo dos projetores acústicos. A Figura 20 mostra o desenho do ambiente e as dimensões.

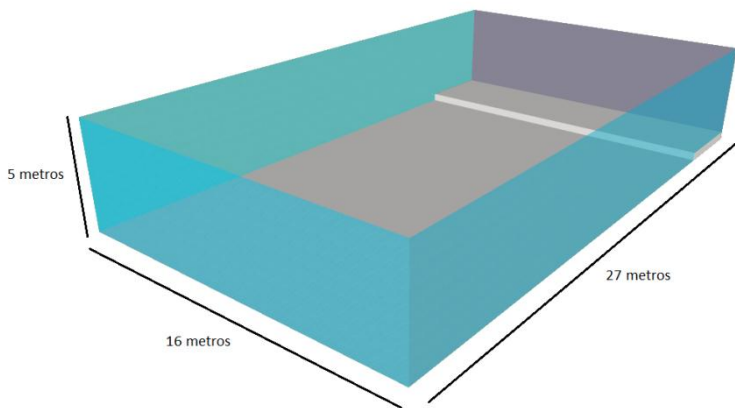


Figura 20 – Ambiente a ser sonorizado.

Fonte: Autor.

4.2.1 Características do Ambiente

O ambiente objeto deste estudo é uma Igreja com as seguintes dimensões:

- Comprimento: 27 metros;
- Largura: 16 metros;
- Altura: 5 metros;
- Volume Interno: 2160 m³;

É necessário fazer o levantamento da área interna e do tipo de material que reveste estas superfícies e calcular o coeficiente de absorção médio do recinto, onde $\bar{\alpha}$ é o coeficiente de absorção sonora e S a área:

Tabela 5– Tabela para cálculo do coeficiente de absorção.

Fonte: Autor.

MATERIAL	ÁREA (M2)	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 kHz		2 kHz		4 kHz	
		$\bar{\alpha}$	S. $\bar{\alpha}$	$\bar{\alpha}$	S. $\bar{\alpha}$	$\bar{\alpha}$	S. $\bar{\alpha}$	$\bar{\alpha}$	S. $\bar{\alpha}$	$\bar{\alpha}$	S. $\bar{\alpha}$	$\bar{\alpha}$	S. $\bar{\alpha}$
Vidro (Portas e Janelas)	32	0,35	11,2	0,25	8	0,18	5,76	0,12	3,84	0,07	2,24	0,04	1,28
PVC (Forro)	427	0,11	46,97	0,11	46,97	0,12	51,24	0,11	46,97	0,1	42,7	0,09	38,43
Parede Pintada	403	0,1	40,3	0,05	20,15	0,06	24,18	0,07	28,21	0,09	36,27	0,08	32,24
Bancos de Madeira	153	0,05	7,65	0,06	9,18	0,08	12,24	0,07	10,71	0,06	9,18	0,07	10,71
Piso	279	0,01	2,79	0,01	2,79	0,01	2,79	0,02	5,58	0,02	5,58	0,02	5,58
S. $\bar{\alpha}$ Total			108,91		87,09		96,21		95,31		95,97		88,24
RT60	3,67		3,19		3,99		3,61		3,65		3,62		3,94
$\bar{\alpha}$			0,124		0,096		0,09		0,078		0,068		0,06

Com o uso de um analisador de áudio foi medido o tempo de reverberação (RT_{60}) no ambiente ficando em 3,2 segundos e o valor de RT_{60} na Tabela 4 foi de 3,67 segundos.

Neste ponto do projeto é necessária a determinação do ouvinte mais distante do projetor de som (Do). Com estas informações pode-se determinar a relação de diretividade do projetor de som (Q) mínimo para que se possa atingir um nível mínimo de inteligibilidade que é 15%.

O Índice Percentual de Perda de Articulação consonantal ($\%AL_{cons}$) é o indicativo de inteligibilidade de um sistema eletroacústico. Com índices de $\%AL_{cons}$ inferiores a 10% a inteligibilidade é muito boa, entre 10 e 15% boa e 15% é o limite máximo para projetos (CYSNE, 1991).

$$\%AL_{cons} = \frac{200D^2(RT60)N}{VQM}$$

Onde:

D é a distância entre o projetor e o último ouvinte;

N é a relação da potência produzida pelo projetor e a potência irradiada pelo projetor;

V é o volume do ambiente;

Q é a relação de diretividade do projetor de som;

M é a relação do coeficiente médio de absorção do ambiente e do coeficiente sobre o qual o som incide.

Neste projeto a distância do ouvinte mais afastado do projetor de som é de 23 metros, então:

$$Q_{min} = \frac{13,33D^2(RT60)^2}{V}$$

$$Q_{min} = \frac{13,33(23)^2(3,67)^2}{2160}$$

$$Q_{\min} = 43,67$$

O nível de ruído ambiente foi levantado através de medições no ambiente a ser sonorizado em vários horários e dias e adotou-se o maior nível detectado pelo analisador de áudio que é de 67 dB.

O nível de pressão sonora do programa a ser reproduzido pelo sistema eletroacústico deve estar 25 dB acima do ruído ambiente (CYSNE, 1991), portanto o sistema deverá entregar para o ouvinte mais distante 92 dB.

O primeiro ouvinte está a 3 metros da caixa acústica e o último a 23 metros (De). O modelo de caixa a ser utilizado será um arranjo em linha e que este tipo de caixa projeta o som de forma que temos uma queda de 3 dB a cada dobro da distancia, e que devemos ter uma pressão sonora de 92 dB (SPLrec) no último ouvinte, para manter a relação sinal/ruído de 25 dB, calculou-se o nível de pressão sonora (SPLmax) a ser produzida pela caixa:

$$SPL_{\max} = SPL_{\text{rec}} - 10 \log \frac{1}{De}$$

$$SPL_{\max} = 92 - 10 \log \frac{1}{23}$$

$$SPL_{\max} = 105,6 \text{ dB}$$

A caixa deverá produzir um nível de pressão sonora de 105,6 dB e a 3 metros, onde deverá estar o primeiro ouvinte teremos 100,9 dB. De acordo com a Tabela 2 uma pessoa só pode ficar exposta a estes níveis por 1 hora, problema este que deverá ser contornado com o posicionamento da caixa. O uso de uma única caixa seria a melhor solução, o seu posicionamento seria no teto de forma centralizada. Esta solução foi descartada por questões estéticas, restando a opção de fixar na parede, nas simulações no desenho uma única caixa não teria ângulo

suficiente para cobrir toda a área, por este motivo a área a ser coberta pelo sistema foi dividida em duas (Figura 21).

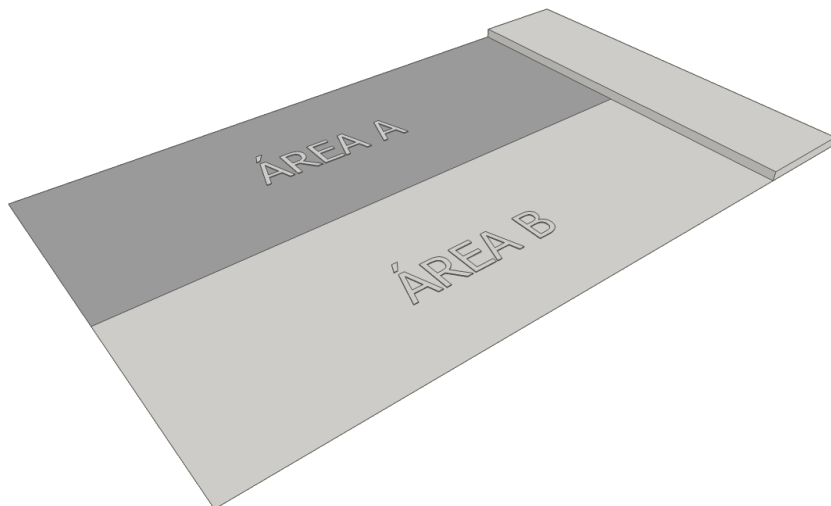


Figura 21 – Divisão da área a ser sonorizada.

Fonte: Autor.

4.3 Especificação da Caixa

As características do ambiente determinaram as características da caixa:

- Relação de diretividade, $Q_{\min} = 43,97$;

- Pressão sonora máxima, $SPL_{max} = 105,6$ dB.

A relação de diretividade aponta para uma caixa com ângulos máximos de cobertura de 10 e 110 graus calculados através do equacionamento (CYSNE, 1991):

$$Q = \frac{180}{\text{arcoseno}(\text{seno}(CH/2) \cdot \text{seno}(CV/2))}$$

Onde:

CH é ângulo de cobertura horizontal;

CV é o ângulo de cobertura vertical;

Q é o índice de diretividade.

4.4 Projeto da Caixa

Para determinar a quantidade de alto-falantes colocados em linha para atingir o ângulo de cobertura vertical de 10 graus fez-se um levantamento prático. Foi construído um gabinete com capacidade de acomodar 12 alto-falantes coaxiais de quatro polegadas.

Para estes testes foi utilizado o ruído rosa (*pink noise*), que é um sinal de teste sonoro caracterizado por manter a potência igual entre todas as oitavas, por esta razão decai numa razão de 3 dB por oitava. Este sinal foi aplicado na entrada do amplificador que alimentava a caixa acústica em teste.

Na medida em que foi instalado mais um alto-falante no gabinete, o sistema foi excitado com ruído rosa e medido o nível de pressão sonora com o analisador de áudio em campo aberto no eixo vertical e efetuado o registro do ângulo quando o nível estivesse a -6 dB. A Tabela 6 mostra o número de alto-falantes e os ângulos registrados.

A quantidade de alto-falantes que atende ao ângulo vertical determinado no item 4.3 (Especificação da Caixa) é de 8 alto-falantes. No arranjo em linha o ângulo de cobertura horizontal não é alterado e foi levantado seguindo o mesmo procedimento do levantamento vertical, apresentando um ângulo de 100 graus.

Tabela 6 – Relação do número de projetores e ângulo vertical.

Fonte: Autor.

Nº Alto-falantes	Ângulo Vertical
1	100°
2	80°
3	60°
4	55°
5	45°
6	40°
7	25°
8	10°
9	7,5°
10	5°
11	2,5°
12	0°

4.4.1 Escolha do Alto-falante

Entre as opções comerciais e de baixo custo para o alto-falante, optou-se por um modelo de quatro polegadas coaxial. Mas antes de concluir esta escolha se fez necessária a

verificação da sensibilidade e potência para atender a especificação de produzir com oito alto-falantes em um gabinete a pressão sonora de 105,6 dB. De acordo com o fabricante a sensibilidade, o quanto de pressão sonora é produzida com 1 watt a 1 metro de distância em ambiente anecóico, é de 87 dB/W/m e a potência máxima admitida pelo componente é de 50 W. No gabinete foram acomodados oito alto-falantes, sendo ligados em dois grupos de quatro unidades em série e estes em paralelo, conforme Figura 22.

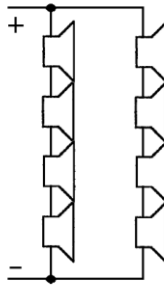


Figura 22 – Ligação dos alto-falantes.

Fonte: Autor.

Para cada alto-falante montado em série diminui-se 3 dB da sensibilidade por causa do aumento da impedância, mas também há um ganho de 3 dB por acoplamento acústico, permanecendo a mesma sensibilidade de um único alto-falantes. Para cada alto-falante acrescentado em paralelo soma-se 3 dB por conta da diminuição da impedância e mais 3 dB pelo acoplamento acústico, totalizando 6 dB no aumento da sensibilidade da caixa acústica em relação a uma única peça (DICKASON, 1991). Para o nosso caso cada conjunto de quatro unidades temos uma sensibilidade de 87 dB e para o sistema, 93 dB e potência de 400 W. Com estes dados podemos calcular o

nível de pressão sonora máxima que a caixa é capaz de produzir:

$$SPL_{max} = \log(\text{Potência}) \cdot 10 + \text{Sensibilidade}$$

$$SPL_{max} = \log(400) \cdot 10 + 93$$

$$SPL_{max} = 119\text{dB}$$

O nível de pressão sonora máxima produzida pelo conjunto de alto-falantes atende as necessidades do projeto, no item 4.3 (Especificação da Caixa), com uma folga maior que 13 dB, caso esta caixa acústica seja excitada por um amplificador de 400 W.

4.4.2 Desenho mecânico

O desenho mecânico da caixa acústica depende dos parâmetros de Thiele-Small fornecidos pelo fabricante. Estes dados são aplicados na equação:

$$V_{caixa} = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}^2}{Q_{ts}^2}\right) - 1}$$

Onde:

V_{as} é o volume equivalente do alto-falante;

Q_{tc} fator de qualidade total do sistema caixa fechada;

Q_{ts} fator de qualidade total.

Desta forma calcula-se o volume interno do gabinete ideal para que o alto-falante tenha uma resposta plana, cabendo ao projetista seguir ou não esta orientação do cálculo. Muitas vezes,

na prática, usa-se um volume menor e corrige-se a resposta de frequência com o uso de um equalizador gráfico.

A Figura 23 mostra um gráfico com a resposta em frequência do alto-falante escolhido.

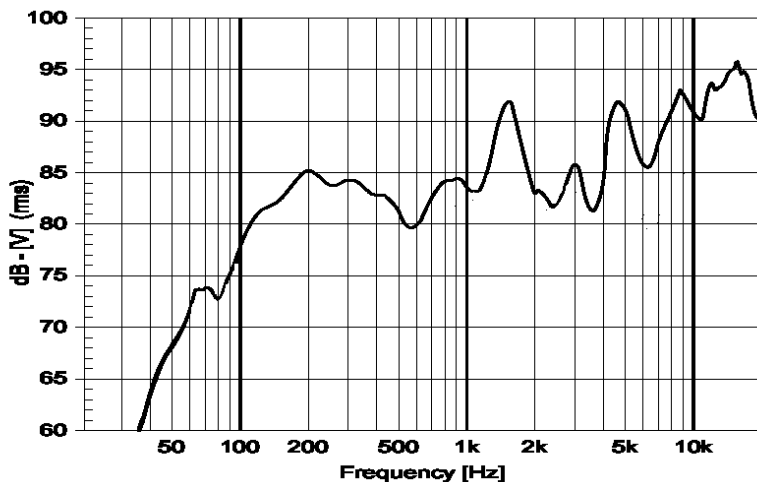


Figura 23 – Resposta em frequência do alto-falante selecionado.

Fonte: <http://www.selenium.com.br>.

O cálculo para caixa de som do tipo fechada permite escolher um dos parâmetros que modifica a resposta do alto-falante abaixo de 100 Hz. Conforme mostra a Figura 24, escolheu-se o valor de Q_{tc} de 1,5, para compensar a resposta em frequência abaixo de 200 Hz, aplicando na equação:

$$V_{caixa} = \frac{2,74}{\left(\frac{2,25^2}{0,64^2}\right) - 1}$$

$$V_{caixa} = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Qtc^2}{Qtc^2} - 1\right)}$$

$$V_{caixa} = 0,78 \text{ litros}$$

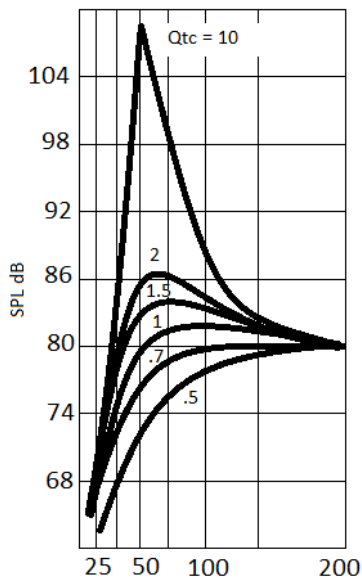


Figura 24 – Resposta em frequência caixa fechada x

Fonte: DICKASON, 1991.

Este volume é para cada alto-falante, o volume final da caixa é multiplicado por oito, ficando em 6,24 litros. O formato escolhido foi o trapezoidal, com o ângulo de 15 graus, para que a caixa pudesse ser fixada diretamente na parede sem o uso de suportes para ajuste de posição.

Para acomodar os oitos alto-falantes em linha a caixa foi confeccionada em compensado naval de 10 mm de espessura, com 98 cm de altura e 14 de largura, com a base em formato de trapézio e profundidade de 8,9 cm. Para o acabamento foi aplicado um esmalte sintético na cor da parede. A Figura 25 mostra a caixa finalizada.



Figura 25 - Caixa proposta finalizada e instal

Fonte: Autor.

4.5 Resultados

A aferição dos resultados, e todas as medições prévias, foram realizadas com o uso de um analisador de áudio digital (Figura 26). Este equipamento incorpora as funções de analisador de espectro de áudio, decibelímetro com curvas de ponderação A, B e C e medidor de tempo de reverberação (RT_{60}).



Figura 26 – Analisador de áudio PAA3.

Fonte: <http://www.phonic.com>.

4.5.1 Testes de campo

Antes de instalar as caixas acústicas, testes foram realizados com o objetivo de aferir as características exigidas pelo projeto, ângulos de cobertura, níveis de pressão sonora e

resposta em frequência. Com o uso do analisador de áudio e um suporte para fixação da caixa instalada ao ar livre, em campo aberto, sem nenhum obstáculo que pudesse refletir as ondas sonoras, as medidas foram efetuadas. O amplificador utilizado para os testes foi um modelo que fornece, de acordo com o manual, 380 W para uma carga de 8 Ohms, excitado por um ruído rosa gerado pelo próprio analisador de áudio. A primeira medida efetuada foi o SPL_{max} gerado pela caixa: 110 dB. Este valor chamou a atenção por ser o dobro do que se havia calculado, 107 dB, visto que o acréscimo de 3 dB equivale ao dobro da pressão sonora, mesmo aplicando uma potência menor. Na tentativa de descobrir o que causou a diferença, analisou-se a folha de dados (Anexo I) do alto-falante e chegou-se a conclusão de que a sensibilidade declarada é a média da resposta em frequência e ao medir, o instrumento mostra o somatório de todas as frequências. Nesta mesma estrutura foram medidos os ângulos de cobertura e considerados os limites com a queda de 6 dB no decibelímetro, apresentando 100° de cobertura horizontal e 10° de cobertura vertical. Estes resultados

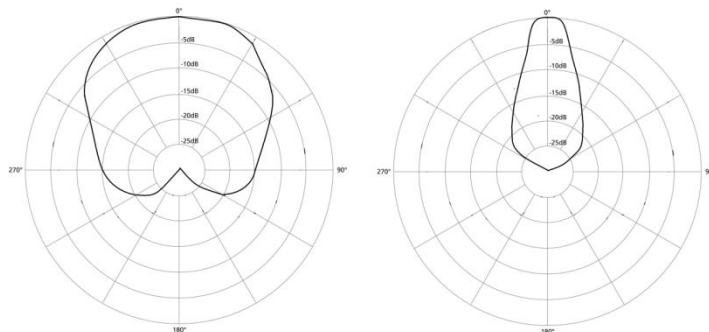


Figura 27 – Diagrama polar horizontal e vertical.

Fonte: Autor.

foram registrados em um digrama polar vertical e outro horizontal (Figura 27).

Os diagramas polares mostram a cobertura horizontal e vertical da caixa acústica e representam graficamente os níveis de pressão sonora em relação ao eixo central frontal da caixa.

A resposta em frequência ficou similar à mostrada na folha de dados do alto-falante. Mesmo utilizando um valor de Q_{tc} no dimensionamento da caixa, que visa um aumentando na resposta em frequências abaixo de 200 Hz, não foi suficiente para compensar a baixa eficiência do alto-falante nesta região. A resposta da caixa é mostrada na Figura 28.

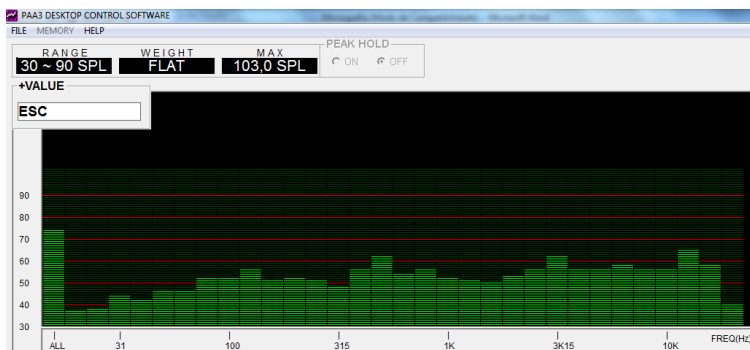


Figura 28 – Resposta em frequência em campo aberto.

Fonte: Autor.

4.5.2 Testes no Ambiente

A instalação das caixas acústicas no ambiente seguiu o posicionamento utilizado para os cálculos conforme a Figura 29, neste ponto foi analisada a altura da caixa, que ficará a 2 metros do chão (Figura 30), para que o primeiro ouvinte ficasse exposto a um nível de pressão sonora adequado para um programa de

duas horas, de acordo com a Tabela 2, este nível não deve ser superior a 95 dB.

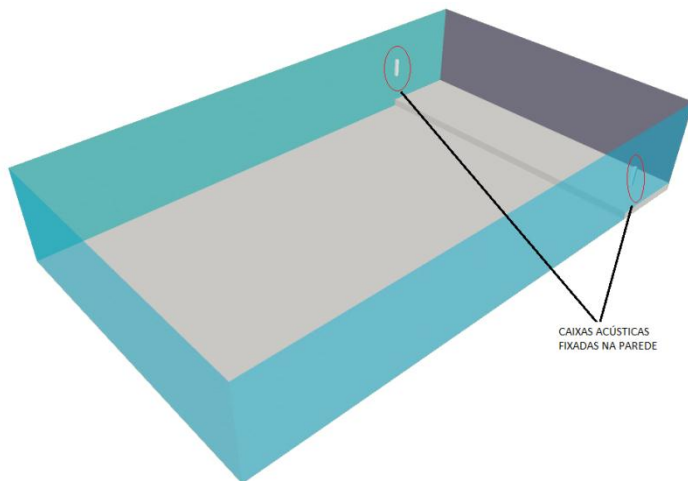


Figura 29 – Posicionamento das caixas.

Fonte: Autor.

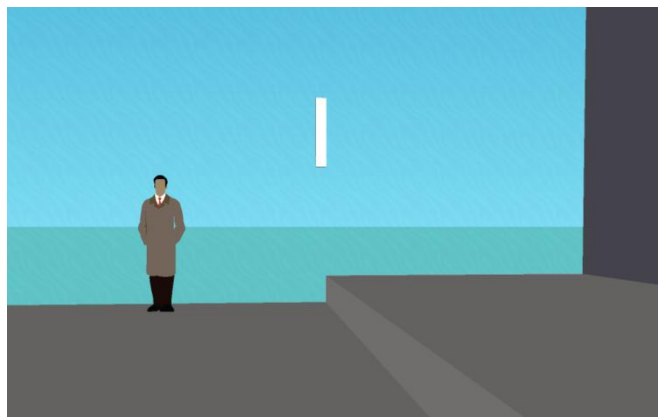


Figura 30 – Posição da caixa em relação ao piso e o primeiro ouvinte.

Fonte: Autor.

O diagrama polar vertical mostra que no limite de 10° temos uma queda de 6 dB; o primeiro ouvinte está a 3 metros, soma-se uma queda de 4,7 dB, considerando que o sistema deve operar com 105,6 dB e com as atenuações previstas, resulta em 94,9 dB. Também foi medida a resposta em frequência do sistema instalado, em diversos pontos no ambiente e feita uma média utilizando uma função disponibilizada no analisador (Figura 26). Este equipamento também mostra os ajustes que deverão ser feitos no equalizador para corrigir a curva de resposta do sistema instalado, como mostra a Figura 31.

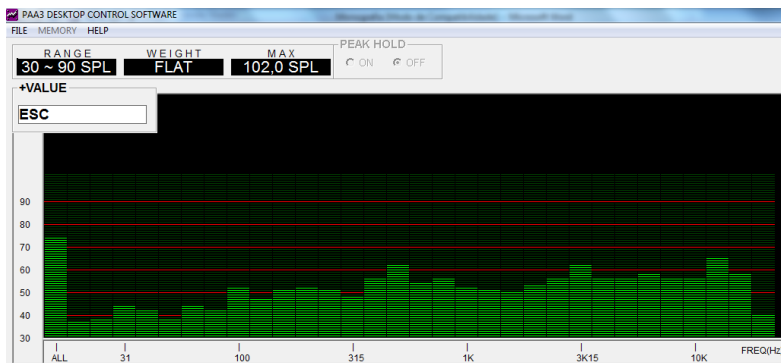


Figura 31 - Resposta média em frequência no ambiente

Fonte: Autor.

Para esta finalidade foi instalado no sistema um equalizador gráfico de 15 bandas (Figura 32). Ao analisar a resposta do sistema (Figura 31) pode-se observar uma deficiência na resposta entre 80 e 250 Hz. Mesmo que o equalizador permita ajuste de ganho, esta ação não é recomendada, tendo em vista que ao reforçar frequências que o sistema não responde provocam-se saturações e distorções nas caixas acústicas (PARK, 2006).



Figura 32 – Equalizador Gráfico de 15 bandas.

Fonte: <http://www.oneal.com.br>.

A curva de resposta do sistema em campo aberto mostrou uma baixa resposta abaixo de 200 Hz e soma-se o fato de que as frequências abaixo de 300 Hz não são direcionais, mesmo num sistema de arranjo em linha. A solução para o problema foi a inclusão de uma caixa acústica com resposta de 50 a 300 Hz, modelo *bandpass*, desenvolvida pela empresa Selenium, um fabricante nacional de alto-falantes, disponibilizado no site do fabricante. Esta caixa foi instalada abaixo da caixa de arranjo em linha. Com esta alteração, o sistema passou a ter uma resposta em frequência plana.

A recomendação de curvas de respostas varia de acordo com o programa a ser reproduzido (BALLOU, 1988). Foram experimentadas duas curvas de respostas, a indicada para cinema e a curva recomendada para show musical. Um grupo de 12 pessoas entre músicos e leitores foi convidado para testar o sistema. O sistema foi ajustado para responder à curva indicada para salas de cinema, foi executada uma música e feita a leitura de um texto. Em seguida foi efetuado o ajuste para atender a curva recomendada para show musical e executados os mesmo programas. Os convidados foram questionados sobre qual dos ajustes eles gostariam que fosse aplicado ao sistema. Os palestrantes optaram pelo ajuste para show e os músicos, o ajuste de cinema. Também foram questionados sobre qual dos ajustes não queriam que fosse aplicado, os palestrantes

indicaram o cinema e os músicos acharam que os dois poderiam ser aplicados. Assim, o ajuste efetuado foi o mostrado na Figura 33, é plana de 100 Hz a 8 kHz, tem uma queda de 6 dB por oitava de 8 kHz até 20 kHz e uma queda de 3 dB de 100 Hz até 20 Hz. A resposta em frequência média do sistema no ambiente é apresentada na Figura 34.

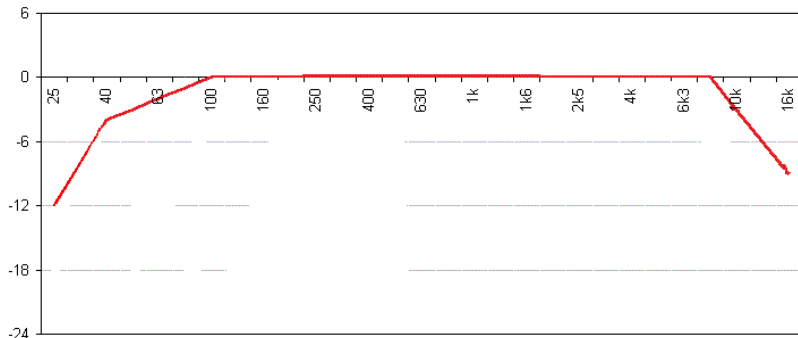


Figura 33 – Curva de resposta recomendada.

Fonte: BALLOU, 1988.

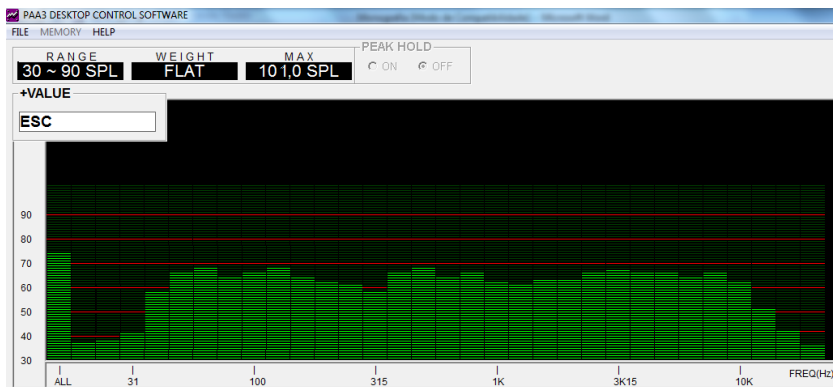


Figura 34 – Resposta do sistema após ajustes no equalizador.

Fonte: Autor.

4.6 Recomendações Futuras

O desenvolvimento de um produto não está finalizado na sua primeira versão, e deverá evoluir até que atenda todas as expectativas do usuário. O produto se tornou bastante competitivo por causa do seu custo, que poderá ser reduzido se este for produzido em série. A sensibilidade do sistema, o quanto de pressão sonora ele produz com um 1 watt de potência, precisa ser melhorada. Esta sensibilidade está diretamente ligada ao modelo do alto-falante utilizado no projeto. O desafio é encontrar um alto-falante que reproduza uma faixa de áudio de 150 Hz a 12 kHz com variações de no máximo 3 dB. As dimensões deverão ficar entre 2 e 4 polegadas, para que o acoplamento das altas frequência seja o mais otimizado possível. O componente deverá ter uma potência admissível de pelo menos 30 watts e com sensibilidade entre 89 e 95 dB. Até a conclusão deste trabalho não estava disponível para compra nenhum produto que atendesse estes requisitos. A recomendação é buscar este componente junto a um fabricante de alto-falantes com as características citadas ou desenvolver o modelo em parceria.

5 Considerações Finais

A realização deste trabalho só foi possível por causa da parceria com a Igreja Santa Terezinha do Menino Jesus, de Nova Brasília, no município de Imituba. Esta parceria custeou todo o custo de fabricação das caixas e também a aquisição dos amplificadores, equalizador, mesa de som, microfones e cabos, necessários para a operação do sistema. O projeto teve início no final de julho e foi concluído em meados de setembro de 2010, no período de reforma do prédio. O produto se destacou junto à comunidade pelas pequenas dimensões e por ter uma aparência discreta, além de serem somente duas unidades fixadas na

parede cobrindo uma área de 432 metros quadrados. O fato de serem feitas artesanalmente permitiu produzi-las da cor da parede, ficando em harmonia estética com o ambiente (Figura 35). Mas o destaque principal ficou com a satisfação dos usuários, que tinham como referência um sistema de baixa inteligibilidade, devido à reverberação do som no ambiente e uma resposta em frequência que não cobria toda a faixa de áudio. O fato de o som não ser propagado para o teto e nem para as partes altas das paredes diminuiu consideravelmente a reverberação, ficando em torno de 1,8 segundos, o que aumenta a inteligibilidade. O sistema também mostrou eficiência no que se refere à cobertura sônica: é imperceptível a variação do volume sonoro ao se deslocar no ambiente. O nível de pressão sonora apontado pelo projeto não foi aplicado, tendo em vista que os usuários o consideraram alto ficando este na pior situação em 87 dB, abaixo dos 92 dB sugeridos.



Figura 35 - Sistema de som instalado.

Fonte: Autor.

6 REFERÊNCIAS

BALLOU, Glen. Handbook for Sound Engineers. 1^a Ed. United States: Howard W. Sans & Company, 1988. 1247 p.

CYSNE, Luís Fernando O. **Áudio, Engenharia E Sistemas**. 2^a Ed. Rio de Janeiro: H. Sheldon, 1991. 219 p.

DICKASON, Vance. **The Loudspeaker Design Cookbook**. 4^a Ed. United States: Audio Amateur Publications, 1991. 148 p.

MACHADO, Renato Muchon. **Som Ao Vivo Conceitos E Aplicações Básicas Em Sonorização**. 2^a Ed. Rio de Janeiro: H. Sheldon, 2001. 171 p.

UREDA, Mark S. **Line Arrays: Theory and Applications**. Presented on

the 110th AES convention, The Netherlands, Amsterdam, MAIO, 2001.

PARK, Lonnie. Tradução: SILVA, Homero Sette. **Sistemas De Som Para Igrejas**. 1^a Ed. Rio de Janeiro: H. Sheldon, 2006. 84 p.

EVEREST, F. Alton. POHLMANN, Ken C. **Master Handbook of Acoustics**. 5^a Ed. United States: McGraw Hill Professional, 2001. 510 p.

ACIOLI, J.L. **Física básica para arquitetura: mecânica, transmissão de calor e acústica.** Brasília: Universidade de Brasília, 1994, 330 p.

MILLER, Harry Bernard. **Acoustical Measurements: Methods And Instrumentation.** 1ª Ed. Stroudsburg, PA, US: Hutchinson Ross Pub, 1982, 407 p.

VASCONCELOS, Ricardo de Salvo. MAIRINK, Marcelus Tadeu Ferreira. OLIVEIRA, Ethel Caires de. TEODORO, Elias Bitencourt. **Construção De Um Tubo De Impedância.** Artigo apresentado 15º POSMEC. FEMEC/UFU, Uberlândia-MG, 2005.