

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Projecto e Construção de um Sonodifusor de
Sub-graves Direccional**

Tiago Lobão Correia

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Automação

Orientador: Prof. Diamantino Rui da Silva Freitas
Supervisor Empresarial: Eng. António Fernando C. M. Correia

Junho de 2015

A Dissertação intitulada

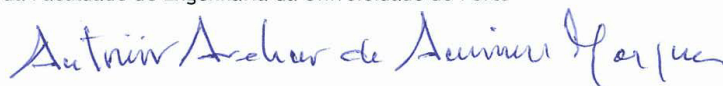
“Projecto e Construção de um Sonodifusor de Sub-graves Direccional”

foi aprovada em provas realizadas em 17-07-2015

o júri



Presidente Professor Doutor Carlos João Rodrigues Costa Ramos
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professor Doutor António Avelino Amorim Marques
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto
Superior de Engenharia do Porto



Professor Doutor Diamantino Rui da Silva Freitas
Professor Associado do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Tiago Lobão Correia

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

O desenho e dimensionamento de sonodifusores é um domínio de grande dimensão em termos de conhecimento e da prática profissional. Sendo uma área tecnológica bastante amadurecida foi por isso motivo deste estudo tendo sido realizado o levantamento do estado da arte e escolhido para estudo aprofundado um subdomínio em que se observa uma evolução muito interessante, que é o desenho de sonodifusores de graves com comportamento direcional. Além do estudo teórico da produção sonora foi também estudado o comportamento dos sonodifusores nas respetivas caixas acústicas. Os destinatários do campo acústico produzido, ouvintes ou espectadores percebem o som produzido e sentem as suas características e conteúdo semântico através do sentido da audição e por isso foi também tratada a base de audiologia e psicoacústica no sentido de valorizar corretamente o efeito previsível em termos de perceção do som produzido. Os principais sinais de ruído, usados na indústria eletroacústica, para a medição do SPL e diretividade foram também abordados assim como técnicas de medição. Inerente à diretividade estão os diagramas de dispersão polar e por isso foram também objeto de estudo desta dissertação.

Para a simulação acústica da interação de diversas fontes sonoras no plano X/Y foi desenvolvida uma aplicação em MATLAB usando a ferramenta GUI. A aplicação desenvolvida, ASI, permite aos seus utilizadores uma previsão rápida e precisa da distribuição da pressão sonora ao longo de um espaço bidimensional.

Foi desenvolvida a arquitetura do sistema tendo em conta as simulações efetuadas no software desenvolvido seguindo-se de uma simulação das caixas acústicas no software “LEAP - Enclosure Shop”.

Finalmente foram feitos os desenhos técnicos do subgrave, montagem e obtidos resultados experimentais e posterior avaliação.

Abstract

The design of loudspeakers is a large area in terms of knowledge and professional practice. Because of being a fairly mature technology area, was the reason why this study has been carried out and accomplished the survey of the state of the art. For further study, a subdomain where there is a very interesting development, the design of subwoofers with directional characteristics was chosen. Beyond of the theoretical study of sound reproduction was also studied the loudspeaker's behavior in enclosures. The recipients of the produced acoustic field perceive the produced sound and feel its features and semantic content through the sense of hearing. That's why the basis of audiology and psychoacoustics was also studied in order to correctly value the expected effects in terms of perception of the produced sound. The main noise signals, used in electroacoustic's industry, for measuring SPL and directivity, were also discussed as well as measurement techniques. Inherent to directivity are the polar dispersion patterns and so were also object of study in this thesis.

For acoustic simulation of the interaction of various sound sources in the X / Y plane an application was developed in MATLAB using the GUI tool. The developed application, ASI, enables its users a fast and accurate prediction of the distribution of sound pressure over a two-dimensional space.

The system architecture was developed taking into account simulations performed on the developed software followed by a simulation of the enclosure in "LEAP - Enclosure Shop". software. Finally were made technical drawings of the subwoofer, assembly process and achieved experimental results and subsequent evaluation.

Agradecimentos

O meu principal agradecimento vai, como não poderia deixar de ser, para a minha mãe, o meu pai e o meu irmão que foram o meu pilar nesta longa jornada académica e sempre me indicaram o melhor caminho a seguir. Sem eles nada disto teria sido possível e, agradeço-lhes do fundo do coração, por me terem proporcionado todos estes anos de estudo.

À Laurinha que, todos os dias de estudo, esteve ao meu lado e me incentivou e me ajudou a relaxar e descomprimir nas horas mais tensas.

Uma parte integrante deste meu sucesso foi o meu grande amigo Guilherme Rodrigues que me ajudou a superar as dificuldades e alguns momentos de frustração no estudo e por isso um agradecimento a ele também é merecido.

Gostaria de agradecer à empresa NEXT-proaudio e a todos os seus colaboradores, que gentilmente me cederam o espaço e meios para a realização deste projeto.

Um agradecimento final vai para a última pessoa que conheci durante este meu longo percurso, mas não menos importante, o meu professor orientador Diamantino Freitas que sempre me ajudou e incentivou a fazer mais e melhor.

UM SINCERO OBRIGADO!

“Success is stumbling from failure to failure with no loss of enthusiasm.” - Winston S. Churchill

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - O Problema	2
1.2 - O Objetivo.....	2
1.3 - Estado da Arte.....	3
Capítulo 2 - Sonodifusores.....	5
2.1 - Transdutores Eletrodinâmicos	5
2.2 - Caixas Acústicas.....	8
2.2.1 - Caixa Fechada	8
Circuito Acústico Equivalente	9
Impedância Elétrica	10
Alinhamentos.....	11
Dimensionamento da Caixa	11
2.2.2 - Caixa Bass-Reflex ou Vented-Box	12
Circuito Acústico Equivalente	15
Velocidade Volumétrica	15
Pressão Acústica	16
Impedância Elétrica	17
Alinhamentos.....	18
Dimensionamento da Caixa	19
2.2.3 - Caixa Passa-Banda	21
Circuito Acústico Equivalente	22
Velocidade Volumétrica	24
Pressão Acústica	25
Impedância Elétrica	26
Dimensionamento da Caixa Passa-Banda de 4ª Ordem	26
Dimensionamento da Caixa Passa-Banda de 6ª Ordem	28
Capítulo 3 - Radiação e Cobertura Sonora e Técnicas de Medição.....	31
3.1 - Tipologias de Ruído.....	31
3.2 - Técnicas de Medição	32
3.3 - Diagramas de Dispersão Polar	33
3.4 - Desenvolvimento de Ferramenta de Simulação Acústica	34
3.4.1 - Cálculos.....	36
Capítulo 4- Projeto e Construção do Sistema.....	41
4.1 - Arquitetura do Sistema	41
4.2 - Simulação da Caixa Acústica.....	45
4.2.1 - Simulação da Caixa Bass-Reflex	46
4.2.2 - Simulação da Caixa Passa-Banda	49

4.3 - Construção e Montagem do Sonodifusor	52
Capítulo 5 - Resultados Experimentais.....	55
Capítulo 6 - Conclusões e Trabalhos Futuros	61
Referências	63
Bibliografia.....	65
Anexos	67

Lista de Figuras

Figura 1 - Ilustração do corte longitudinal de um altifalante.....	5
Figura 2 - Circuito equivalente completo de um altifalante - Beranek, L. L (1993)	6
Figura 3 - Exemplo de curva de impedância de um altifalante.....	7
Figura 4 - Ilustração de uma caixa acústica fechada em corte longitudinal	8
Figura 5 - Circuito acústico equivalente de uma caixa fechada para baixas frequências - Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003)	9
Figura 6 - Exemplo de impedância elétrica de um altifalante em caixa fechada	10
Figura 7 - Ilustração de uma caixa acústica bass-reflex em corte longitudinal	12
Figura 8 - Comparação da resposta em frequência entre uma caixa fechada (a tracejado) e uma caixa bass-reflex (a cheio) com o mesmo volume e o mesmo altifalante	13
Figura 9 - Resposta em frequência da porta (a cheio) e do altifalante (a tracejado)	14
Figura 10 - Circuito acústico simplificado de uma caixa bass-reflex para baixas frequências - Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003)	15
Figura 11 - Exemplo de um gráfico de magnitude de impedância elétrica de entrada normalizada numa caixa bass-reflex.....	17
Figura 12 - Funções de transferência de alguns alinhamentos livres - Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003).....	18
Figura 13 - Acabamento da porta - The Subwoofer DIY Page (2006)	20
Figura 14 - Ilustração de uma caixa acústica passa-banda de 4ª ordem	21
Figura 15 - Ilustração de uma caixa acústica passa-banda de 6ª ordem	21
Figura 16 - Exemplo de resposta em frequência de uma caixa passa-banda e comparação com <i>baffle</i> infinito	22
Figura 17 - Circuito acústico simplificado de uma caixa passa-banda de 4ª ordem - Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003).....	23
Figura 18 - Circuito acústico simplificado de uma caixa passa-banda de 6ª ordem - Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003).....	23
Figura 19 - Exemplo de um gráfico de magnitude de impedância elétrica de uma caixa passa-banda	26
Figura 20 - Quadro I para dimensionamento da caixa passa-banda de 6ª ordem.....	28

Figura 21 - Quadro II para dimensionamento da caixa passa-banda de 6ª ordem	29
Figura 22 - Microfone de medição de precisão EarthWorks M30	32
Figura 23 - Prato para medição de dispersão (LinearX - LT360).....	32
Figura 24 - Painel de controlo do ASI.....	34
Figura 25 - Interface gráfica do software de simulação desenvolvido, ASI	35
Figura 26 - Resposta em fase e frequência do local de escuta	35
Figura 27 - Diagrama polar e indicadores de qualidade	36
Figura 28 - Representação gráfica de um fasor	37
Figura 29 - Fluxograma do algoritmo do software ASI.....	39
Figura 30 - Simulação com fase fixa de 90°	42
Figura 31 - Simulação com fase adaptativa	42
Figura 32 - Simulação com atraso temporal fixo	42
Figura 33 - Esquema da amplificação e processamento do sistema	43
Figura 34 - Exemplo de atenuação do sinal sonoro para um altifalante de 18".....	44
Figura 35 - Velocidade linear do ar na porta da caixa bass-reflex em função da frequência	47
Figura 36 - Excursão do altifalante na caixa bass-reflex em função da frequência.....	48
Figura 37 - Simulação 3D da caixa bass-reflex no <i>software</i> LEAP Enclosure Shop 5.2.....	48
Figura 38 - Resposta em frequência simulada da caixa bass-reflex	49
Figura 39 - Velocidade linear do ar nas portas da caixa passa-banda em função da frequência	50
Figura 40 - Excursão do altifalante na caixa passa-banda em função da frequência.....	51
Figura 41 - Simulação 3D da caixa passa-banda no <i>software</i> LEAP Enclosure Shop 5.2	51
Figura 42 - Resposta em frequência simulada da caixa passa-banda.....	52
Figura 43 - Desenho técnico das peças integrantes do projeto e corte lateral do caixa acústica	52
Figura 44 - Vista em 3D da parte frontal e traseira do sonodifusor executada em SOLIDWORKS	53
Figura 45- Calibração do microfone através da função multímetro do CLIO 10	55
Figura 46 - Curva de sensibilidade da caixa passa-banda (laranja) e da caixa bass-reflex (verde)	56
Figura 47 - Esquema de medição do diagrama polar	57

Figura 48 - Gráfico polar do subgrave cardióide às frequências ISSO 266 (25 Hz a 40 Hz)	58
Figura 49 - Gráfico polar do subgrave cardióide às frequências ISSO 266 (50 Hz a 100 Hz)	58
Figura 50 - Diagrama de diretividade colorido	59
Figura 51 - Comparação das curvas de resposta da caixa bass-reflex (verde) e subgrave cardióide (vermelho)	59

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Descrição das diferentes aplicações consoante o valor de QTS do altifalante ...	8
Tabela 2 - Estimação dos valores de QMC, fator de qualidade mecânico de uma caixa fechada Electroacústica: altavoces y micrófonos (2003)	11
Tabela 3 - Fator de correção de acabamento da porta	20
Tabela 4 - Relação entre Q4 e Δf para uma caixa passa-banda (Ortega, B. P. and M. R. Romero, 2003)	27
Tabela 5 - Diagramas de dispersão polar e suas características. The Microphone Book, Second Edition (Focal Press, 2004).....	33
Tabela 6 - Coeficientes em ai contidos na equação da velocidade do som	38

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

ASI	Acoustical Simulation Interface
BFR	Rácio Frente-Trás
DI	Índice de Diretividade
DSP	Processador de Sinal Digital
SPL	Nível de Pressão Sonora

Lista de símbolos

Δf	Largura de banda normalizada de uma caixa Passa-Banda
A_v	Área da porta (cm^2)
b	Comprimento da base do triângulo (cm)
Bl	Produto da força do íman pelo comprimento do fio no campo magnético (T.m)
c	Velocidade do som (344.2 m/s a 22°C)
C_{AB}	Compliância acústica do volume V_{AB} (m^5/N)
C_{AB1}	Compliância acústica do volume anterior de uma caixa Passa-Banda (m^5/N)
C_{AB2}	Compliância acústica do volume posterior de uma caixa Passa-Banda (m^5/N)
$C_{AC(1)}$	Compliância acústica total da caixa fechada (m^5/N)
C_{AE}	Compliância acústica que modeliza a indutância da bobina (m/N)
C_{AS}	Compliância acústica da suspensão do diafragma (m^5/N)
C_{MS}	Compliância mecânica de um altifalante (m/N)
f_0	Frequência central de uma caixa Passa-Banda (Hz)
$f_{1,2}$	Frequência inferior e superior de sintonia caixa Passa-Banda (Hz)
f_b	Frequência de ressonância de uma caixa aberta (Hz)
f_c	Frequência de ressonância de uma caixa aberta (Hz)
f_s	Frequência de ressonância de um altifalante em plano infinito (Hz)
F	Fator de intensificação
h	Sintonia de uma caixa aberta (f_b/f_s)
ht	Altura do triângulo (cm)
humi	Porcentagem de humidade no ar
K	Fator de correção de acabamento da porta

LE	Indutância da bobina (H)
LV	Comprimento da porta em caixas abertas e passa-banda (cm)
MA4	Massa acústica do diafragma e dos recintos de uma caixa Passa-Banda de 4ª ordem (Ns^2/m^5)
MA6	Massa acústica do diafragma e dos recintos de uma caixa Passa-Banda de 6ª ordem (Ns^2/m^5)
MAB	Massa acústica do ar que se move no interior da caixa (Ns^2/m^5)
MAC	Massa acústica do diafragma e da carga de ar numa caixa (Ns^2/m^5)
MAD	Massa acústica do diafragma (Ns^2/m^5)
MAR	Massa acústica da carga do ar sobre um pistão em plano infinito (Ns^2/m^5)
MAS	Massa acústica da carga de ar sobre um pistão em plano infinito (Ns^2/m^5)
MAV	Massa acústica do tubo de uma caixa aberta ou passa-banda (Ns^2/m^5)
MMD	Massa mecânica do diafragma (Ns^2/m)
Mms	Massa do cone do altifalante (g)
Np	Número de portas da caixa aberta
p	Pressão atmosférica
P0	Pressão estática do ar ($1.013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$)
PSV	Fator de pressão de saturação do vapor de água no ar
Q	Fator de qualidade
QEC	Fator de qualidade elétrico de uma caixa fechada
QES	Fator de qualidade elétrico de um altifalante em plano infinito
QL	Fator de qualidade do recinto de uma caixa aberta
QMC	Fator de qualidade mecânico de uma caixa fechada
QMS	Fator de qualidade mecânico de um altifalante em plano infinito
QTC	Fator de qualidade total de uma caixa fechada
QTS	Fator de qualidade total de um altifalante em plano infinito
R	Raio de um tubo cilíndrico (cm)
RAB	Resistência acústica do material absorvente (Ns/m^5)
RAC	Resistência acústica do altifalante e material absorvente numa caixa fechada (Ns/m^5)
RAE	Resistência acústica das perdas elétricas (Ns/m^5)
RAL	Resistência acústica de fugas de ar de uma caixa
RAS	Resistência acústica da suspensão de um altifalante
RE	Resistência da bobina (Ω)
Rg	Resistência do gerador equivalente de Thevenin (Ω)
rMS	Inverso da resistência mecânica do sistema de suspensão ($m/(Ns)$)
Sd	Área do cone do altifalante (m^2)
Sv	Superfície do tubo em caixas acústicas (m^2)
t	Temperatura ambiental ($^{\circ}C$)
U0	Velocidade volumétrica líquida de uma caixa aberta (m^3/s)

U_B	Velocidade volumétrica de uma caixa aberta (m^3/s)
U_D	Velocidade volumétrica gerada pelo diafragma (m^3/s)
U_L	Velocidade volumétrica por fugas (m^3/s)
U_V	Velocidade volumétrica gerada pelo tubo de uma caixa (m^3/s)
V_{AB}	Volume de ar requerido de uma caixa (m^3)
$V_{AB1,2}$	Volume dos recintos traseiro e dianteiro de uma caixa Passa-Banda (m^3)
V_{AS}	Volume de ar equivalente à compliância de um altifalante (m^3)
V_b	Volume da caixa Bass-Reflex (L)
V_D	Volume de ar movimentado pelo cone do altifalante (m^3)
x_c	Fração molar de dióxido de carbono
x_w	Fração molar do vapor de água
W	Potência aplicada ao altifalante (W)
X_{max}	Excursão máxima do altifalante (mm)
α	Proporção de complacências C_{AS}/C_{AB}
α_2	Proporção de complacências de uma caixa Passa-Banda de 4ª ordem C_{AS}/C_{AB}
γ	Constante termodinâmica (1.4 em processos isotérmicos e 1 em processos adiabáticos)
λ	Comprimento de onda (m)
ρ_0	Densidade do ar ($1.21 \text{ kg}/m^3$)
ω_0	Frequência angular central de uma caixa passa-banda (rad/s)
ω_B	Frequência angular de ressonância de Helmholtz numa caixa aberta (rad/s)
ω_c	Frequência angular de ressonância da caixa (rad/s)
ω_s	Frequência angular de ressonância de um altifalante em plano infinito (rad/s)

Capítulo 1 - Introdução

Nos primeiros anos da radiodifusão comercial, a conversão de energia elétrica em energia acústica só se realizava por meio de auscultadores telefônicos. Foi em 1924, que os cientistas americanos C. W. Rice e E. W. Kellogg inventaram e construíram o primeiro sonodifusor eletrodinâmico, devido ao desenvolvimento operado nos sistemas amplificadores de válvulas eletrônicas que tornou possível o funcionamento dos sonodifusores. A partir dessa altura, a técnica de construção dos sonodifusores tem vindo gradualmente a ser aperfeiçoada com o objetivo de se conseguir a reprodução do som com a melhor fidelidade possível e portanto com a melhor resposta em fase e frequência possível.

Um altifalante é um dispositivo transdutor que converte um sinal elétrico em acústico i.e. ondas sonoras. Estes dispositivos são divididos em classes por faixas de frequência de trabalho: *tweeter*, *mid-range* e *woofer* reproduzindo sons agudos (altas frequências), médios (médias frequências) e graves (baixas frequências) respetivamente. É sabido que os sons audíveis pelo ser humano, embora varie de indivíduo para indivíduo e com a idade, estão, na generalidade, compreendidos entre as frequências de 20 Hz e de 20 kHz. O ouvido humano possui uma característica de sensibilidade [Anexo 1] não linear ao longo desse intervalo de frequências, ou seja o mesmo SPL a diferentes frequências produz sensações auditivas de intensidades diferentes. A maior sensibilidade pode encontrar-se na gama de frequências entre os 2 kHz e os 4 kHz e o limiar auditivo é de 20 micropascal (0 dB).

A reprodução dos sons de muito baixas frequências necessita de caixas acústicamente grandes e de altifalantes indicados para o efeito (grande diâmetro do cone e grande excursão). Para que o volume das caixas acústicas dos sonodifusores de gama completa (*Full-Range*) não fosse afetado e estas ficassem demasiadamente grandes, foi criado um dispositivo para reproduzir, exclusivamente os sons ditos subgraves. Este novo dispositivo, com características específicas, é denominado de *subwoofer*. A reprodução dessas frequências é conseguida através da aplicação do altifalante (*woofer*) numa caixa acústica com características específicas para o efeito (p.ex. grande volume interno). A motivação para esta dissertação foi o melhoramento e aumento do rendimento da reprodução das frequências subgraves dotando as caixas acústicas de características diferentes das convencionais principalmente no respeitante à direcionalidade.

1.1 - O Problema

As caixas acústicas reprodutoras de sons subgraves convencionais apresentam um enorme problema que pode ser corrigido qualificando o produto muito acima do comum.

O grande problema é a sua radiação sonora ser quase omnidirecional querendo isto dizer que não há controlo da dispersão acústica originando desperdício de energia. Este fenómeno deve-se aos comprimentos de onda em que o subgrave opera serem demasiado grandes (3 m a 17 m) quando comparados com a dimensão da fonte sonora. Tanto em recintos abertos como fechados a não controlabilidade da dispersão pode ter efeitos negativos na radiação sonora assim como distorcer o som captado pelos microfones.

1.2 - O Objetivo

Em geral, diz-se que um sonodifusor irradia com um padrão esférico quando a potência acústica por unidade geométrica de ângulo sólido (densidade angular de potência) é uniforme em função da orientação geométrica considerada para a observação, relativamente ao eixo principal do sonodifusor. Outros padrões são possíveis e até desejados de forma que a distribuição de potência acústica por unidade geométrica seja assimétrica e permita assim produzir pressões sonoras diferentes em espaços em volta do sonodifusor.

Um exemplo de padrão geométrico de radiação é o cardióide, no qual se verifica que a distribuição da densidade de potência radiada para a frente é superior à que é gerada para trás. O padrão cardióide, célebre pela sua forma em coração, é representado matematicamente pela equação $\rho = (0.5 + 0.5\cos(\sigma))$, onde σ representa o ângulo no plano de referência, em radianos, no caso atual será o plano horizontal.

É objetivo de estudo desta dissertação a redução do som produzido pelo *subwoofer* na sua parte traseira, otimizando também o som radiado frontalmente, obtendo assim um diagrama de radiação do tipo cardióide, hipercardióide ou similar. O aumento da diretividade em *subwoofers* origina diversas vantagens por haver redução da emissão de ondas em direções não desejadas concentrando assim a energia sonora nos locais pretendidos.

1.3 - Estado da Arte

Hoje em dia o *subwoofer* é utilizado em quase todas as aplicações sonoras desde concertos e Home Cinema até aos mais recentemente aplicados em computadores portáteis.

Há várias situações em que o *subwoofer* direcional pode ser útil. Por exemplo, em espaços interiores, quando são usados subgraves convencionais, com uma parede atrás, a onda traseira gerada pelo sonodifusor refletir-se-á e interferências acontecerão na frente do sonodifusor (não esquecer que os *subwoofers* ditos convencionais têm uma dispersão quase omnidirecional). Por outras palavras, a onda refletida na parede chegará com uma diferença de tempo em relação à onda frontal i.e. haverá uma diferença de fase entre as duas ondas que causará interferências construtivas ou destrutivas dependendo do local onde o ouvinte se encontra, degradando a uniformidade da resposta em amplitude do sistema e criando uma correspondente não uniformidade do SPL no espaço. Um subgrave cardióide, que pressupõe uma baixa radiação sonora para a parte traseira, minimizará este efeito. Ao ar livre, a configuração cardióide, também tem vantagens sobre os subwoofers convencionais. Normalmente, em concertos, os subgraves ocupam uma posição na parte frontal do palco. Como os subwoofers convencionais irradiam em todas as direções, uma parte das baixas frequências reproduzidas por estes sonodifusores, acabará por irradiar sobre o palco. Este efeito complica o trabalho da engenharia de som assim como o dos músicos uma vez que ficam expostos a som de reforço com valores de pressão acústica de baixas frequências geralmente elevados. Estas mascaram de forma muito prejudicial os sons reproduzidos pelos diversos instrumentos provocando uma menor fidelidade dos sons captados pelos microfones. Uma vez que as frequências baixas são captadas pelos microfones, o “feedback” de graves acaba por acontecer bastante cedo. Ao usar-se subwoofers cardióides, a radiação traseira é atenuada significativamente, aumentando o valor do ganho possível até à ocorrência de “feedback” (denominado margem de ganho acústico) e diminuindo o efeito de *sound masking*. Assim, tanto o trabalho da engenharia de som como o dos músicos pode ser facilitado. O resultado final é uma significativa melhoria no som percebido pelo ouvinte/espectador que assiste ao concerto.

Após uma análise de mercado pôde concluir-se que já existem algumas marcas de equipamentos de áudio profissional que usam o conceito de controlo de dispersão nos seus *subwoofers*. Referindo apenas algumas, as mais conhecidas, temos por exemplo a Electro Voice com o modelo “XCS 312” (XCS312 Triple 12” cardioid bass element, 2015), a D&B com o modelo “B4 Subwoofer” (B4 Subwoofer, 2015) e a NEXO com o “CD12” (CD12 Cardioid Dipolar Subbass, 2015). Estas três empresas aplicam o conceito de diretividade controlada aos seus subgraves de formas diferentes no entanto, por falta de informação disponibilizada pelas mesmas, não foi possível conhecer quais os seus métodos construtivos.

Capítulo 2 - Sonodifusores

2.1 - *Transdutores Eletrodinâmicos*

O transdutor eletrodinâmico é um dispositivo capaz de converter energia elétrica, proveniente de um amplificador, em energia acústica (ondas sonoras). A corrente elétrica alternada passa através da bobina criando um campo magnético que irá interferir com o campo magnético criado pelo ímã permanente. Consoante o sentido da corrente elétrica na bobina serão criados alternadamente pólos magnéticos positivos e negativos que por atração e repulsão magnética com o ímã permanente geram o movimento do cone. Este movimento tem a mesma frequência que a corrente que passa na bobine gerando diferentes sons consoante as frequências a que vibra. A Figura 1 representa o corte transversal de um altifalante para uma melhor compreensão do funcionamento deste dispositivo

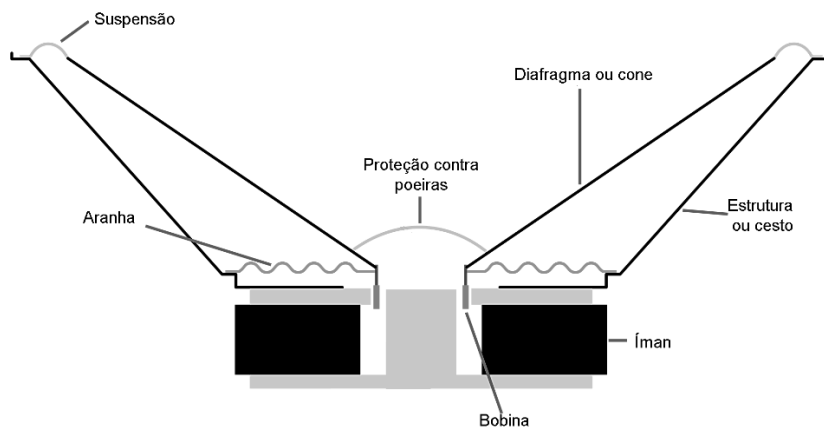


Figura 1 - Ilustração do corte longitudinal de um altifalante

A bobina encontra-se ligada fisicamente ao cone do altifalante, elemento responsável pelo movimento do ar. O cone está por sua vez ligado ao cesto (estrutura metálica) por meio de uma suspensão.

Um conjunto de parâmetros, o mais reconhecido a nível global, foi originalmente definido por Albert Neville Thiele e aperfeiçoado por Richard H. Small, permitindo a criação de um circuito elétrico equivalente que modeliza as características do altifalante nos seus sectores elétrico, mecânico e acústico. A Figura 2 mostra como estes três circuitos se relacionam entre si (Beranek, L. L., 1993). E as equações seguintes relacionam alguns dos mais importantes destes parâmetros (Ortega, B. P. and M. R. Romero, 2003). Normalmente, estes parâmetros são fornecidos pelo fabricante do altifalante.

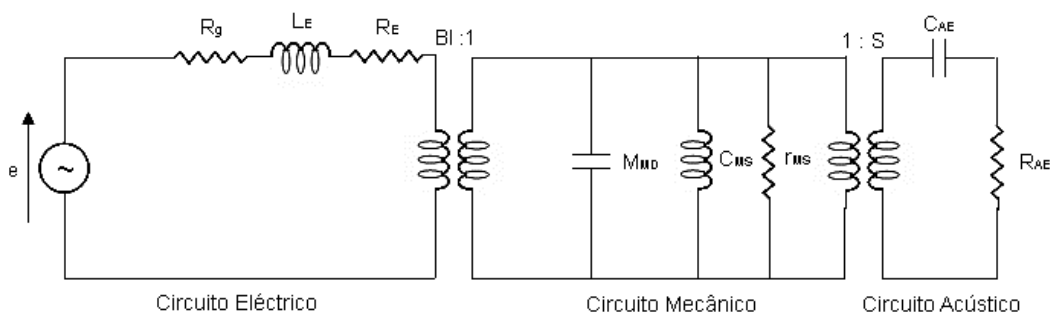


Figura 2 - Circuito equivalente completo de um altifalante - Beranek, L. L (1993)

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ms} * C_{ms}}} \quad (1)$$

$$Q_{es} = \frac{2\pi * F_s * M_{ms} * R_E}{B l^2} \quad (2)$$

$$Q_{MS} = \frac{2\pi * F_s * M_{ms}}{R_{ms}} \quad (3)$$

$$Q_{TS} = \frac{Q_{ES} Q_{MS}}{Q_{ES} + Q_{MS}} \quad (4)$$

$$V_{AS} = \rho * c^2 * S_d^2 * C_{ms} \quad (5)$$

Os valores destes parâmetros são determinados medindo-se a impedância de entrada do altifalante com pequenos sinais de entrada para os quais o comportamento do altifalante é praticamente linear - ou seja proporcional à entrada. Através da equação (1) mede-se a frequência de ressonância do altifalante, as equações (2 e 3) são passos intermédios para o cálculo da equação (4), que representa o quão controlável o cone é. Por fim, através da equação (5) pode calcular-se o quão controlado o cone é (em litros). Há também alguns parâmetros de grandes sinais que são igualmente importantes como X_{max} e $V_d = S_d * X_{max}$. X_{max} é a máxima excursão atingida pelo altifalante e V_d é o volume de pico-a-pico deslocado pelo movimento do cone do altifalante.

Normalmente, estes parâmetros são fornecidos pelo fabricante do altifalante por forma a serem utilizados posteriormente, pelo utilizador, por exemplo num software de simulação de caixas acústicas.

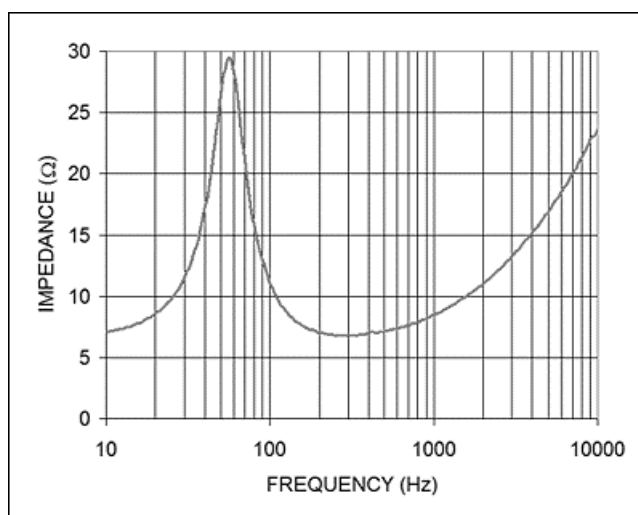


Figura 3 - Exemplo de curva de impedância de um altifalante

A Figura 3 é representativa de uma curva de impedância de um altifalante resultante do módulo da impedância equivalente do esquema elétrico (Figura 2).

Um altifalante operando em espaço aberto (i.e. sem caixa acústica) tem duas grandes limitações:

- O movimento alternado do cone do altifalante gera duas ondas sonoras, uma frontal e outra traseira, desfasadas em 180°. Não existindo isolamento entre as superfícies anterior e posterior do cone, serão consideravelmente canceladas todas as ondas cujo comprimento de onda seja superior ao diâmetro do altifalante.

- A utilização do altifalante em espaço aberto não permite o “controlo” da excursão do cone, pelo que facilmente este ultrapassará a sua excursão máxima causando um elevado nível de distorção harmónica podendo mesmo levar à destruição do dispositivo. Este fenómeno é atenuado montando o altifalante numa caixa acústica devidamente dimensionada a partir dos valores dos parâmetros Thiele/Small.

2.2 - Caixas Acústicas

O desenho das caixas acústicas tem sido objeto de amplo estudo desde os inícios da utilização dos altifalantes. Podem ser encontradas várias tipologias de caixa acústica cujas características diferem largamente, entre elas destacam-se, por serem as mais utilizadas na indústria, as caixas dos tipos: fechada, bass-reflex, passa-banda, em corneta e radiador passivo. Tendo em conta o objetivo deste estudo, serão apenas abordadas as tipologias que mais se enquadram neste tema (fechada, bass-reflex e passa-banda). Na Tabela 1 estão indicados os intervalos do valor de Q_{TS} e suas aplicações adequadas de acordo com Peter Strassacker (2004).

Tabela 1 - Descrição das diferentes aplicações consoante o valor de Q_{TS} do altifalante

Valor de Q_{TS}	Descrição	Adequado para caixas do tipo:
0.2-0.4	Altifalante muito duro	Corneta (Horn-loaded)
0.3-0.5	Altifalante duro	Bass-Reflex e Corneta
0.4-0.6	Altifalante médio	Fechada
0.5-0.7	Altifalante mole (frágil)	Linha de Transmissão/Dipolo

2.2.1 - Caixa Fechada

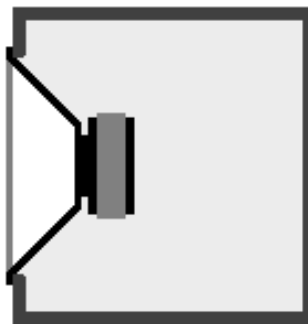


Figura 4 - Ilustração de uma caixa acústica fechada em corte longitudinal

A caixa fechada (Figura 4) impede que a onda traseira interfira com a onda gerada na parte frontal do altifalante ao mesmo tempo que aumenta a rigidez, ou inversamente diminui a compliância, através da compressão do ar no interior da caixa, “controlando” a excursão do cone do dispositivo. O resultado de um bom desenho da caixa não só alarga a extensão da reprodução a frequências baixas como também aumenta o “controlo” da excursão do cone do altifalante a elevadas potências.

O ar dentro da caixa estará exposto a compressões e expansões conforme o movimento do cone do altifalante. Quando o volume da caixa for reduzido o ar estará sujeito a maiores pressões pelo que, se poderá dizer, que o altifalante se comporta como se as suas suspensões ficassem mais rígidas, baixando a compliância e consequentemente subindo a frequência de ressonância do conjunto equação (1). A utilização de material absorvente no interior da caixa permite a absorção das ondas acústicas internas dissipando a sua energia por conversão em calor, diminuindo assim a compressão no interior da caixa. Acusticamente, uma caixa com material absorvente no seu interior transforma-se numa caixa de maior volume baixando a frequência de ressonância do conjunto (altifalante + caixa acústica). Este fenómeno é explicado pelo facto de a velocidade do som em processos isotérmicos ser inferior à velocidade em processos adiabáticos pelo que a onda demora mais tempo a alcançar a parede da caixa.

Circuito Acústico Equivalente

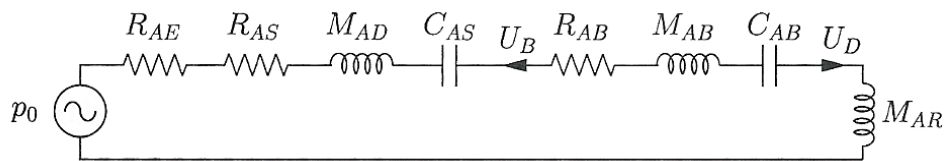


Figura 5 - Circuito acústico equivalente de uma caixa fechada para baixas frequências - Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003)

A Figura 5 representa o circuito acústico equivalente de uma caixa fechada considerando os quatro elementos intervinientes neste tipo de montagem: o altifalante, a caixa, o ar no interior da caixa e o ar no exterior da caixa. R_{AE} , R_{AS} , M_{AD} e C_{AS} dizem respeito ao altifalante, R_{AB} , M_{AB} e C_{AB} são dependentes do ar no interior da caixa e M_{AR} é a massa acústica da carga do ar sobre um pistão em plano infinito. As correntes equivalentes U_B e U_D representam o movimento do cone do altifalante para trás e para a frente respetivamente.

$$C_{AB} = \frac{V_{AB}}{\rho_0 c^2} = \frac{V_{AB}}{\gamma P_0} \quad (6)$$

A compliância acústica do volume (C_{AB}) é calculada na equação (6) e depende diretamente do volume da caixa, V_{AB} . R_{AB} é a resistência acústica do material absorvente que dependerá do tipo de material. M_{AB} modeliza o movimento do ar em volta do diafragma que pode ser desprezado numa análise mais simplificada do modelo.

$$R_{AC} = R_{AS} + R_{AB} \quad (7)$$

$$M_{AC} = M_{AD} + M_{AB} + M_{AR} \quad (8)$$

$$C_{AC} = \frac{C_{AS} \cdot C_{AB}}{C_{AS} + C_{AB}} \quad (9)$$

Pela equação (7) se conclui que R_{AC} é a resistência total da caixa+altifalante sendo a resistência equivalente de duas resistências em série. A equação (8) soma as 3 bobinas em série obtendo-se a massa acústica total (M_{AC}). Pela equação (9) obtém-se a compliância total (C_{AC}) da caixa fazendo a combinação de dois condensadores em série.

Impedância Elétrica

Na Figura 6 está representada a curva de impedância característica de uma caixa fechada que, como seria de prever, apenas tem um pico de impedância à frequência de ressonância da caixa. A frequência a que o pico ocorre depende da frequência de ressonância do altifalante, do quão controlado é o movimento do cone e do volume da caixa (equação 15).

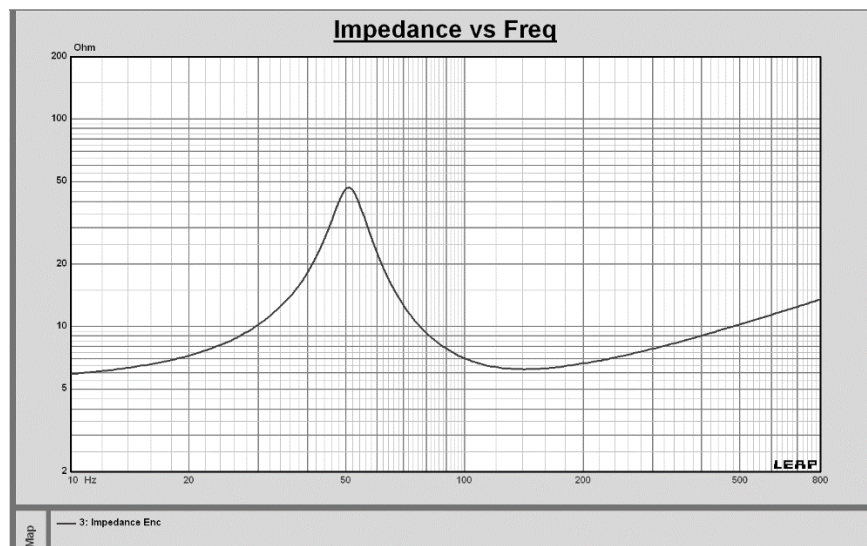


Figura 6 - Exemplo de impedância elétrica de um altifalante em caixa fechada

Alinhamentos

Mediante a análise do circuito elétrico (Figura 5) pode concluir-se que a sua função de transferência exhibe um pendente de subida de 12 dB/oitava.

O fator de qualidade de uma caixa fechada, Q_{TC} , é um elemento importante para o seu dimensionamento afetando a sua resposta às baixas frequências quer em fase quer em amplitude proporcionando diversos alinhamentos. Embora o valor de Q_{TC} possa variar entre 0.5 e 1.5, o seu valor nunca deve ser superior a Q_{TS} . Existem valores normalizados definidos como alinhamentos típicos: Bessel ($Q_{TC}=0.577$), Butterworth ($Q_{TC}=0.707$) ou Chebyshev ($0.707 < Q_{TC} < 1.5$).

O valor de $Q_{TC}=0.707$ é geralmente considerado um alinhamento ótimo com muito boa resposta transitória, extensa às frequências mais baixas e resposta mais linear. A variável α , da equação (12), é fundamental no desenho porque permite estimar o efeito de aumento da frequência de ressonância do conjunto altifalante + caixa acústica.

Dimensionamento da Caixa

O dimensionamento da caixa é a fase mais importante do projeto pois é neste passo que se define e otimiza as características acústicas do sonodifusor.

Tabela 2 - Estimação dos valores de Q_{MC} , fator de qualidade mecânico de uma caixa fechada Electroacústica: altavoces y micrófonos (2003)

Q_{MC}	Caixa Pequena ($V_{AB} < 20L$)	Caixa Média ($20L < V_{AB} < 200L$)	Caixa Grande ($V_{AB} > 200L$)
Sem mat. absorvente	10	7.5	5
Com mat. absorvente	5	3.5	2

$$Q_{TC} = \omega_c \cdot \frac{M_{AC}}{R_{AE} + R_{AC}} \quad (10)$$

$$Q_{EC} = \frac{Q_{MC} Q_{TC}}{Q_{MC} - Q_{TC}} \quad (11)$$

Após obtenção do fator de qualidade de uma caixa fechada, Q_{TC} (equação 10), deve escolher-se um valor de Q_{MC} de acordo com a Tabela 2 e calcular-se o fator elétrico do sistema, Q_{EC} , através da equação (11). A relação de compliâncias é calculada pela equação (12).

$$\alpha = \left(\frac{Q_{EC}}{Q_{ES}}\right)^2 - 1 \quad (12)$$

$$f_c \cong f_s * \sqrt{1 + \alpha} \quad (13)$$

$$V_{AB} = \frac{V_{AS}}{\alpha} \quad (14)$$

A frequência de ressonância da caixa acústica e o seu volume são obtidos pelas equações (13 e 14), respetivamente, em que f_s é a frequência de ressonância do altifalante. Por dedução matemática das equações anteriores conclui-se que o valor de f_c , frequência de ressonância da caixa fechada, pode também ser calculado pela equação (15).

$$f_c = \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_{AB}} + 1} * f_s \quad (15)$$

Pela equação (15) se depreende que, aumentando o volume da caixa, V_{AB} , f_c diminui, ou seja, mais baixa será a frequência a que ocorre o pico de impedância representado pela Figura 6.

2.2.2 - Caixa Bass-Reflex ou Vented-Box

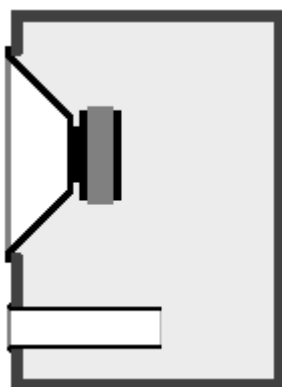


Figura 7 - Ilustração de uma caixa acústica bass-reflex em corte longitudinal

O sistema de caixa bass-reflex (Figura 7) consiste numa caixa acústica com uma abertura em forma de túnel ou orifício por onde o ar se move para dentro e para fora em resposta às

variações de pressão no interior da caixa. A massa de ar na abertura ressoa com a “elasticidade” do ar no interior da caixa, exatamente da mesma forma que uma garrafa ressoa quando uma corrente de ar é direcionada à sua abertura formando uma relação acústica massa-mola. A frequência a que a caixa ressoa, conhecida como frequência de ressonância de Helmholtz (f_b), depende do volume da caixa, da área da porta e do seu comprimento.

A ideia desta tipologia de caixa acústica é aumentar e estender a resposta da caixa às baixas frequências. A massa acústica no interior do tubo, M_{AV} , é dada pela equação (16)

$$M_{AV} = \frac{\rho_0 L_V}{S_V} \quad (16)$$

onde L_V e S_V representam o comprimento e área da porta, respectivamente.

A frequência de sintonia da caixa é calculada através da equação 17.

$$f_B = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{AV}C_{AB}}} \quad (17)$$

onde C_{AB} representa a compliância acústica do volume V_{AB} .

Este tipo de caixa apresenta algumas vantagens relativamente à caixa fechada com dimensão equivalente, possuindo uma frequência de corte mais baixa e um SPL máximo mais elevado até essa frequência utilizando o mesmo altifalante (Figura 8). No entanto este tipo de caixas necessitam de um dimensionamento mais cuidado do que as fechadas.

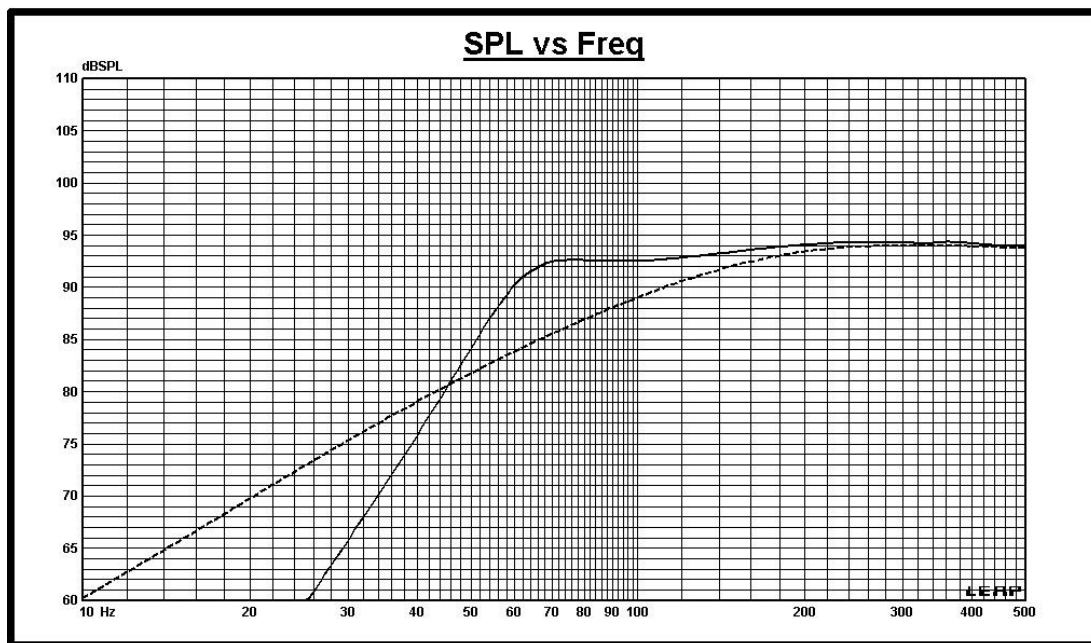


Figura 8 - Comparação da resposta em frequência entre uma caixa fechada (a tracejado) e uma caixa bass-reflex (a cheio) com o mesmo volume e o mesmo altifalante

À frequência de ressonância da caixa a maior parte da pressão sonora é gerada pelo tubo. O altifalante também produz algum SPL porém, a sua excursão é limitada porque a energia está a ser utilizada para excitar o ressonador. A relação entre as fases das ondas geradas é tal que o som gerado pelo tubo interfere construtivamente com o som gerado pelo altifalante, aumentando o SPL disponível. Isto traduz-se também num incremento de potência que é possível injetar no altifalante a essa frequência antes de ocorrer distorção. Contudo, a frequências acima da ressonância, a massa de ar no tubo e a compliância do ar na caixa deixam de ter uma relação produtiva. A causa deriva do ar no interior do tubo ser uma massa, e toda a massa se torna difícil de movimentar com o aumento da frequência de oscilação. No extremo, a massa de ar no tubo funciona como um tampão. Desta forma, a caixa, a frequências acima da sua sintonia, funciona como uma caixa fechada. A frequências abaixo da frequência de ressonância da caixa, a massa de ar do tubo começa a movimentar-se mais facilmente. No interior da caixa, o ar não se comprime como uma mola fazendo com que o altifalante e a porta trabalhem fora de fase i.e. quando o cone do altifalante se movimenta para a frente, o ar desloca-se para dentro da caixa pela porta. De igual modo, o ar desloca-se para fora da caixa pela porta quando o cone do altifalante se movimenta para trás. Portanto, às baixas frequências, a excursão do diafragma deixa de ser “controlável” pela compliância do ar na caixa. Por forma a evitar este regime de funcionamento, a sintonia da frequência de ressonância da porta deverá ser muito próxima da frequência mais baixa a que o *subwoofer* irá operar. Na Figura 9 é possível observar um exemplo do contributo do altifalante e porta para a resposta em frequência da caixa bass-reflex.

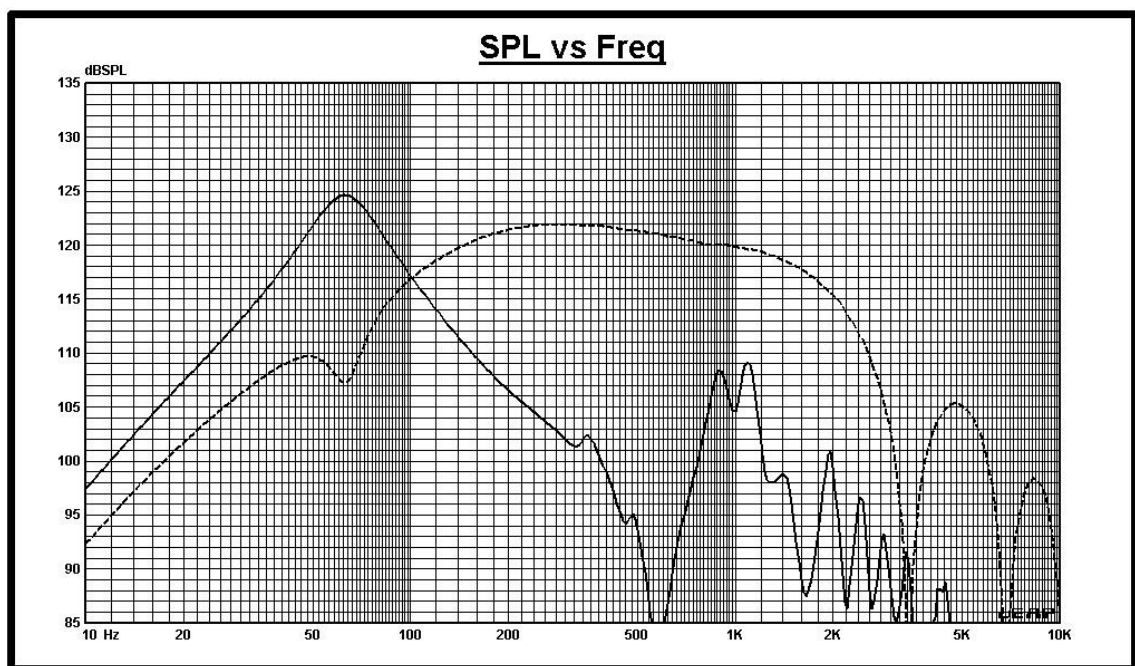


Figura 9 - Resposta em frequência da porta (a cheio) e do altifalante (a tracejado)

Circuito Acústico Equivalente

O circuito acústico equivalente para uma caixa bass-reflex está abaixo representado na Figura 10. Basicamente os elementos constituintes do circuito elétrico e mecânico são os mesmos que na caixa fechada. Na parte acústica existem três ramos em paralelo que modelizam os efeitos da caixa, do tubo e das perdas na caixa. O elemento C_{AB} é igual ao da caixa fechada.

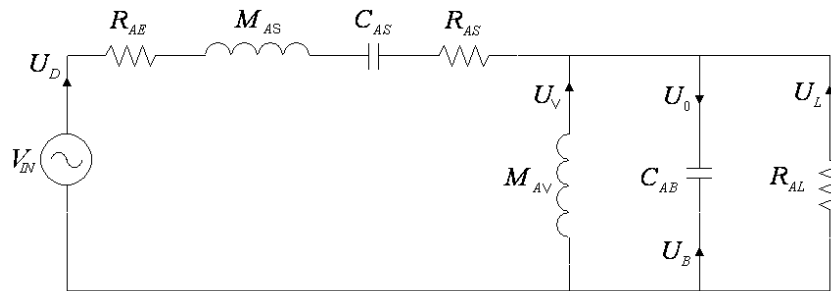


Figura 10 - Circuito acústico simplificado de uma caixa bass-reflex para baixas frequências - Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003)

Velocidade Volumétrica

Ao contrário da caixa fechada, existem diversas fontes de velocidade volumétrica que irradiam para o ambiente exterior.

A velocidade volumétrica total, vista no esquema acústico (Figura 10) como U_0 , é a soma de todas as velocidades volumétricas criadas pelo diafragma, pela porta e pelas fugas. Pela análise do circuito da Figura 10 e aplicando a lei dos nós de Kirchhoff obtém-se:

$$U_0 = -U_B = U_D + U_V + U_L \quad (18)$$

Analisando a equação 18 é possível concluir que a velocidade volumétrica total, U_0 , é igual à soma das velocidades volumétricas criadas pelo cone do altifalante, pelo tubo e pelas fugas. Da mesma forma se conclui que está desfasada 180° com a velocidade volumétrica gerada no interior da caixa, U_B .

Pressão Acústica

A função de transferência de uma caixa bass-reflex tem uma estrutura semelhante a um filtro passa-alto de 4ª ordem (24 dB/oitava) pelo que será necessário o uso de um filtro passa-baixo, ativo ou passivo, para limitar a resposta em frequência da caixa. $G_V(s)$ é a função de transferência de pressão da caixa bass-reflex e é dada pela equação (19) (Ortega, B. P. and M. R. Romero, 2003).

$$G_V(s) = \frac{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^4}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^4 + a_3 \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^3 + a_2 \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + a_1 \left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1} \quad (19)$$

Os coeficientes em “a_i” são dados pela equação (20), a relação de compliâncias, α , vem na equação (21). ω_0 é calculado através de ω_B e ω_S (equação 22) na equação (23) e h , frequência de sintonia de uma caixa aberta, é o quociente de ω_B por ω_S (equação 24). Os parâmetros de Q_L e Q_{TS} são calculados nas equações (25 e 26), respetivamente.

$$a_1 = \frac{1}{Q_L \sqrt{h}} + \frac{\sqrt{h}}{Q_{TS}}; a_2 = h + \frac{\alpha + 1}{h} + \frac{1}{Q_{TS} Q_L}; a_3 = \frac{1}{Q_{TS} \sqrt{h}} + \frac{\sqrt{h}}{Q_L} \quad (20)$$

$$\alpha = \frac{C_{AS}}{C_{AB}} = \frac{V_{AS}}{V_{AB}} \quad (21)$$

$$\omega_B = \frac{1}{\sqrt{M_{AV} \cdot C_{AB}}}; \omega_S = \frac{1}{\sqrt{M_{AS} \cdot C_{AS}}} \quad (22)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_B \cdot \omega_S} \quad (23)$$

$$h = \frac{\omega_B}{\omega_S} \quad (24)$$

$$Q_L = R_{AL} \sqrt{\frac{C_{AB}}{M_{AV}}} \quad (25)$$

$$Q_{TS} = \frac{1}{R_{AE} + R_{AS}} \sqrt{\frac{M_{AS}}{C_{AS}}} \quad (26)$$

Desta forma, a resposta da caixa bass-reflex é dependente dos coeficientes a_1 , a_2 e a_3 cujos valores numéricos determinam o tipo de ajuste da caixa. O valor das perdas da caixa, Q_L , pode ser estimado de acordo com o seu volume. Uma caixa de volume moderado, entre 20 e 80 L, tem $Q_L=7$, para volumes superiores usa-se $Q_L=3$, para volumes inferiores a 20 L, $Q_L=15$.

Impedância Elétrica

A impedância elétrica de entrada de um altifalante numa caixa bass-reflex é dada pela equação 27 (Leach, W. Marshall, Jr (2001)).

$$Z_{ee}(s) = R_E + sL_E + R_{ES} \frac{\frac{1}{Q_{MS}} \frac{s}{\omega_s} \left[\left(\frac{s}{\omega_s}\right)^2 + \frac{1}{Q_L} \frac{s}{\omega_s} + 1 \right]}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^4 + b_3 \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^3 + b_2 \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + b_1 \left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1} \quad (27)$$

R_E é a resistência da bobina do altifalante e L_E a sua indutância. R_{ES} é a resistência da suspensão do altifalante. Os coeficientes em “ b_i ” são iguais aos coeficientes em “ a_i ” trocando apenas Q_{TS} por Q_{MS} . Na curva de impedância das caixas bass-reflex é possível identificar dois picos e um vale no meio, ao contrário da caixa fechada que apenas apresenta um pico na resposta de impedância (Figura 6). A frequência de ressonância de Helmholtz é aquela onde a impedância é mínima e encontra-se no vale.

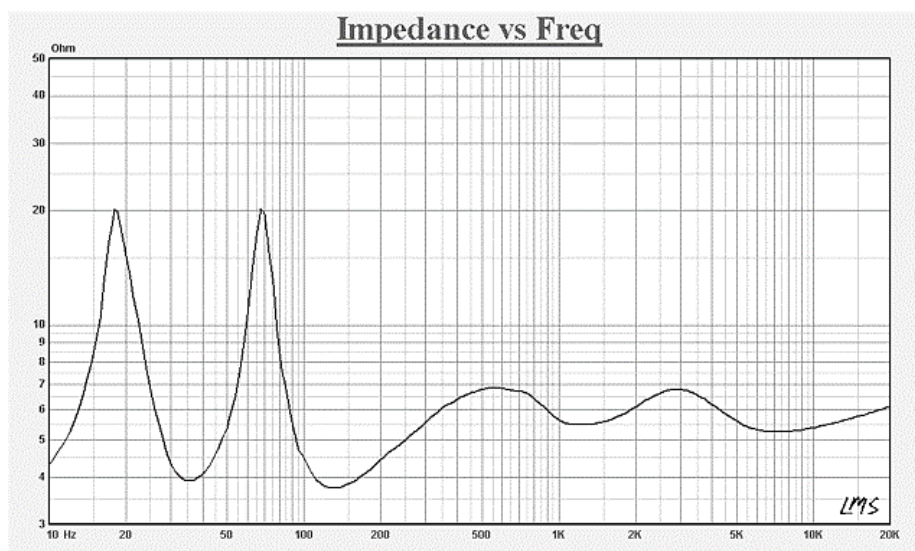


Figura 11 - Exemplo de um gráfico de magnitude de impedância elétrica de entrada normalizada numa caixa bass-reflex

Na Figura 11, a frequência de ressonância será próxima dos 36 Hz. Como a magnitude dos picos é semelhante pode dizer-se que se trata de um alinhamento B4 (Butterworth de 4ª ordem). Neste tipo de alinhamento, a frequência de Helmholtz coincide com a frequência de ressonância do altifalante e esta, por sua vez, coincide com a frequência de corte do sistema.

Alinhamentos

Em geral, existem dois tipos de alinhamentos: assistidos e livres. Os alinhamentos assistidos, descritos inicialmente por Thiele, necessitam de alguma equalização eletrônica para obter a resposta desejada enquanto os livres não necessitam de ajustes e são maioritariamente utilizados pelos fabricantes. Dentro dos alinhamentos livres estes podem produzir uma resposta plana na banda passante (alinhamentos planos) ou criando oscilações. Para os alinhamentos planos são necessários altifalantes com Q_{TS} inferior a 0.4 (Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003)). Para o outro tipo de alinhamentos são necessários altifalantes com altos valores de Q_{TS} . Embora prejudiquem a resposta da banda passante, possuem uma mais baixa frequência de ressonância.

Exemplos de alinhamentos livres (Figura 12): SBB4 (Super Boom Box de 4ª ordem), SC4 (Sub Chebyshev de 4ª ordem), QB3 (Quasi-Butterworth de 3ª ordem), B4 (Butterworth de 4ª ordem), D4 (Bessel de 4ª ordem), C4 (Chebyshev de 4ª ordem), BB4 (Boom Box de 4ª ordem) e SBQ3 (Super Quasi-Butterwoth de 3ª ordem).

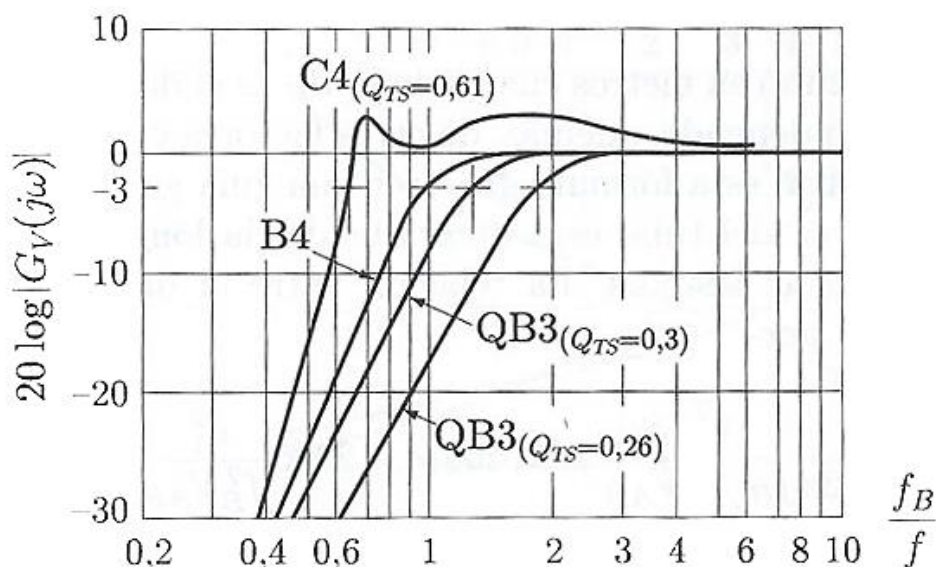


Figura 12 - Funções de transferência de alguns alinhamentos livres - Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003)

Dimensionamento da Caixa

Deve iniciar-se o desenho da caixa pelo seu volume, V_b , e frequência de sintonia, F_b , que, de acordo com G. Margolis and R. H. Small (1981), vêm das equações (28 e 29), respetivamente.

$$V_b = 20 * V_{AS} * Q_{TS}^{3.3} \quad (28)$$

$$F_b = 0.42 * F_S * Q_{TS}^{-0.96} \quad (29)$$

De acordo com R.H. Small (1973) a velocidade na porta deverá ser igual ou inferior a 5% da velocidade do som para que não haja efeito de sopro nem *power compression*. A equação (30) ilustra a velocidade do ar numa porta circular numa fração da velocidade do som.

$$Vel. porta circular (\%) = \frac{13.7\sqrt{W}}{F_b * \left[\frac{R}{2.54}\right]^2} * 100 \quad (30)$$

Por dedução matemática da fórmula acima descrita conclui-se que a velocidade numa porta triangular é dada por:

$$Vel. porta triangular (\%) = \frac{13.7\sqrt{W}}{F_b * \left[\frac{\sqrt{\frac{b * ht}{2 * \pi}}}{2.54}\right]^2} * 100 \quad (31)$$

onde W é a potência aplicada em watt, R o raio da porta em cm, F_b a frequência de sintonia da porta em Hz, b o comprimento da base em cm e ht a altura do triângulo em cm. Respeitando a premissa acima referida, a área mínima da porta é calculada pela equação (32), segundo Vance Dickason (2006), ou pela equação (33) seguindo uma abordagem mais conservativa de acordo com Richard Small (Vance Dickason, 2006).

$$A_V \geq 6.45161 * \pi * \frac{39.37^2 * 411.25 * S_d * \frac{X_{max}}{1000}}{4 * \sqrt{F_b}} \quad (32)$$

$$A_V \geq 6.45161 * \pi * \left[\frac{39.37 * \sqrt{F_b * S_d * \frac{X_{max}}{1000}}}{2}\right]^2 \quad (33)$$

onde A_v é a área mínima da porta em cm^2 , S_d é a área do cone do altifalante em m^2 , e X_{\max} a excursão máxima do altifalante em mm. Os parâmetros S_d em m^2 e X_{\max} em mm são fornecidos pelo fabricante do altifalante. Obtendo a área da porta é possível calcular o seu comprimento através da equação (34), segundo G. Margolis and R. H. Small (1981):

O valor de K deverá ser consultado na Tabela 3.

$$L_v = \frac{1.463 * 10^7 * A_v * 0.155}{61.0237 * \pi * F_b^2 * \frac{V_b}{N_p}} - K * 2 * \sqrt{\frac{A_v * 0.155}{\pi}} \quad (34)$$

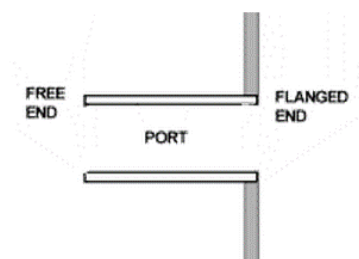


Figura 13 - Acabamento da porta - The Subwoofer DIY Page (2006)

Tabela 3 - Fator de correção de acabamento da porta

ACABAMENTO DA PORTA	0 FLANGES	1 FLANGE	2 FLANGES
K	0.614	0.732	0.850

O comprimento da porta é dado pela equação (35) em conformidade com Ortega, B. P. and M. R. Romero, (2003).

$$L_{V(\text{máx})} = L_{x,y,z} - \frac{\sqrt{4 * A_v}}{4} \quad (35)$$

onde N_p é o número de portas utilizado, L_v é o comprimento de cada uma das portas em cm e V_b o volume líquido da caixa em litros i.e. descontando o volume ocupado pelo altifalante e respectivas portas. Logo se depreende que a velocidade do ar na porta é inversamente proporcional à área da porta (equação 31) no entanto, para que a frequência de sintonia se mantenha, com o aumento da área da porta, o seu comprimento terá também de aumentar (equação 34). Se este for demasiado grande criará ondas estacionárias no seu interior que deteriorarão a resposta em frequência do sonodifusor, sendo que o limite máximo do seu

comprimento é o indicado na equação (35). $L_{x,y,z}$ é o comprimento máximo na caixa sobre o qual o tubo se estende. Ora para o cálculo da porta há uma situação de compromisso com a resposta em frequência, a velocidade do ar na porta que não deve ultrapassar os 17.15 m/s à máxima potência e o comprimento da porta não ser demasiado longo.

2.2.3 - Caixa Passa-Banda

A caixa passa-banda é uma caixa que cria um filtro passa-alto e um passa-baixo de forma acústica limitando a banda passante. Na caixa Passa-Banda de 4ª ordem (Figura 14), a câmara traseira é fechada produzindo uma banda passante com pendentes, de subida e descida de 12 dB/oitava denominando-se sistema de carga simétrica. Na caixa de 6ª ordem (Figura 15), o recinto traseiro é aberto e por isso cria um pendente de subida de 4ª ordem (24 dB/oitava) e um de descida de 2ª ordem (12 dB/oitava).

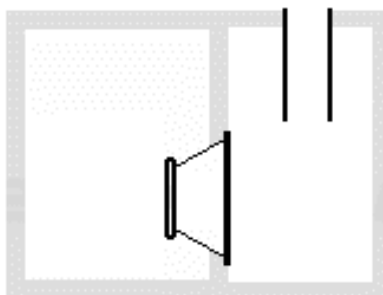


Figura 14 - Ilustração de uma caixa acústica passa-banda de 4ª ordem

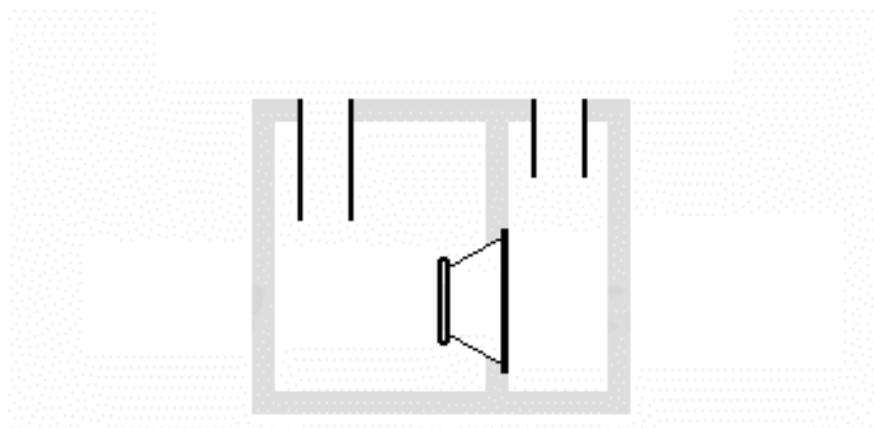


Figura 15 - Ilustração de uma caixa acústica passa-banda de 6ª ordem

A câmara traseira é um ressonador de Helmholtz sintonizado à frequência de corte inferior enquanto a câmara frontal é sintonizada à mais alta frequência de trabalho pretendida. O resultado desta tipologia de caixa acústica apresenta como vantagens principais o aumento do SPL, dependente da largura da banda passante pretendida, e a redução da distorção harmónica resultante da atenuação introduzida pelo filtro passa-baixos inerente a este tipo de construção. O filtro acústico é bastante mais eficiente que qualquer filtro eletrónico. A eletrónica não consegue suprimir as distorções geradas pela limitação de excursão do altifalante enquanto a caixa passa-banda, com o seu filtro acústico, reduz significativamente os efeitos audíveis das distorções do altifalante e da porta.

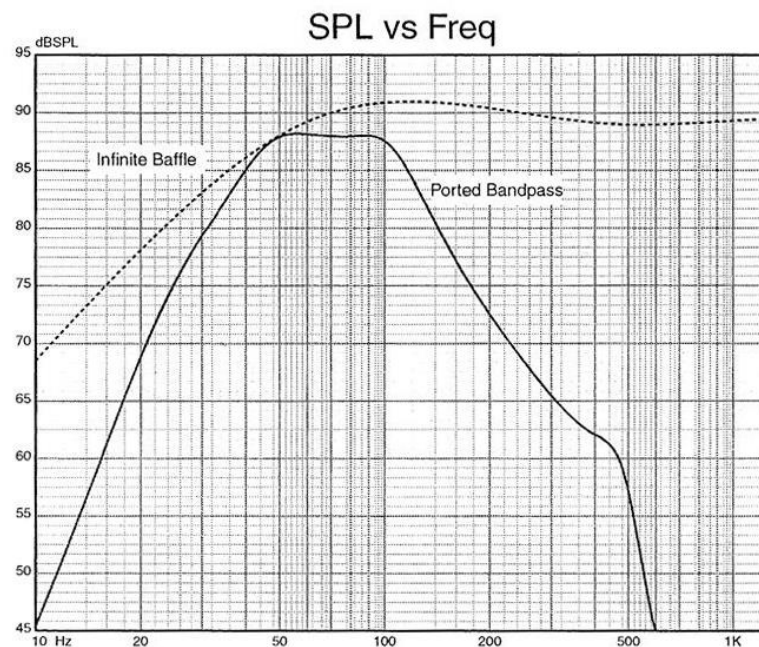


Figura 16 - Exemplo de resposta em frequência de uma caixa passa-banda e comparação com *baffle* infinito

Na Figura 16 pode observar-se que claramente a caixa do tipo passa-banda limita a banda passante no entanto o pendente de descida, às baixas frequências, é menor num altifalante montado plano infinito. A diferença entre as duas caixas é de cerca 6 dB/oitava.

Circuito Acústico Equivalente

O esquema acústico da caixa Passa-Banda de 4ª ordem (Figura 17) é bastante similar ao da caixa bass-reflex (Figura 10) no entanto há uma diferença, a velocidade volumétrica do

diafragma e do tubo estão em fase (as correntes U_D e U_{V2} têm o mesmo sentido), o que não ocorre em caixas do tipo bass-reflex. Na caixa bass-reflex, a determinadas frequências, as velocidades volumétricas do diafragma e do tubo estão em oposição de fase. O esquema elétrico da caixa Passa-Banda de 6ª ordem (Figura 18) é similar ao de 4ª ordem diferenciando-se apenas no facto de ter mais uma bobina e um condensador respeitantes à câmara traseira. Por esse motivo, cada um dos ramos tem uma corrente associada que se desloca no sentido contrário à corrente vinda da outra câmara. Quando o altifalante vai para a frente, movimenta o ar da câmara frontal para fora ao mesmo tempo que suga ar para dentro da câmara anterior. Desta forma, as velocidades volumétricas dos tubos estão sempre desfasadas 180° . Nesta abordagem serão discutidos os valores relativos à caixa Passa-Banda de 4ª ordem pelo que analogamente se transporta para a caixa Passa-Banda de 6ª ordem.

Nota: Os coeficientes com índice 1 referem-se à câmara anterior da caixa e com índice 2 à câmara posterior.

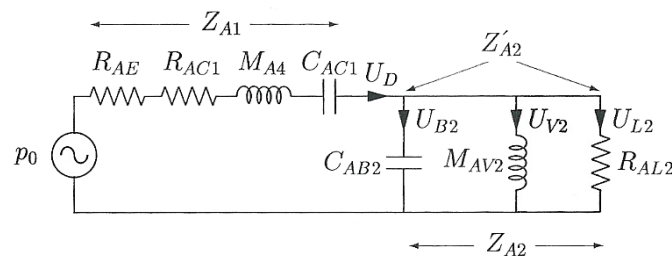


Figura 17 - Circuito acústico simplificado de uma caixa passa-banda de 4ª ordem - Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003)

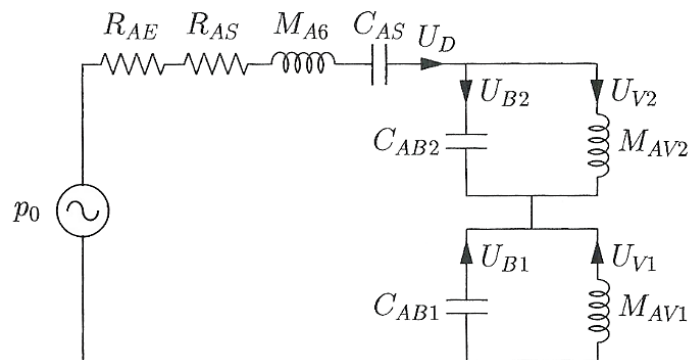


Figura 18 - Circuito acústico simplificado de uma caixa passa-banda de 6ª ordem - Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003)

A equação (36) determina a frequência, em radianos por segundo, de ressonância da caixa fechada. Da mesma forma, a equação (37) determina a frequência de ressonância da caixa aberta.

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{M_{A4} \cdot C_{AC1}}} = 2\pi * f_c \quad (36)$$

$$\omega_B = \frac{1}{\sqrt{M_{AV2} \cdot C_{AB2}}} = 2\pi * f_B \quad (37)$$

Os fatores de qualidade de uma caixa fechada e de uma caixa aberta são dados pelas equações (38 e 39) respetivamente (Ortega, B. P. and M. R. Romero, 2003).

$$Q_{TC} = \omega_c \frac{M_{A4}}{R_{AT4}} \quad (38)$$

$$Q_L = \frac{R_{AL2}}{\omega_B M_{AV2}} \quad (39)$$

A impedância Z_{A1} é igual à soma das resistências R_{AE} e R_{AC1} em série com a bobina M_{A4} e o condensador C_{AC1} (equação 40):

$$Z_{A1} = R_{AE} + R_{AC1} + sM_{A4} + \frac{1}{C_{AC1}} = \frac{\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2 + \frac{1}{Q_{TC}}\left(\frac{s}{\omega_c}\right) + 1}{sC_{AC1}} \quad (40)$$

Esta impedância está definida na Figura 17 como Z_{A1} .

Velocidade Volumétrica

A velocidade volumétrica que se pretende calcular é a pertencente ao ramo da porta. Portanto é necessário calcular U_{V2} através do divisor de corrente do circuito (4ª ordem). Para isso usar-se-á Z'_{A2} , o paralelo de C_{AB2} com R_{AL2} . U_{04} e U_{06} , representados nas equações (41 e 42), correspondem à velocidade volumétrica líquida nas caixas de quarta e sexta ordem respetivamente.

$$U_{04} = U_{V2} = U_D \frac{Z'_{A2}}{Z'_{A2} + sM_{AV2}} \quad (41)$$

$$U_{06} = U_{V1} + U_{V2} \quad (42)$$

Pela divisão de corrente dos ramos paralelos, e sabendo que Z_{AB1} e Z_{AB2} são as impedâncias de cada um dos ramos paralelos e modelizam o tubo e a compliância do ar no interior da caixa, podem obter-se as velocidades volumétricas de cada uma das portas, U_{V1} e U_{V2} (equação 43).

$$U_{V1} = -U_D \frac{Z_{AB1}}{SM_{AV1}}; U_{V2} = U_D \frac{Z_{AB2}}{SM_{AV2}} \quad (43)$$

Pressão Acústica

A função de transferência de uma caixa Passa-Banda de 4ª ordem tem uma estrutura semelhante a um filtro passa-alto de 2ª ordem (12 dB/oitava) somado com um filtro passa-baixo de 2ª ordem (12 dB/oitava) pelo que forma um filtro do tipo passa-banda. $G_4(s)$ é a função de transferência de pressão da caixa Passa-Banda de 4ª ordem e é dada pela equação (44).

$$G_4(s) = \left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2 \frac{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^4 + a_3 \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^3 + a_2 \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + a_1 \left(\frac{s}{\omega_0}\right) + 1} \quad (44)$$

Os coeficientes em “a_i” são muito similares aos da caixa bass-reflex e são dados pela equação (45), a relação de compliâncias, α_1 e α_2 , vem na equação (46). h , frequência de sintonia de uma caixa aberta, é o quociente de f_B por f_c (47). Os parâmetros Q_{TC} e Q_L foram calculados nas equações (38 e 39) respetivamente.

$$a_1 = \frac{1}{Q_L \sqrt{h}} + \frac{\sqrt{h}}{Q_{TC}}; a_2 = h + \frac{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + 1}}{h} + \frac{1}{Q_{TC} Q_L}; a_3 = \frac{1}{Q_{TC} \sqrt{h}} + \frac{\sqrt{h}}{Q_L} \quad (45)$$

$$\alpha_1 = \frac{V_{AS}}{V_{AB1}}; \alpha_2 = \frac{V_{AS}}{V_{AB2}} \quad (46)$$

$$h = \frac{f_B}{f_c} \quad (47)$$

Impedância Elétrica

É possível identificar, na Figura 19, dois vales entre os três picos exibidos. A frequência correspondente ao valor mais baixo do primeiro vale é a frequência de sintonia da câmara traseira (aproximadamente 31 Hz). Analogamente, a frequência de sintonia da câmara frontal, corresponde a aproximadamente 73 Hz.

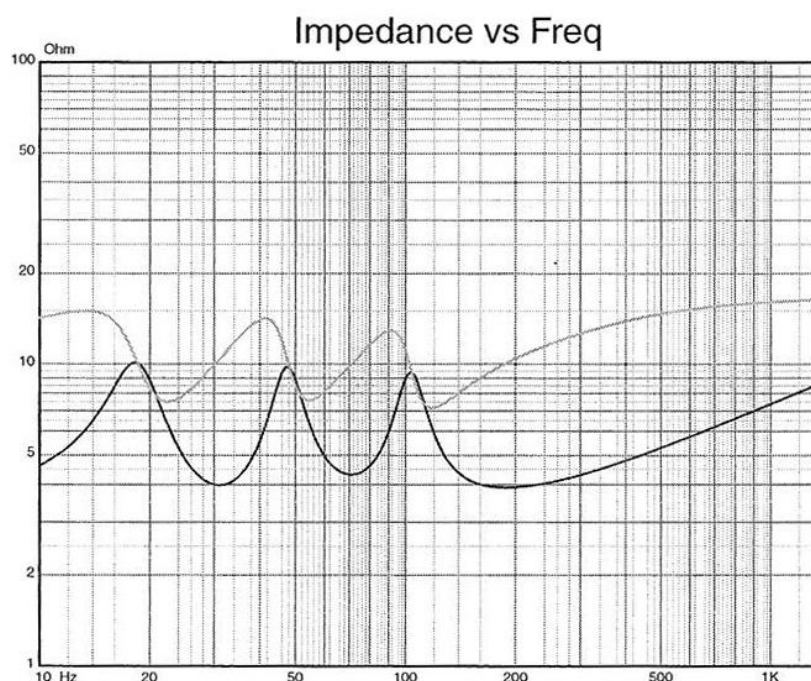


Figura 19 - Exemplo de um gráfico de magnitude de impedância elétrica de uma caixa passa-banda

Dimensionamento da Caixa Passa-Banda de 4ª Ordem

O primeiro passo para o dimensionamento da caixa passa-banda de 4ª ordem é definir a frequência de corte inferior, f_1 , que deverá ser no mínimo a frequência de ressonância do altifalante. O valor do ajuste, Q_4 , deverá ser escolhido de acordo com o tipo de resposta desejada. Para uma resposta plana deve escolher-se $Q_4=0.707$ que corresponde a um valor de largura de banda normalizado, Δf , de aproximadamente 0.72. Para outros valores de Q_4 e Δf deve consultar-se a Tabela 4. (Para valores não mencionados na tabela deverá ser feita uma interpolação para o seu cálculo).

Tabela 4 - Relação entre Q_4 e Δf para uma caixa passa-banda (Ortega, B. P. and M. R. Romero, 2003)

Q_4	Δf	Q_4	Δf	Q_4	Δf	Q_4	Δf
0,40	0,064	0,60	0,488	0,80	0,891	1,00	1,271
0,42	0,107	0,62	0,529	0,82	0,930	1,02	1,308
0,44	0,151	0,64	0,570	0,84	0,969	1,04	1,345
0,46	0,194	0,66	0,611	0,86	1,007	1,06	1,382
0,48	0,236	0,68	0,652	0,88	1,046	1,08	1,418
0,50	0,279	0,70	0,692	0,90	1,084	1,10	1,454
0,52	0,321	0,72	0,732	0,92	1,122	1,12	1,490
0,54	0,363	0,74	0,772	0,94	1,159	1,14	1,525
0,56	0,405	0,76	0,812	0,96	1,197	1,16	1,561
0,58	0,447	0,78	0,851	0,98	1,234	1,18	1,596

A frequência de corte superior é definida na equação (48). A frequência central f_0 é calculada na equação (49).

$$f_2 = f_1 + \Delta f \frac{f_s}{Q_{TS}} \quad (48)$$

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (49)$$

O volume da câmara traseira é dado pela equação (50) sendo que o valor do fator de qualidade de uma caixa fechada, Q_{TC} , é calculado na equação (51).

$$V_{AB1} = \frac{V_{AS}}{\left(\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}}\right)^2 - 1} \quad (50)$$

$$Q_{TC} = f_0 \frac{Q_{TS}}{f_s} \quad (51)$$

O volume da câmara frontal é dado pela equação (52).

$$V_{AB2} = \left(\frac{Q_{TS}}{Q_4}\right)^2 V_{AS} \quad (52)$$

Numa caixa do tipo passa-banda de 4ª ordem a câmara traseira é fechada e a câmara frontal é do tipo aberta pelo que é necessário dimensionar a porta. De acordo com Vance Dickason (1991), a área da porta, em cm^2 , é dada pela equação (53) onde S_d vem em m^2 e X_{\max} em mm. O comprimento da porta, em cm, é calculado pela equação (54) onde A_v é a área da porta

em cm^2 , N_p é o número de portas e V_{AB2} o volume da câmara frontal em litros. O valor de K deverá ser consultado na Tabela 3.

$$A_V \geq \frac{\pi * 2030^2 * \sqrt{\frac{(S_d * \frac{X_{max}}{1000})^2}{f_2}}}{4 * N_p} \quad (53)$$

$$L_V = 23562 * \frac{4 * A_V * N_p}{\pi * f_2^2 * V_{AB2}} - K * 2 * \sqrt{\frac{A_V}{\pi}} \quad (54)$$

Tal como na caixa bass-reflex, o comprimento do tubo não pode exceder o limite calculado na equação (35).

Dimensionamento da Caixa Passa-Banda de 6ª Ordem

“As caixas acústicas passa-banda de 6ª ordem são substancialmente mais complicadas, matematicamente, do que as de 4ª ordem. Embora possuam muito mais flexibilidade de *design* ainda ninguém publicou um método de “cálculo à mão” para projetar este tipo de caixa. É provável que muitas das unidades fabricadas ao longo dos últimos anos tenham sido concebidas por tentativa e erro, embora haja vários programas de computador que podem agora ser usados para criar simulações destes modelos. Os três programas capazes dessa simulação, no momento da publicação, são Low Frequency Designer by SpeakEasy, Speak by DLC design, e LEAP 4.0 by LinearX Systems” - Vance Dickason (2006)

O método que se segue serve apenas como um ponto de partida para um trabalho futuro num software de simulação acústica. As tabelas abaixo contêm valores para um alinhamento plano (The Subwoofer DIY Page, 2006).

O valor de Q_{TS} do altifalante é o fator mais importante no desenho da caixa passa-banda de 6ª ordem uma vez que é a partir desse valor que são determinados todos os outros valores. Na Figura 20 e Figura 21 estão disponíveis os quadros para consulta dos valores de V_f/V_{AS} , F_f/F_s , V_r/V_{AS} , F_r/F_s , F_h/F_s , F_l/F_s e ganho.

Q_{TS}	V_f/V_{AS}	F_f/F_s	V_r/V_{AS}	F_r/F_s	F_h/F_s	F_l/F_s	Gain
0.18	0.190	1.950	0.440	1.000	2.370	1.052	-2.3
0.19	0.200	1.960	0.460	1.000	2.410	1.013	-1.9
0.20	0.212	1.960	0.465	1.000	2.410	1.070	-1.4
0.21	0.215	1.980	0.470	1.000	2.460	1.076	-1.1
0.22	0.217	2.020	0.510	1.000	2.590	1.060	-0.9
0.23	0.223	2.032	0.530	1.000	2.640	1.060	-0.6
0.24	0.230	2.040	0.550	1.000	2.680	1.060	-0.3
0.25	0.252	2.010	0.580	1.000	2.620	1.060	0.2
0.26	0.270	1.988	0.600	1.000	2.570	1.060	0.6
0.27	0.294	1.960	0.630	1.000	2.510	1.064	1.1
0.28	0.308	1.950	0.660	1.000	2.500	1.060	1.4

Figura 20 - Quadro I para dimensionamento da caixa passa-banda de 6ª ordem

Qts	Vf/Vas	Ff/Fs	Vr/Vas	Fr/Fs	Fh/Fs	Fl/Fs	Gain
0.25	0.142	2.608	0.270	1.000	3.952	1.398	-0.3
0.26	0.162	2.520	0.291	1.000	3.740	1.368	0.3
0.27	0.183	2.438	0.315	1.000	3.529	1.353	0.8
0.28	0.203	2.385	0.341	1.000	3.423	1.323	1.1
0.29	0.210	2.347	0.370	1.000	3.360	1.293	1.3
0.30	0.225	2.316	0.391	1.000	3.297	1.281	1.6
0.31	0.246	2.263	0.420	1.000	3.170	1.262	2.0

Figura 21 - Quadro II para dimensionamento da caixa passa-banda de 6ª ordem

O volume da câmara traseira, V_{AB1} , e a sua frequência de sintonia, f_1 , são calculados pelas equações (55 e 56). O volume da câmara frontal e sua frequência de sintonia vêm nas equações (57 e 58). V_{AS} e f_s são valores do altifalante.

$$V_{AB1} = \left(\frac{V_r}{V_{AS}}\right) * V_{AS} \quad (55)$$

$$f_1 = \left(\frac{F_r}{F_s}\right) * f_s \quad (56)$$

$$V_{AB2} = \left(\frac{V_f}{V_{AS}}\right) * V_{AS} \quad (57)$$

$$f_2 = \left(\frac{F_f}{F_s}\right) * f_s \quad (58)$$

Embora as frequências de sintonia da caixa sejam f_1 e f_2 , os limites da resposta em frequência são um pouco diferentes e determinados pelas equações (59 e 60).

$$f_h = \left(\frac{F_h}{F_s}\right) * f_s \quad (59)$$

$$f_l = \left(\frac{F_l}{F_s}\right) * f_s \quad (60)$$

f_h e f_l correspondem às frequências de corte superior e inferior respetivamente onde o sinal está já atenuado -3 dB.

Não há nenhuma fórmula científica conhecida para cálculo das áreas e comprimentos das portas da caixa passa-banda de 6ª ordem pelo que deverá ser usado um software de simulação para o seu dimensionamento.

Capítulo 3 - Radiação e Cobertura Sonora e Técnicas de Medição

Há vários tipos de sinal para medição, de banda estreita e banda larga como sinusóides, pulsos, chirps e sinais pseudoaleatórios como o MLS. O tipo de sinal pseudoaleatório é interessante por descorrelacionar efeitos de interferência por ondas estacionárias.

Por esta razão, este tipo de sinais, de banda larga pseudoaleatórios, têm tendência para ser utilizados nos processos de medição de sistemas electracústicos.

3.1 - Tipologias de Ruído

Existem principalmente três tipos de ruído usados na engenharia de áudio: ruído branco, ruído rosa e chirp.

O ruído branco é um sinal com um espectro de frequências plano, ou seja uma densidade espectral de potência uniforme. O seu nome deriva da analogia com a luz branca que também compreende todas as radiações de cores numa proporção uniforme. Quer isto dizer, que em termos de potência, a banda dos 20 Hz - 30 Hz contém igual valor de potência que a dos 400 Hz - 410 Hz. Ao dividir a gama de frequências do sinal por oitavas, como a largura de banda de cada oitava cresce proporcionalmente à frequência, isso causa que a densidade de potência por oitava cresça proporcionalmente à frequência, ou seja a 3 dB/oitava ou 10 dB/década.

Com o ruído rosa, que apresenta uma densidade espectral de potência inversamente proporcional à frequência, cada oitava, contém um valor constante de potência, eliminando assim a característica de crescimento verificada no caso do ruído branco. Este tipo de ruído apresenta uma diminuição da densidade espectral de potência de -3 dB por oitava. Ora, como a percepção do conteúdo espectral pelo ouvido humano é realizado com larguras de banda crescentes de forma quase proporcional à frequência (bandas críticas de largura proporcional a partir de 500 Hz), a apreciação subjetiva resultante da distribuição espectral percebida é uniforme no caso do ruído rosa ser o som ouvido. Um chirp é um sinal na qual a frequência aumenta (up-chirp) ou diminui (down-chirp) com o tempo. Num chirp logarítmico (LogChirp), a frequência do sinal varia de acordo com uma relação geométrica ao longo do tempo. Por outras palavras, se dois pontos distintos da forma de onda forem escolhidos, T_1 e T_2 , e o intervalo de

tempo entre eles T_2-T_1 seja mantido constante, a relação de frequência $f(T_2)-f(T_1)$ também será constante. Num chirp logarítmico, a frequência do sinal varia logaritmicamente em função do tempo.

3.2 - Técnicas de Medição

Uma das técnicas de medição do SPL de um sonodifusor requer uma câmara anecoica com um chão em grelha acusticamente invisível. O microfone de medição, Figura 22, deverá ser colocado à frente do sonodifusor a uma distância escolhida e, se o altifalante estiver à face, o microfone deverá estar alinhado com o centro do cone. Para que as sensibilidades dos sonodifusores possam ser comparadas, adotou-se a medida *standard* de 1W/1m, ou seja, o microfone é colocado a um metro de distância do sonodifusor e injeta-se 1 W de potência no altifalante. O sinal injetado deverá ser um dos indicados no capítulo anterior.

Contudo, o método em câmara anecoica não funciona para as baixas frequências porque seria necessário dispor de câmaras extremamente amplas para o efeito. O melhor método para a medição do SPL e dispersão de um subgrave é em campo aberto ou ao ar livre. Como o *subwoofer* deverá operar em *half-space* i.e. pousado no chão, as medições irão ser feitas dessa forma. Para a medição da dispersão dispõe-se de um prato giratório comandado por computador (Figura 23). O *subwoofer* assentará sobre o prato cuja rotação é controlada, em incrementos de 10 graus, à medida que o computador recolhe a sua resposta em frequência ao longo de 360°.



Figura 22 - Microfone de medição de precisão EarthWorks M30

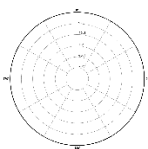
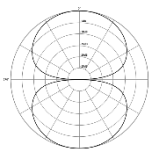
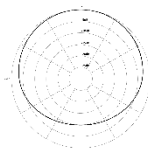
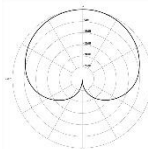
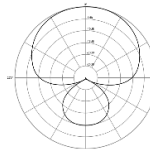


Figura 23 - Prato para medição de dispersão (LinearX - LT360)

3.3 - Diagramas de Dispersão Polar

Um diagrama de direccionalidade ou de dispersão polar é uma representação 2D dos valores de SPL, no plano horizontal ou vertical, nas diferentes posições angulares para uma dada frequência. A Tabela 5 apresenta os tipos de diagrama polar de primeira ordem mais comuns e objeto de estudo nesta dissertação.

Tabela 5 - Diagramas de dispersão polar e suas características. *The Microphone Book, Second Edition (Focal Press, 2004).*

Característica	Omnidirecional	Figura - 8	Subcardióide	Cardióide	Hipercardióide
Diagrama de Dispersão Polar					
Equação Polar	1	$\cos(\theta)$	$0.7+0.3\cos(\theta)$	$0.5+0.5\cos(\theta)$	$0.37+0.63\cos(\theta)$
Directivity Index (DI)	0 dB	4.8 dB	2.5 dB	4.8 dB	5.7 dB
Pressão sonora relativa a 180°	0 dB	0 dB	-8 dB	$-\infty$ dB	-11.7 dB
BFR (Back-to-Front Ratio) 120°-240°	33.33%	43.3%	21.51%	5.77%	10.79%

Na Tabela 5 estão descritas as equações matemáticas correspondentes a cada um dos diagramas polares exibidos. Pelo índice de diretividade (DI) pode concluir-se que o diagrama mais direcional é o hipercardióide seguido dos diagramas cardióide e figura-8. Apesar disso o diagrama figura-8 não apresenta redução sonora a 180° pelo que não é interessante para este estudo. Por maior redução sonora na traseira (<BFR), o diagrama cardióide é o mais apetecível porém o diagrama hipercardióide também será um diagrama a ter em conta durante este projeto por um bom índice de diretividade.

3.4 - Desenvolvimento de Ferramenta de Simulação Acústica

Houve necessidade de desenvolvimento de uma ferramenta de simulação acústica para estudar a radiação e cobertura sonora no espaço e prever como várias fontes sonoras se conjugam entre si dependendo da sua posição relativa, ganho, *delay*, etc...

O software de simulação acústica projetado e desenvolvido ao longo desta dissertação (ASI - Acoustical Simulation Interface) permite prever, em alta resolução e em diagrama colorido, a pressão acústica e fase do sinal no plano X/Y criado por fontes sonoras às diferentes frequências ISO 266 de 1/3 de oitava, até um máximo de 315 Hz. O software foi desenvolvido em MATLAB R2013a dispendo de uma interface gráfica amigável, criada com a ferramenta GUI (Graphical User Interface), controlada por mais de 2500 linhas de código.

Podem ser simuladas “n” fontes sonoras pontuais, sem um limite máximo, sendo para cada fonte configuráveis: a posição (em X e Y), o *delay* (em ms), a polaridade (+/-), direção (esquerda ou direita) e ainda a sensibilidade medida a 1w/1m.

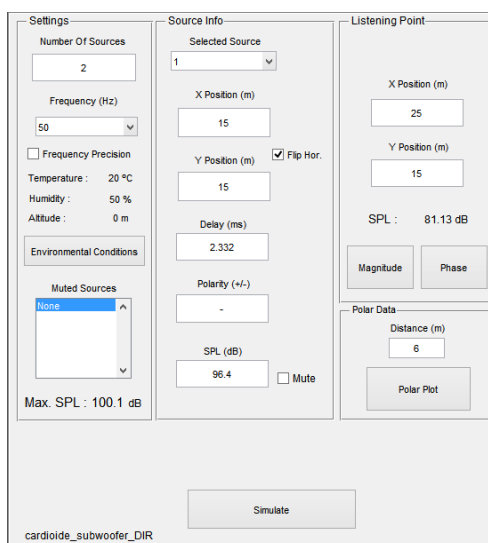


Figura 24 - Painel de controlo do ASI

O painel de controlo do ASI permite ao utilizador visualizar algumas informações importantes assim como alterar as configurações da simulação. É possível visualizar se há fontes em “mute” (desligadas) e quais as fontes que se encontram nesse estado. O máximo SPL também é indicado. As condições atmosféricas e a frequência a que está a decorrer a simulação também estão presentes e podem ser alteradas neste painel. No canto inferior esquerdo é indicado o nome do ficheiro de simulação.

Com o ASI é possível simular um diagrama polar de um conjunto de fontes sonoras a uma distância definida pelo utilizador. O diagrama polar conta com alguns indicadores de qualidade como por exemplo: o ângulo em que o SPL é igual a -6 dB (normalmente caracterizador da diretividade), os fatores Q e DI (*Directivity Index*), a razão BFR (Back-to-Front Ratio) e a mínima atenuação traseira (indica, em dB, qual a mínima atenuação obtida entre 120° e 240°). Foi criada ainda uma função de sonda ou ponto de escuta em que é seleccionado o ponto onde se deseja colocar um “microfone virtual” e são aí traçadas as respostas em fase e frequência correspondentes ao local. Cada simulação poderá ser gravada para que possa mais tarde ser carregada de novo no ASI. Todos os cálculos do algoritmo têm em conta os valores de temperatura, humidade do ar e altitude do local onde se deseja efetuar a simulação.

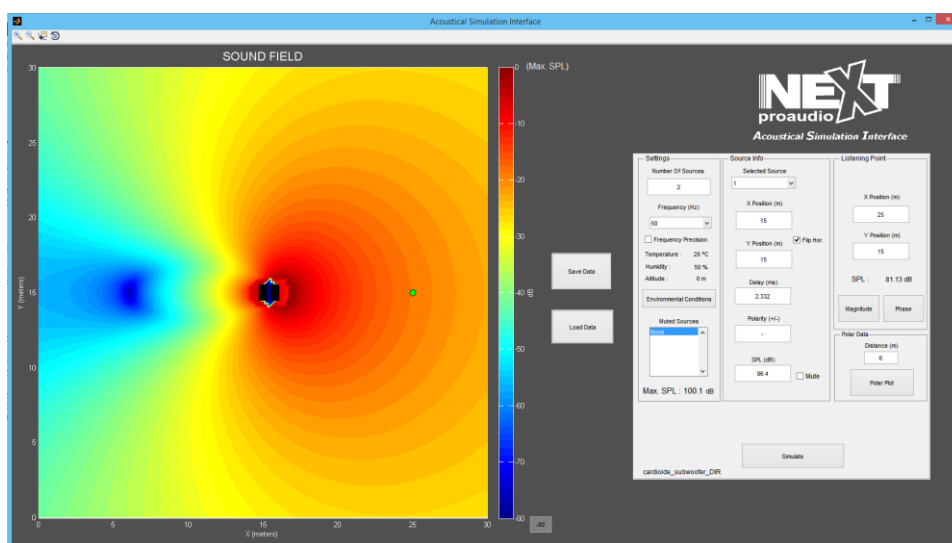


Figura 25 - Interface gráfica do software de simulação desenvolvido, ASI

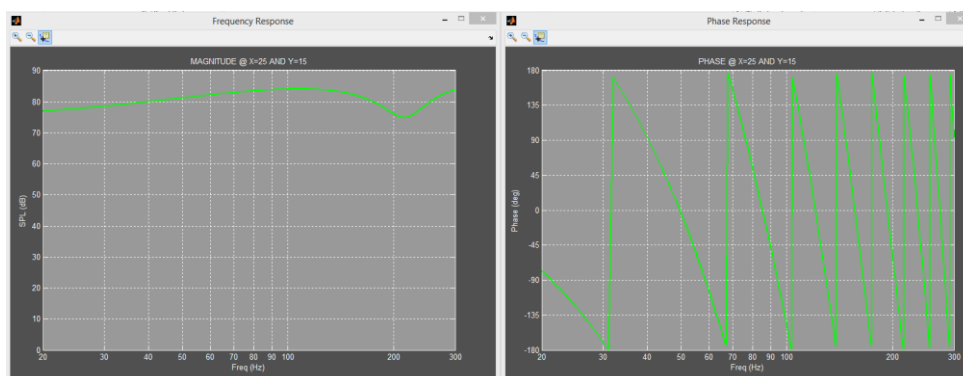


Figura 26 - Resposta em fase e frequência do local de escuta

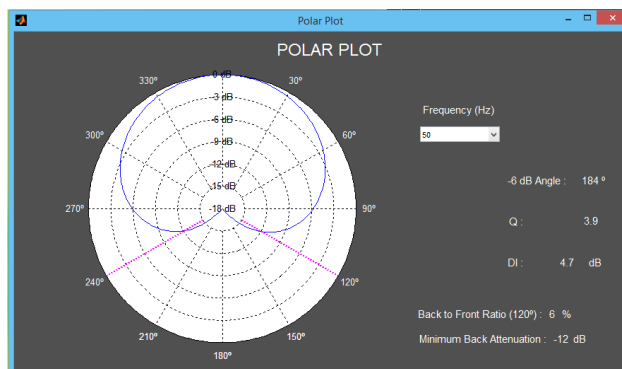


Figura 27 - Diagrama polar e indicadores de qualidade

O diagrama polar logarítmico da Figura 27 foi conseguido a partir de uma função desenvolvida por Hakan Cakmak da Universidade de Duisburg-Essen e posteriormente alterada para melhor adaptação a este problema. As equações (61 e 62) calculam o fator de diretividade, Q , e o índice de diretividade, DI , respetivamente. $\Delta\theta$ é o valor do incremento do ângulo que neste caso foi definido como $0.0175 \text{ rad} = 1^\circ$ para uma melhor resolução do gráfico, θ é o grau em radianos e $I(\theta_i)/I(\theta_0)$ é a razão entre a intensidade sonora a 0° e a intensidade sonora no ângulo correspondente ao índice i . (Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003)).

$$Q(\theta) = \frac{1}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{I(\theta_i)}{I(\theta_0)} * \sin \theta_i * \Delta\theta_i} \quad (61)$$

$$DI = 10 \log_{10} Q \quad (62)$$

O rácio da radiação entre frente e trás (de 120° a 240°) em percentagem, foi desenvolvido nesta dissertação como um indicador de qualidade da solução e é calculado pela equação 63.

$$Ratio = \frac{\sum_{i=120}^{240} P_i}{\sum_{n=0}^{119} P_n + \sum_{j=241}^{359} P_j} * 100 \quad (63)$$

3.4.1 - Cálculos

Neste *software* foram consideradas fontes pontuais e ideais com um diagrama de dispersão similar ao subcardioide mas com apenas 3 dB de atenuação a 180° ($0.86+0.14*\cos(\theta)$). Para o cálculo da fase e da amplitude da pressão sonora num determinado ponto, devido à interferência de diversas fontes, foi usada uma descrição por meio de fasores. Uma onda

acústica é uma onda sinusoidal que, em cada ponto da sua curva, pode ser definida através de um fasor com uma dada fase e amplitude.

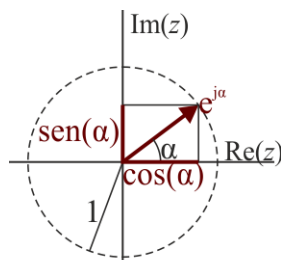


Figura 28 - Representação gráfica de um fasor

A amplitude de uma onda sonora, considerando apenas o eixo horizontal, é inversamente proporcional à distância (campo distante) assim como a sua fase varia dependendo da frequência e distância. Com a sensibilidade da fonte dada pelo utilizador, a 1 W/1m, é possível calcular a pressão acústica, em Pa, a um metro de distância da fonte. Esta pressão passará a ser a amplitude inicial do fasor. O *delay* inserido pelo utilizador, em milissegundos, caracteriza a fase inicial do fasor, dependendo da frequência a que é feita a análise, para um mesmo *delay*, a fase inicial variará.

O algoritmo calcula então a amplitude e fase de cada fonte de 20 em 20cm ao longo de 30m em X e Y perfazendo um total de 22500 pontos analisados, o que possibilita uma boa resolução de visualização. Uma vez calculados os fasores das diversas fontes em todos os pontos apenas é necessário somar fasores obtendo a pressão sonora e fase em cada um dos diversos pontos.

De acordo com Owen Cramer (1993) a equação (69) permite calcular a velocidade do som no ar húmido com pressão de saturação de vapor deduzida por Richard Davis (1992) e uma fração de mole de dióxido de carbono de 0.0004.

É possível calcular a velocidade do som através desta fórmula com temperaturas entre 0° C e 30° C e pressões entre 75 kPa e 102 kPa. Na região entre 95 kPa e 104 kPa a variação da velocidade do som é desprezável. Segundo os ISA Standards, a pressão ao nível médio da água do mar é de 101.325 kPa. A pressão atmosférica é dependente da altitude. A velocidade do som não é dependente da amplitude ou da frequência da onda.

A atenuação da pressão sonora por efeito da absorção do ar é notável nas altas frequências. Até 130 Hz não se regista qualquer atenuação, a 140 Hz verifica-se uma atenuação de 0.001 dB/m e a 300 Hz uma atenuação de 0.002 dB/m (todos estes valores foram calculados para uma atmosfera a 20° C e 50% de humidade relativa). Como o limite máximo de funcionamento dos subgraves será 150 Hz estas atenuações não são significativas pelo que o cálculo efetuado pelo software as despreza.

$$p = 101325 * \left(1 - \frac{0.0065}{288.15} * altitude\right)^{\frac{-9.80665 * 0.0289644}{-8.31432 * 0.0065}} \quad (64)$$

A pressão atmosférica é calculada através da altitude pela equação (64). Os coeficientes de a_0 a a_{15} são constantes e estão presentes na Tabela 6 (Owen Cramer (1993)).

Tabela 6 - Coeficientes em a_i contidos na equação da velocidade do som

i	a_i
0	331.5024
1	0.603055
2	-0.000528
3	51.471935
4	0.1495874
5	-0.000782
6	$-1.82 \cdot 10^{-7}$
7	$3.73 \cdot 10^{-8}$
8	$-2.93 \cdot 10^{-10}$
9	-85.20931
10	-0.228525
11	$5.91 \cdot 10^{-5}$
12	-2.835149
13	$-2.15 \cdot 10^{-12}$
14	29.179762
15	0.000486

$$F = 1.00063 + 3.14 \cdot 10^{-8} \cdot p + 5.6 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \quad (65)$$

$$P_{sv} = e^{\frac{20.386 - \frac{5132}{273.15+t}}{133.322365}} \quad (66)$$

$$x_c = 0.0004 \quad (67)$$

$$x_w = \text{humi} \cdot F \cdot \frac{P_{sv}}{p} \quad (68)$$

Na equação (68) entram as variáveis calculadas F , P_{sv} e p . humi é o valor da humidade atmosférica em fração e x_c a fração molar de dióxido de carbono (Owen Cramer (1993)).

Resolvendo a equação (69), abaixo descrita, obtém-se c , velocidade do som em m/s.

$$\begin{aligned}
 c = & a_0 + a_1 * t + a_2 * t^2 + (a_3 + a_4 * t + a_5 * t^2) * x_w + (a_6 + a_7 * t + a_8 * t^2) \\
 & * p + (a_9 + a_{10} * t + a_{11} * t^2) * x_c + a_{12} * x_w^2 + a_{13} * p^2 \\
 & + a_{14} * x_c^2 + a_{15} * x_w * p * x_c
 \end{aligned} \tag{69}$$

$$T = \frac{1}{f} \tag{70}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{71}$$

O período da onda sinusoidal (em segundos) é obtido através do inverso da frequência como pode observar-se na equação (70). Dividindo a velocidade do som pela frequência (equação 71) obtém-se o comprimento de onda em metros.

No fluxograma da Figura 29 está representado o esquemático do processo algorítmico adotado pelo software desenvolvido.

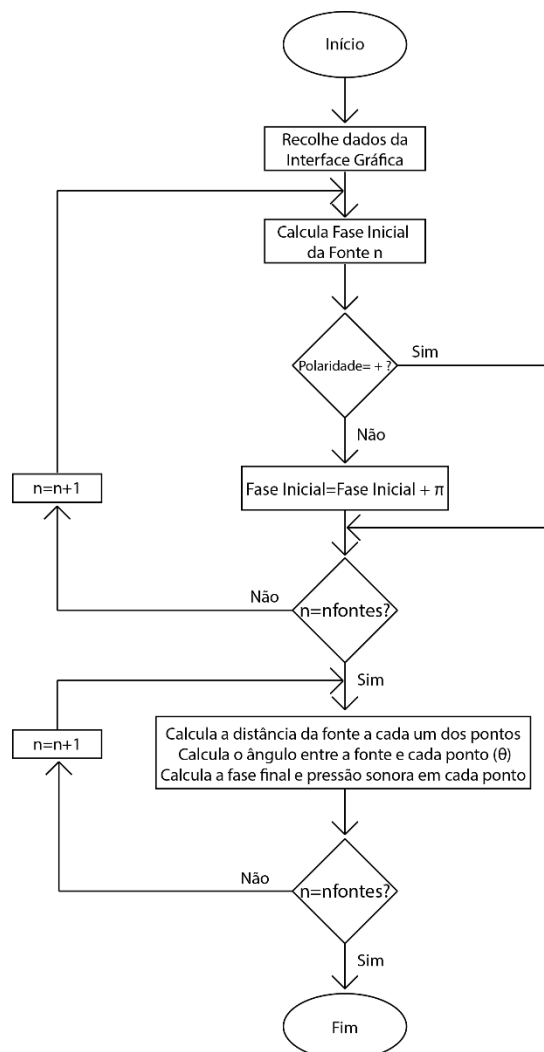


Figura 29 - Fluxograma do algoritmo do software ASI

$$P(1m) = 10^{\frac{\text{sensibilidade}}{20}} * 2 * 10^{-5} \quad (72)$$

P (1m) da equação (72) representa a pressão acústica em Pa a 1 m da fonte e é calculado a partir da sensibilidade da fonte. A sensibilidade corresponde à pressão sonora em dB medida a um metro da fonte introduzindo na mesma 1WS de sinal.

A pressão a uma dada distância é estimada pela equação (73) tendo em conta o padrão de dispersão polar e o ângulo a que está ser feita a medição (θ).

$$P(\text{distancia}) = \frac{P(1m)}{\text{distancia}} * (0.86 + 0.14 * \cos(\theta)) \quad (73)$$

Se a distância da fonte ao ponto a calcular for inferior a 1 m, zona onde não é conhecido o SPL da fonte, o programa assume a pressão sonora igual ao limiar de audição: $2 * 10^{-5}$ Pa (0dB).

Para a soma dos diferentes sinais no mesmo local, recorreu-se ao uso de fasores. Para isso foi necessário converter os sinais em fase e amplitude em coordenadas real e imaginária (equações 74 e 75).

$$\text{Parte Real} = P(\text{distancia}) * \cos(\text{Fase Final}) \quad (74)$$

$$\text{Parte Imaginaria} = P(\text{distancia}) * \sin(\text{Fase Final}) \quad (75)$$

As partes real e imaginária de cada uma das fontes são somadas algebricamente. Calcula-se a magnitude em Pa com a equação (76) e a fase através da equação (77).

$$\text{Magnitude} = \sqrt{\text{Parte Real}^2 + \text{Parte Imaginaria}^2} \quad (76)$$

$$\text{Fase} = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Parte Imaginaria}}{\text{Parte Real}}\right) \quad (77)$$

Para se obter finalmente um valor de SPL em dB é aplicada a equação (78).

$$\text{SPL Final} = 20 * \log_{10}\left(\frac{\text{Magnitude}}{2 * 10^{-5}}\right) \quad (78)$$

Capítulo 4- Projeto e Construção do Sistema

4.1 - Arquitetura do Sistema

Para a formação de um padrão de dispersão cardióide são necessárias duas fontes sonoras coerentes. As fontes sonoras deverão estar espaçadas fisicamente de $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda da frequência mais alta a que serão utilizados. Neste caso foram dimensionados para trabalhar até 92 Hz o que resultou numa distância entre fontes de 93.3 cm (equação 79).

$$\lambda = \frac{c}{f}; \quad \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4 * f} = \frac{343.4}{4 * 92} = 0.933 \text{ m} \quad (79)$$

Para que se obtenha um diagrama cardióide, a fonte traseira terá de ser atrasada. Para saber que tipo de atraso seria mais benéfico efetuaram-se variadas simulações no *software* ASI. A simulação consistia em comparar a resposta em frequência do sonodifusor a 0° (na parte frontal) e a 180° (na parte traseira) com diferentes tipos de atraso. O primeiro tipo de atraso a simular foi um atraso de fase constante, de 90° , a todas as frequências. O segundo foi um atraso em fase otimizado para cada gama de frequências (1/3 de oitava). Por otimizado entenda-se uma boa relação frente-trás assim como boa anulação a 180° . Por fim, a última simulação foi feita com um atraso fixo em tempo. Como resultado das simulações obtiveram-se os seguintes gráficos:

Nota: a linha laranja corresponde ao SPL na frente do sonodifusor e a linha azul corresponde ao SPL na traseira do sonodifusor.

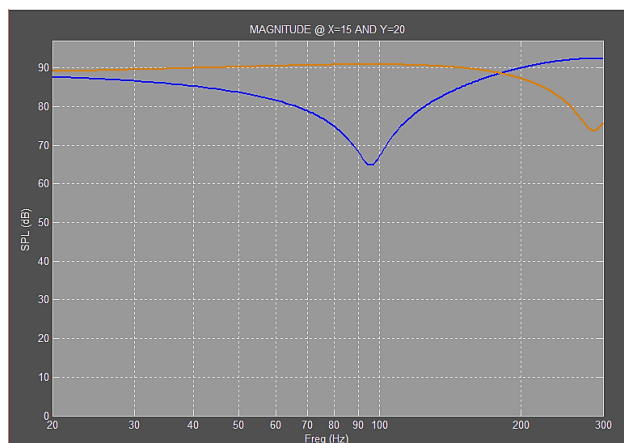


Figura 30 - Simulação com fase fixa de 90°

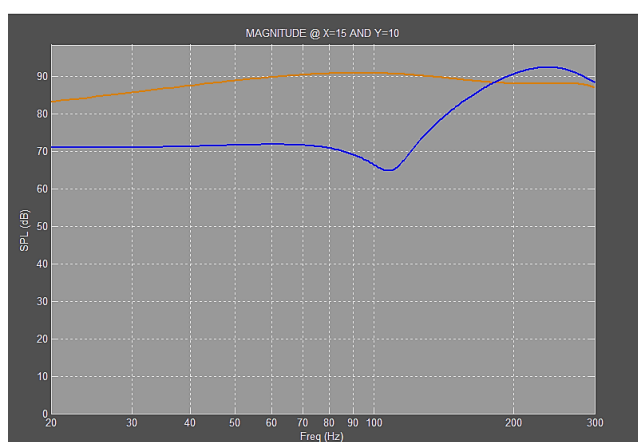


Figura 31 - Simulação com fase adaptativa

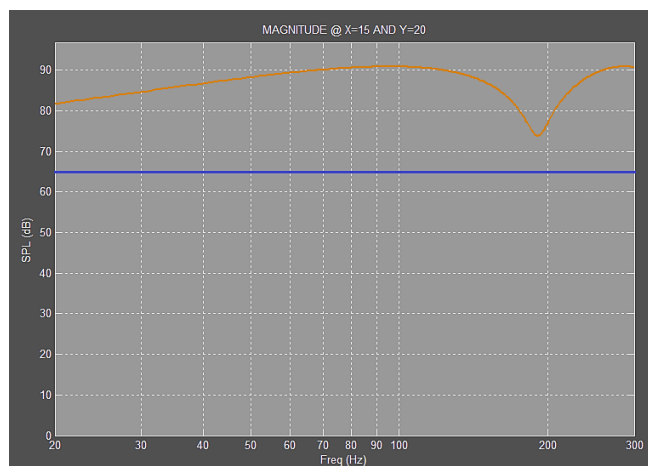


Figura 32 - Simulação com atraso temporal fixo

Claramente se verifica que o atraso de fase de 90°, Figura 30, é o que permite uma resposta em frequência mais plana no entanto apresenta muito pouca atenuação na traseira em toda a gama de frequências exceto na frequência de 92 Hz, frequência à qual a distância entre fontes sonoras corresponde a $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda.

A resposta com fase adaptativa, Figura 31, tem uma boa resposta em frequência na frente e relativamente boa atenuação traseira. No entanto, para aplicar um filtro que introduzisse esta adaptação de fase era necessário aproximar por uma equação de 4ª ordem [Anexo 2] o que seria de complexidade eletrónica elevada e dispendioso.

Por último, o atraso em tempo constante, Figura 32, é o que apresenta sem dúvida uma atenuação traseira maior e mais constante. A resposta na parte frontal é similar ao da Figura 31 contudo apenas algumas perturbações na zona dos 200 Hz, fora da gama de frequências a que o *subwoofer* irá operar.

Optou-se então por um atraso eletrónico por ser o mais eficaz e mais fácil de implementar.

Para facilitar em termos de dimensões da caixa, usou-se a distância entre fontes de 93cm alterando a frequência máxima para 92.3 Hz (equação 79).

Para determinar o valor do *delay* eletrónico de $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda da frequência máxima de trabalho empregou-se a equação (80).

$$delay = \frac{1}{4 * f} = \frac{1}{4 * 92.3} = 2.709 \text{ ms} \quad (80)$$

Por fim, a polaridade da fonte sonora que radia para a parte traseira deverá ser invertida por forma a anular o som vindo da fonte sonora dianteira. São usadas distâncias e *delays* correspondentes a $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda para que o som não só seja anulado na parte traseira do sonodifusor como também haja algum reforço sonoro na parte frontal do mesmo. Se se usasse um valor diferente de $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda, iria acontecer o cancelamento na retaguarda mas não era garantido o reforço sonoro na frente.

O sinal de audio é amplificado por um amplificador analógico e o processamento é assegurado por um DSP.

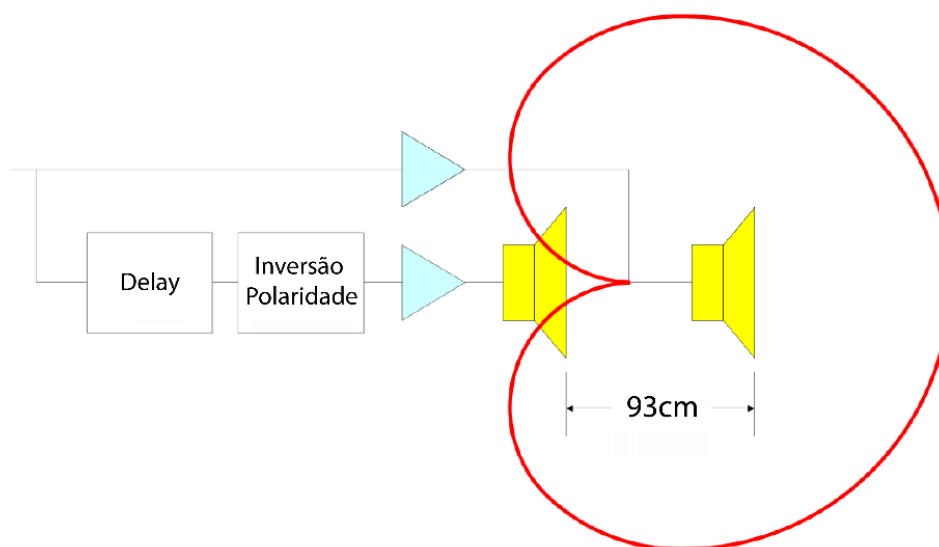


Figura 33 - Esquema da amplificação e processamento do sistema

Na Figura 33 está ilustrado o esquema da amplificação e processamento do sistema. Este sistema terá obrigatoriamente de ser bi-amplificado tal como representado na figura pelos dois triângulos. Um dos sinais de áudio terá de sofrer algum processamento antes de ser amplificado, sinal esse que alimentará posteriormente o altifalante da traseira do sonodifusor.

Na Figura 34 pode ver-se que, para um altifalante de 18", a relação entre as pressões acústicas mensuráveis à frente e atrás é aproximadamente -3 dB (Christner, M., 2014). Por essa razão o altifalante traseiro pode ser menos potente e de menores dimensões. Para radiador frontal adotou-se uma caixa do tipo bass-reflex.

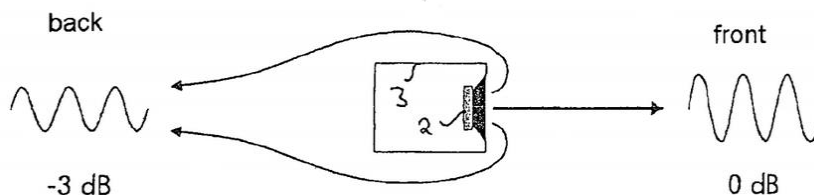


Figura 34 - Exemplo de atenuação do sinal sonoro para um altifalante de 18"

Como é sabido as frequências mais altas têm comprimentos de onda mais pequenos pelo que os dispositivos que as produzem são bastante mais direcionais que nas baixas frequências logo, o som que viaja até à parte de trás do sonodifusor apenas contém as frequências mais baixas. Ora, a caixa, por si só, cria um filtro passa-baixo para a parte de trás. Como a caixa bass-reflex é do tipo passa-alto, o som que chega à retaguarda do sonodifusor é apenas uma banda limitada pelo passa-alto do bass-reflex e pelo passa-baixo inerente à diretividade do som. Para que a anulação na parte posterior do sonodifusor seja a melhor, a resposta do radiador traseiro tem de ser similar ao som proveniente do radiador frontal. Por isso, adotou-se uma caixa do tipo passa-banda de 6ª ordem como radiador traseiro. Outra das razões para a escolha deste tipo de caixa é o elevado SPL da caixa e a fase nos tubos estar de acordo com a fase do altifalante.

4.2 - Simulação da Caixa Acústica

O primeiro passo a dar no desenvolvimento de uma caixa acústica é a escolha dos altifalantes a usar dependendo do tipo de caixa necessário. Neste caso terá de ser um altifalante apropriado para a reprodução das baixas frequências. Como o projeto se baseia na interferência acústica entre duas fontes sonoras distintas, serão necessários dois altifalantes.

Tendo em conta a atenuação de sensivelmente 3dB que ocorre quando o som viaja da frente da caixa até à sua traseira (Figura 34), o altifalante traseiro poderá ser menos potente e de tamanho mais reduzido, melhorando assim o consumo de energia, o preço, o tamanho e o peso da caixa acústica. O altifalante escolhido para ser usado na caixa frontal foi um modelo de 18", 8 ohm de impedância nominal, 2400 W de potência, excursão máxima de 9 mm, frequência de ressonância de 34 Hz, bobina de 100 mm de diâmetro e núcleo de ferrite da marca B&C, referência 18TBX100. Para a caixa traseira foi escolhido o altifalante da mesma marca, referência 15PS100 de 15", 8 ohm de impedância nominal, 1400 W de potência, excursão máxima de 8 mm, frequência de ressonância de 33 Hz, bobina de 100 mm de diâmetro e núcleo de ferrite. Como o material magnético de ambos os altifalantes é ferrite, os seus pesos são consideravelmente altos: 13 kg o de 18" e 9.8 kg o de 15" perfazendo um total de 22.8 kg. Para reduzir o peso do altifalante o material magnético deveria ser de neodímio. No entanto este tipo de altifalantes são substancialmente mais caros.

Para a simulação das caixas acústicas utilizou-se um dos mais avançados softwares de simulação disponíveis no mercado: "LEAP Enclosure Shop 5.2" (LEAP Enclosure Shop, 2009). Para efetuar as simulações é necessário fornecer os modelos matemáticos dos altifalantes a usar. Em muitos casos, os parâmetros complexos são assumidos como sendo insignificantes, ou têm valores fixos constantes, para permitir uma solução aproximada. Embora esta abordagem tenha sido muito apropriada há algumas décadas atrás, devido às limitações de cálculo, a computação moderna permite um modelo muito mais detalhado e uma análise avançada pode ser realizada.

O modelo matemático do LEAP, chamado STD, pode ser calculado a partir de duas curvas de impedância do altifalante, sendo a primeira uma curva de impedância habitual, com o altifalante montado ao ar livre i.e. sem caixa acústica, e a segunda, uma curva em que é adicionada uma porção de material ao cone com massa suficientemente grande para provocar alterações inerciais no movimento do cone do altifalante. Nesta experiência usou-se uma massa de plasticina de 150.3 g. A massa do cone do altifalante de 18", M_{ms} , é de 209 g enquanto o M_{ms} do altifalante de 15" é de 145 g pelo que 150.3 g é suficiente para causar alteração considerável do movimento do cone e alterar assim a curva de impedância do altifalante [Anexos 3 a 5]. Antes de serem realizadas estas medições os dois altifalantes foram sujeitos a um pré-condicionamento aplicando um sinal de 20 Hz durante 24 horas [Anexo 6] para que as suspensões atingissem um nível de rigidez aproximadamente igual aquele a que trabalharão.

Utilizou-se o software e hardware “LMS - Loudspeaker Measurement System” (LMS 4.1, 2000) para efetuar a medição das curvas de impedância de ambos os altifalantes. É recomendada uma calibração prévia do hardware medindo com um multímetro a tensão de saída cujo valor, 5.09 V, foi posteriormente inserido no software. As impedâncias foram medidas com e sem massa adicional e verificou-se que as frequências de ressonância dos altifalantes baixaram com o aumento da massa do cone como seria expectável analisando a equação (1). Os testes de impedância foram feitos com sinais sinusoidais ao longo do espectro sonoro (20 kHz a 20 Hz). Poderão existir algumas perturbações nas curvas de impedância devido a vibrações na fixação do altifalante e ao ruído ambiente que foi previamente verificado, sendo desprezável.

Foram introduzidas no “LEAP Enclosure Shop” as duas curvas de impedância dos altifalantes assim como os valores dos parâmetros Z_{nom} (impedância nominal), S_d (área do cone do altifalante), X_{gap} (altura do entreferro), R_{evc} (resistência da bobina), P_{max} (potência máxima do altifalante) e X_{coil} (altura da bobina) fornecidos pelo fabricante, para que fosse formado o modelo matemático e estimados os restantes parâmetros do altifalante.

4.2.1 - Simulação da Caixa Bass-Reflex

Para calcular as dimensões da caixa bass-reflex foi necessário calcular o volume interno necessário e adequado ao altifalante de 18”. De acordo com o fabricante do altifalante 18TBX100, temos $V_{AS}=212$ L, $Q_{TS}=0.35$ e $f_s=34$ Hz. Pela equação (28) temos $V_b=132.7$ L. Para obter um volume líquido semelhante optou-se por escolher as dimensões da caixa: resultando 445*550*650 mm (dimensões internas) (159,1 L), descontado o volume de ar ocupado pelo altifalante (10.5 L) mais o volume aproximado das portas (~3 L) o volume líquido é igual a 145.6 L. Adicionou-se também cerca de 50% do volume interno de material absorvente (poliéster) com densidade de 10 kg/m³ fazendo com que a caixa ficasse acusticamente maior.

Inicialmente foi tomada como referência a frequência de ressonância sugerida pela B&C para o altifalante 18TBX100 numa caixa bass-reflex. Foram dimensionadas as portas, em formato retangular e com uma flange, de acordo com a frequência de 34 Hz. Foram simulados vários tipos de porta (sempre com a mesma área): retangular, triangular e circular tendo sido escolhida a porta triangular por ter obtido os melhores resultados na resposta em frequência, por ser mais fácil de implementar e por usar menor quantidade de materiais. A área mínima da porta segundo a equação (33), quando sintonizada a uma frequência de 34 Hz, utilizando o altifalante 18TBX100 com S_d de 0.121 m² e X_{max} de 9 mm, é de 290 cm². Para que o comprimento da porta não resultasse demasiado longo optou-se por utilizar duas portas com 145 cm² de área cada. Com $V_b=148.6$ L e $K=0.732$ cada porta ficou com 344 mm de comprimento (equação 34).

Após algumas simulações, à máxima potência, 2400 W, optou-se por reduzir um pouco a área da porta por forma a obter uma melhor resposta em frequência mantendo a velocidade máxima do ar na porta inferior a 17.15 m/s. Finalmente concluiu-se o projeto com duas portas triangulares isósceles com 16 cm de lado originando uma área total de 256 cm² e um comprimento de 308.7 mm. Desta forma, estima-se obter uma velocidade máxima de 15.79 m/s aos 23.36 Hz como ilustra a Figura 35.

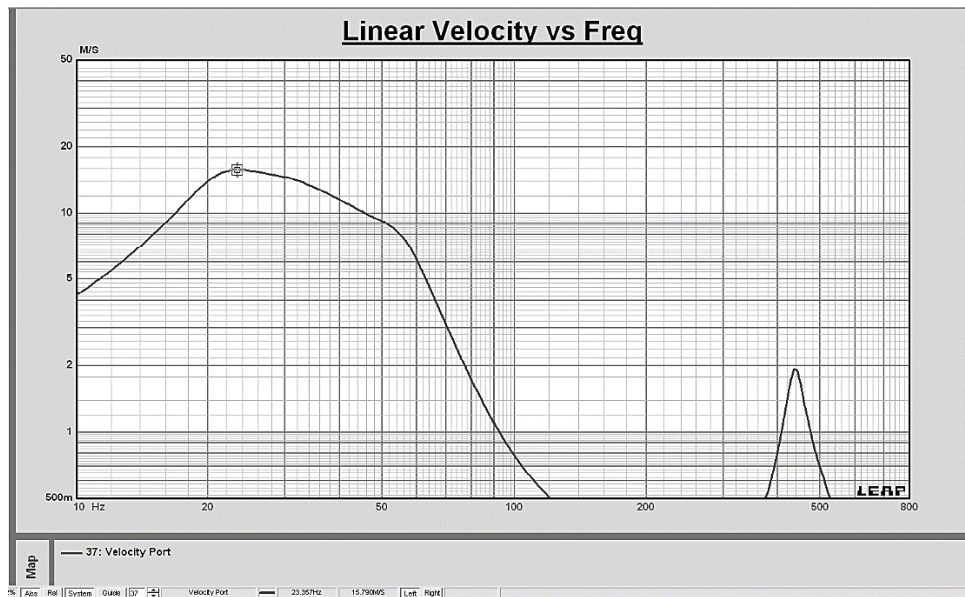


Figura 35 - Velocidade linear do ar na porta da caixa bass-reflex em função da frequência

Outro fator a ter em conta é a excursão do altifalante que não pode ultrapassar os 9mm (valor imposto como excursão máxima pelo fabricante). Para isso é necessário colocar um filtro passa-alto eletrónico por forma a não deixar que o altifalante ultrapasse o seu limite máximo de excursão que se dá aos 27.7 Hz. Uma medida adotada pela indústria é colocar um filtro com frequência de corte igual a 80% da frequência de excursão mínima local (no vale do gráfico da Figura 36). Neste caso $0.8 \cdot 36 = 28.8$ Hz. Ao aplicar o filtro, a velocidade máxima na porta irá ser mais baixa uma vez que a potência do altifalante na zona dos 23 Hz é já bastante mais reduzida.

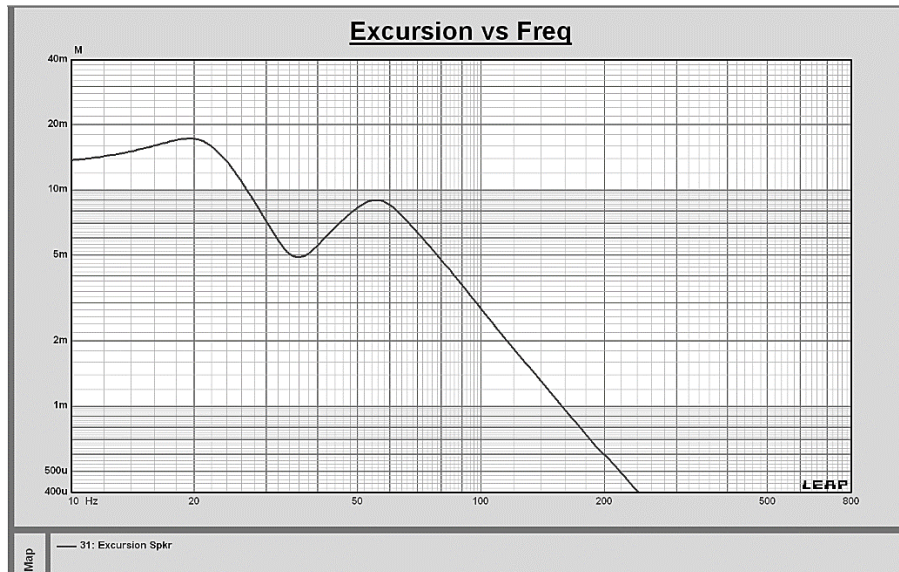


Figura 36 - Excursão do altifalante na caixa bass-reflex em função da frequência

Após todos os ajustes obtiveram-se os resultados finais da simulação feita segundo a Figura 37 e que estão representados na Figura 38, em termos da resposta em frequência.

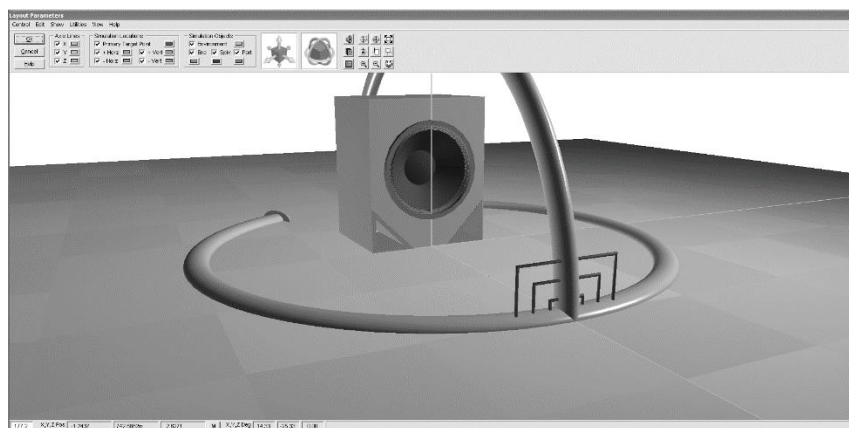


Figura 37 - Simulação 3D da caixa bass-reflex no *software* LEAP Enclosure Shop 5.2

A Figura 37 representa as condições em que foi feita a simulação. Neste caso o subgrave está colocado no chão i.e em *half-space* e o microfone também no chão (local da interceção entre os dois arcos).

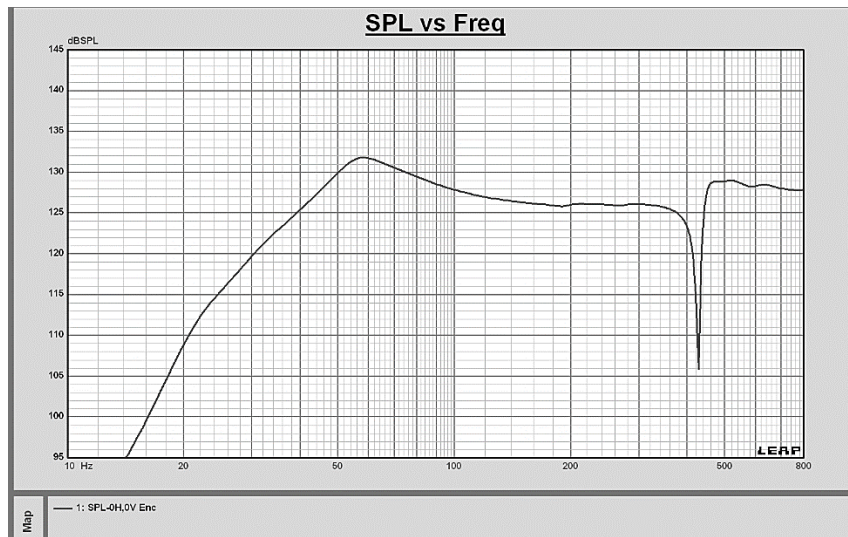


Figura 38 - Resposta em frequência simulada da caixa bass-reflex

O profundo vale que se observa na resposta em frequência por volta dos 430 Hz deve-se à interferência entre as duas portas. Como o *subwoofer* funcionará no máximo até aos 120 Hz através de um corte com um filtro passa-baixo eletrônico, esse defeito não se manifestará na resposta do sonodifusor, pelo que é desprezável.

4.2.2 - Simulação da Caixa Passa-Banda

Para iniciar o projeto da caixa passa-banda de 6ª ordem e ter uma primeira aproximação dos volumes necessários, calcularam-se os volumes câmaras anterior e posterior da caixa.

Segundo o fabricante B&C, o altifalante de 15" possui os seguintes parâmetros: $f_s=33$ Hz, $Q_{TS}=0.31$ e $V_{AS}=152$ L. Baseado nas equações (56 e 58) obtiveram-se os valores de $f_1=33$ Hz e $f_2=75$ Hz. A partir das equações (55 e 57) calcularam-se os volumes das câmaras frontal e traseira da caixa passa-banda, $V_{AB1}= 63.84$ L e $V_{AB2}= 37.39$ L totalizando aproximadamente 101 L. Como é obrigatório que a caixa tenha 930 mm de profundidade e a caixa bass-reflex tem de dimensões 445*550*650 mm (dimensões internas) a caixa passa-banda terá de ter 440*550*650 mm (dimensões internas) gerando um volume total de aproximadamente 157 L porém, a este volume é necessário subtrair o volume da placa de madeira que separa as duas câmaras. A tábua tem 15 mm de espessura, 440 mm de largura e 550 mm de comprimento (-3,6 L), por conseguinte, o volume eficaz da caixa passa-banda é de $157 - 3,6 = 153.4$ L. Tal como na caixa bass-reflex, 50% do volume interno da caixa é ocupado por material absorvente, poliéster, com densidade de 10 kg/m^3 . No final, o seu volume líquido será um pouco menor uma vez que será necessário descontar o volume ocupado por cada uma das portas. A frequência de sintonia superior foi aumentada para 90 Hz para obter um espectro de reprodução sonora mais alargado

e mais adequado ao problema. A frequência de sintonia mais baixa foi sintonizada aos 33 Hz, frequência de ressonância do altifalante. O volume de cada uma das câmaras foi calculado a partir de sucessivas simulações sendo adotados os valores que representavam uma melhor resposta em frequência, excursão do altifalante dentro dos limites e velocidade do ar nas portas não excessiva. Após esse estudo primário foi adicionado ao volume da câmara frontal o volume do cone do altifalante e subtraído ao volume da câmara traseira o volume do altifalante uma vez que este está montado numa estrutura divisória das duas câmaras. Com os novos volumes seguiram-se novas simulações e aperfeiçoamento dos tubos.

Como resultado final obteve-se uma câmara frontal com dimensões internas de 440*550*190 mm (46 L) no entanto o volume líquido da câmara é superior pois é necessário acrescentar o volume do altifalante e descontar o volume das portas obtendo-se um total de 49 L. A porta da câmara frontal, é um retângulo que se estende ao logo de toda a traseira do sonodifusor e encontra-se na parte superior com dimensões de 45*550 mm (248 cm²) e comprimento de 45 mm. Esta porta está sintonizada a 90 Hz.

A câmara traseira é um pouco maior com dimensões 440*550*445 mm (108 L), tendo em conta o volume do altifalante e o volume ocupado pela porta foi necessário descontar 9 L totalizando 99 L. A porta foi sintonizada aos 33 Hz como mencionado acima, com dimensões de 25*550 mm (138 cm²) e comprimento de 250 mm, estendendo-se ao longo da traseira do sonodifusor e disposta na zona inferior do mesmo.

Todos os gráficos seguidamente apresentados foram simulados à potência máxima do altifalante, 1400 W. Após análise da Figura 39 é possível verificar que existe um pico de velocidade em cada uma das portas. O pico da porta frontal dá-se aos 111 Hz com uma velocidade de 16.97 m/s. A velocidade máxima da porta traseira é de 16.713 m/s aos 21 Hz. Ambas as velocidades estão abaixo do valor estabelecido como máximo (17.15 m/s).

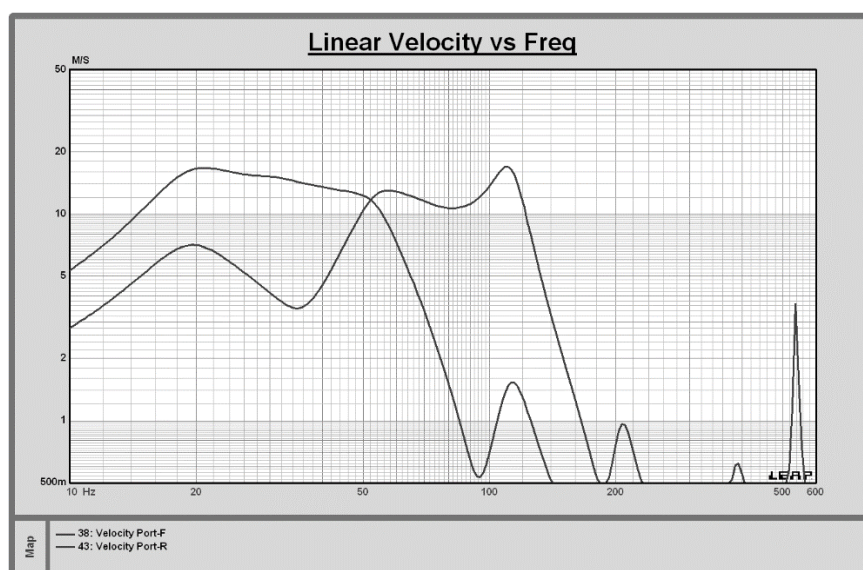


Figura 39 - Velocidade linear do ar nas portas da caixa passa-banda em função da frequência

A Figura 40 representa a excursão do altifalante em função da frequência. Para proteger o altifalante de atingir excessivos valores de excursão, atingidos abaixo dos 34 Hz (frequência de ressonância mais baixa), é necessário aplicar um filtro do tipo passa-alto aos $0.8 \cdot 34 = 27.2$ Hz

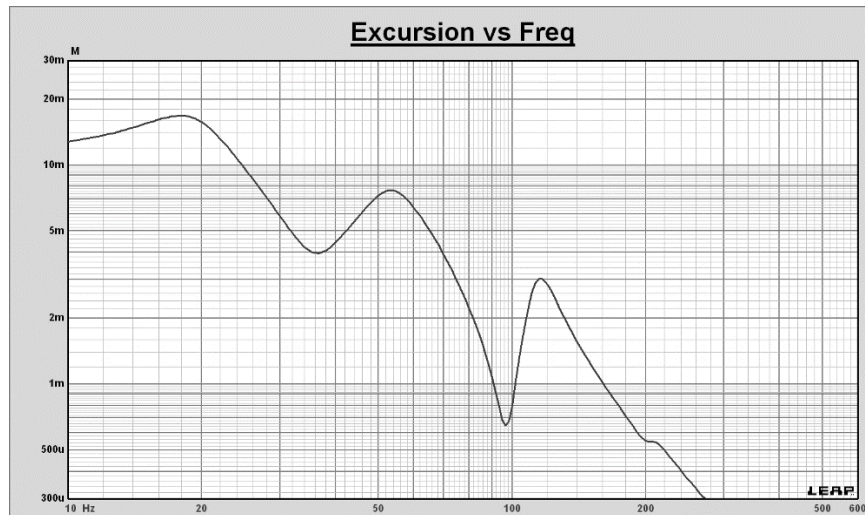


Figura 40 - Excursão do altifalante na caixa passa-banda em função da frequência

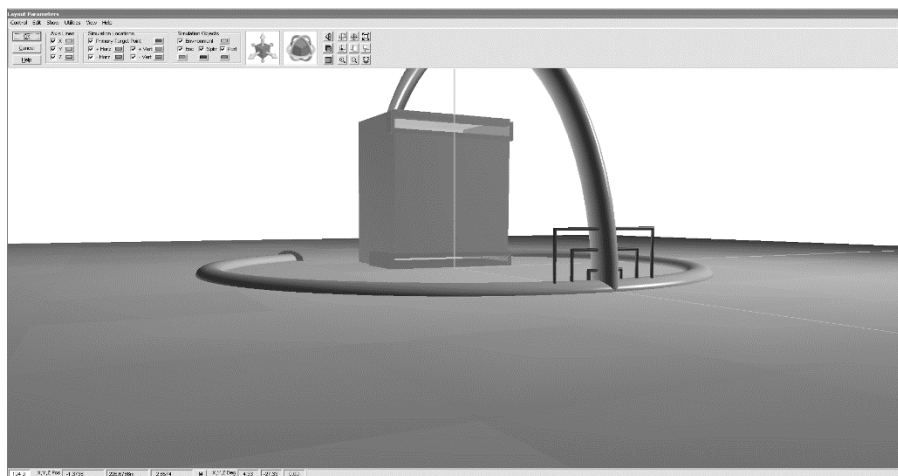


Figura 41 - Simulação 3D da caixa passa-banda no software LEAP Enclosure Shop 5.2

A Figura 41 representa a simulação em 3D e onde foi colocado o microfone para a simulação (intersecção dos dois arcos), que neste caso é no chão e em *half-space*. A Figura 42 apresenta a resposta em frequência da caixa passa-banda. As perturbações que aparecem a partir dos 186 Hz devem-se a reflexões na caixa e portanto são impossíveis de eliminar. Uma forma de evitar este fenómeno é a utilização de um filtro passa-baixo.

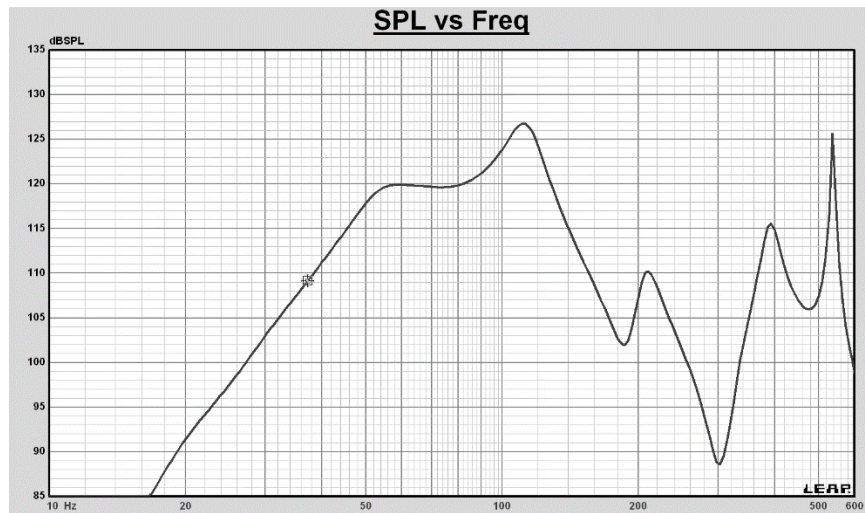


Figura 42 - Resposta em frequência simulada da caixa passa-banda

4.3 - Construção e Montagem do Sonodifusor

Após a conclusão das simulações e estabelecidas as dimensões, é necessário projetar as peças do subgrave. Para isso executou-se, em Adobe Illustrator CS6 (Adobe Illustrator CS6, 2013), um desenho à escala de cada uma das peças integrantes do sonodifusor assim como um corte lateral do mesmo. Todas as medidas seguiram as medidas internas simuladas acrescentando a espessura da madeira de 15 mm.

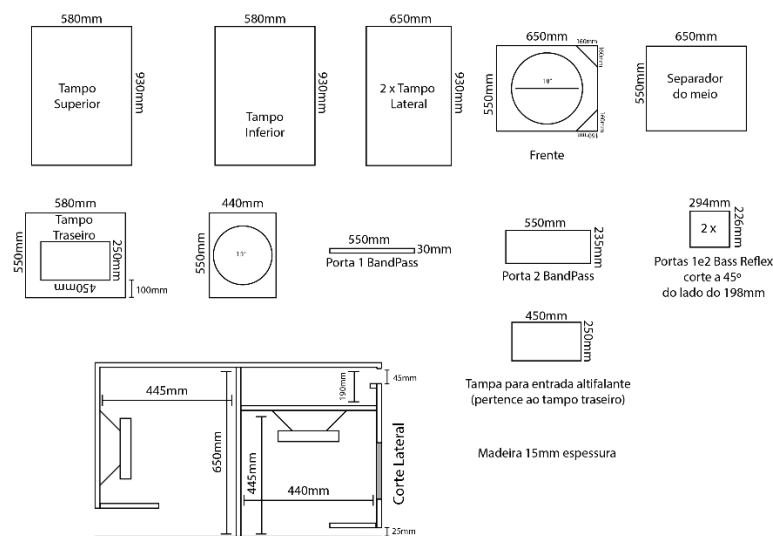


Figura 43 - Desenho técnico das peças integrantes do projeto e corte lateral da caixa acústica

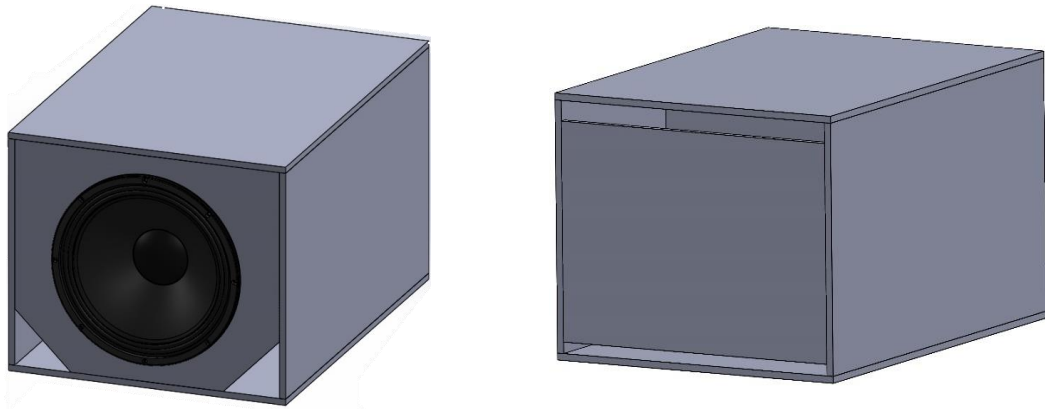


Figura 44 - Vista em 3D da parte frontal e traseira do sonodifusor executada em SOLIDWORKS

Na Figura 44 pode ver-se o aspeto final que deverá ter a frente do sonodifusor assim como o encaixe de todas as peças.

Os elementos presentes na Figura 43 e Figura 44 possibilitam, a qualquer pessoa, construir e montar o protótipo desenvolvido ao longo desta dissertação.

Uma descrição detalhada das fases de construção, montagem e alguns detalhes importantes está disponível nos Anexos [7 a 12].

Capítulo 5 - Resultados Experimentais

Antes de se obter qualquer resultado de medição é de extrema importância a calibração dos instrumentos a usar. Por este motivo foi feita a calibração do microfone de precisão Earthworks M30, por via de um calibrador de pressão sonora, CEM SC-05, respeitante da norma IEC 942 Class 2 com precisão de +/- 0.5 dB. O ajuste foi feito com um sinal de 94 dB (1 Pa a 1 kHz) e medido com a funcionalidade multímetro do software CLIO 10 (CLIO 10, 2012). O hardware que faz a conexão entre o microfone e o computador é a interface firewire CLIO FW-01 também devidamente calibrada através de calibração automática.

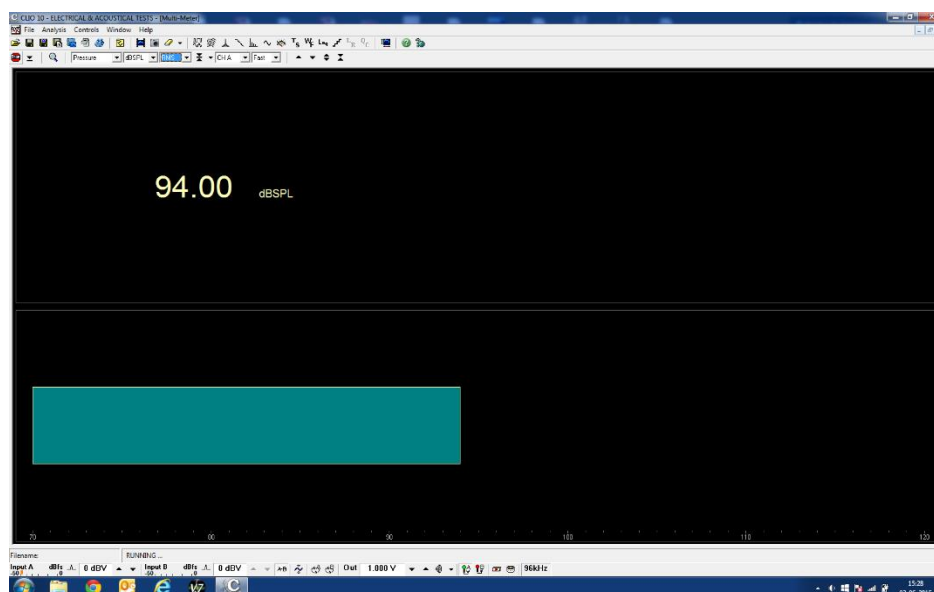


Figura 45- Calibração do microfone através da função multímetro do CLIO 10

A sensibilidade do microfone foi alterada por forma a obter 94 dB numa medição RMS do multímetro. A Figura 45 mostra que o microfone ficou devidamente calibrado. A sensibilidade final do microfone ficou definida em 9.1 mV/Pa.

Para definir as frequências de corte dos filtros passa-altos reais, é necessário medir a impedância do conjunto caixa+altifalante. Utilizou-se mais uma vez o software e hardware LMS para a obtenção de cada uma das curvas de impedância disponibilizadas nos Anexos [13 e 14]. Após análise das curvas pode constatar-se que a frequência de ressonância mais baixa da caixa passa-banda é de 32.2 Hz e a frequência de ressonância da caixa bass-reflex é de 33 Hz. Desta forma será necessário implementar filtros passa-alto aos 25.8 Hz e 26.4 Hz respetivamente.

Traçou-se a curva de sensibilidade de cada um dos sonodifusores (bass-reflex e passa-banda) com o CLIO 10. Para tal, mediu-se a tensão, em dBV, com um sinal LogChirp, nos terminais do altifalante ao longo de todo o espectro de frequências. Após ser feito o registo da curva em dBV deve medir-se a curva de resposta em frequência, com o microfone a 1 m, para que depois seja ajustada a intensidade sonora de acordo com a impedância nominal do altifalante e com a curva em dBV. Desta forma obtém-se exatamente a curva de sensibilidade a 1 W/1m (Figura 46). Pode verificar-se que as curvas coincidem com as simulações efetuadas no capítulo anterior que, foram projetadas por forma a serem idênticas até aos 100Hz.

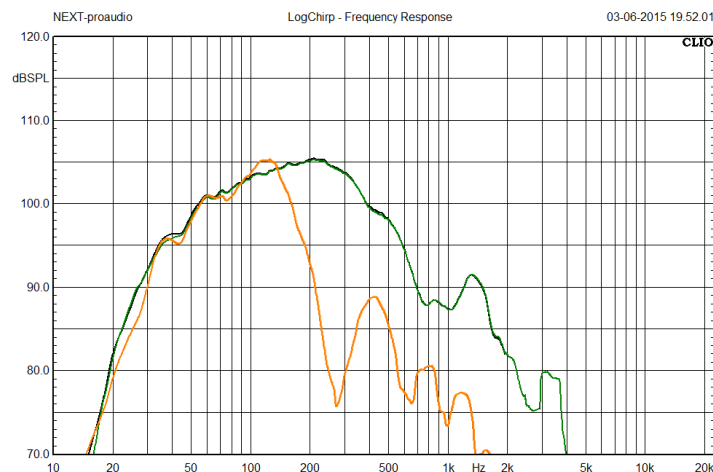


Figura 46 - Curva de sensibilidade da caixa passa-banda (laranja) e da caixa bass-reflex (verde)

A formação do diagrama cardióide parte do pressuposto que o som vindo da frente do bass-reflex é anulado pelo som gerado pelo passa-banda que se encontra na traseira. Para que este resultado se verifique há duas coisas que terão de acontecer: a fase dos sinais terá de ser oposta e a sua magnitude terá de ser igual. Para alcançar tal objetivo, usou-se um processador de áudio NEXT-proaudio LMS242 que permite equalizar cada uma das caixas independentemente assim como ajustar o seu *delay* e ganho. O microfone foi colocado a 3 metros da fonte sonora, pela parte de trás, onde se necessita o cancelamento. Registou-se a resposta em fase e frequência do bass-reflex, com ruído rosa, usando o *software* SMAART v7 (SMAART v7, 2012). O microfone encontrava-se a 3m da parte traseira do sonodifusor. Posteriormente, equalizou-se o sistema passa-banda para que as duas respostas em frequência, a registada anteriormente e a medida em tempo-real, se sobrepusessem. A fase é ajustada através do *delay*. Adicionou-se um atraso à caixa passa-banda por forma à curva de fase se sobrepôr à anteriormente captada. O atraso foi de 2.593 ms, um pouco inferior ao calculado na equação (80) devido ao atraso intrínseco à caixa do tipo passa-banda (*Group Delay*). Quando as curvas de fase se sobrepõem quer isso dizer que as ondas sonoras estão em fase a todas as frequências, basta então fazer a inversão de fase no processador e a curva de fase do sistema passa-banda desloca-se 180° paralelamente à curva de fase do bass-reflex. Estão então reunidas

as duas condições para que haja o máximo cancelamento na traseira do sonodifusor. Adicionaram-se os respetivos filtros passa-alto (Linkwitz-Riley 18 dB/oitava) e um filtro passa-baixo aos 100 Hz (Linkwitz-Riley 24dB/oitava) [Anexo 15]. Neste caso escolheu-se 100Hz para o caso demonstrativo de um conjunto sub+top com uma coluna NEXT HFA112. No entanto o subgrave pode ser reprogramado até uma frequência de corte máxima de 120 Hz.

Para o ajuste final de resposta em frequência mas desta vez na frente do sonodifusor, colocou-se o microfone na frente, e com o sistema cardióide em funcionamento, equalizou-se o sistema completo i.e. na entrada do processador, de forma a obter uma resposta em frequência plana.

De forma a documentar os resultados do conceito e os ajustes previamente descritos preparou-se o esquema de medição da Figura 47. Por meio do hardware e software do CLIO 10 e da mesa rotativa LT360 (LT360, 2006), foi possível medir o diagrama polar horizontal (2D) do sonodifusor. A aquisição de dados é feita de 10° em 10° ao longo de 360° perfazendo um total de 36 medições [Anexo 16]. O sinal usado foi LogChirp. O CLIO 10 possibilita ao utilizador, a partir das medidas efetuadas, calcular um diagrama polar assim como um gráfico colorido da diretividade.

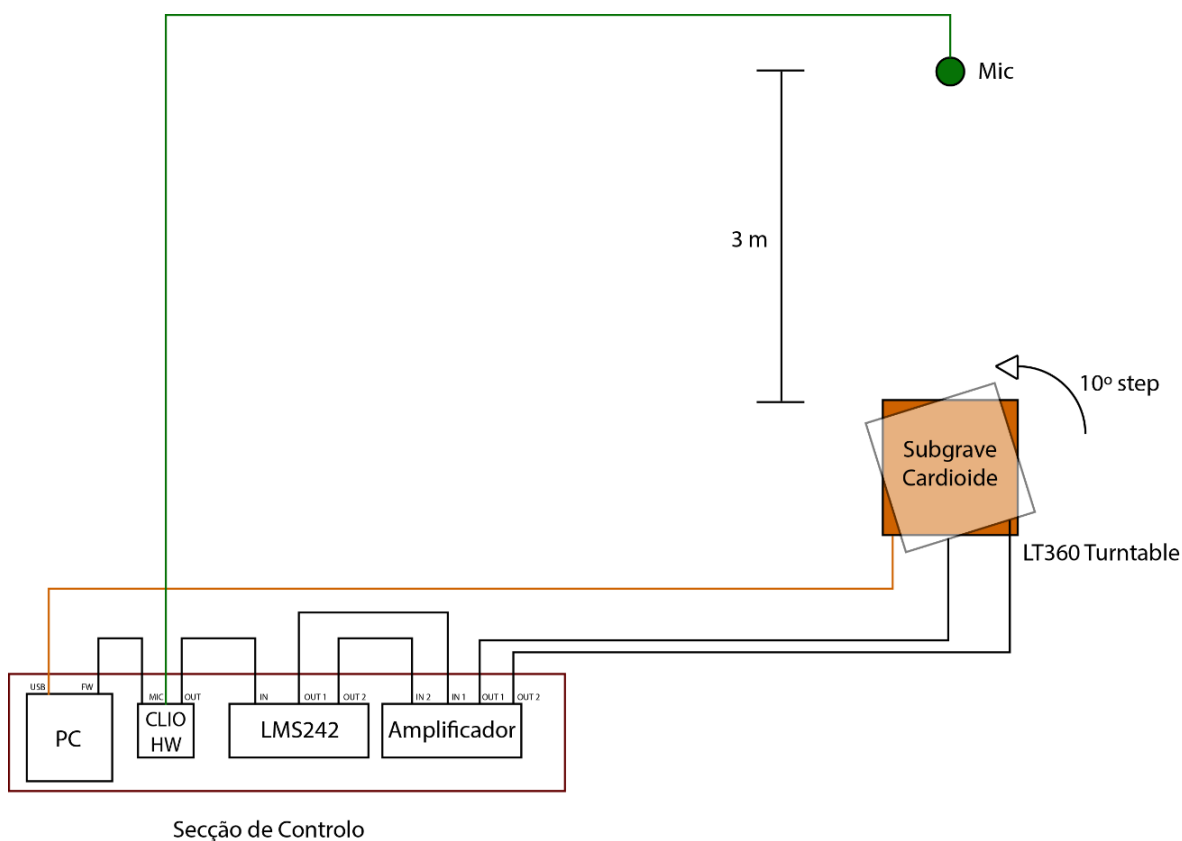


Figura 47 - Esquema de medição do diagrama polar

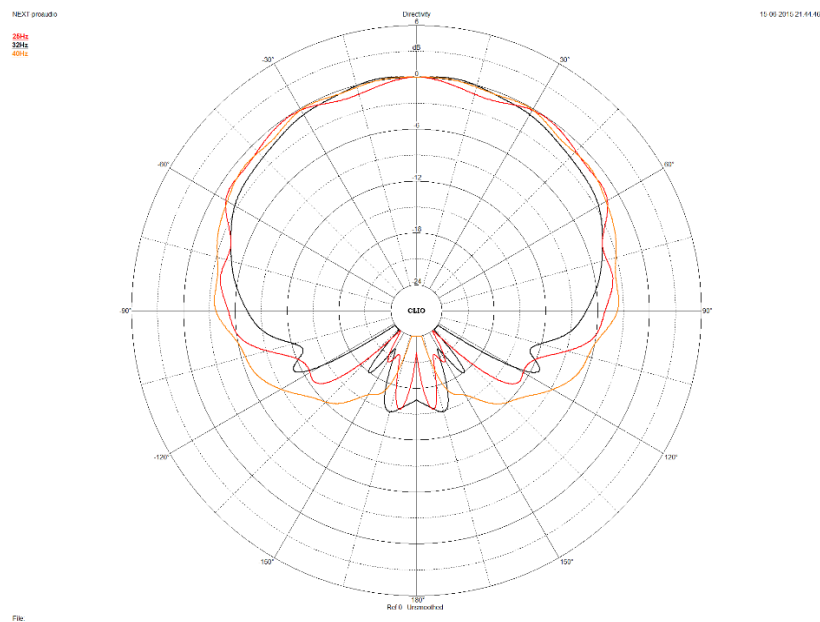


Figura 48 - Gráfico polar do subgrave cardióide às frequências ISSO 266 (25 Hz a 40 Hz)

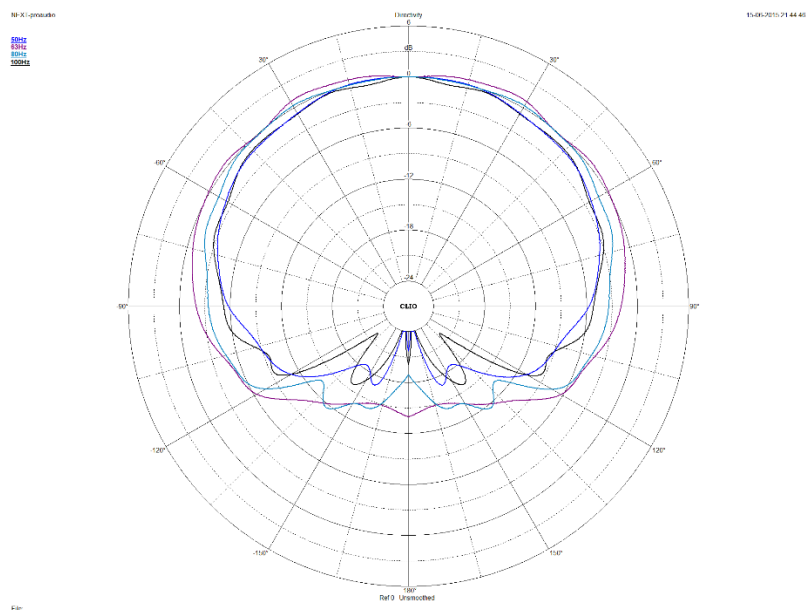


Figura 49 - Gráfico polar do subgrave cardióide às frequências ISSO 266 (50 Hz a 100 Hz)

A Figura 48 e Figura 49 representam os gráficos polares do subgrave desenvolvido ao longo desta dissertação. As curvas estão representadas às frequências ISSO 266 entre 25 Hz e 100 Hz (gama de trabalho do subgrave). O motivo da separação em dois gráficos foi a melhor leitura dos mesmos. No Anexo [17] encontram-se os gráficos polares do mesmo subgrave a trabalhar em configuração não cardióide isto é, apenas com a caixa bass-reflex em funcionamento.

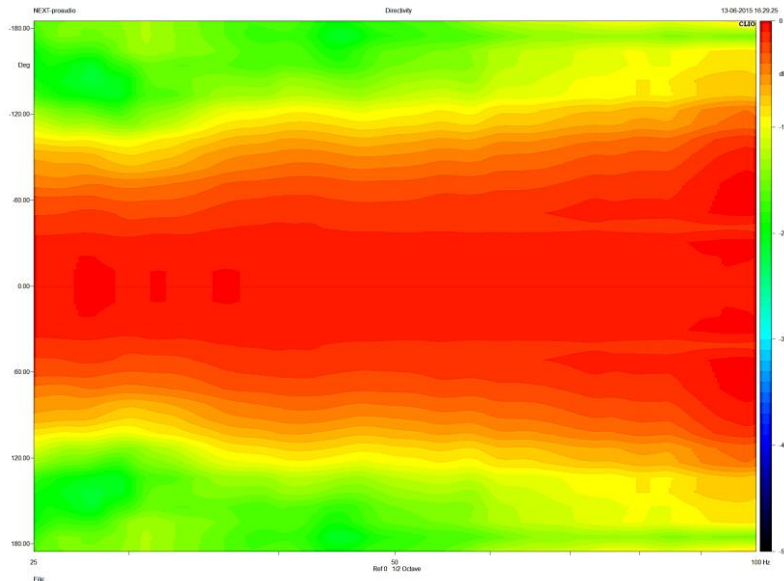


Figura 50 - Diagrama de diretividade colorido

Pela Figura 50 se verifica que a maior pressão sonora (zona vermelha), se encontra entre os 120° e os -120° . Quer isto dizer que o objetivo de cancelamento sonoro na zona traseira (120° a 240°) foi alcançado.

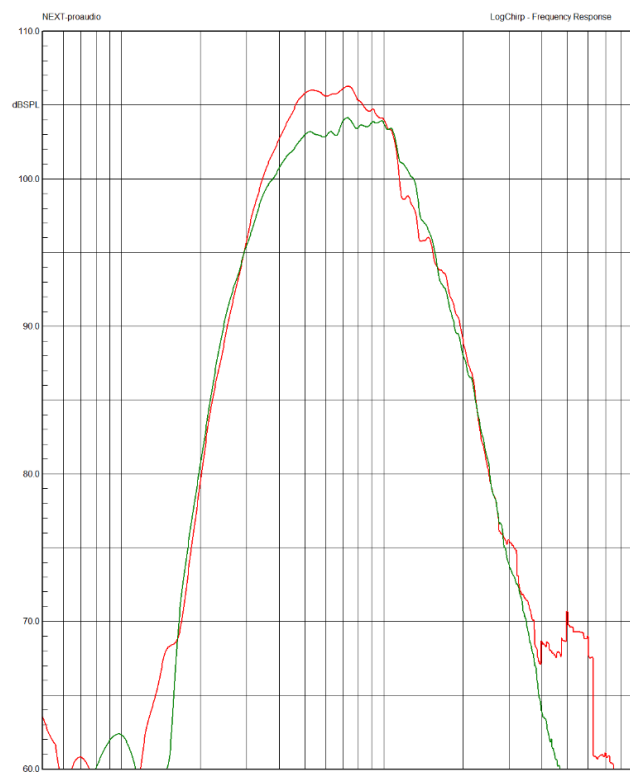


Figura 51 - Comparação das curvas de resposta da caixa bass-reflex (verde) e subgrave cardióide (vermelho)

Na Figura 51 pode observar-se que, tal como se esperava, para além do cancelamento traseiro haja reforço sonoro na frente do subgrave cardióide. Neste caso, pode observar-se um aumento de sensivelmente 3 dB em relação à caixa bass-reflex convencional.

Capítulo 6 - Conclusões e Trabalhos Futuros

Este projeto, por abranger uma vasta gama de áreas, desde a acústica à programação, impôs um longo período de estudo sobre as diversas matérias. O estudo teórico realizado veio contribuir para aumentar os meus conhecimentos sobre acústica, desenho e projeto de subgraves, técnicas de medição e tipologias de ruído a usar nas medições.

O desenvolvimento da ferramenta ASI, em MATLAB, foi um grande passo para a compreensão do comportamento das ondas acústicas e como se relacionam entre si. Veio a mostrar-se também como um elemento fundamental para a simulação do sonodifusor e confirmação de resultados. Felizmente, foi-me possível a materialização do projeto e subsequente apreciação dos resultados. O primeiro protótipo não satisfez totalmente as minhas expectativas pelo que foi necessário fazer pequenas alterações para um desempenho ótimo. No final, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e de acordo com as simulações executadas na aplicação desenvolvida em MATLAB. Após confirmar os resultados, posso afirmar que a aplicação desenvolvida também é precisa o suficiente.

Como trabalho futuro, porque o tempo da dissertação é curto para um estudo tão longo e aprofundado, gostaria de aplicar ao software uma modelação em 3D do sonodifusor o que, no meu ponto de vista, não será complicado uma vez que basta replicar o cálculo feito para o eixo X/Y. Outra das melhorias seria ter em conta a difração sonora na própria caixa acústica, pelo menos uma aproximação simples do efeito.

Quanto ao sonodifusor, penso que deveria ser um pouco menos profundo por forma a alargar a gama de frequências a que o subgrave é controlável; infelizmente foi impossível realizar essa modificação por falta de tempo. Um resultado que encontrei ao longo deste estudo, e que me preocupou bastante, foram os altamente baixos rendimentos de um altifalante eletrodinâmico (informação fornecida pelo fabricante dos altifalantes). Embora não tenha aprofundado essa área estou ciente de que ainda há muito por realizar para melhorar este campo da electroacústica.

Em suma, o resultado deste projeto foi bastante satisfatório uma vez que para além de alcançados os objetivos, o preço de custo do produto, que ronda os 400€, se enquadra com o panorama atual do áudio profissional. Acima de tudo, considerei este estudo uma excelente forma de aprendizagem e enriquecimento intelectual.

Referências

Adobe Illustrator CS6 (2013),

http://help.adobe.com/archive/en/illustrator/cs6/illustrator_reference.pdf

B4 Subwoofer, (2015), <<http://www.dbaudio.com/en/systems/details/b4-subwoofer.html>>

Beranek, L. L (1993), Acoustics. 2nd ed. Acoustical Society of America, Woodbridge, NY. 1993.

CD12 Cardioid Dipolar Subbass, (2015), <<http://nexo-sa.com/en/products/8/cd12/>>

Christner, M. (2014), Loudspeaker system with reduced rear sound radiation (Google Patents, 2014)

CLIO 10 (2012), <http://www.audiomatica.com/wp/wp-content/uploads/clioman10.pdf>

G. Margolis and R. H. Small (1981), "Personal Calculator Programs for Approximate Vented-Box and Closed-Box Loudspeaker System Design," J. Audio Eng. Soc., vol. 29, pp. 421-441 (1981 June); corrected on p. 824 (1981 Nov.).

John Eargle (2004), The Microphone Book, Second Edition (Focal Press, 2004).

Leach, W. Marshall, Jr (2001), Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier Design. 2nd ed. Kendall/Hunt, Dubuque, IA. 2001.

LEAP Enclosure Shop (2009), http://www.linearx.com/files/pdf/EncShop_Brochure.pdf

LMS 4.1 (2000), http://www.linearx.com/files/pdf/LMS-4_Manual.pdf

LT360 (2006), <http://www.manualslib.com/manual/831550/Linearx-Lt360.html#manual>

Ortega, B. P. and M. R. Romero (2003), Electroacústica: altavoces y micrófonos, Pearson Educación.

Owen Cramer (1993), "JASA, 93, p. 2510, 1993"

Peter Strassacker (2004), "Frank Kleiber on Thiele & Small parameters", July 2004.

R.H. Small (1973), "Vented-Box Loudspeaker Systems," J. Audio Eng. Soc., vol. 21, pp. 363-372 (1973 June); pp. 438-444 (1973 July/Aug.); pp. 549-554 (1973 Sept.); pp. 635-639 (1973 Oct.).

Richard S. Davis (1992), "Metrologia, 29, p. 67, 1992"

SMAART v7 (2012), <http://rationalacoustics.com/wp-content/uploads/2013/05/Getting-Started-with-Smaart-v7.4.pdf>

The Subwoofer DIY Page (2006), <http://www.diysubwoofers.org/bnd/6thord1.htm>

Vance Dickason (1991), The Loudspeaker Design Cookbook, Fourth Edition (Audio Amateur Press, Peterborough, NH, 1991).

Vance Dickason (2006), The Loudspeaker Design Cookbook, Seventh Edition (Audio Amateur Press, Peterborough, NH, 2006).

XCS312 Triple 12" cardioid bass element, (2015),
<<http://www.electrovoice.com/product.php?id=927>>

Bibliografia

A.N Thiele (1973), "Loudspeakers in Vented Boxes", JAES, May 1973

Beranek, L. L (1996), "Acoustics", McGraw-Hill, 1996 edition

D. B. Keele, Jr (1974), Low-Frequency Loudspeaker Assessment by Nearfield Sound-Pressure Measurement, 1974-04 AES Published

DeCarlo, Raymond A. (2004), "The Butterworth Approximation." and "The Chebyshev Approximation." Notes from ECE 445. Purdue University. 2004.

E. Larsen and R.M. Aarts (2004), Audio Bandwidth extension. Application of Psychoacoustics, Signal Processing and Loudspeaker Design, J. Wiley.

Kreutz, Joseph and Panzer, Joerg (1994), "Derivation of the Quasi-Butterworth 5 Alignments." Journal of the Audio Engineering Society. Vol. 42, No. 5, May 1994.

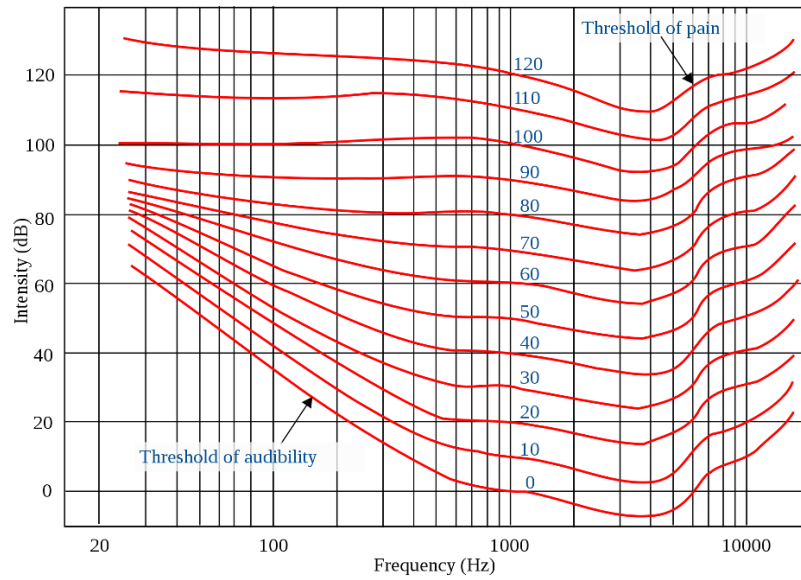
R. Small (1972), "Direct Radiator Loudspeaker System Analysis", JAES, June 1972.

R. Small (1973), "Closed-Box Loudspeaker Systems, Part 1,2", JAES Jan, Feb 1973.

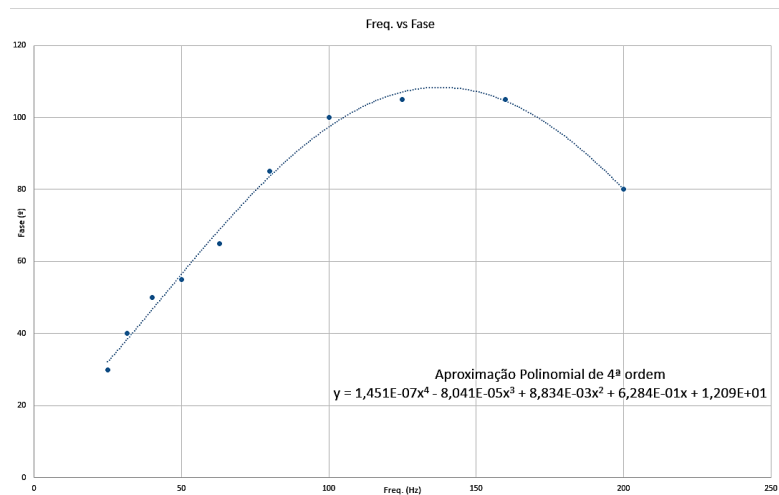
Rutt, Thomas E. (1985) "Root-Locus Technique for Vented-Box Loudspeaker Design." Journal of the Audio Engineering Society. Vol. 33, No. 9, September 1985.

Van Valkenburg, M. E (1982), Analog Filter Design. Holt, Rinehart and Winston, Inc. Chicago, IL. 1982.

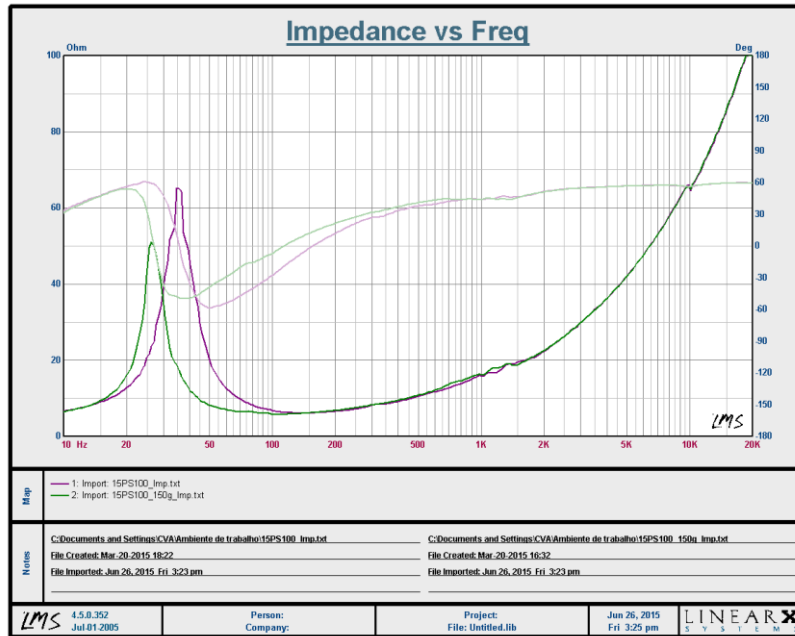
Anexos



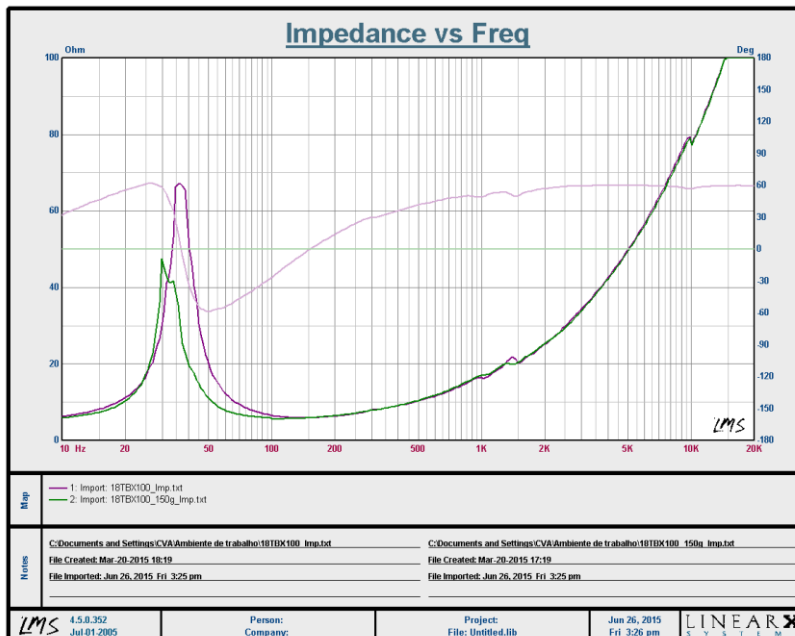
Anexo 1 - Curva de Fletcher-Munson



Anexo 2 - Gráfico de interpolação de 4ª ordem



Anexo 3 - Curvas de impedância do altifalante 15PS100



Anexo 4 - Curvas de impedância do altifalante 18TBX100



Anexo 5 - Medição da curva de impedância com massa adicional



Anexo 6 - Gerador de sinais durante o período de pré-condicionamento



Anexo 7 - Corte da madeira com tico-tico



Anexo 8 - Tábua de uma porta (tubo) com aresta boleada.



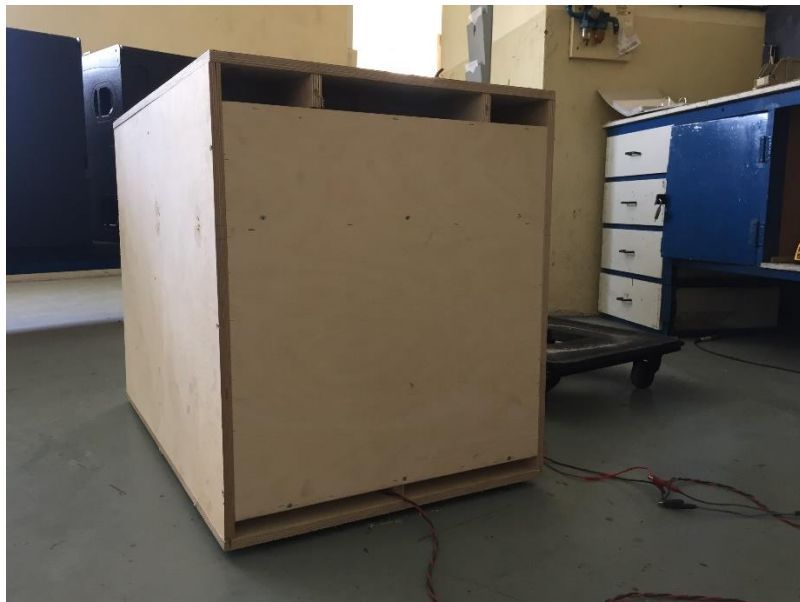
Anexo 9 - Interior da caixa acústica



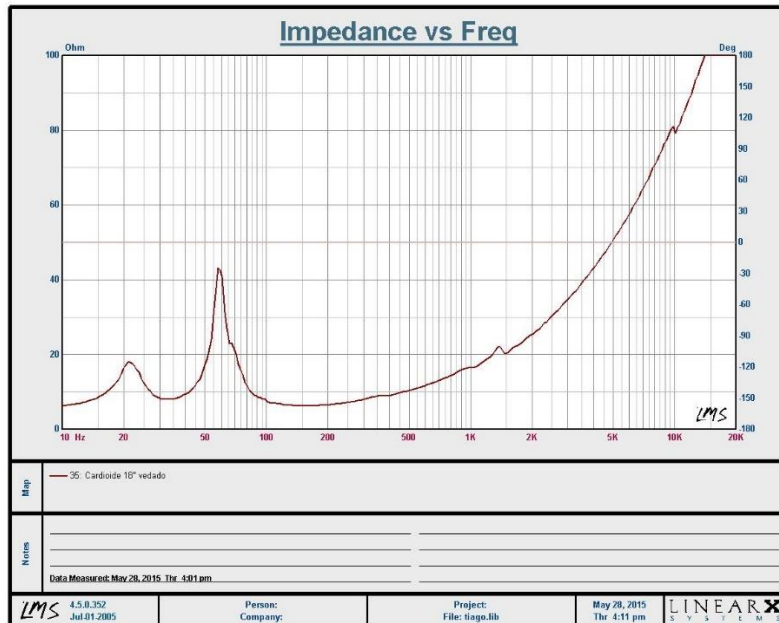
Anexo 10 - Interior da caixa acústica com material absorvente, altifalantes assembled e travamentos adequados (a fita esponjosa no centro serve para vedar a passagem de ar entre as duas câmaras)



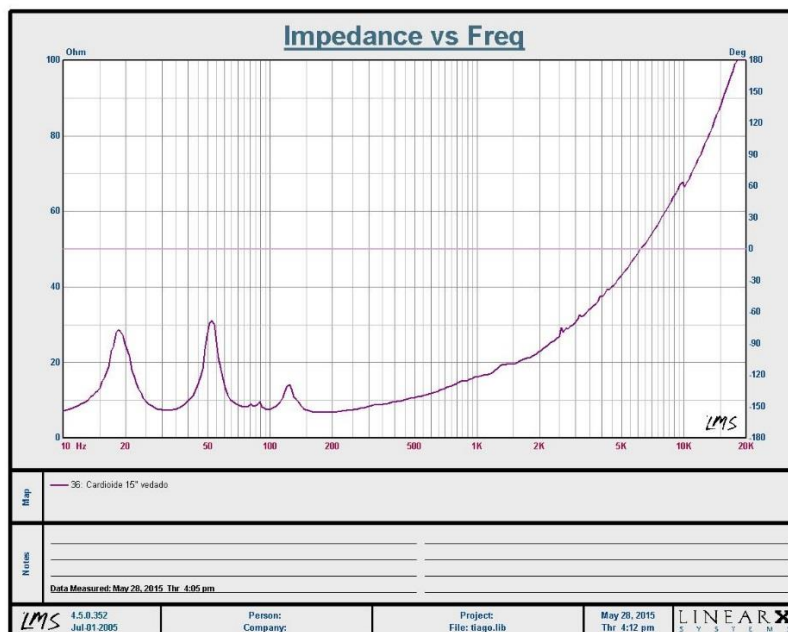
Anexo 11 - Vista frontal do sonodifusor (bass-reflex)



Anexo 12 - Vista traseira do sonodifusor (passa-banda)



Anexo 13 - Curva de impedância da caixa bass-reflex



Anexo 14 - Curva de impedância da caixa passa-banda

