

Lucas Cavalcanti Lins Falcão

Relatório de Estágio Integrado

Campina Grande, PB

2017

Lucas Cavalcanti Lins Falcão

Relatório de Estágio Integrado

Relatório acadêmico apresentado como nota final da disciplina de Estágio Obrigatório de Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Dr. José Ewerton Pombo de Farias

Campina Grande, PB

2017

Lucas Cavalcanti Lins Falcão

Relatório de Estágio Integrado/ Lucas Cavalcanti Lins Falcão. – Campina Grande, PB, 2017-
78 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. José Ewerton Pombo de Farias

Relatório de Estágio Curricular – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica, 2017.

1. Engenharia acústica. 2. Alto-falantes. 3. Amplificadores. 4. Som automotivo. I. Dr. José Ewerton Pombo de Farias. II. Universidade Federal de Campina Grande. III. Engenharia Elétrica. IV. Relatório de estágio integrado.

Lucas Cavalcanti Lins Falcão

Relatório de Estágio Integrado

Relatório acadêmico apresentado como nota final da disciplina de Estágio Obrigatório de Engenharia Elétrica.

Dr. José Ewerton Pombo de Farias
Orientador

Professor
Convidado 1

Campina Grande, PB
2017

Que este trabalho sirva de inspiração para todos que, assim como eu, decidiram por trilhar caminhos ainda tão pouco difundidos no Brasil.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à toda a minha família pelo apoio e pelo papel fundamental na construção da minha personalidade e caráter.

Muito obrigado à universidade por todo conhecimento adquirido. Em especial ao professor José Ewerton por todo apoio e orientação durante este processo de busca por conhecimento.

Aos amigos do peito, muito obrigado por existirem. Nada disso seria possível sem o apoio emocional de vocês.

Também muito obrigado aos amigos recentemente adquiridos na Frahm. Em especial os amigos Maichel, Wellington, Robson e Flávio por todo material que me foi disponibilizado e por todo o carinho durante estes dias. Felipe, Janir, Rômulo, Tiago e Leonardo, muito obrigado por todo o acolhimento. Sempre me lembrarei de todo o carinho de vocês.

*"A lei de ouro do comportamento é a tolerância mútua,
já que nunca pensaremos todos da mesma maneira,
já que nunca veremos senão uma parte da verdade e sob ângulos diversos"*
(Mahatma Gandhi)

Resumo

Alto-falantes desempenham um papel importante atualmente no mundo do entretenimento, visto que o interesse em música cresce a cada dia e, conseqüentemente, o interesse em sistemas de reprodução de áudio de qualidade. Frahm e Hinor são duas marcas da NH indústria e comércio ltda. que tem uma participação importante na entrega de equipamentos de reprodução de áudio de qualidade ao mercado brasileiro.

Neste trabalho pode-se encontrar o detalhamento das atividades desenvolvidas pelo aluno Lucas Cavalcanti Lins Falcão na empresa NH indústria e comércio ltda entre 18/11/2016 até 03/04/2017. Estas atividades estão relacionadas com as áreas de eletroacústica e engenharia de produtos, visto que a empresa é uma indústria de alto-falantes localizada em Rio do Sul, Santa Catarina.

Também pode ser visto o passo-a-passo de várias atividades desenvolvidas conjuntamente com outros engenheiros como: desenvolvimento de novos produtos, teste de produtos e várias outras atividades. Este trabalho é o resultado de um estágio de 4 meses trabalhando como um engenheiro de desenvolvimento de produtos e desenvolvendo alto-falantes, sistemas de som e caixas amplificadas.

Palavras-chave: alto-falantes. engenharia de produtos. caixas amplificadas. amplificadores de áudio. eletroacústica.

Abstract

Loudspeakers play an important role in the world of entertainment. People are expanding their interest on music and, consequently, their interest in quality sound reproduction systems. Frahm and Hinor are two brands from NH indústria e comércio ltda. that have an important participation on providing quality sound reproduction products to the brazilian market.

This technical report presents the activities carried out by Lucas Cavalcanti Lins Falcão during his internship program at NH Indústria e Comércio Ltda in Rio do Sul, Santa Catarina, Brazil, from 11/18/2016 to 04/03/2017. These activities are related to electroacoustics and product engineering fields, as the company is a loudspeaker industry.

It can also be seen the step-by-step of some works developed along with other engineers as, for example: development of new products, product testing and many others. This work is a result of a 4 months internship working as a product engineer designing loudspeaker, sound systems and speaker boxes.

Keywords: loudspeakers. product engineering. speaker boxes. audio amplifiers. electroacoustics.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Secção transversal de um alto-falante e suas partes (DICKASON, 2005).	29
Figura 2 – Gráfico da influência da razão entre o tamanho do gap e o $X_{máx}$ (DICKASON, 2005).	31
Figura 3 – Ilustração dos modos em um cone de um alto-falante com formato cônico (DICKASON, 2005).	32
Figura 4 – Representação de um alto-falante a partir de um circuito elétrico equivalente (BERANEK; MELLOW, 2012).	35
Figura 5 – Eficiência de um alto-falante, projetado para frequências médio-baixas, em função da frequência (DAVIS; PATRONIS, 2014).	36
Figura 6 – Respostas em frequência medidas em câmara anecóica e sala de audição (GABRIELSSON; LINDSTRÖM; TILL, 1991).	39
Figura 7 – Comportamento da resposta em frequência em função do valor de Q_{TC} (BERANEK; MELLOW, 2012).	41
Figura 8 – Exemplo de montagem de uma caixa passa-faixa (DAVIS; PATRONIS, 2014).	43
Figura 9 – Resposta em frequência de um projeto de caixa passa-faixa (DICKASON, 2005).	44
Figura 10 – Caixa <i>bookshelf</i> desenvolvida para ambientes domésticos utilizando alto-falante de 5 polegadas e <i>tweeter</i> com domo de seda.	47
Figura 11 – Resposta em frequência, extraída com o CLIO, do <i>tweeter</i> HST 600 (amarelo) e o <i>tweeter</i> modificado com um conjunto magnético maior (vermelho).	48
Figura 12 – Imagem do <i>tweeter</i> HST 600 ganhador de diversos prêmios nacionais na categoria super <i>tweeter</i> .	49
Figura 13 – Ligação de um capacitor em série com um <i>tweeter</i> para filtrar as baixas frequências.	50
Figura 14 – Amplificador automotivo utilizado na montagem da caixa amplificada Box Trio APP.	50
Figura 15 – Diagrama de montagem da caixa amplificada Box Trio APP.	51
Figura 16 – Separação entre as câmaras dos <i>subwoofers</i> na caixa amplificada Box Trio APP.	51
Figura 17 – Simulação do alto-falante 12 EVO 300 na caixa amplificada Box Trio APP.	52
Figura 18 – Receptor bluetooth e rádio AM/FM, Smart Player APP, utilizado para reproduzir mídia no sistema automotivo.	58

Figura 19 – Sistema de som automotivo 4 vias montado para a feira anual de representantes.	58
Figura 20 – Amplificadores e fontes utilizadas na montagem do sistema de som automotivo 4 vias.	59
Figura 21 – Simulação do projeto da caixa do alto-falante 18 SW 3K.	59
Figura 22 – Simulação do projeto da caixa do alto-falante 12 SW 3K.	59
Figura 23 – Diagrama de montagem do sistema de som automotivo para caminhonetes.	60
Figura 24 – Painel utilizado nos testes de amplificadores automotivos.	61
Figura 25 – Alto-falante utilizado nos testes de amplificadores automotivos.	62
Figura 26 – Visão das arandelas instaladas no teto do teste de vida para realizar testes com os amplificadores residenciais e com os transformadores.	62
Figura 27 – Visão dos amplificadores utilizados para testar os alto-falantes no teste de vida do setor de engenharia.	63
Figura 28 – Sistema de informação do rendimento da célula de produção.	75
Figura 29 – Teste de alto-falante utilizando o sistema CLIO.	75
Figura 30 – Parte do processo de fabricação de carcaça de alto-falantes.	76
Figura 31 – Parte do processo de fabricação de bobinas para alto-falantes.	76
Figura 32 – Parte do processo de fabricação de materiais plásticos.	77
Figura 33 – Processo de colagem do cone do alto-falante na bobina.	77

Lista de tabelas

Tabela 1 – Relação entre Q_{TC} e frequência de corte em uma caixa selada (BERANEK; MELLOW, 2012).	41
Tabela 2 – Tabela para cálculo de parâmetros em uma caixa com duto (BERANEK; MELLOW, 2012).	42
Tabela 3 – Tabela dos parâmetros Thiele-Small dos dois alto-falantes utilizados no sistema de som automotivo.	50
Tabela 4 – Tabela dos parâmetros Thiele-Small dos dois alto-falantes utilizados no sistema de som automotivo.	58

Lista de abreviaturas e siglas

Pa	Pascal
RMS	Raiz do valor quadrático médio (Root Mean Square)
dB	Decibel
SPL	Nível de Pressão Sonora

Lista de símbolos

f	Frequência
ω	Frequência angular
λ	Comprimento de onda
c	Velocidade do Som
T	Período
a	Raio do cone do alto-falante em m
S	Área em m^2
S_D	Área do cone do alto-falante em m^2
V	Volume em m^3
ρ_0	Densidade do ar em kg/m^3
γ	Razão entre os calores específicos molar a pressão constante e a volume constante (1,4 para compressões adiabáticas)
B	Densidade de fluxo do campo magnético no gap em T (Tesla)
$X_{m\acute{a}x}$	Deslocamento máximo do alto-falante em mm
M_{MS}	Massa do conjunto móvel, sistema de suspensão e do ar deslocado pelo alto-falante em kg
M_{MD}	Massa do diafragma e do fio da bobina em kg
C_{MS}	Conformidade mecânica total em m/N
L_E	Indutância da bobina do alto-falante em H (Henry)
L_p	Nível de pressão sonora em dB
R_E	Resistência elétrica da bobina do alto-falante em Ω (Ohms)
R_g	Resistência elétrica interna do gerador (amplificador de áudio) em Ω (Ohms)
R_{MS}	Resistência mecânica do sistema de suspensão em Ns/m
G_{MS}	Condutância mecânica do sistema de suspensão em $(Ns/m)^{-1}$

Q_{MS}	Coefficiente de controle do sistema de suspensão
Q_{ES}	Coefficiente de controle da bobina de Ímã
Q_{TS}	Coefficiente de controle total do alto-falante
V_{AS}	Volume de ar que, quando comprimido a um metro cúbico, exerce a mesma força que C_{MS} em m^3
V_A	Volume interno do ar na caixa acústica em m^3
V_M	Volume total de espuma utilizada na caixa acústica em m^3
V_P	Volume do duto em uma caixa acústica em m^3
W	Potência acústica em watts
W_E	Potência elétrica fornecida pelo gerador em watts
E_{ff}	Eficiência do alto-falante
$e_{g(rms)}$	Tensão RMS fornecida pelo gerador em volts
I	Intensidade Sonora
f_s	Frequência de ressonância do alto-falante em Hz
f_C	Frequência de ressonância da caixa acústica em Hz
f_0	Frequência de corte inferior do alto-alante em Hz
T_{60}	Tempo de reverberação
t	Comprimento do duto de caixas acústicas em m
S_P	Área transversal do duto de caixas acústicas m^2
\bar{A}	Quantidade de área absorvente em Sabins
a_E	Coefficiente de absorção de uma dada superfície

Sumário

	Introdução	25
0.1	Objetivos	25
0.1.1	Objetivos gerais	25
0.1.2	Objetivos específicos	25
I	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
1	ALTO-FALANTES E CAIXAS ACÚSTICAS	29
1.1	Principais partes de um alto-falante	29
1.1.1	Conjunto Magnético	30
1.1.2	Diafragma	30
1.1.3	Sistema de suspensão	32
1.2	Circuito equivalente	33
1.3	Parâmetros	34
1.3.1	Parâmetros Thiele-Small	34
1.3.2	Eficiência	36
1.3.3	Sensibilidade	37
1.4	CLIO	37
1.5	Resposta acústica	38
1.6	Caixa acústica	40
1.6.1	Caixa selada	40
1.6.2	Caixa com duto (Bass-reflex)	42
1.6.3	Caixas passa-faixa (Band-pass)	43
II	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS PELO ESTAGIÁRIO	45
2	TESTE E DESENVOLVIMENTO DE ALTO-FALANTES E CAIXAS ACÚSTICAS	47
3	TESTE DE AUDIÇÃO	53
4	MONTAGEM DE SISTEMA DE SOM AUTOMOTIVO	57
5	INSTALAÇÃO DO TESTE DE VIDA PARA AMPLIFICADORES E ALTO-FALANTES	61

III	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	69
	ANEXOS	71
	ANEXO A – A EMPRESA	73
A.1	História	73
A.2	A Frahm	73
A.3	A Hinor	74
A.4	Processo produtivo	74
A.5	Teste de vida	78

Introdução

Este relatório é referente ao estágio integrado desenvolvido pelo aluno da graduação em engenharia elétrica Lucas Cavalcanti Lins Falcão na empresa NH indústria e comércio Ltda. A empresa é uma indústria de alto-falantes, caixas amplificadas, arandelas, amplificadores de áudio e outros produtos relacionados. Através de duas marcas, Frahm e Hinor, a NH indústria e comércio Ltda. atua nos ramos de caixas acústicas e amplificadores e soluções automotivas (alto-falantes, alarmes, amplificadores automotivos e etc).

O estágio foi todo desenvolvido na cidade de Rio do Sul, SC. Nessa cidade ficam situadas a sede da empresa e fábrica das marcas Frahm e Hinor, pertencentes à NH indústria e comércio Ltda. O principal ponto de execução das atividades foi no setor de engenharia da empresa. Lá, juntamente com 5 engenheiros, 2 técnicos e 2 desenhistas, foram desenvolvidas todas as atividades aqui descritas.

Durante o estágio foram desenvolvidos trabalhos de caráter técnico em projetos de alto-falantes e em projetos de caixas amplificadas e amplificadores. Dentre as atividades ali realizadas pode-se destacar:

- Montagem, extração de parâmetros e teste de alto-falantes;
- Testes de audição;
- Montagem de caixas amplificadas;
- Instalação de uma nova sala para testes de vida;
- Teste de novos produtos.

0.1 Objetivos

0.1.1 Objetivos gerais

Conhecer o processo produtivo da empresa, se familiarizar com o sistema de gestão adotado, adquirir conhecimento técnico acerca dos produtos e ajudar no projeto e teste de produtos.

0.1.2 Objetivos específicos

- Consolidar conhecimentos em projetos de alto-falantes e caixas acústicas;
- Adquirir conhecimentos em amplificadores de áudio;

- Conhecer a metodologia de gerenciamento de projetos da empresa.

Parte I

Fundamentação teórica

1 Alto-falantes e caixas acústicas

1.1 Principais partes de um alto-falante

O alto-falante é um transdutor que converte tensão variável em variação de pressão através do movimento de uma membrana. Essa membrana, tipicamente referenciada como cone do alto-falante, está ligada a um corpo com um fio de cobre enrolado, bobina, que está permanentemente mergulhado em um campo magnético constante produzido pelo conjunto magnético do alto-falante, composto de arruelas, pólo e material magnético como pode ser visto na figura 1.

Para que todo o sistema mova-se em harmonia é utilizada uma centragem entre a bobina e o cone que limita o deslocamento no horizontal permitindo que a bobina mova-se apenas no sentido vertical. Caso este movimento não fosse limitado, a bobina se movimentaria de forma desordenada acarretando em defeitos e distorção no som do alto-falante.

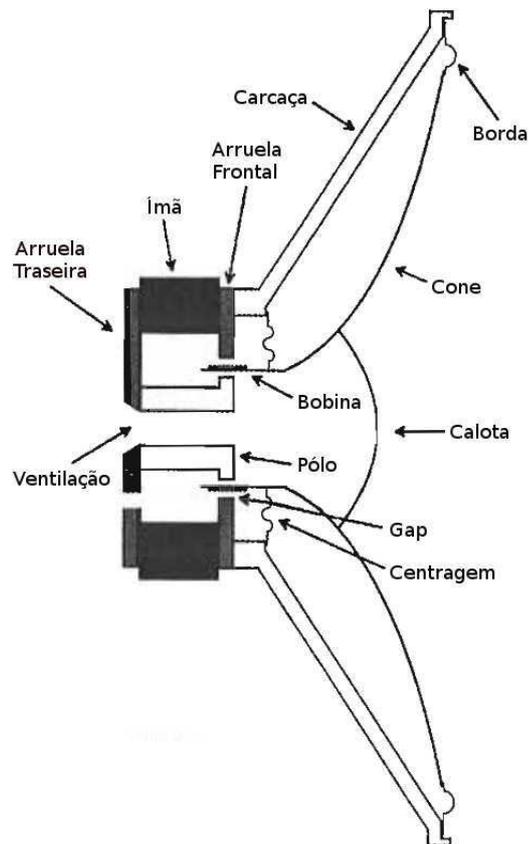


Figura 1 – Seção transversal de um alto-falante e suas partes (DICKASON, 2005).

1.1.1 Conjunto Magnético

O conjunto magnético de um alto-falante é composto de 5 partes: arruela superior, arruela inferior, pólo, material magnético e bobina. As arruelas superior e inferior e o pólo são compostos de um material com uma alta permeabilidade magnética para que eles possam prover um caminho de baixa resistência ao fluxo magnético produzido pelo ímã. O material magnético, ímã, é geralmente feito de ferrite e utilizado em forma de anel. Além disso, existe um espaço entre a arruela superior e o pólo por onde deve se dar o movimento da bobina do alto-falante. Este espaço é pequeno o suficiente para que seja permitido o movimento apenas da bobina e nele há uma intensa passagem de fluxo magnético.

Quando um sinal senoidal é aplicado nos terminais de um alto-falante, a corrente circulando na bobina durante o ciclo positivo da senóide levará o cone a movimentar-se em uma direção. Enquanto que a corrente circulando na bobina durante o ciclo negativo da senóide levará o alto-falante a se movimentar na direção oposta. Para que isto aconteça, é importante que o campo magnético na bobina seja o mais simétrico possível para que a mesma força seja aplicada nas duas direções. Se este cuidado não for tomado, o som sofrerá distorção.

Esta força que é desenvolvida sobre a bobina é representada pelo termo Bxl . Bxl é a força produzida pela passagem de corrente em um fio de comprimento l exposto a uma densidade de fluxo manético constante, B . Bxl é o parâmetro que representa a força produzida pelo "motor" do alto-falante e é dado por $T.m/N$.

Existem dois tipos de geometria do conjunto gap e enrolamento da bobina: bobina longa e bobina curta. Entre essas duas configurações, a mais utilizada em projetos de alto-falantes é a bobina longa devido à sua alta eficiência e boa linearidade.

Um parâmetro também importante no projeto de um alto-falante é o deslocamento máximo da bobina, $X_{m\acute{a}x}$. O $X_{m\acute{a}x}$ é dado pelo tamanho do enrolamento subtraído do tamanho do gap e dividido por 2. Quando a razão entre o tamanho do gap e o $X_{m\acute{a}x}$ é grande, a curva do Bxl em função do deslocamento da bobina tem um declive bem menos acentuado que no caso de uma razão pequena, como pode ser observado na figura 2. Mesmo com um declive pouco acentuado, a distorção que pode ser medida no som devido a uma excursão exagerada é bem pequena. A máxima excursão de um alto-falante deve ser aproximadamente igual ao $X_{m\acute{a}x} + 15\%$. Após esse limite, as harmônicas ímpares começam a aumentar e o som começa a apresentar distorções audíveis.

1.1.2 Diafragma

O diafragma de um alto-falante é denominado cone e é responsável por criar um gradiente de pressão na atmosfera por meio do movimento induzido pela bobina. O corte de frequência exibido pelo alto-falante é geralmente um resultado da influência do meio e

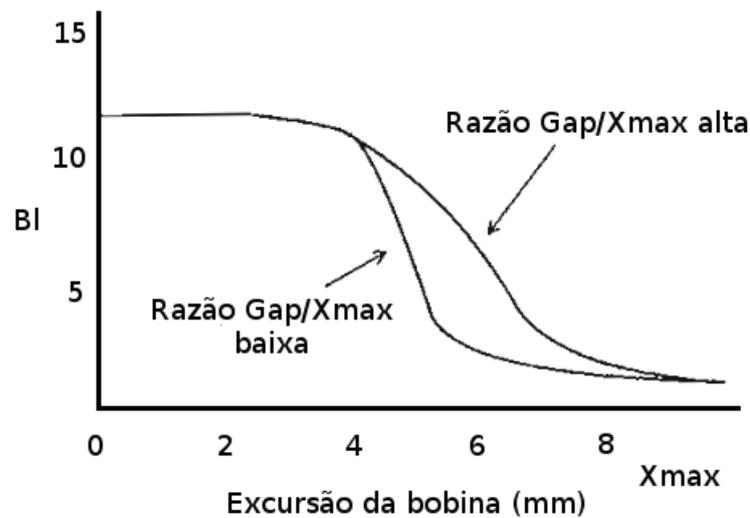


Figura 2 – Gráfico da influência da razão entre o tamanho do gap e o $X_{máx}$ (DICKASON, 2005).

do raio do cone. Cones que tem um raio menor, conseguem reproduzir frequências maiores que aqueles que possuem um raio maior.

Os cones não são estruturas rígidas e por isso apresentam um certo padrão de onda que se forma neles enquanto eles reproduzem som. Esse padrão é mais evidente em certas frequências que são denominadas de frequências de ressonância ou modos. Existem três tipos de modos: Radial, concêntrico e uma combinação de ambos. A diferença entre estes modos podem ser vistas na figura 3.

Os modos radiais estão mais presentes nas frequências mais baixas e se propagam ao longo da circunferência do cone. Os modos concêntricos são modos que se propagam como uma série de ondas do centro do cone até a borda. O padrão do modo se parece muito com as ondas formadas em um lago quando um objeto é jogado na sua superfície.

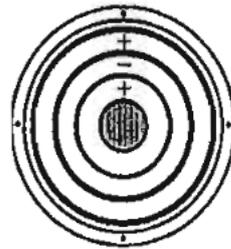
O número de ondas formadas nos modos é proporcional à frequência que está sendo reproduzida. Maiores frequências produzem um maior número de ondas no cone do alto-falante. Essas ondas podem vir a causar interferência por estar em contra-fase com o movimento do alto-falante e, por este motivo, precisa-se de uma atenção especial ao fabricar cones com tipos de materiais diferentes.

Em relação ao formato do cone, existem três tipos básicos: plano, cônico e convexo. Cones com formato cônico tendem a apresentar uma curva de resposta com um pico próximo à frequência de corte superior da curva de resposta do alto-falante. A localização desse pico é determinada com base na curvatura do cone.

Em comparação com os cones de formato cônico, os cones convexos tendem a ter uma resposta mais suave e uma largura de banda menor. Também apresentam um pico no fim da curva de resposta, mas com uma amplitude bem menor em comparação



Modos Radiais no cone



Modos concêntricos no cone

Combinação dos modos
concêntricos e radiais

Figura 3 – Ilustração dos modos em um cone de um alto-falante com formato cônico (DICKASON, 2005).

com o formato cônico. A resposta em frequência dos cones convexos pode ser alterada simplesmente alterando o raio de curvatura do cone.

Os cones com formato plano são os que possuem faixa de atuação mais ampla em comparação com os outros tipos de cones.

1.1.3 Sistema de suspensão

O sistema de suspensão, em qualquer alto-falante, é composto por duas partes: centragem e borda. Juntas, essas duas partes são responsáveis por manter a bobina centralizada dentro do gap e por amortecer o movimento do conjunto móvel.

A borda pode ser feita de espuma, borracha, tecido ou do mesmo material do cone. A escolha da espessura e do tipo de material da borda podem alterar drasticamente a resposta em frequência do alto-falante devido à sua influência na amplitude e fase dos

modos do cone. Pode-se dizer que a borda é responsável por 20% da compliância mecânica total do sistema. A centragem é responsável pelos 80% restantes (DICKASON, 2005). Comparando um alto-falante a um sistema massa-mola, a compliância do alto-falante pode ser vista como a capacidade de amortecimento da mola no sistema (BERANEK; MELLOW, 2012).

O material mais usado para a fabricação de bordas de alto-falantes é a espuma. No entanto, esse tipo de material tem uma tendência a se desgastar mais facilmente e não tem um desempenho tão bom quanto a borracha em relação ao amortecimento do cone. Quando utiliza-se borracha na fabricação da borda, a resposta em frequência do alto-falante apresenta uma curva mais suave para valores de frequência acima de 10 kHz (DICKASON, 2005).

A centragem é o segundo componente do sistema de suspensão e tem um papel fundamental na resposta do alto-falante. Além de manter a bobina centrada em relação ao pólo do conjunto magnético, ela é responsável pela maior parte da compliância do alto-falante. É também por meio da rigidez da centragem que a frequência de ressonância do alto-falante é determinada. A frequência de ressonância, f_S , é uma função da massa e da compliância do alto-falante

$$f_S = \frac{1}{6,28\sqrt{C_{MS}M_{MS}}} \quad [Hz] \quad (1.1)$$

sendo f_S é a frequência de ressonância do alto-falante ao ar livre, C_{MS} é a compliância total e M_{MS} é a soma das massas do conjunto móvel e do sistema de suspensão (cone, bobina, centragem, borda e a massa do ar que está sendo deslocado).

1.2 Circuito equivalente

A conversão de um sistema mecânico para um sistema elétrico é uma técnica muito utilizada em análise de sistemas. Esta analogia é feita substituindo cada massa do sistema mecânico por um capacitor no sistema elétrico, molas são substituídas por indutores e amortecedores são substituídos por resistores. A ligação entre os componentes no circuito elétrico é feita observando-se a relação entre os componentes no sistema mecânico.

Dessa forma, é possível também converter transdutores (com suas partes mecânicas e elétricas) para um circuito elétrico equivalente. Começamos admitindo que existe uma indutância e uma resistência elétrica associadas à bobina do alto-falante e denominadas L_E e R_E , respectivamente. O diafragma e o fio da bobina possuem uma massa total dada por M_{MD} . O diafragma, por sua vez, é montado em um sistema de suspensão no centro e em suas bordas. O efeito total desse sistema de suspensão é representado por uma compliância mecânica, C_{MS} , e uma resistência mecânica, $R_{MS} = 1/G_{MS}$, onde G_{MS} é a condutância mecânica (BERANEK; MELLOW, 2012).

Devido à força que o ar exerce sobre o alto-falante, podemos também associar uma impedância acústica, $Z_{AR} = 1/Y_{AR}$, à parte frontal e traseira do diafragma, onde Y_{AR} é a admitância acústica. Dessa forma, a admitância mecânica vista por cada lado do diafragma é dada por $Y_{MR} = S_D^2 Y_{AR}$, onde S_D é a área efetiva do diafragma (BERANEK; MELLOW, 2012).

Agora, é possível representar o alto-falante por meio de um circuito elétrico equivalente. A representação pode ser vista nas figuras 4a e b. Na figura 4, \tilde{e}_g é a tensão de circuito aberto do gerador (amplificador de áudio) em volts (V), R_g é a resistência interna do gerador em ohms (Ω), L_E é a indutância medida na bobina em henrys (H) com seu movimento bloqueado, R_E é a resistência elétrica DC em ohms (Ω), B é a densidade de fluxo em Tesla (T) do conjunto magnético, l é o comprimento total do fio na bobina em metros (m), \tilde{i} é a corrente elétrica em amperes (A) que passa pelo enrolamento da bobina, \tilde{f}_c é a força em Newtons (N) gerada pela interação da bobina com o campo magnético constante, $\tilde{f}_c = B\tilde{l}\tilde{i}$, e $\tilde{u}_c = \tilde{e}/Bl$ é a velocidade da bobina em m/s onde \tilde{e} é a força contra-eletromotriz gerada nos terminais da bobina. No lado direito do circuito equivalente, a é o raio do diafragma em metros (m), M_{MD} é a massa do diafragma e da bobina em kg, C_{MS} é a compliância mecânica total do sistema de suspensão em m/N , $G_{MS} = 1/R_{MS}$ é a condutância mecânica do sistema de suspensão em $mN^{-1}s^{-1}$, R_{MS} é a resistência mecânica do sistema de suspensão em Ns/m , $Y_{MR} = 1/Z_{MR} = G_{MR} + jB_{MR}$ é a admitância mecânica em $mN^{-1}s^{-1}$ de um dos lados do diafragma, $Z_{MR} = R_{MR} + jX_{MR}$ é a impedância mecânica em Ns/m de um dos lados de um pistão de raio a montado sobre um defletor, $S_D = \pi a^2$ é a área efetiva do diafragma em m^2 , $\tilde{p}_R = 2\tilde{U}_C/Y_{MR}$ é a pressão no diafragma devido à carga que está sendo movimentada e \tilde{U}_C é a velocidade do diafragma.

As figuras 4c e d são o circuito equivalente simples de um alto-falante, onde o primeiro representa os componentes mecânicos trazidos para o lado elétrico do circuito equivalente 4b e o segundo representa o circuito com os componentes elétricos trazidos para o lado mecânico. Existem outras formas de escrever o circuito equivalente levando em consideração a não-linearidade da indutância L_E da bobina. Isso pode ser feito adicionando uma segunda indutância com uma resistência em paralelo.

1.3 Parâmetros

1.3.1 Parâmetros Thiele-Small

Durante os anos 1970 vários artigos foram escritos e submetidos à AES (Audio Engineering Society) de forma que resultaram no que conhecemos hoje como parâmetros Thiele-Small. Thiele era o engenheiro sênior de projeto e desenvolvimento da Australian Broadcasting Commission e responsável pela Federal Engineering Laboratory. Nessa mesma

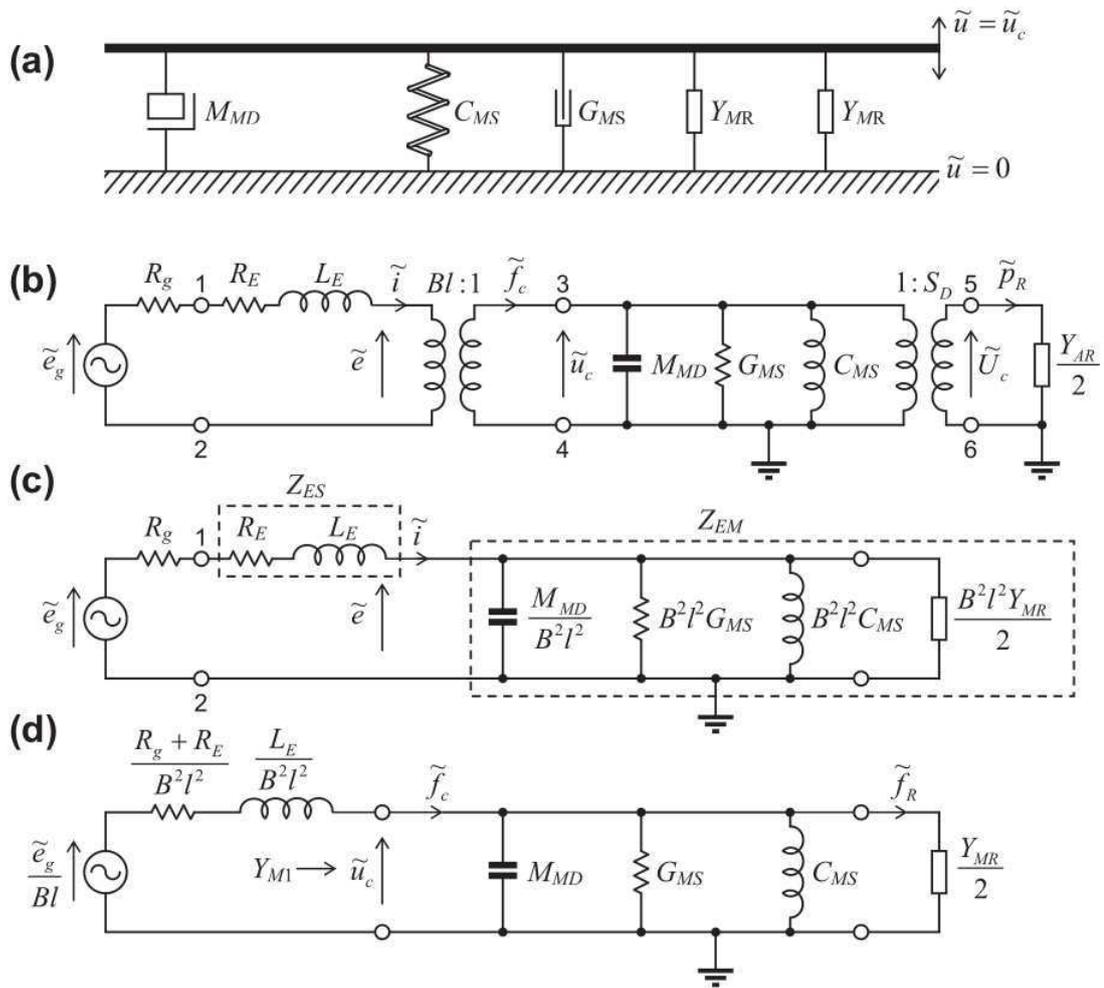


Figura 4 – Representação de um alto-falante a partir de um circuito elétrico equivalente (BERANEK; MELLOW, 2012).

época, Small era um estudante de pós-graduação na School of Electrical Engineering da University of Sydney. Ambos dedicaram esforços consideráveis no desenvolvimento de um modelo que explicasse a relação entre um alto-falante e a caixa que ele está inserido (UNDERSTANDING..., 2016).

Os parâmetros Thiele-Small são parâmetros de um modelo para baixas frequências de um alto-falante e sua respectiva caixa acústica. Esses parâmetros são: R_E , Q_{ES} , Q_{MS} , f_S , S_D e V_{AS} (BERANEK; MELLOW, 2012).

Esses parâmetros são dados pelas equações abaixo. O parâmetro R_E é a resistência elétrica da bobina e é obtida através da medição da resistência nos terminais do alto-falante com o seu movimento bloqueado.

$$Q_{ES} = \frac{R_g + R_E}{B^2 l^2} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}} \quad (1.2)$$

$$Q_{MS} = \frac{1}{R_{MS}} \sqrt{\frac{M_{MS}}{C_{MS}}} \quad (1.3)$$

$$f_s = \frac{1}{6,28\sqrt{C_s M_D}} \quad [Hz] \quad (1.4)$$

$$S_D = \pi a^2 \quad [m^2] \quad (1.5)$$

$$V_{AS} = C_{AS} \rho_0 c^2 = C_{MS} S_D^2 \rho_0 c^2 \quad [m^3] \quad (1.6)$$

A partir desses parâmetros é possível obter todos os valores dos componentes do circuito elétrico equivalente de um alto-falante. Outro parâmetro que também é comumente definido como um parâmetro Thiele-Small é o $X_{m\acute{a}x}$. No entanto, esse parâmetro não faz parte do conjunto de parâmetros Thiele-Small e é especialmente difícil de definir por ter de ser estabelecida uma quantidade de distorção máxima presente no sinal. Porém, alguns autores definem esse limite como sendo $X_{m\acute{a}x} + 15\%$ (DICKASON, 2005).

1.3.2 Eficiência

A eficiência de um alto-falante é um parâmetro fortemente dependente da frequência. Uma curva típica de eficiência pode ser vista na figura 5. Esta curva apresenta seu valor máximo nas vizinhanças da frequência de ressonância mecânica do alto-falante.

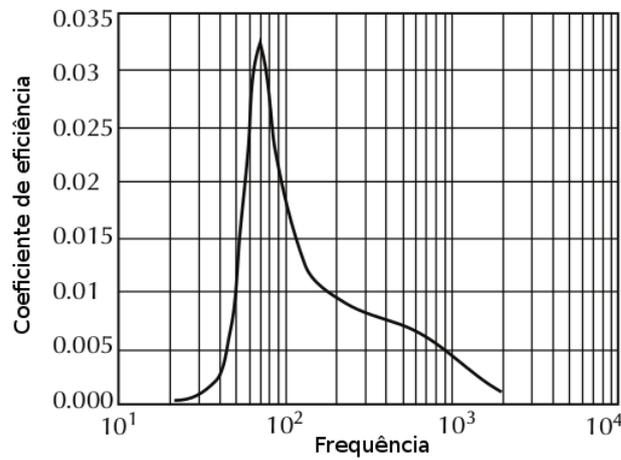


Figura 5 – Eficiência de um alto-falante, projetado para frequências médio-baixas, em função da frequência (DAVIS; PATRONIS, 2014).

Para frequências médias, $2f_0 < f < \frac{c}{4\pi a}$, onde f_0 é a frequência de corte inferior, podemos dizer que a eficiência é dada pela seguinte equação:

$$E_{ff} = 100 \frac{W}{W_E} \approx 100 \frac{8\pi^2 V_{AS} f_S^3}{Q_{ES} c^3} \quad (1.7)$$

onde W é a potência acústica emitida pelo alto-falante e W_E é a potência elétrica total consumida (BERANEK; MELLOW, 2012). A potência W_E fornecida pelo amplificador é

dada por

$$W_E \approx \frac{e_{g(rms)}^2}{R_E} \quad [W] \quad (1.8)$$

Na frequência de ressonância, ou seja $f = f_S$, podemos dizer que a eficiência é dada por

$$E_{ffS} = 100 \frac{W}{W_E} = 100 \frac{Q_{ES} Q_{MS}^2 B^2 l^2 S_D^2 \rho_0}{(Q_{ES} + Q_{MS}) \pi R_E M_{MS}^2 c} \quad (1.9)$$

onde W_E é dado por

$$W_E = \frac{e_{g(rms)}^2}{R_g + R_E + (B^2 l^2) / R_{MS}} \quad [W] \quad (1.10)$$

Em altas frequências a eficiência é quase nula devido a inércia do conjunto móvel, fazendo com que praticamente toda a energia seja dissipada em calor (BERANEK; MELLOW, 2012).

1.3.3 Sensibilidade

A sensibilidade de um alto-falante especifica quanto será produzido em termos de pressão sonora à uma certa distância e com uma dada entrada padrão. O padrão mais utilizado para especificar a sensibilidade de um alto-falante é a pressão sonora máxima a 1 metro de distância com uma potência de entrada igual a 1 Watt. Porém, isso não quer dizer que a medição foi feita exatamente a 1 metro. Para este tipo de medição, recomenda-se que seja feita em campos distantes (far field) e depois seja calculada a pressão sonora a 1 metro de distância do alto-falante (DAVIS; PATRONIS, 2014). Para isto, utiliza-se a seguinte fórmula

$$L_P @1m = L_P(r) + 20 \log\left(\frac{r}{1}\right) \quad [dBSPL] \quad (1.11)$$

onde r é a distância do alto-falante para o ponto de medição e L_P é o nível de pressão sonora neste dado ponto.

Dado um valor de sensibilidade, também é possível prever a pressão sonora em um ponto a r metros de distância e aplicando uma potência P diferente de 1 Watt. Para isto, pode-se usar a seguinte equação

$$L_P(r) = L_P - 20 \log\left(\frac{r}{1}\right) + 10 \log\left(\frac{P}{1}\right) \quad [dBSPL] \quad (1.12)$$

1.4 CLIO

CLIO é um sistema para medições elétricas e acústicas baseadas em computador. Foi desenvolvido pela empresa Audiomatica¹ em 1991 e apresentado ao público pela primeira vez na conferência da AES (Audio Engineering Society) em Paris. O sistema CLIO é

¹ <http://www.audiomatica.com/wp/?page_id=8>

composto pelo software, placa de áudio, amplificador e microfone de medição. Juntos, esses equipamentos são uma poderosa ferramenta de medição na área de eletroacústica, controle de ruído e acústica arquitetônica.

O software permite que sejam calculados vários parâmetros de alto-falantes. Os mais importantes são a resposta acústica do alto-falante e os parâmetros Thiele-Small. A partir destes dados é possível comparar a resposta de alto-falantes de diversas marcas e prever sua resposta em caixas acústicas. Essa predição se faz por meio de outro software e utilizando nele os parâmetros Thiele-Small adquiridos por meio do sistema CLIO.

Durante as medições é extremamente importante que o microfone de medição esteja exatamente a um metro de distância do alto-falante. Isto é necessário porque a resposta acústica normalizada de um alto-falante é sempre extraída a um metro de distância e aplicando 1 Watt sob os terminais do alto-falante.

Para extrair a resposta em frequência do alto-falante o CLIO utiliza um ruído branco gerado no próprio software. Dessa forma é possível quantificar a diferença entre o sinal medido e o sinal produzido para gerar a curva de resposta em frequência do alto-falante.

1.5 Resposta acústica

A resposta acústica, ou resposta em frequência, de um alto-falante é um dos parâmetros que melhor define seu comportamento e sua qualidade sonora (GABRIELSSON; LINDSTRÖM; TILL, 1991), visto que por meio dela conseguimos observar seu desempenho em função da frequência. Essa curva é uma importante ferramenta na avaliação de alto-falantes devido à possibilidade de se fazer uma comparação clara e precisa entre dois modelos diferentes para que, mais tarde, o engenheiro projetista consiga definir a melhor abordagem para se atingir a resposta desejada.

Por norma técnica, a resposta acústica é definida como aquela extraída de um alto-falante em uma câmara anecóica por meio de um microfone posicionado a um metro de distância do seu cone e sendo aplicado 1 W de potência em seus terminais. A resposta em frequência retirada de um alto-falante em uma câmara anecóica é extremamente importante para o seu estudo. Mas sua importância em relação à qualidade sonora percebida é extremamente discutível. Isso se deve pelo fato de que a resposta tem uma variação enorme ao ser medida em um ambiente onde a reverberação passa a ter influência. A resposta medida em uma sala de audição, com tempo de reverberação e reflexões controladas, nos daria uma definição muito melhor da qualidade sonora percebida por um ouvinte do que aquela medida em uma câmara anecóica onde o alto-falante atua totalmente livre da influência de reflexões. Porém, tais medições em ambientes com reverberação não são normatizadas e apresentam vários problemas que podem abrir margem para várias

discussões (GABRIELSSON; LINDSTRÖM; TILL, 1991).

Na figura 6 é possível observar uma resposta em frequência medida em uma câmara anecóica (primeiro gráfico) e uma resposta medida em uma sala de audição (segundo gráfico). É possível observar que o gráfico da resposta medida em uma sala de audição apresenta uma curva um pouco diferente e muito mais suave que a resposta em uma câmara anecóica. Isso se deve pela influência das ressonâncias da sala e do tempo de reverberação na resposta medida pelo microfone.

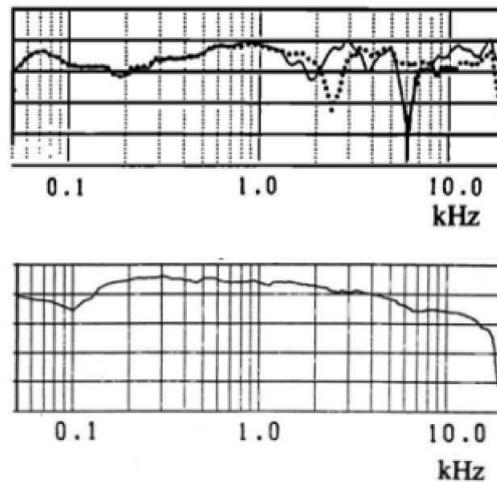


Figura 6 – Respostas em frequência medidas em câmara anecóica e sala de audição (GABRIELSSON; LINDSTRÖM; TILL, 1991).

No que se refere às características que podem definir a resposta percebida de um alto-falante podemos destacar: clareza, preenchimento, espacialidade, brilho e suavidade. Na resposta em frequência percebida de um alto-falante, a clareza é favorecida por uma ampla resposta com ênfase em frequências médio-altas (cerca de 500 - 4 kHz). Quanto mais energia a resposta apresentar nas baixas frequências, menor é a percepção de clareza no som reproduzido.

A sensação de preenchimento é percebida da mesma forma que a clareza. Porém, a ênfase em baixas e altas frequências são igualmente prejudiciais na percepção do ouvinte.

Brilho é uma característica percebida que é diretamente proporcional à ênfase da resposta em altas frequências. Quanto mais energia se acumular nas altas frequências da resposta percebida do alto falante, maior é a sensação de brilho no som. Em contrapartida, a sensação de suavidade em um alto-falante está associada com uma pequena ênfase nas baixas frequências.

Uma boa reprodução é usualmente relacionada a altos valores de clareza, espacialidade, preenchimento e relação sinal ruído (GABRIELSSON; LINDSTRÖM; TILL, 1991).

1.6 Caixa acústica

Existem três principais tipos de projetos de caixas para alto-falantes: caixa selada, caixa com duto e passa-faixa. Esses projetos podem variar em formato da caixa, número e formato dos dutos, presença de alto-falantes passivos e etc.

1.6.1 Caixa selada

O projeto de caixa selada, ou seja, caixa sem duto (ventilação), é o projeto de caixas acústicas mais usado. Nesse tipo de projeto, o alto-falante é colocado em uma caixa totalmente fechada que age como uma compliância extra amortecendo o deslocamento do diafragma do alto-falante. Para esse projeto, deve ser utilizada madeira compensada ou MDF de 18 a 25 mm de espessura. A utilização dessas madeiras na construção de caixas acústicas é devido à alta densidade desse tipo de material (normalmente são materiais mais densos que madeira comum). Essa alta densidade ajuda para que a caixa não vibre durante sua utilização. Vibrações na caixa apenas causam distorções e atrasos que atrapalham na reprodução do som pelo alto-falante (SILVA; SILVA, 2002).

Para um projeto de caixa selada, é necessário ter em mãos os parâmetros Thiele-Small do alto-falante que será utilizado. Com esses parâmetros é possível determinar o volume necessário para a caixa, frequência de corte e sensibilidade.

Inicialmente, deve-se determinar a compliância total da caixa, $Q_{TS} = Q_{ES}Q_{MS}/(Q_{ES} + Q_{MS})$, e a partir deste valor determinar o tipo de resposta em frequência que a caixa terá nas baixas frequências utilizando a tabela 1. A variação da resposta em frequência em função do valor de Q_{TC} pode ser visto na figura 7. Deve ser levado em conta que o valor de Q_{TC} deve ser sempre maior que o valor de Q_{TS} . Desta forma, pode-se determinar o volume total de ar na caixa, V_A utilizando a seguinte equação

$$V_A = \frac{V_{AS}}{\left(\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}}\right)^2 - 1} - \gamma V_M \quad (1.13)$$

onde V_M é o volume total de revestimento utilizado dentro da caixa acústica. Revestimentos são comumente utilizados para amortecer a resposta em altas frequências do alto-falante. Caixas que não possuem revestimento interno podem apresentar uma resposta em frequência com picos bastante acentuados nas frequências superiores.

A frequência de ressonância da caixa, f_C , pode ser determinada utilizando a equação seguinte

$$\frac{f_C}{f_S} = \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_{AB}}} \quad (1.14)$$

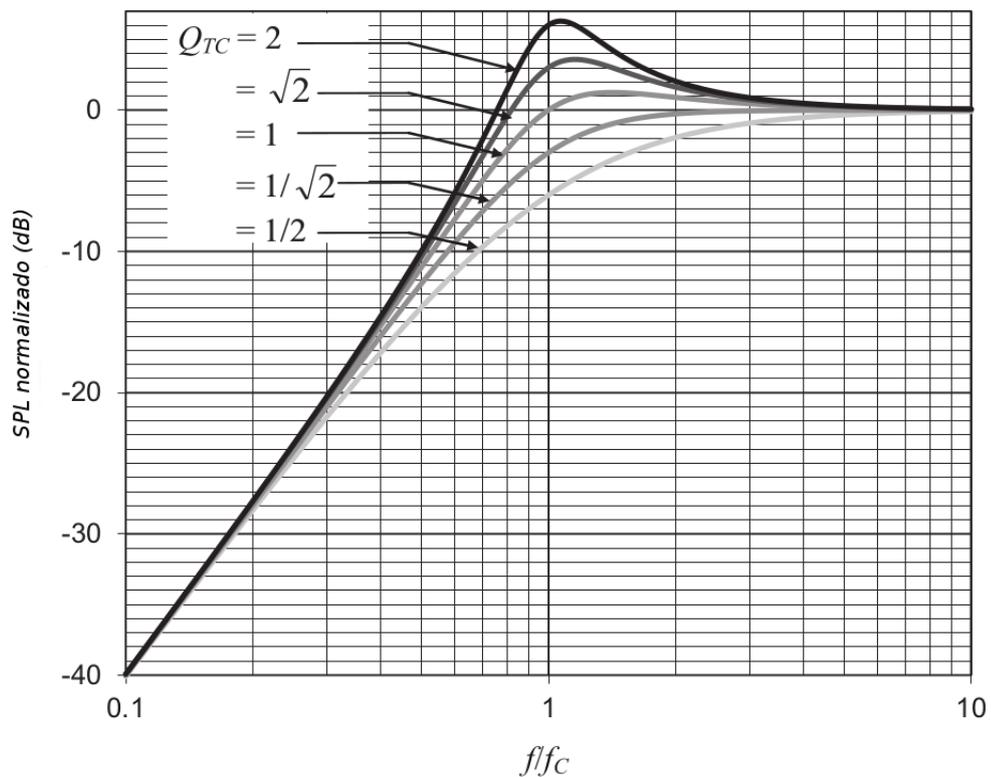
Com o valor de f_C determinado, é possível determinar o valor de f_{3dB} utilizando novamente os valores da tabela 1. Para o cálculo do nível de pressão sonora máximo do

Tabela 1 – Relação entre Q_{TC} e frequência de corte em uma caixa selada (BERANEK; MELLOW, 2012).

<i>Tipo de resposta em frequência</i>	f_{3dB}/f_c	Q_{TC}
<i>Síncrona</i>	1,5538	0,5
<i>Bessel</i>	1,272	0,5774
<i>Butterworth</i>	1	0,7071
<i>Chebyshev com 0,1dB de ripple</i>	0,93682	0,76736
<i>Chebyshev com 0,5dB de ripple</i>	0,88602	0,86372
<i>Chebyshev com 1,0dB de ripple</i>	0,86234	0,9565
<i>Chebyshev com 2,0dB de ripple</i>	0,84461	1,1287
<i>Chebyshev com 3,0dB de ripple</i>	0,84090	1,3047
<i>Chebyshev com 4,0dB de ripple</i>	0,84312	1,4934
<i>Chebyshev com 5,0dB de ripple</i>	0,84842	1,6996
<i>Chebyshev com 6,0dB de ripple</i>	0,85544	1,9269

alto-falante, $SPL_{máx}$, podemos utilizar a seguinte equação

$$SPL_{máx} = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{c \times 20 \times 10^{-6}} \sqrt{\frac{Z_{nom} W_{máx} 2\pi f_S^3 V_{AS} \rho_0}{R_E Q_{ES}}} \right) \quad [dB \text{ SPL}] \quad (1.15)$$

Figura 7 – Comportamento da resposta em frequência em função do valor de Q_{TC} (BERANEK; MELLOW, 2012).

É importante lembrar que todo esse processo pode ser feito por meio de softwares de simulação que ajudam o projetista a encontrar o melhor projeto de caixa para a aplicação

desejada. Nestes softwares é possível simular as curvas de resposta em frequência para vários valores de V_A e f_{3dB} . Exemplos de software deste tipo são o LspCAD[®], Bassbox[®] e FINEBox[®].

1.6.2 Caixa com duto (Bass-reflex)

Caixas com duto são fisicamente muito semelhantes às caixas seladas. Nessas caixas a diferença está apenas na adição de um duto de ventilação por onde o ar pode entrar ou sair da caixa. A adição desse duto faz com que a carga de ar atrás do alto-falante seja maior aumentando assim a sua performance em baixas frequências.

Em comparação às caixas seladas, podemos dizer que o deslocamento do cone perto da frequência de ressonância é bem menor em caixas com dutos. Isto resulta em uma potência nominal maior e menos distorção no sinal. A frequência de corte inferior da caixa torna-se relativamente menor em comparação com o projeto de caixas seladas. E, em teoria, há um ganho de $+3dB$ na eficiência em comparação com a uma caixa selada de mesmo volume (DICKASON, 2005).

Em contrapartida, caixas com dutos são mais sensíveis a parâmetros desalinhados. O que as tornam mais complicadas para projetistas inexperientes.

Para o projeto de uma caixa com duto, inicialmente deve-se determinar a compliância total da caixa, $Q_{TS} = Q_{ES}Q_{MS}/(Q_{ES} + Q_{MS})$, e a partir deste valor determinar o tipo de resposta em frequência que a caixa terá nas baixas frequências utilizando a tabela 2. Além do tipo de resposta da caixa, também podem ser extraídos os valores de f_{3dB} , f_B e V_{AB} a partir dos parâmetros Thiele-Small f_S e V_{AS} .

Tabela 2 – Tabela para cálculo de parâmetros em uma caixa com duto (BERANEK; MELLOW, 2012).

<i>Tipo de resposta em frequência</i>	f_{3dB}/f_S	V_{AB}/V_{AS}	Q_{TS}	f_B/f_S
<i>Sincrona ($B = 0$)</i>	2,2990	0,2899	0,2593	1
<i>Sub – Butterworth ($B = 0,6$)</i>	1,7748	0,4028	0,3010	1
<i>Bessel (próximo a $B = 0,77$)</i>	1,4941	0,5242	0,3312	0,9735
<i>Sub – Butterworth ($B = 0,9$)</i>	1,1790	0,6914	0,3689	1
<i>Butterworth ($B = 1$)</i>	1	0,9422	0,4048	1
<i>Chebyshev com 0,01dB de ripple</i>	0,8143	1,5511	0,4572	0,8838
<i>Chebyshev com 0,1dB de ripple</i>	0,6963	2,3308	0,5120	0,7839
<i>Chebyshev com 0,25dB de ripple</i>	0,6374	2,9747	0,5553	0,7259
<i>Chebyshev com 0,5dB de ripple</i>	0,5894	3,7464	0,6073	0,6742

Para o cálculo do $SPL_{m\acute{a}x}$ usa-se a equação 1.15. No cálculo das dimensões do duto deve-se utilizar as seguintes equações

$$p_{m\acute{a}x} = 2\sqrt{2} \times 10^{\frac{SPL_{m\acute{a}x}}{20} - 5} \quad [Pa] \quad (1.16)$$

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{p_{m\acute{a}x}}{2\pi f_B^2 \rho_0} \quad [m^3] \quad (1.17)$$

O volume do duto, V_P , deve ser escolhido de modo a ser várias vezes maior que $V_{m\acute{a}x}$, mas com um certo limite (BERANEK; MELLOW, 2012). O comprimento do duto, t , é dado pela seguinte equação

$$t \approx \frac{c}{\omega_B} \sqrt{\frac{V_P}{V_{AB}}} \quad [m] \quad (1.18)$$

E a área transversal do duto é dada por

$$S_P = V_P/t \quad (1.19)$$

A partir destes dados, é possível obter o volume ideal da caixa e seu respectivo duto. Na indústria, são utilizados dutos dos mais variados tipos como dutos cilíndricos, triangulares e quadrados. Sendo que os dutos cilíndricos são os mais comuns dentre os projetos de caixas acústicas do tipo bass-reflex.

1.6.3 Caixas passa-faixa (Band-pass)

Caixas acústicas passa-faixa são conhecidas por serem utilizadas em projetos de subwoofers. Estas caixas possuem uma curva de resposta em frequência muito parecida com a de um filtro passa-faixa, como pode ser visto na figura 9, e tem como principal característica o modo como o alto-falante é posicionado. Nesta caixa, o alto-falante é instalado de modo a tocar para dentro de uma câmara com duto, como pode ser visto na figura 8.

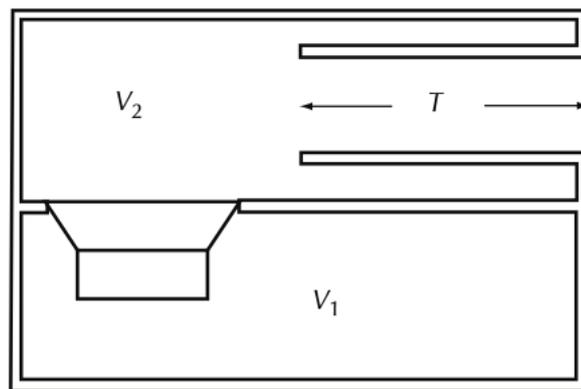


Figura 8 – Exemplo de montagem de uma caixa passa-faixa (DAVIS; PATRONIS, 2014).

Projetos do tipo passa-faixa podem ser contruídos de diversas formas. É possível utilizar mais de um alto-falante, altos-falantes passivos, mais de um duto, dutos entre as câmaras e etc. Projetos de caixas deste tipo são especialmente complexas devido à necessidade de calcular a sintonia entre as câmaras e vários outros fatores. Desta forma,

é extremamente aconselhável que projetos de caixas deste tipo sejam feitos utilizando softwares de simulação, como os mencionados anteriormente.

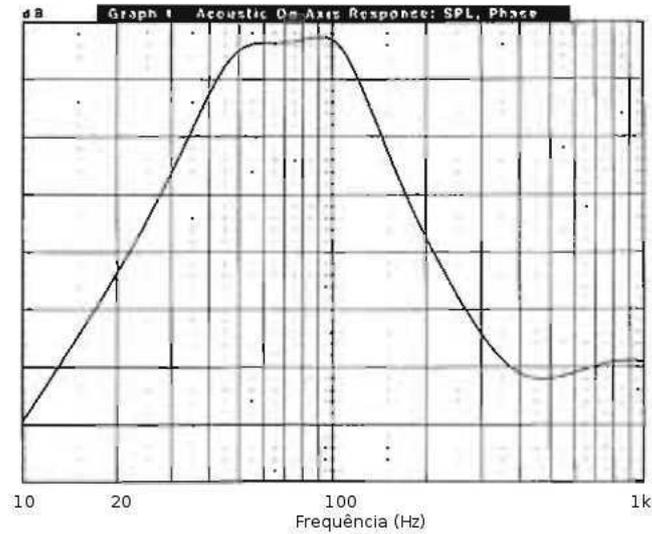


Figura 9 – Resposta em frequência de um projeto de caixa passa-faixa (DICKASON, 2005).

Parte II

Atividades desenvolvidas pelo estagiário

2 Teste e desenvolvimento de alto-falantes e caixas acústicas

Na NH, muitas vezes o produto é criado pelo setor comercial ao identificar alguma necessidade do mercado e então projetado pelo setor de engenharia. Um exemplo de um desses produtos é uma caixa modelo *bookshelf* que está em processo de desenvolvimento. Esta caixa foi feita especificamente para ser utilizada em um sistema 2.0, 2.1 ou até mesmo 5.1 e harmonizar com a decoração do ambiente. Esta caixa possui um alto-falante *midrange* (alto-falante desenvolvido para responder satisfatoriamente em boa parte do espectro de frequências audíveis) e um *tweeter* (transdutor desenvolvido para reproduzir frequências próximas de 20 *kHZ*) com domo de seda. Esta caixa pode ser vista na figura 10. Durante minha estadia na empresa pude participar da montagem do primeiro protótipo desta caixa e escolha do *tweeter*.

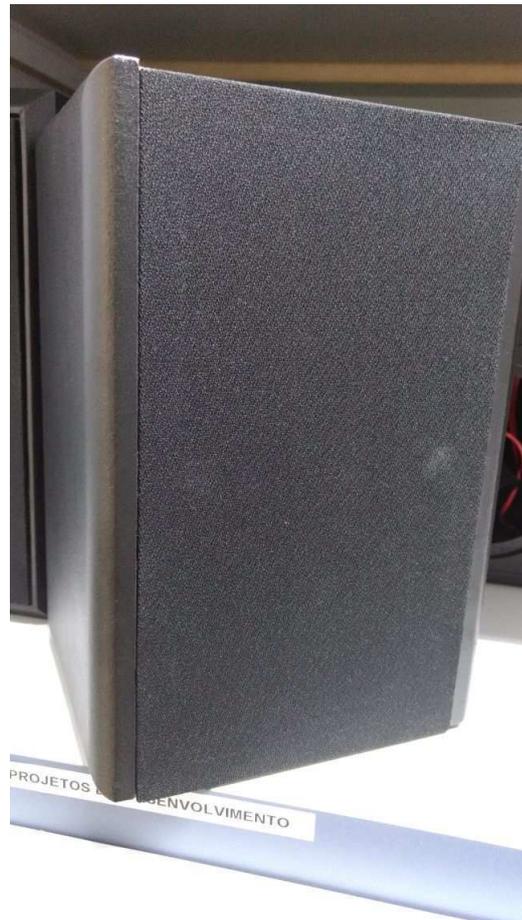


Figura 10 – Caixa *bookshelf* desenvolvida para ambientes domésticos utilizando alto-falante de 5 polegadas e *tweeter* com domo de seda.

Em outros casos, a iniciativa de criar um novo produto parte diretamente do setor de engenharia. Esse foi o caso da criação de um novo super *tweeter* com uma potência e tamanho maiores que o *tweeter* modelo HST 600, ganhador de diversos prêmios nacionais em competições de som automotivo, cuja imagem pode ser vista na figura 12. Esse produto foi criado ao ser identificada uma crescente necessidade em aumentar a potência dos alto-falantes. Nos últimos anos vários modelos tiveram aumento de potência e, conseqüentemente, de tamanho, exceto os *tweeters*. Observando essa disparidade, foi criado um *tweeter* com mais potência e melhor eficiência que o modelo mais vendido da Hinor, o HST 600. Esse aumento na potência acústica do *tweeter* foi feito mudando apenas o seu conjunto magnético e seu exterior. Ao mudar para um conjunto magnético maior, maior Bxl , automaticamente consegue-se uma eficiência maior no produto, visto que de acordo com a equação 1.2 e 1.7, Bxl e E_{ff} são duas grandezas diretamente proporcionais. Essa mudança no produto fez com que sua sensibilidade mudasse de aproximadamente 107 dB para 113 dB. Essa diferença de 6 dB na sensibilidade representa o dobro da sensação de intensidade sonora. As curvas de resposta em frequência dos dois produtos, original e modificado, podem ser vistas na figura 11. Para esse projeto, tive a oportunidade de participar de todas as fases, incluindo projeto, montagem dos primeiros protótipos e aprovação do produto pela diretoria da empresa.

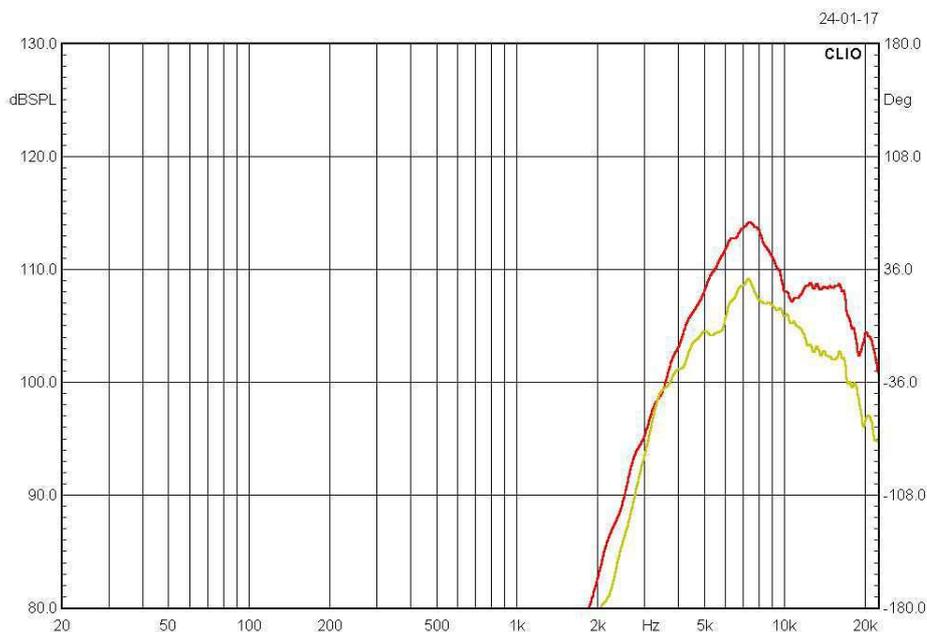


Figura 11 – Resposta em frequência, extraída com o CLIO, do *tweeter* HST 600 (amarelo) e o *tweeter* modificado com um conjunto magnético maior (vermelho).

Outro produto criado dentro do setor de engenharia foi um modelo superior, em termos de qualidade e potência, ao modelo de caixa amplificadora Box Trio que já é



Figura 12 – Imagem do *tweeter* HST 600 ganhador de diversos prêmios nacionais na categoria *super tweeter*.

comercializado. O modelo Box Trio consiste de um sistema de 3 vias (*subwoofer*, *driver* e *tweeter*) que se complementam na reprodução das frequências audíveis. Em projetos deste tipo, é comum que o *subwoofer* (tipo de transdutor desenvolvido para reproduzir as baixas frequências do espectro audível) se restrinja a reproduzir frequências até 2 kHz , faixa de frequência onde ele ainda possui uma atuação considerável, o *driver* (transdutor desenvolvido para reproduzir frequências próximas de 6 kHz) reproduza frequências acima de 2 kHz e o *tweeter* reproduza as frequências acima de 8 kHz .

Para realizar este tipo de filtragem, o mais comum é utilizar um filtro de primeira ordem (capacitor ligado em série com o *driver* ou *tweeter*, como pode ser visto na figura 13). Este filtro utiliza apenas um capacitor em série com o transdutor e sua função é evitar sobrecarga filtrando as baixas frequências que o transdutor não consegue reproduzir. A escolha da capacitância é feita a partir da equação 2.1. No caso do *subwoofer* não há necessidade de utilizar um filtro passa-baixa pois o tamanho e peso do alto-falante (*subwoofer* de 15 polegadas) já limita a atuação do próprio alto-falante à frequências baixas. É verdadeiro dizer que o próprio aspecto construtivo de um *tweeter* e de um *driver* também atua como um filtro, filtrando as baixas frequências do sinal. Porém, as bobinas nesses transdutores são muito mais sensíveis que as de um alto-falante projetado para baixas frequências, o que ocasionaria a queima da bobina se a potência nominal fosse enviada a esses transdutores com todas as componentes audíveis de frequência. Para amplificar o sinal recebido, foi acoplado na caixa o amplificador automotivo modelo HI400 com potência máxima de 200 W_{rms} . Este amplificador pode ser visto na figura 14 e o diagrama da montagem do sistema pode ser visto na figura 15.

$$C = \frac{1}{2\pi f_c R_E} \quad (2.1)$$

O *subwoofer* utilizado nesse projeto foi um alto-falante de 15 polegadas especialmente projetado para esta caixa. Seus parâmetros Thiele-Small podem ser vistos na tabela

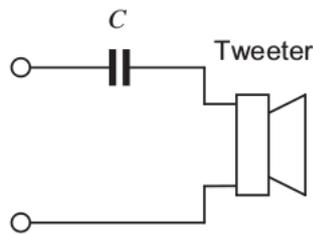


Figura 13 – Ligação de um capacitor em série com um tweeter para filtrar as baixas frequências.



Figura 14 – Amplificador automotivo utilizado na montagem da caixa amplificada Box Trio APP.

3. Os modelos do *driver* e *tweeter* utilizados foram HDC 100 e HST 600 respectivamente. Para determinar o volume ideal da caixa, foi utilizado o programa Bassbox[®]. A simulação com o volume e dutos escolhidos pode ser vista na figura 17. Para este projeto, foi escolhido um duto retangular por questões estéticas e para melhor aproveitar o espaço disponível. Para evitar que ocorresse interferência e cancelamento entre os dois *subwoofers*, foram utilizadas câmaras separadas por uma outra câmara onde encontrava-se o corpo do *driver* e do *tweeter*, como pode ser visto na figura 16.

Tabela 3 – Tabela dos parâmetros Thiele-Small dos dois alto-falantes utilizados no sistema de som automotivo.

Modelo	f_s (Hz)	R_E (Ω)	Q_{ES}	Q_{MS}	V_{AS} (L)
12 EVO 300	56,29	4	0,7462	4,6252	60,99

Durante o período de estágio também houve participação no programa de aperfeiçoamento dos produtos de linha da fábrica. As atividades se resumiam a identificar um produto que pudesse ser melhorado e analisar o conjunto alto-falante e caixa acústica. Se o conjunto não estivesse trabalhando satisfatoriamente, tentava-se mudar algum componente do alto-falante de modo que fosse percebida alguma diferença no resultado final. A conclusão era então tirada com um teste de audição entre o produto original e o produto aperfeiçoado.

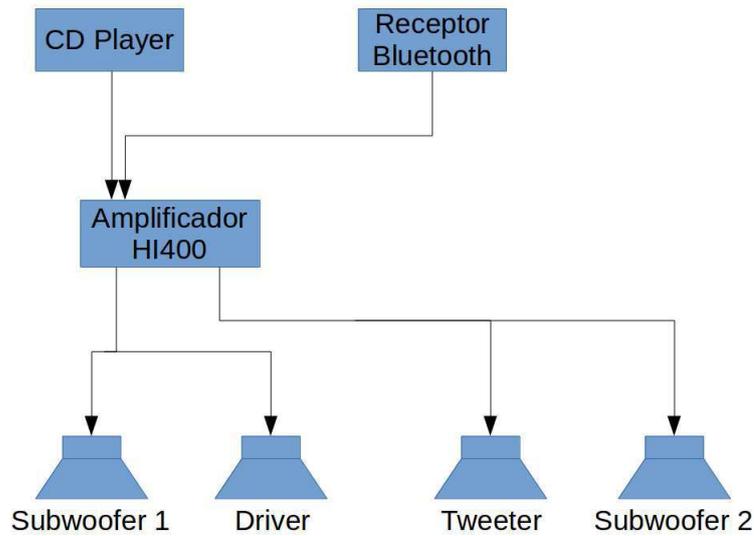


Figura 15 – Diagrama de montagem da caixa amplificadora Box Trio APP.

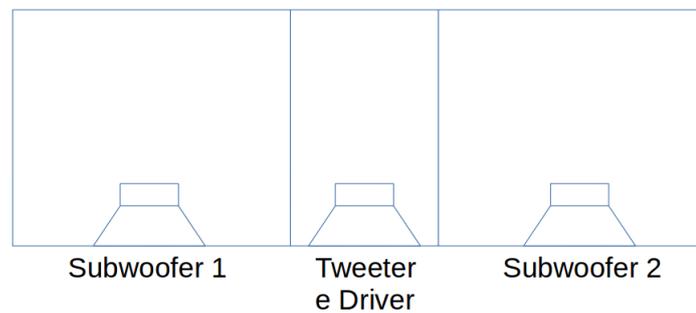


Figura 16 – Separação entre as câmaras dos *subwoofers* na caixa amplificadora Box Trio APP.

O programa de aperfeiçoamento não limitou-se apenas às caixas vendidas pela marca Frahm. Também foram incluídos nessa iniciativa os alto-falantes da marca Hinor. Durante este período, foram analisados, medidos e modificados diversos produtos de linha da marca. A metodologia utilizada foi bem semelhante ao caso das caixas da marca Frahm, o produto era escolhido e então analisado. Ao identificar uma possível limitação no produto, começavam os testes e eram feitas inúmeras análises utilizando o sistema CLIO. A conclusão acerca do produto era então feita utilizando testes de audição.

É importante observar que muitas vezes a alteração não era feita especificamente para tornar o produto melhor que o original. Mas também para torná-lo mais atrativo visualmente ou mais barato, através da modificação de alguns componentes do alto-falante ou da própria caixa.

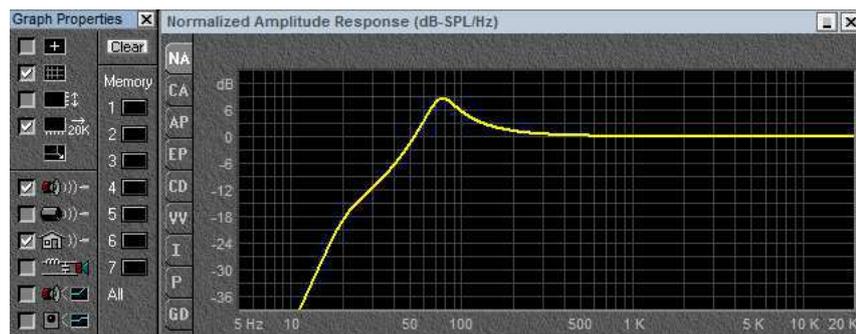


Figura 17 – Simulação do alto-falante 12 EVO 300 na caixa amplificadora Box Trio APP.

3 Teste de audição

Quando colocado em uma câmara anecóica, a qualidade da reprodução do som em um alto-falante é bastante insatisfatória. Isso se deve pela falta de reflexões, principalmente reflexões laterais, que resultam em um som com uma sensação de envolvimento quase inexistente (BEERENDS; NIEUWENHUIZEN; BROEK, 2016).

Em uma sala normal, a reverberação e os modos da sala fazem com que a resposta de um alto-falante seja fortemente alterada. Um alto-falante de alta qualidade pode soar excelente quando o ouvinte está posicionado no lugar correto ou pode soar pior que um alto-falante de baixa qualidade se escutado em um ponto onde os modos acústicos da sala coincidam. O mesmo pode acontecer em gêneros musicais diferentes. Um alto-falante que parece ter uma boa qualidade acústica em um determinado gênero pode soar como um de má qualidade em outro (BEERENDS; NIEUWENHUIZEN; BROEK, 2016). Dessa forma, é importante destacar a relevância em realizar testes de audição em várias posições diferentes na sala e utilizando a maior variedade possível de gêneros musicais. Com exceção daqueles produtos que são feitos especialmente para uma determinada aplicação, como é o caso dos alto-falantes utilizados em torneios de som automotivo, cujos gêneros musicais preferidos são músicas eletrônicas.

Em 1996, David L. Clark e Floyd E. Toole publicaram uma série de recomendações que viriam a ser as recomendações oficiais da AES em relação à realização de testes subjetivos em alto-falantes (DAVID; FLOYD, 1996). Este guia tem como base as seguintes normas: IEC 268-3, IEC 268-5, IEC 651, IEC 804, ISO 1996-1, ISO 2204, ISO 3382 e ISO 7029. Neste guia encontram-se recomendações em relação à sala, arranjo dos alto-falantes, material a ser reproduzido e procedimento de teste.

Em relação à sala, seu tamanho não deve ser menor que $20 m^2$, seu teto não deve ter menos que $2,1 m$ de altura, o tempo de reverberação deve se encontrar entre $0,45 \pm 0,15s$, sendo permitido que este valor seja um pouco maior em baixas frequências e menor em altas frequências, o chão deve ser coberto por, no mínimo, 75% de carpete, a influência dos modos da sala devem ser minimizadas o máximo possível e o ruído de fundo não deve ultrapassar $35 dBA$ e $50 dBC$ (DAVID; FLOYD, 1996).

No que se refere ao posicionamento dos alto-falantes, ele deve ser feito de modo que permita não só um único ponto para os testes, mas toda uma área que se estenda a uma distância de menos de um metro até mais de 3 metros do ponto onde as caixas estão localizadas. Ao testar caixas que serão utilizadas em uma configuração estéreo, deve ser respeitada uma angulação mínima de 40° e a angulação ideal para essa configuração deve ser de 60° entre as caixas. O centro da parte frontal das caixas devem estar há pelo menos

um metro de qualquer superfície refletora. Em alguns casos, onde não há espaço suficiente, o caso deve ser reportado em relatório explicando a escolha da posição dos alto-falantes. Meios para diminuir as reflexões iniciais (early reflections) também devem estar disponíveis. Isso pode ser feito posicionando materiais absorvedores nas superfícies próximas das caixas. É importante que os alto-falantes sejam cobertos de modo que os testes não tenham interferência visual. Ou seja, o ouvinte não deve conseguir ver o alto-falante que está reproduzindo a mídia.

Em relação à mídia utilizada, é extremamente recomendável que sejam utilizadas mídias digitais devido ao fato destas mídias não perderem qualidade com o tempo e serem facilmente replicadas. Uma seleção de gravações de sons acústicos deve ser mantida de forma a verificar a qualidade da reprodução de timbres relacionados a esses instrumentos. Todas as mídias utilizadas devem ser familiares aos que realizam estes testes de modo que, se uma mídia precisar ser trocada, ela precisa ser mantida em alguns testes até que a nova mídia seja familiar. Mídias contendo gravações anecóicas de instrumentos e vozes masculinas e femininas também são altamente recomendáveis. Sinais de ruído (ruído branco e ruído rosa) podem ser incorporados aos testes de modo a realizar rápidos diagnósticos como inversão de polaridade ou alto-falantes defeituosos.

Durante os testes, nenhum equipamento deve sair da sua região de linearidade. Isto é uma regra tanto para o sistema de reprodução de mídia, o amplificador e o alto-falante. Algumas músicas contemporâneas podem ser testadas no volume mais alto possível e sem distorção para que seja feito o teste do alto-falante no seu limite superior de pressão sonora. Os alto-falantes também devem ser combinados de forma a emitir o mesmo nível de pressão sonora com uma precisão de $\pm 0,5$ dB. Isto pode ser feito utilizando-se um sonômetro com a escala A selecionada e medindo o nível de pressão sonora de um ruído rosa. Um alto-falante pode ser usado como referência durante os testes. Este alto-falante é denominado de alto-falante âncora e deve ser familiar e livre de defeitos.

E finalmente, em relação ao ouvinte, deve-se utilizar ouvintes experientes e treinados para realizar testes de audição. Pode-se dizer que um ouvinte é treinado quando ele consegue escolher o mesmo sistema em diferentes tipos e arranjos de testes cegos.

Após os testes, um relatório deve ser escrito de modo a reportar qualquer problema nos testes ou qualquer ponto que, por qualquer motivo, não tenha sido atendido.

Na empresa, é utilizada uma sala de audição com tempo de reverberação controlado que foi projetada exclusivamente para este fim. Na sala são geralmente posicionados os alto-falantes em um painel e, através de uma chave seletora, o engenheiro responsável pelo teste faz a escolha de qual alto-falante ele deseja escutar no dado momento. Esse teste comparativo pode ser feito com um produto da própria marca ou de marcas concorrentes, no caso de estar sendo desenvolvido um novo produto para concorrer com um outro alto-falante que já é comercializado.

Para caixas amplificadas o procedimento é o mesmo. As caixas são posicionadas em frente ao engenheiro responsável pelo projeto acústico, respeitando a distância mínima e angulação necessária, e a fonte sonora é chaveada. De modo que possa ser feito um teste comparativo com maior clareza. Devido à falta de um método qualitativo para definir a qualidade de uma fonte sonora, a responsabilidade em decidir se a qualidade do produto é satisfatória recai sob os ouvidos dos engenheiros da empresa. Esses engenheiros responsáveis pelos testes de audição receberam treinamento especializado para realizar estes testes.

4 Montagem de sistema de som automotivo

Durante o período de estágio aconteceu em Rio do Sul, Santa Catarina, uma feira de representantes das marcas Frahm e Hinor. Nesta feira, foram realizados treinamentos, palestras, exposições e demonstrações dos produtos. Em uma das demonstrações, foi montado um sistema de som com 4 vias (*subwoofer*, *woofer*, *driver* e *tweeter*) para caminhonetes. O principal objetivo dessa demonstração era mostrar como funcionava e como projetar um sistema para campeonatos de som automotivo.

Para montar esse sistema foram utilizados:

- 1 Smart Player APP (figura 18);
- 1 gerenciador de canais da marca Hinor (esse produto ainda não foi lançado e foi utilizado no sistema para demonstrar sua aplicação);
- 3 amplificadores automotivos de marcas diferentes;
- 1 fonte de tensão 12V;
- 1 bateria;
- 2 *subwoofers* de 18 polegadas e modelo 18 SW 3K;
- 4 *woofers* (transdutor utilizado na reprodução de frequências médias) de 12 polegadas e modelo 12 SW 3K;
- 4 *drivers* modelo HDC 3000;
- 2 *tweeters* HST 600.

Os parâmetros Thiele-Small dos alto-falantes 18 SW 3K e 12 SW 3K podem ser vistos na tabela 4.

Para o cálculo da caixa do alto-falante 18 SW 3K, foi escolhido um projeto de caixa acústica passa-faixa (*band-pass*). O principal objetivo deste projeto foi fazer com que o *subwoofer* tocasse apenas as baixas frequências, de 40 Hz a 200 Hz, de modo que não houvesse problemas de fase no sistema devido à interferência destrutiva entre as ondas produzidas pelo *subwoofer* e pelo alto-falante 12 SW 3K. Visto que ainda seriam utilizadas mais 4 caixas para reproduzir as frequências médias. A simulação da curva de resposta em frequência do projeto desta caixa, utilizando o Bassbox[®], pode ser vista na figura 21.

O projeto utilizado nas caixas responsáveis por reproduzir as médias frequências foi o de uma caixa com duto retangular. Mais uma vez, o principal objetivo era limitar



Figura 18 – Receptor bluetooth e rádio AM/FM, Smart Player APP, utilizado para reproduzir mídia no sistema automotivo.



Figura 19 – Sistema de som automotivo 4 vias montado para a feira anual de representantes.

a atuação desta caixa nas médias frequências, entre 200 Hz e $1,2\text{ kHz}$, para que não houvesse problemas de fase entre esta caixa e o *subwoofer*. Para isso, o volume da caixa foi escolhido de tal modo que a frequência de corte inferior desta caixa fosse próxima à frequência de corte superior do *subwoofer*. A simulação da curva de resposta em frequência desta caixa pode ser vista na figura 22.

Tabela 4 – Tabela dos parâmetros Thiele-Small dos dois alto-falantes utilizados no sistema de som automotivo.

Modelo	f_s (Hz)	R_E (Ω)	Q_{ES}	Q_{MS}	V_{AS} (L)
12 SW 3K	58,89	4	0,29	6,35	19,04
18 SW 3K	42,93	4	0,38	6,04	101,88

Para os drivers e tweeters, nos limitamos apenas a fazer o corte de frequências utilizando o gerenciador de canais. As frequências de corte utilizadas no *driver* foram



Figura 20 – Amplificadores e fontes utilizadas na montagem do sistema de som automotivo 4 vias.

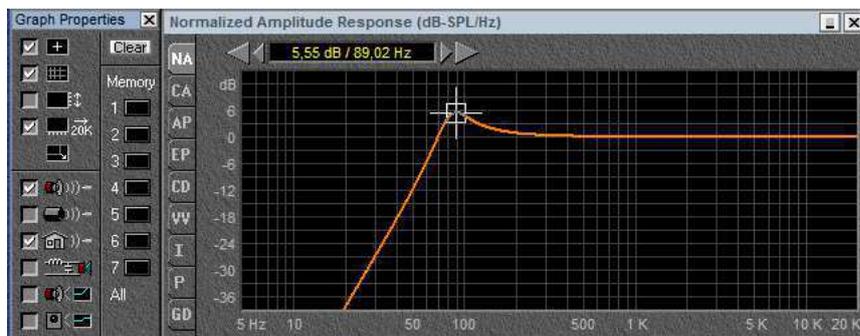


Figura 21 – Simulação do projeto da caixa do alto-falante 18 SW 3K.



Figura 22 – Simulação do projeto da caixa do alto-falante 12 SW 3K.

1 kHz e 10 kHz para as frequências de corte inferior e superior. E as frequências de corte utilizadas no *tweeter* foram 8 kHz e 20 kHz. O diagrama de montagem do sistema automotivo pode ser visto na figura 23. Nele é possível ver que o sinal de áudio teve origem no Smart Player APP e foi dividido em 4 canais. Cada um desses canais foi distribuído para um amplificador, com exceção dos canais utilizados nos drivers e tweeters. Esses foram encaminhados para um amplificador de áudio estéreo (2 canais).

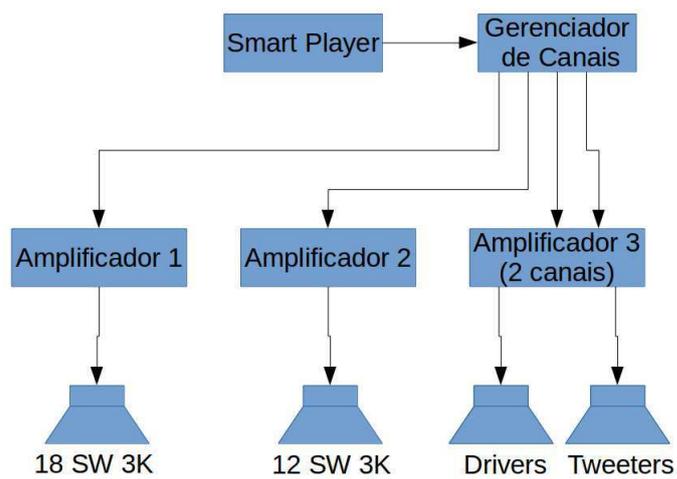


Figura 23 – Diagrama de montagem do sistema de som automotivo para caminhonetes.

5 Instalação do teste de vida para amplificadores e alto-falantes

A fábrica possui 4 espaços reservados para o teste de vida de produtos novos e de linha. Alguns destes espaços são reservados para testes nos produtos que estão sendo fabricados e outros são reservados para os testes de produtos em desenvolvimento. No total, são 2 para os testes da fábrica e 2 para o setor de engenharia. O último deles a ser projetado foi feito exclusivamente para teste de amplificadores residenciais e automotivos, transformadores para projetos de sonorização e alto-falantes. Esse espaço foi construído devido ao crescimento do setor de engenharia que tem realizado cada vez mais projetos nos últimos anos.

No espaço destinado a testes de alto-falantes da linha automotiva podemos encontrar 1 cd player automotivo, 1 gerador de ruído branco e ruído rosa, 3 amplificadores de 2 canais (6 canais no total) e 1 espaço de montagem dos alto-falantes. O intuito deste espaço é ter a liberdade de testar os alto-falantes em potência nominal utilizando ruído ou músicas comuns, como pode ser visto na figura 27. Também há um espaço destinado ao teste de amplificadores automotivos. Para a realização destes testes temos uma bateria automotiva servindo como fonte de energia e ligada a ela temos uma fonte de 12V que alimenta a bateria. O sinal utilizado para os testes nos amplificadores é um cd player automotivo comum, de forma a melhor simular o uso dos amplificadores automotivos em um carro. Na saída do amplificador é possível ligar até 8 alto-falantes do tipo 6x9 da linha city, como pode ser visto na figura 25, e um subwoofer. Todas estas ligações são feitas através de um painel que permite alternar o número de alto-falantes ligados ao amplificador e o sinal a ser utilizado durante os testes, como pode ser visto na figura 24.



Figura 24 – Painel utilizado nos testes de amplificadores automotivos.



Figura 25 – Alto-falante utilizado nos testes de amplificadores automotivos.

No teste de amplificadores residenciais, os amplificadores são ligados em arandelas comuns, posicionadas no teto da sala, em ligação série ou paralelo. A instalação foi feita de modo que durante o teste dos amplificadores residenciais o número de arandelas ligadas na saída do amplificador possa variar de acordo com a necessidade e o produto que esteja sendo testado, como pode ser visto na figura 26. Isso é muito importante para testar o amplificador sob diversas condições de estresse variando a resistência resultante ligada na sua saída e, conseqüentemente, variando a quantidade de potência na saída do amplificador. Também é possível variar o transformador que está sendo utilizado na ligação das arandelas. Transformadores são utilizados em projetos de sonorização quando a distância entre o amplificador e os alto-falantes se torna grande o suficiente a ponto de haver uma queda de tensão no fio considerável, tornando-se um fator limitante no projeto. Dessa forma, usa-se um transformador na saída do amplificador e outro nos terminais de entrada da arandela para diminuir as perdas provocadas pela grande distância entre o amplificador e o alto-falante. A qualidade desses transformadores deve ser muito bem analisada pois eles podem adicionar distorção e até mesmo ruído na instalação do som. É por esse motivo que existe a alternativa de realizar o teste com transformadores da marca Frahm ou com transformadores de outras duas marcas concorrentes.



Figura 26 – Visão das arandelas instaladas no teto do teste de vida para realizar testes com os amplificadores residenciais e com os transformadores.



Figura 27 – Visão dos amplificadores utilizados para testar os alto-falantes no teste de vida do setor de engenharia.

Parte III

Conclusão

A experiência de um estágio em um ambiente empresarial e industrial é extremamente importante na formação do aluno e na sua preparação para o mercado de trabalho. Esta vivência foi especialmente importante devido ao fato de a empresa possuir uma indústria de médio porte onde pelo menos 75% das peças são fabricadas internamente. Dessa forma, é importante ressaltar que vários conhecimentos referentes aos processos produtivos, gestão de estoque e estrutura organizacional foram ali obtidos e serão um diferencial no mercado de trabalho.

Dentro do setor de engenharia da empresa muitas atividades de cunho técnico foram desenvolvidas e inúmeros conhecimentos foram adquiridos, como por exemplo: rotina de testes em produtos em desenvolvimento, projetos de sonorização, gerenciamento de projetos, projetos de alto-falantes e caixas acústicas e projetos de amplificadores. Estas atividades deram a oportunidade de aplicar e aprofundar conhecimentos em disciplinas como eletrônica, dispositivos eletrônicos, sistemas de processamento de áudio e vídeo, filtros elétricos e conhecimentos adquiridos durante intercâmbio em engenharia acústica, de Setembro de 2014 até Agosto de 2015, na University of Salford, Manchester - UK.

Entre todos os conhecimentos adquiridos, vale salientar que o mais importante foi a oportunidade de vivenciar o ambiente empresarial e poder participar da rotina de um setor de engenharia trabalhando com desenvolvimento de produtos e testes de produtos em desenvolvimento.

Referências

- BEERENDS, J. G.; NIEUWENHUIZEN, K. v.; BROEK, E. L. Quantifying sound quality in loudspeaker reproduction. *Journal of the Audio Engineering Society*, Audio Engineering Society, v. 64, n. 10, p. 784–799, 2016. Citado na página 53.
- BERANEK, L. L.; MELLOW, T. J. *Acoustics: sound fields and transducers*. [S.l.]: Academic Press, 2012. Citado 10 vezes nas páginas 15, 17, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 42 e 43.
- DAVID, L.; FLOYD, E. Aes recommended practice for professional audio–subjective evaluation of loudspeakers (aes20-1996), aessc wg-07 working group on listening tests. *Audio Engineering Society Standard*, 1996. Citado na página 53.
- DAVIS, D.; PATRONIS, E. *Sound system engineering*. [S.l.]: CRC Press, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 15, 36, 37 e 43.
- DICKASON, V. *Loudspeaker design cookbook*. [S.l.]: Audio Amateur Pubns, 2005. Citado 8 vezes nas páginas 15, 29, 31, 32, 33, 36, 42 e 44.
- GABRIELSSON, A.; LINDSTRÖM, B.; TILL, O. Loudspeaker frequency response and perceived sound quality. *The Journal of the Acoustical Society of America*, ASA, v. 90, n. 2, p. 707–719, 1991. Citado 3 vezes nas páginas 15, 38 e 39.
- HINO, S. *Inside the mind of Toyota: Management principles for enduring growth*. [S.l.]: CRC Press, 2005. Citado na página 74.
- SILVA, C. C. da; SILVA, H. S. Alto-falantes e caixas acústicas, características e utilização. *1º SEMEA-Seminário de Engenharia de Áudio, Belo Horizonte, MG, Brasil, CD-ROM*, p. 1–21, 2002. Citado na página 40.
- TOYOTA Production System. 2016. Operations. Disponível em: <<http://www.toyota.com.au/toyota/company/operations/toyota-production-system>>. Acesso em: 25.3.2017. Citado 2 vezes nas páginas 75 e 77.
- UNDERSTANDING loudspeaker data. 2016. Operations. Disponível em: <<https://www.eminence.com/support/understanding-loudspeaker-data/>>. Acesso em: 25.3.2017. Citado na página 35.

Anexos

ANEXO A – A empresa

A.1 História

A Frahm foi fundada em 09/06/1961 pelo Sr. Norberto Frahm. Suas atividades se iniciaram com a produção de rádios e, desde então, a empresa tem se dedicado a ampliar cada vez mais a sua linha de produtos.

Em 1969 a empresa lançou a primeira caixa amplificadora do mercado brasileiro. Isto é, foi a primeira caixa acústica que dispensava o uso de amplificadores externos. Antes desta adaptação, o uso de caixas de som era restrito àqueles que possuíam conhecimento técnico na área.

Conforme o armazenamento de mídia foi mudando, os produtos da marca Frahm também foram se adaptando aos novos tempos. Foi assim que a marca passou pela fita cassete, vinil, cd e, atualmente, pen drive, bluetooth e WiFi. No mercado brasileiro, a Frahm foi por diversas vezes pioneira no lançamento de produtos que reproduziam tais mídias. Além de também ter sido a primeira marca a lançar no Brasil uma caixa de som cujo controle pode ser feito por meio de aplicativo para celular.

Há 28 anos foi criada a empresa Hinor pelo também fundador da marca Frahm. A Hinor foi criada em uma contínua busca por dominar outros mercados. Com principal foco no setor automotivo, a Hinor produz desde alto-falantes até sistemas de alarmes para carros.

Hoje, a Hinor é a principal concorrente no Brasil de marcas como a JBL, SNAKE, Bomber e outras empresas de alto-falantes com foco no setor automotivo. A Hinor também é líder de venda no mercado de super tweeters e ganhadora de vários prêmios nacionais de som automotivo com este produto.

A.2 A Frahm

A Frahm é uma empresa que atua tanto no segmento de áudio profissional quanto no doméstico. Seus produtos vão desde caixas acústicas multiuso até caixas e arandelas para sonorização de ambientes.

Suas 4 principais linhas são: acústico, multiuso, portáteis e sonorização. Na linha acústico são encontrados os produtos para áudio profissional como caixas para PA e caixas subwoofer com alta potência destinados a shows e espetáculos para públicos pequenos. A linha de produtos multiuso tem foco no público doméstico que precisa de uma caixa um

pouco mais dinâmica e que possa ser usada também com instrumentos e microfones além de ser utilizada para reproduzir mídias de áudio padrão. A linha portátil, como o próprio nome já diz, refere-se aos produtos portáteis com conectividade bluetooth. Essas caixas são pequenas, leves e ideais para o uso em pequenas reuniões. A linha de sonorização é a linha que possui mais produtos e nela podem ser encontrados produtos como amplificadores, arandelas, caixas acústicas e etc. Essa linha tem como foco a sonorização de ambientes comerciais e também residenciais.

Dentre seus vários produtos os mais consumidos são os seus amplificadores de áudio e as caixas multiusos. Esses dois produtos juntos representam boa parte da renda da empresa.

A.3 A Hinor

A Hinor é uma empresa com foco no setor automotivo cujos produtos vão desde alto-falantes até alarmes para carros. Seu foco maior está em desenvolver produtos para áudio como alto-falantes, caixas amplificadas, drivers, tweeters e amplificadores.

Com uma grande variedade de produtos a Hinor oferece alto-falantes dos mais variados tipos e tamanhos. Seu menor alto-falante possui 6 polegadas de diâmetro do cone e o maior, destinado a faixa de subgraves, com 18 polegadas. Diferente da maioria de seus concorrentes, a Hinor não tem restrições em sua linha de produtos. A marca consegue concorrer tanto com fabricantes de tweeters quanto com fabricantes de alto-falantes para faixa de sub-graves.

Na modalidade super tweeter, a Hinor é ganhadora de diversos prêmios nacionais em competições de som automotivo por vários anos consecutivos e principal vendedora desse produto no Brasil.

A.4 Processo produtivo

A empresa NH conta com uma planta industrial capaz de fabricar, estocar e fazer manutenção de praticamente todos os produtos disponíveis em sua linha. Salvo a exceção de alguns componentes e de alguns produtos que são desenvolvidos fora da empresa ou importados, todos os outros são fabricados no próprio parque fabril.

O sistema de produção utilizado é o Lean Manufacturing, ou Sistema Toyota de Produção, que é uma filosofia de gestão que visa a redução dos sete principais tipos de desperdícios: super-produção, tempo de espera, transporte, excesso de processamento, inventário, movimento e defeitos (HINO, 2005). A partir da diminuição destes desperdícios os custos no processo de produção são reduzidos e, conseqüentemente, o preço final do produto torna-se mais competitivo no mercado.



Figura 28 – Sistema de informação do rendimento da célula de produção.



Figura 29 – Teste de alto-falante utilizando o sistema CLIO.

A busca contínua por melhorias nos processos no sentido de melhorar a qualidade, aumentar a eficiência e eliminar desperdícios é o coração do STP (Sistema Toyota de Produção) e é conhecido como Kaizen. O Kaizen tem como objetivo criar um fluxo contínuo de materiais desde o recebimento de matéria-prima até a entrega do produto final eliminando qualquer trabalho que não agregue valor ao produto e diminuindo todas as formas de desperdício, seja material ou humano. Outro objetivo do método Kaizen é humanizar o ambiente de trabalho diminuindo trabalhos excessivamente pesados e ensinar as pessoas como fazer experimentos se utilizando do método científico para criar melhorias no processo e aumentar a produtividade (TOYOTA..., 2016).

No STP a linha de produção é organizada em células. Estas células são projetadas para produzir da forma mais eficiente possível um ou mais produtos do mesmo tipo, desde o recebimento dos componentes até o teste final do produto. Cada célula possui um sistema



Figura 30 – Parte do processo de fabricação de carcaça de alto-falantes.



Figura 31 – Parte do processo de fabricação de bobinas para alto-falantes.

de gestão visual próprio que fornece algumas informações sobre a produção na célula como pode ser visto na figura 28. Essas células também são projetadas para serem flexíveis, ou seja, elas podem ter sua estrutura facilmente mudada para que um outro produto seja produzido com a mesma eficiência que trabalhava-se antes. Atualmente, a fábrica conta com 6 células de montagem de alto-falantes, 5 células de montagem de amplificadores, 2 células de montagem acústica (Caixas amplificadas) e 1 célula de montagem de PCI (Placa de circuito impresso). A grande maioria das células são equipadas com o sistema CLIO de medição, como pode ser visto na figura 29. Isso garante que 100% dos produtos que saem de fábrica sejam testados antes de serem embalados. Além disso, os produtos são colocados em mesas vibratórias para garantir que durante o transporte nenhum componente ou cabo se solte.

De modo a eliminar estoques desnecessários de produtos prontos, um dos objetivos



Figura 32 – Parte do processo de fabricação de materiais plásticos.

do STP é também implementar o *Just in time* na produção. O *Just in time* estabelece que o cliente final é quem deve puxar a linha de produção. Desta forma, somente é produzido o que sabe-se que vai ser vendido eliminando gastos desnecessários com super-produção e estoque (TOYOTA..., 2016). Portanto, o planejamento mensal de vendas é o que regula o modo como a fábrica vai trabalhar, ou seja, número de pessoas, tempo de produção, volume de peças, layout das células e etc.

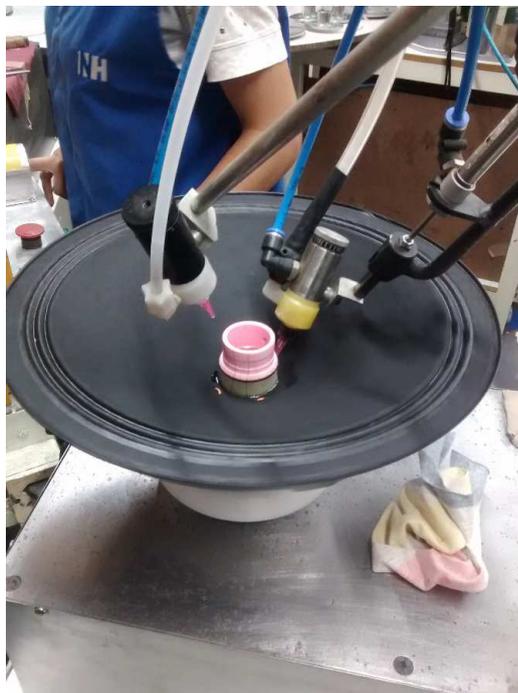


Figura 33 – Processo de colagem do cone do alto-falante na bobina.

Como já foi destacado anteriormente, a empresa conta com um maquinário e mão de obra capazes de produzir boa parte dos componentes dos seus produtos. Dentre as várias

máquinas que compõem a empresa pode-se destacar as máquinas de corte a laser para cortar painéis metálicos outras peças metálicas, centro de pintura eletrostática, máquinas de inserção de componentes SMD, máquina de injeção plástica e etc. As máquinas de corte a laser foram as aquisições mais recentes da empresa e a próxima grande aquisição que será realizada será um novo centro de pintura eletrostática.

A.5 Teste de vida

Para garantir a qualidade do produto entregue ao consumidor, é feito um teste de vida acelerado em uma parte do lote e em protótipos que estão sendo desenvolvidos. O objetivo deste teste é prever falhas e o tempo de vida do produto antes que ele vá ao mercado. Durante o teste de vida acelerado, o produto é exposto às condições de extremo estresse como alta temperatura e potência elevada por um curto período de tempo de modo que seus componentes sejam testados no seu limite de operação.

Em caixas acústicas, o teste de vida é feito colocando-as em uma temperatura de $50^{\circ}C$ por um período de 48 horas com o volume máximo. Este período é suficiente para que a grande maioria dos problemas sejam previstos bem antes do consumidor receber esses produtos em mãos. Em alto-falantes que são vendidos separadamente das caixas acústicas o processo é similar mas com a diferença de que eles não são expostos a temperatura de $50^{\circ}C$. Eles são colocados em câmaras com isolamento acústico e testados com potência nominal tocando ruído rosa.

Nas instalações da empresa existem 4 espaços reservados para testes de vida. Sendo dois do setor de engenharia e dois destinados aos testes nos produtos da linha de produção. O teste de vida mais recente foi desenvolvido para testar amplificadores residenciais e automotivos além de alto-falantes e arandelas.