

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

UM SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE RUÍDO  
UTILIZANDO A TÉCNICA DE BEAMFORMING

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

YURI ADSON RIBEIRO SILVA

Florianópolis, dezembro de 2008.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TÍTULO

UM SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE RUÍDO  
UTILIZANDO A TÉCNICA DE BEAMFORMING

YURI ADSON RIBEIRO SILVA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM VIBRAÇÕES E ACÚSTICA  
sendo aprovada em sua forma final.

---

Samir Nagi Yousri Gerges, Ph.D. – Orientador

---

Eduardo Alberto Fancello, D.Sc. – Coordenador

BANCA EXAMINADORA

---

Sidnei Noceti Filho, D.Sc.

---

Mário Trichês Júnior, Dr.Eng.

---

Roberto Jordan, Dr.Eng. – Presidente



Dedico este trabalho aos meus queridos pais que, além de serem grandes exemplos de amor e dedicação, sempre me apoiaram incondicionalmente durante todas as etapas de minha vida.



“Making the simple complicated is commonplace;  
making the complicated simple, awesomely simple, that’s creativity.”

*Charles Mingus*



# Agradecimentos

Ao Prof. Samir, agradeço muito pela oportunidade que me foi dada e por toda a confiança e apoio neste projeto de pesquisa.

Ao William, pelas valiosas discussões e pelo companheirismo nas atividades realizadas para este trabalho e nas muitas outras que a amizade nos permitiu.

Ao Thiago, pela motivação no início deste projeto e por dividir seus conhecimentos adquiridos durante os seus primeiros estudos nesta linha de pesquisa.

Aos outros amigos do Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC, Marcelo, Stephan, Raquel e Ricardo, que além de compartilharem a paixão pela acústica contribuíram para enriquecer os momentos de convívio em Florianópolis.

Ao Kurt Veggeberg, representando a National Instruments, sou muito grato pelo fornecimento do código fonte do NI MAS.

Ao Alexandre Nunes, representando a General Motors do Brasil Ltda., por tornar possível a continuação do trabalho e por permitir que parte deste fosse realizado com a infra-estrutura do Laboratório de Ruídos e Vibrações do Campo de Provas da Cruz Alta.

Ao Erlon, meus sinceros agradecimentos pela paciência e horas gastas me ajudando com a revisão do texto.

Além destes, quero agradecer especialmente àquela que acompanhou todo o outro lado desta história, Cássia, pelo incentivo, apoio e paciência, principalmente nos momentos em que este trabalho se tornou difícil de ser realizado.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, mesmo não sendo listados aqui, contribuíram, de alguma maneira, para que este trabalho fosse realizado. Muito obrigado!



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xv</b>
<b>Resumo</b>	<b>xvii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	5
1.3 Organização do trabalho . . . . .	6
<b>2 Revisão da Literatura</b>	<b>7</b>
<b>3 Fundamentos da Técnica de Beamforming</b>	<b>15</b>
3.1 Propagação da onda sonora . . . . .	15
3.2 Arranjos de microfones para identificação de fontes . . . . .	18
3.3 Algoritmos de Beamforming . . . . .	19
3.4 Construção dos mapas . . . . .	29
3.5 Características da resposta de um arranjo . . . . .	30
3.6 Resposta de diferentes tipos arranjos planos . . . . .	37
3.7 Calibração do arranjo de microfones . . . . .	38
<b>4 Desenvolvimento do Sistema</b>	<b>43</b>
4.1 Considerações iniciais . . . . .	43
4.2 Sistema de aquisição de dados . . . . .	44
4.3 Construção dos microfones de baixo custo . . . . .	47
4.4 Software de análise e processamento dos sinais . . . . .	51

4.5	Projeto da geometria do arranjo . . . . .	54
4.6	Aspectos construtivos do arranjo . . . . .	56
4.7	Calibração e alinhamento da resposta do arranjo . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Caracterização Experimental do Sistema</b>	<b>63</b>
5.1	Análise da cadeia de instrumentação . . . . .	63
5.2	Medição do monopólo acústico . . . . .	69
5.3	Separação de duas fontes . . . . .	75
5.4	Conclusões . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Aplicações na Identificação de Fontes de Ruído</b>	<b>79</b>
6.1	Possíveis aplicações na indústria automotiva . . . . .	79
6.2	Vazamento acústico através de painéis . . . . .	81
6.3	Ruído no compartimento do motor . . . . .	90
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>103</b>
7.1	Considerações finais . . . . .	103
7.2	Trabalhos futuros . . . . .	105
	<b>Referências</b>	<b>107</b>
	<b>Apêndice A – Códigos em LabVIEW</b>	<b>113</b>
	<b>Apêndice B – Configuração do arranjo</b>	<b>117</b>
	<b>Apêndice C – Objetos analisados</b>	<b>119</b>
	<b>Anexo A – Informações de fabricantes</b>	<b>121</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1	Arranjo de 27 antenas de rádio utilizado para análise de sinais eletromagnéticos em radioastronomia. . . . .	8
Figura 2.2	Arranjos de 256 transdutores para obtenção de imagens médicas ultrassônicas tridimensionais. . . . .	8
Figura 2.3	Demonstração de uso do arranjo de sensores acústicos construído pelos franceses na Primeira Guerra Mundial para detecção de aeronaves inimigas. . .	10
Figura 3.1	Esquema geral do sistema para o mapeamento de fontes sonoras. . . . .	19
Figura 3.2	Representação geométrica de um arranjo de cinco microfones e uma fonte pontual. . . . .	20
Figura 3.3	Mapa de Beamforming para uma única fonte posicionada na origem do plano XY. . . . .	30
Figura 3.4	Determinação da largura de feixe em 3 dB. . . . .	31
Figura 3.5	Razão entre a resolução na direção de focalização e a resolução no eixo perpendicular ao arranjo em função do ângulo $\theta$ . . . . .	33
Figura 3.6	Definição da faixa dinâmica de operação de uma arranjo através da diferença de nível entre o lóbulo principal e o maior lóbulo lateral. . . . .	34
Figura 3.7	Mapeamento de uma única fonte utilizando arranjos regulares com mesmas dimensões externas. . . . .	35
Figura 3.8	Arranjo retangular e suas FEP em 3 kHz e em 7 Hz. . . . .	39
Figura 3.9	Arranjo em forma de cruz e suas FEP em 3 kHz e em 7 Hz. . . . .	39
Figura 3.10	Arranjo com espirais múltiplas e suas FEP em 3 kHz e em 7 Hz. . . . .	39
Figura 3.11	Arranjo aleatório e suas FEP em 3 kHz e em 7 Hz. . . . .	39
Figura 4.1	Esquema de cada canal de aquisição do módulo NI 9233. . . . .	45
Figura 4.2	Desvios típicos no ganho do filtro passa-banda do NI 9233. . . . .	45

Figura 4.3	Erro de não-linearidade na estimativa de fase do NI 9233. . . . .	45
Figura 4.4	Esquema da unidade de interfaceamento NI cDAQ -9172. . . . .	47
Figura 4.5	Cápsulas comerciais da Panasonic <sup>©</sup> utilizadas no sistema desenvolvido.	48
Figura 4.6	Diagrama elétrico do circuito de condicionamento do sinal a ser integrado a cápsula de eletreto. . . . .	50
Figura 4.7	Componentes do microfone em seu último estágio de montagem. . . . .	50
Figura 4.8	Painel frontal utilizado para gerenciar os arquivos no NI MAS. . . . .	52
Figura 4.9	Diagrama de blocos que descreve o gerenciador no NI MAS. . . . .	53
Figura 4.10	Visualização dos detalhes da geometria do arranjo com espirais múltiplas utilizada. . . . .	55
Figura 4.11	FEP em diferentes frequências em bandas de 1/3 de oitava. . . . .	57
Figura 4.12	Visão geral do sistema construído. . . . .	59
Figura 4.13	Detalhes do suporte dos microfones montados nos tubos de alumínio. . . . .	59
Figura 4.14	Exemplo de fatores de correção de magnitude e fase utilizados na calibração do arranjo na banda de 4 kHz. . . . .	60
Figura 5.1	Desvio de fase entre os canais do sistema de aquisição. . . . .	64
Figura 5.2	Desvio de magnitude entre os canais do sistema de aquisição. . . . .	64
Figura 5.3	Valores de sensibilidade dos 45 microfones obtidos com o calibrador com excitação de 94 dB em 1 kHz. . . . .	65
Figura 5.4	Dispositivo construído para a obtenção das diferenças de magnitude e fase nas respostas dos microfones. . . . .	66
Figura 5.5	Funções de coerência obtidas durante as medições de resposta dos microfones . . . . .	67
Figura 5.6	Diferença na magnitude da resposta em frequência dos microfones . . . . .	68
Figura 5.7	Diferença na magnitude da resposta em frequência dos microfones . . . . .	68
Figura 5.8	Fonte sonora de referência para médias frequências, destacando o <i>driver</i> de alta pressão e o bocal por onde o som é radiado. . . . .	69

Figura 5.9	Configuração experimental para medição da resposta do arranjo a uma fonte de referência usada como monopólo. . . . .	70
Figura 5.10	Resposta do arranjo em um plano a 2,6 m de distância para diferentes bandas de frequências em 1/3 de oitava. . . . .	71
Figura 5.11	Nível de rejeição do lóbulo lateral observado a distância de 1,4 m. . . . .	72
Figura 5.12	Largura de feixe em cada uma das distâncias medidas. . . . .	73
Figura 5.13	Estimativa da constante $K$ do arranjo, definida pela razão entre a largura de feixe e o comprimento de onda, em cada distância medida. . . . .	74
Figura 5.14	Mapas em 8 kHz da fonte posicionada a 1,0 m do arranjo. . . . .	75
Figura 5.15	Resultados do experimento com dois alto-falantes emitindo um tom de 2 kHz. . . . .	76
Figura 6.1	Conceito de uma suíte de transmissão acústica para medições de isolamento sonoro via aérea. . . . .	82
Figura 6.2	Câmara reverberante mostrando em detalhe uma das fontes sonoras, o microfone de referência e a amostra em teste instalada na janela acústica. . . . .	83
Figura 6.3	Arranjo de microfones na câmara anecóica, posicionado em frente a amostra em teste instalada na janela acústica. . . . .	83
Figura 6.4	Espectros medidos em bandas de 1/3 de oitava com o microfone de referência na sala-receptora para cada configuração de ensaio. . . . .	85
Figura 6.5	Resultados com passagens seladas e sem material de isolamento. . . . .	86
Figura 6.6	Resultados com passagens instaladas e sem material de isolamento. . . . .	87
Figura 6.7	Resultados com passagens seladas e com material de isolamento leve. . . . .	88
Figura 6.8	Resultados com passagens seladas e sem material de isolamento pesado. . . . .	89
Figura 6.9	Configuração experimental usada durante as medições no dinamômetro de veículos instalado na câmara semi-anecóica. . . . .	91
Figura 6.10	Influência da remoção da diagonal no mapa de 6,3 kHz, em banda de 1/3 de oitava, obtido no ensaio com o motor a 2500 RPM. . . . .	93
Figura 6.11	Influência da remoção da diagonal no mapa de 1 kHz, em banda de 1/3 de oitava, obtido no ensaio com o motor a 2500 RPM. . . . .	94

Figura 6.12	Variações no mapa de 6,3 kHz observadas em diferentes segmentos de tempo na condição de velocidade constante com o motor a 2500 RPM. . . . .	95
Figura 6.13	Variações no mapa de 1 kHz observadas em diferentes segmentos de tempo na condição de velocidade constante com o motor a 2500 RPM. . . . .	96
Figura 6.14	Resultados com o motor a rotação constante em 2500 RPM . . . . .	98
Figura 6.15	Resultados com o motor a rotação constante em 3500 RPM . . . . .	99
Figura 6.16	Resultados com o motor a rotação constante em 5000 RPM . . . . .	100
Figura A.1	Fluxograma que descreve o algoritmo disponível no NI MAS para implementar o processamento de Beamforming no domínio da frequência. . . . .	113
Figura A.2	Diagrama de blocos em LabVIEW com a rotina para o processamento dos dados e a análise de Beamforming. . . . .	114
Figura A.3	Diagrama de blocos em LabVIEW apresentando detalhes da implementação do algoritmo de Beamforming utilizando o método no domínio da frequência. . . . .	115
Figura B.1	Visualização das posições utilizadas na geometria de espirais múltiplas.	117
Figura C.1	Detalhes da placa corta-fogo com passagens seladas. . . . .	119
Figura C.2	Detalhes da região do compartimento do motor. . . . .	120
Figura AA.1	Especificações das cápsulas de eletreto WM-61A utilizadas nos microfones.	121
Figura AA.2	Informações técnicas fornecidas pelo fabricante da fonte sonora de referência. . . . .	122

# Lista de Tabelas

Tabela 6.1	Configurações utilizadas durante o mapeamento do vazamento acústico.	85
Tabela 6.2	Características acústicas da câmara semi-anecóica, com o dinamômetro desligado e em operação. . . . .	92
Tabela 6.3	Descrição das condições de ensaio no dinamômetro. . . . .	92
Tabela B.1	Coordenadas de cada microfone na geometria de espirias múltiplas. . .	118



# Lista de Símbolos

$\ \cdot\ $	norma Euclidiana
$\langle \cdot \rangle$	média no tempo de uma variável
$E[\cdot]$	valor esperado de uma variável
$\dagger$	operador Hermitiano
$*$	conjugado complexo
$\hat{\cdot}$	estimativa de uma variável
$A$	amplitude do sinal da fonte sonora
$b(t)$	função de Beamforming no domínio do tempo
$B(\omega)$	função de Beamforming no domínio da frequência
$B_k$	resposta de Beamforming no $k$ -ésimo segmento de frequência
$BW_{R_z}$	largura de feixe a uma distância $R$ na direção normal ao arranjo
$c$	velocidade do som no ar
$C_k$	matriz de espectros cruzados na $k$ -ésima linha espectral
$C_{mm'_k}$	espectro cruzado dos sinais de um microfone $m$ e um microfone $m'$
$C_{corr}$	matriz de espectro cruzada corrigida através de calibração
$D_{cal}$	matriz de calibração
$f_s$	taxa de amostragem
$FEP$	sigla para Função de Espalhamento Pontual
$g$	função de Green no domínio do tempo
$\vec{g}_k$	vetor de direção no $k$ -ésimo segmento de frequência
$\vec{g}_{corr}$	vetor de direção corrigido através de calibração
$G$	função de Green no domínio da frequência
$G_m$	função de Green no domínio da frequência associada à propagação da fonte ao microfone $m$
$\vec{G}$	vetor de propagação
$\vec{G}_{teorico}$	vetor de propagação teórico
$j$	parte imaginária ( $\sqrt{-1}$ )
$k$	número de onda
$K$	constante empírica relacionada à largura de feixe de um arranjo
$l$	índice do intervalo no tempo
$L$	número de blocos de tempo

$m$	índice do microfone
$M$	número de microfones
$N$	número de pontos em cada bloco de tempo
$p$	pressão sonora
$p_m(t)$	pressão sonora no $m$ -ésimo microfone em função do tempo
$P_m(\omega)$	pressão sonora no $m$ -ésimo microfone em função da frequência
$p[n]$	signal discreto no tempo da pressão sonora
$P_k$	$k$ -ésimo coeficiente da TRF do sinal de pressão sonora
$P_{m_k}$	$k$ -ésimo coeficiente da TRF do sinal de pressão sonora no microfone $m$
$P_{m'_k}$	$k$ -ésimo coeficiente da TRF do sinal de pressão sonora no microfone $m'$
$P_{ml_k}$	$k$ -ésimo coeficiente da TRF no $l$ -ésimo intervalo de tempo do sinal de pressão sonora no microfone $m$
$P_{m'l_k}$	$k$ -ésimo coeficiente da TRF no $l$ -ésimo intervalo de tempo do sinal de pressão sonora no microfone $m'$
$\vec{P}_k$	vetor coluna contendo a pressão sonora no $k$ -ésimo segmento da TRF de cada um dos $M$ microfones
$r$	distância da fonte a um ponto $\vec{r}$ no espaço
$r'_m$	distância da fonte ao microfone
$\vec{r}$	vetor posição
$RPM$	sigla para Rotações Por Minuto
$R(\theta)$	resolução de arranjo a um ângulo $\theta$ em relação ao eixo normal ao seu plano
$R_{eixo}$	resolução da resposta do arranjo no eixo normal ao seu plano
$t$	tempo
$T$	tempo de integração
$TRF$	sigla para Transformada Rápida de Fourier
$v$	variável unificada que vinculam espaço e tempo
$w_m$	ponderação no $m$ -ésimo microfone
$\vec{v}_{cal}$	o primeiro autovetor da matriz de espectro cruzado obtido na calibração
$\vec{v}_{teórico}$	valor teórico de $\vec{v}_{cal}$
$\vec{x}_m$	localização do microfone $m$
$\vec{x}'$	posição da fonte sonora
$\Delta_m$	tempo de atraso no $m$ -ésimo microfone
$\lambda$	comprimento de onda
$\omega$	velocidade angular
$\omega_k$	frequência radial

## Resumo

Este trabalho descreve o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de medição acústica para a identificação de fontes de ruído. Técnicas atualmente conhecidas permitem mapear o ruído irradiado de uma região através da medição do campo sonoro utilizando um arranjo fixo de microfones. O sistema desenvolvido utiliza o algoritmo clássico de Beamforming no domínio da frequência para processar os sinais de um arranjo bidimensional de 32 microfones. Diferentes geometrias de arranjo foram estudadas através de simulação computacional e, finalmente, uma geometria baseada em múltiplas espirais foi escolhida. Para superar as limitações dos sistemas comercialmente disponíveis, que além de serem considerados caros apresentam muitas restrições operacionais, microfones de baixo custo e uma plataforma de aquisição de sinais flexível e portátil foram usados. Os microfones foram projetados e construídos usando uma cápsula de eletreto comercial acoplada a um circuito simples para o condicionamento do sinal, permitindo a fácil integração com o sistema de aquisição. A caracterização da resposta dos microfones permitiu a seleção das amostras mais adequadas, considerando uma faixa de operação esperada de 15 kHz.

Para validar o sistema, experimentos foram feitos em uma câmara anecóica, mostrando a boa concordância entre os resultados teóricos e experimentais. Finalmente, dois casos diferentes da indústria automotiva foram usados para explorar a aplicação do sistema com o propósito de identificar fontes de ruído. No primeiro, a transmissão sonora através da estrutura complexa de um painel automotivo com tratamento acústico foi avaliada, mostrando claramente as regiões mais frágeis da transmissão sonora, especialmente em bandas de alta frequência. Em um segundo experimento, foi mapeado o ruído irradiado de dentro do compartimento do motor de um veículo operando em um dinamômetro. Neste caso, o sistema foi capaz de apresentar bons resultados utilizando a técnica de remoção da diagonal da matriz de espectros cruzados, possibilitando identificar as principais fontes de radiação do ruído.

**Palavras-chave:** medições acústicas, arranjo de microfones, processamento de sinais, controle de ruído.



## Abstract

This work describes the development and the application of an acoustical measurement system for identification of noise sources. Currently known techniques are able to map the noise radiation from a specific region in space using the sound field measured by a fixed array of microphones. The developed system uses a 32-microphones planar array processed by a classical frequency domain Beamforming algorithm. Different array geometries were studied using computational simulation and finally a multi-arm spiral array was designed based on the results from the simulations. To overcome some limitations of the available commercial systems, which are typically expensive and present a lot of operational constraints, low cost microphones and a flexible and portable signal acquisition platform were used. The microphones were designed and built using a commercially available electret cartridge coupled with a simple circuitry for the signal conditioning, making the easily integration with the acquisition system. Experiments on the microphones response characteristics allowed to select the most adequate samples, considering an expected operational range of 15 kHz.

To validate the system, experiments were carried out in an anechoic chamber and it showed good agreement between the theoretical and experimental results. Finally, two different cases from the automotive industry were used to test the application of the system for the purpose of noise source identification. First, the sound transmission through a complex automotive structure with acoustic treatment was evaluated, showing clearly the regions of sound leakage, particularly at high frequencies. In a second experiment the radiated noise out of the engine compartment from a vehicle operating at a dynamometer was mapped. In this case the system was capable of presenting good results using the cross spectrum matrix diagonal removal technique, enabling the identification of the major noise sources.

**Keywords:** acoustical measurements, microphone array, signal processing, noise control



# 1 Introdução

*“Existem muitos aspectos da acústica que afetam de maneira significativa a qualidade de nossas vidas no dia-a-dia. Através da fala transferimos informações e conhecimento a outros indivíduos. O som da chuva, do vento ou de qualquer outra coisa pode dar orientação e suporte à nossa percepção visual. A música pode nos fascinar, estimulando nossos sentimentos e emoções. Sons agradáveis e música afetam positivamente a saúde através de seus efeitos calmantes. O lado negativo da acústica é o ruído. O ruído é a forma de poluição ambiental mais comumente citada na atualidade. O ruído é facilmente detectado pelo nosso sistema auditivo. Seu efeito pode ser acumulativo e ele influencia tanto nosso ambiente de trabalho como o nosso lar. Até mesmo a qualidade do nosso sono é reduzida se somos expostos ao ruído.”<sup>a</sup>*

---

<sup>a</sup>Tradução livre de um trecho do texto escrito por Thomas Hüttl em sua introdução sobre a importância da pesquisa em acústica [1].

O impacto que o ruído tem sobre a vida do homem é inquestionável. Por isso, uma enorme atenção vem sendo dada ao controle de ruído durante as últimas décadas. Órgãos governamentais estabelecem cada vez mais requisitos legais com o objetivo de controlar a emissão sonora de veículos de transporte, máquinas industriais ou domésticas. Por outro lado, o aumento da exigência dos mercados consumidores impulsiona as empresas a desenvolverem produtos com mais qualidade e baixo custo. Dessa forma, sabendo que seus produtos estão sempre sujeitos ao julgamento de qualidade segundo a sua impressão sonora,

a indústria direciona cada vez mais esforços para desenvolver acusticamente seus produtos. Especialmente na indústria de veículos e eletrodomésticos, os ruídos estão intimamente relacionados à experiência de conforto e satisfação de seus usuários. Nestes casos, a acústica é capaz de diferenciar drasticamente a escolha de um produto em função da qualidade percebida pelos seus consumidores. Porém, o alto custo associado às soluções acústicas pode tornar a medida de controle inviável no projeto de um produto. Desta forma, a exigência de um conhecimento refinado sobre os fenômenos acústicos que estão associados ao ruído, permitirá buscar soluções eficientes que ainda sejam economicamente viáveis. A influência desses fatores exige dos fabricantes, durante o processo de desenvolvimento do produto, o conhecimento de técnicas e métodos para a identificação e controle específico de suas fontes de ruído.

A busca pela compreensão da natureza dos diferentes mecanismos e interações físicas responsáveis pela geração, transmissão e recepção do som tornou-se um assunto extremamente rico na engenharia. A comunidade científica explora nos problemas acústicos os limites dos métodos modernos de simulação computacional, exigindo mais refinamento dos modelos que representam a natureza física de um sistema. Grandes desafios ainda existem para o desenvolvimento de modelos analíticos que descrevem os fenômenos de radiação das ondas sonoras. A exploração de áreas conhecidas como vibroacústica e aeroacústica impulsionam também o desenvolvimento de novos métodos experimentais capazes de obter informações mais completas sobre os campos sonoros, permitindo buscar a correlação entre experimentos e os modelos teóricos. Novas técnicas de análise e processamento de sinais surgem até hoje no estudo dos sinais sonoros. Ainda mais, um vasto campo vem sendo explorado com o objetivo de entender a natureza da relação entre as ondas acústicas e a percepção dos sons pelo homem. Enfim, muito ainda pode ser explorado no campo das ciências aplicadas ao estudar os fenômenos acústicos.

É nesse contexto que se insere a importância do trabalho na área de acústica aplicada ao controle de ruído, envolvendo os interesses conjuntos da sociedade, da indústria e da comunidade científica.

## 1.1 Motivação

Devido ao alto grau de complexidade das interações fluido-estrutura nos problemas acústicos e o maior nível de refinamento em que os fabricantes vêm levando seus produtos, a investigação experimental se torna inevitável durante o processo de desenvolvimento acústico de um sistema. Aumenta-se dessa forma a busca por técnicas capazes de identificar claramente as fontes e caminhos críticos de propagação da energia sonora, com o objetivo de serem utilizadas como ferramentas de investigação e solução de problemas.

Em especial, as técnicas que permitem a obtenção de imagens, capazes de localizar e ordenar as fontes acústicas, tornaram-se extremamente promissoras nas últimas décadas. Por motivos óbvios, uma ferramenta capaz de construir imagens da distribuição de fontes sonoras torna muito mais rápido e direto o processo de identificação das fontes de ruído. Além disso, o uso das imagens oferece a grande vantagem de apresentar informações de maneira simples, mesmo para aqueles que não são especialistas em acústica.

Atualmente, são conhecidos diferentes métodos para obtenção de imagens acústicas baseando-se em técnicas de medição com arranjos<sup>1</sup> de microfones. Um arranjo de microfones é um conjunto de microfones capaz de captar o campo acústico em diferentes posições do espaço num mesmo intervalo de tempo, permitindo, desta forma, analisar a sua natureza espacial. Os principais fatores que tornaram possível a implementação dessas técnicas nas últimas décadas foram o advento de microfones de medição menores e mais baratos, o desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados de alto desempenho com maior número de canais e a evolução da capacidade de processamento dos computadores, especialmente durante a década de 80. Entretanto, o alto custo associado a esses sistemas permaneceu como fator limitante para a popularização das técnicas até a atual década.

Entre as técnicas mais promissoras podemos citar os dois grupos mais difundidos, que são a Holografia Acústica e o Beamforming. A Holografia Acústica, embora seja uma técnica bastante precisa e rica em informações, normalmente exige um processo de medição muito refinado e o processamento dos dados é bastante dispendioso, tornando a técnica um pouco lenta e, às vezes, inviável para aplicações industriais cotidianas. Em contraposição, o Beamforming é uma técnica que não fornece tanto detalhamento de informações, porém ainda é considerada eficiente no processo de identificação das principais fontes sonoras. Ainda mais, a configuração experimental necessária no Beamforming é mais simples e o processamento dos sinais pode ser rápido o suficiente para permitir a obtenção de imagens acústicas em tempo real<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Arranjos de sensores distribuídos no espaço são muito utilizados em processamento de sinais para extrair informações de campos de ondas em propagação, seja ela acústica, eletromagnética ou sísmica.

<sup>2</sup>Uma discussão sobre as diferenças das técnicas de Holografia Acústica, Beamforming e algumas outras técnicas disponíveis pode ser encontrada em [2].

Uma das principais motivações para o desenvolvimento da tecnologia de Beamforming é justamente a agilidade associada a esta técnica. Embora permita apenas uma visão geral da distribuição das principais fontes, o método pode ser muito adequado à realidade das aplicações na indústria. Além disso, alguns fatores que a diferenciam da Holografia Acústica tornam a técnica ainda mais interessante. Por exemplo, a possibilidade de analisar fontes em movimento ou analisar o campo acústico longe da fonte, como em experimentos dentro de túneis de vento. Em poucas palavras, a técnica baseia-se na idéia de usar diversos microfones distribuídos em um padrão geométrico conhecido para identificar frentes de onda irradiadas por fontes localizadas na região analisada. Desta forma, o sistema detecta “superfícies” com mesma fase e as relaciona com a distribuição das fontes.

Até o início deste trabalho, nenhuma pesquisa foi publicada sugerindo o início do estudo da técnica de Beamforming na identificação de fontes de ruído aqui no Brasil. Neste contexto, considera-se muito importante o início da linha de pesquisa nesta área, sendo esta uma forma de adquirir conhecimento tecnológico para o desenvolvimento e aplicação da técnica em universidades, órgãos de pesquisas ou em nossa indústria.

O maior dos estímulos para a realização desse projeto de pesquisa é explorar os resultados do trabalho apresentado por Humphreys *et al.* [3], que discute e analisa uma nova abordagem para a redução do custo associado a um sistema deste tipo, utilizando microfones econômicos. No trabalho citado, os microfones foram construídos em laboratório, utilizando cápsulas de eletreto, uma classe de pequenos dispositivos comumente encontrados em aparelhos eletrônicos como o telefone celular e gravadores de áudio digitais. Entretanto, o maior foco de trabalho utilizando esta abordagem se manteve na indústria aeronáutica. Isso tornou recentemente possível a implementação de um sistema com 614 microfones [4] para ensaios com grandes aeronaves.

É importante notar que o uso desse tipo de tecnologia recentemente desenvolvida expande também as chances de popularização em aplicações menores, como seria o caso das aplicações na indústria automotiva. Para as aplicações na indústria aeronáutica, utilizando amostras em escala em túneis de vento, é freqüentemente necessário a extensão da faixa de freqüência até 40 kHz<sup>3</sup>. Por outro lado, nas aplicações automotivas o limite prático não ultrapassa 15 kHz. Deste modo, um novo potencial de redução do custo associado ao projeto do microfone apresentado por Humphreys pode ser inserido.

---

<sup>3</sup>A freqüência da radiação acústica induzida pelo escoamento em estruturas em uma escala reduzida é proporcionalmente maior que a freqüência encontrada quando é analisada uma estrutura em tamanho real. Esse fenômeno exige o uso de um fator de correção aplicado ao sinal acústico medido para representar a radiação esperada utilizando um modelo em escala real.

A exploração de sistemas de imagens acústicas como uma ferramenta experimental de investigação da radiação sonora se estende a diversos outros tipos de problemas acústicos. A difusão da técnica estimula também a busca por novas oportunidades de aplicações. Desta forma, a busca por oportunidades de aplicações na indústria automotiva, com este tipo de sistema de baixo custo, é responsável por direcionar os esforços contidos neste trabalho.

O autor acredita que o sistema desenvolvido durante a realização deste trabalho representa uma versão em menor escala do que pode ser alcançado utilizando-se arranjos de microfones de baixo custo.

## 1.2 Objetivos

A proposta deste trabalho é explorar os aspectos técnicos do projeto e aplicação de um sistema de identificação de fontes de ruído baseado na técnica de Beamforming, utilizando-se de um arranjo plano de 32 microfones de baixo custo. Em termos gerais, os objetivos da experiência consistem em desenvolver e validar um sistema de Beamforming, e, por fim, utilizá-lo em aplicações práticas para a análise de ruídos no desenvolvimento de veículos.

Os objetivos específicos que definem as diferentes etapas a serem realizadas durante este trabalho são:

- Apresentar uma revisão sobre os fundamentos da técnica de Beamforming e sobre as características da resposta de um arranjo de microfones e suas influências nas imagens de fontes acústicas;
- Projetar e integrar um sistema de Beamforming de baixo custo, reduzindo o custo dos microfones desenvolvidos por Humphreys *et al.* [3] limitando-se às aplicações até 15 kHz e utilizando sistemas de aquisição portáteis de baixo custo;
- Validar experimentalmente o sistema desenvolvido e analisar suas características e limitações técnicas, utilizando fontes sonoras conhecidas em ambiente controlado;
- Por fim, explorar aplicações na indústria automotiva.

## 1.3 Organização do trabalho

Esta dissertação é organizada em sete capítulos e três apêndices. O presente capítulo introduz o contexto geral da pesquisa e apresenta a motivação para a realização desse trabalho. No Capítulo 2, uma revisão da literatura é apresentada mostrando as contribuições relevantes para o desenvolvimento da técnica e o atual estado-da-arte nas aplicações. O Capítulo 3 contém os fundamentos da técnica, suas implicações práticas nas características das imagens, a descrição dos algoritmos de processamento de sinais e a análise de diferentes geometrias para o arranjo. No Capítulo 4 são apresentados os detalhes do desenvolvimento do sistema e a implementação da geometria com as melhores características. A avaliação experimental do sistema desenvolvido é feita no Capítulo 5. Neste capítulo, os microfones construídos foram caracterizados e em seguida a análise da resposta do arranjo completo permite que o desempenho e as limitações do sistema sejam apresentadas. No Capítulo 6 são mostradas as aplicações automotivas e os seus resultados, analisando-se a transmissão sonora através de painéis e a radiação sonora no compartimento do motor de um veículo. O Capítulo 7 destaca as principais conclusões e as propostas para trabalhos futuros nessa área de pesquisa.

## 2 Revisão da Literatura

Neste capítulo são apresentados alguns trabalhos relevantes que representam a evolução histórica e o atual estado-da-arte da técnica de Beamforming e de sua aplicação na identificação de fontes sonoras.

As técnicas de processamento de sinais em arranjos de sensores foram inicialmente desenvolvidas com o uso de antenas de radar durante a Segunda Guerra Mundial, como descrito por Elliot [5]. Hoje elas são extensamente utilizadas em uma série de aplicações. Arranjos de hidrofones começaram a ser usados a partir da Segunda Guerra Mundial para melhorar a capacidade do SONAR<sup>1</sup> na localização de submarinos. Nesta aplicação, ondas acústicas são emitidas e suas reflexões são analisadas pelo arranjo. Esta classe de arranjo é definida como arranjos ativos. Aplicações passivas também são utilizadas em submarinos, evitando a emissão de sinais que possam ser rastreados. Diversas aplicações submarinas são descritas por Urick [6].

Kellerman *et al.* [7] indicam que, desde a década de 60, muitas aplicações foram exploradas na radioastronomia utilizando arranjos de antenas para análise de ondas eletromagnéticas radiadas por corpos celestes. Na Figura 2.1 é apresentada uma fotografia de um grande arranjo de antenas atualmente usado em radioastronomia pelo Observatório de Rádio Astronomia Norte Americano [8]. O arranjo, conhecido como VLA<sup>2</sup>, é constituído por um conjunto de 27 antenas de rádio e está localizado à 80 km da cidade de Socorro, no estado americano do Novo México. Neste arranjo, cada antena tem 25 m de diâmetro e pesa 230 toneladas. O arranjo apresenta geometria em forma de “Y” e pode ser organizado em quatro diferentes configurações: A, B, C e D. Cada configuração define uma distância entre as antenas no arranjo e as separações máximas entre duas antenas são respectivamente: 36 km, 10 km, 3,6 km e 1 km. Estas diferentes configurações do arranjo permitem observar ondas eletromagnéticas em frequências entre 74 MHz e 50 GHz. A modificação entre estas configurações ocorre em períodos de quatro meses.

---

<sup>1</sup>Sigla em inglês usada para nomear um sistema de navegação submarina baseado na análise de ondas sonoras - *SOund Navigation And Ranging*.

<sup>2</sup>Sigla em inglês para *Very Large Array*.



Figura 2.1: Arranjo de 27 antenas de rádio utilizado para análise de sinais eletromagnéticos em radioastronomia [8].

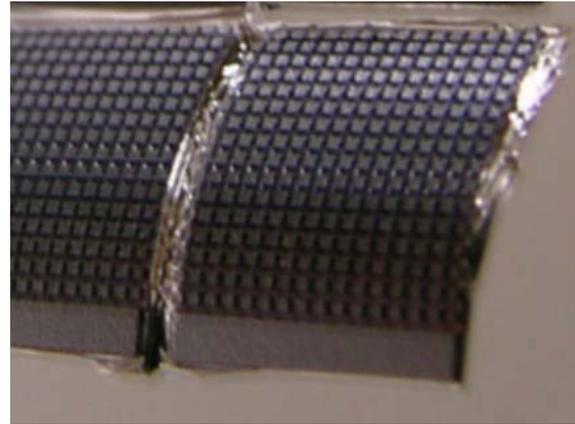


Figura 2.2: Arranjos de 256 transdutores para obtenção de imagens médicas ultra-sônicas tridimensionais [9].

O processamento de arranjos também é extensamente utilizado em imagens médicas e ultra-sônicas auxiliando as análises e os diagnósticos médicos. Trabalhos recentes, como o de Wygant *et al.* [9], apresentam o estado-da-arte na tecnologia de arranjos de transdutores bidimensionais, para a obtenção de imagens ultra-sônicas tri-dimensionais. O exemplo é apresentado na Figura 2.2. Nesta aplicação, o arranjo consiste-se de uma matriz curva de geometria regular com 16 linhas e 16 colunas de micro-transdutores ultra-sônicos capacitivos (CMUT<sup>3</sup>). O arranjo de transdutores tem aproximadamente 4 mm de extensão em cada lado e foi projetado para obter imagens através de ondas ultra-sônicas de 5 MHz.

Johnson e Dudgeon [10] descrevem o processamento de sinais de arranjos de sensores com detalhes e com muitas referências. Nesta obra, os autores mostram que a amostragem discreta do campo através de um arranjo pode oferecer a um sistema de processamento de sinais informações necessárias para realizar três classes de tarefas: **melhorar**, **caracterizar** ou **rastrear** um sinal. Os autores apresentam o Beamforming como uma técnica de processamento de sinais capaz de criar feixes espaciais seletivos, controlando a diretividade ou a sensibilidade do conjunto de sensores em certa direção no espaço.

Existem, conceitualmente, duas principais aplicações do Beamforming analisando campos sonoros: a auralização e a identificação de fontes de ruído. Aplicações para a auralização, ou seja, uso como uma técnica de aquisição do campo acústico com a finalidade de reprodução do sinal sonoro, são atualmente bastante encontradas em tecnologias para a comunicação falada. Exemplos são encontrados na literatura com aplicações em telefonia móvel com as mãos-livres [11], aparelhos auditivos [12] e rastreamento de locutor e melhoria da fala para videoconferência [13]. Nestes casos, o método de Beamforming é usado para suprimir o ruído

<sup>3</sup>Sigla para o termo em inglês *capacitive micromachined ultrasonic transducer*.

---

de fundo e a reverberação que causam a degradação da qualidade do sinal sonoro, que, desta forma, prejudicam a inteligibilidade da comunicação.

Na aplicação como uma técnica de identificação de fontes de ruído, o Beamforming é relativamente mais simples, permite a obtenção de imagens acústicas ou mapas sonoros, que são usados para quantificar e ordenar diferentes fontes sonoras distribuídas no espaço. Uma série de aplicações foi desenvolvida ao longo dos anos utilizando o princípio de Beamforming para a identificação de fontes de ruído.

De acordo com Johnson e Dudgeon [10], a primeira utilização de um arranjo de sensores na identificação de fontes sonoras foi implementada, provavelmente, pelos franceses durante a Primeira Guerra Mundial para localizar aeronaves inimigas. O dispositivo era constituído por dois arranjos, cada um apresentando seis sensores acústicos em forma de cornetas invertidas, distribuídos na forma de um hexágono, o que hoje seria comparável a um arranjo circular de seis microfones, como apresentado na Figura 2.3. Os sensores de cada arranjo eram ligados a um duto que funcionava como uma guia de onda acústica. Os dois dutos de igual comprimento eram levados aos ouvidos de um operador. O sinal que chegava no ouvido era um resultado médio do sinal dos seis sensores. Os dois arranjos eram separados por dois metros, o que melhorava a capacidade natural de localização direcional de um ser humano em um fator de aproximadamente dez. Modificando o ângulo do eixo dos dois arranjos ao mesmo tempo, a direção do som incidente sobre os arranjos poderia ser determinada. Este é um exemplo simplista de um Beamforming realizado pelos sensores em tempo real através do processamento analógico do sinal sonoro.

Em 1974, quase 60 anos depois do sistema utilizado na Primeira Guerra Mundial, a primeira publicação com a aplicação direta de um arranjo de microfones em medições acústicas, utilizando explicitamente o processamento de Beamforming, foi apresentada por Soderman e Noble [14]. Os autores desenvolveram um arranjo em linha para investigar o ruído irradiado por uma turbina instalada dentro de um túnel de vento, utilizando um sistema digital para processar atrasos no tempo dos sinais de cada microfone. O método permitiu rejeitar o ruído indesejado causado pelo escoamento do vento e pela reverberação no túnel. Uma série de questões sobre erros em função da temperatura, a velocidade do vento e o desvio de fase dos microfones já foram abordadas no trabalho destes autores.

No mesmo ano de 1974, Billingsley, na Universidade de Cambridge, constrói um aparato nomeado **telescópio acústico** utilizando um arranjo de microfones em linha [15]. Billingsley explora o uso do sistema na localização em tempo real de fontes sonoras em turbinas à jato. Neste sistema, catorze microfones de medição capacitivos de 1/4" foram conectados através

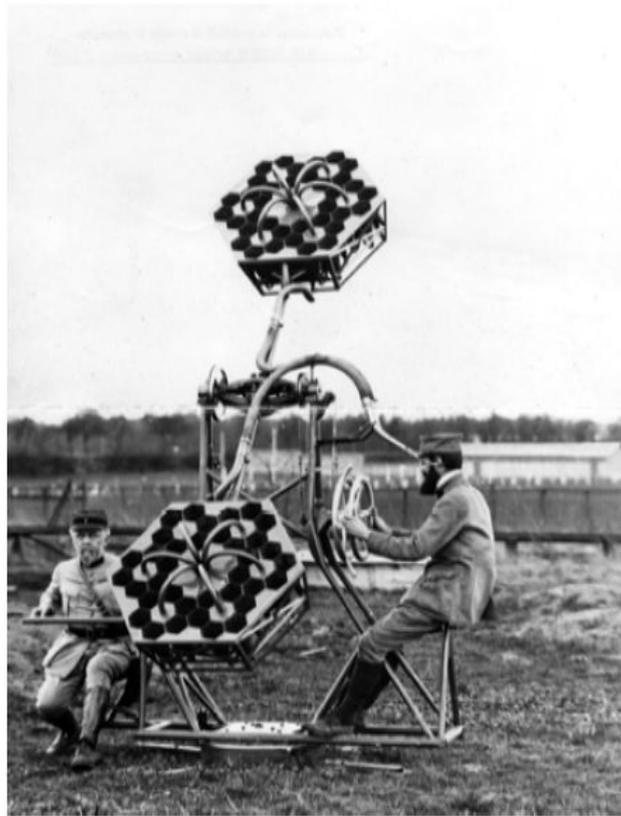


Figura 2.3: Demonstração de uso do arranjo de sensores acústicos construído pelos franceses na Primeira Guerra Mundial para detecção de aeronaves inimigas [10].

de cabos de 10 m de comprimento a um mini computador, onde o sinal era digitalizado com uma resolução de 8 bits. O sinal analógico também poderia ser armazenado em um gravador de fita magnética, o que limitava o número de canais. Os sinais dos microfones eram amplificados e em seguida passavam por filtros analógicos passa-baixa para evitar o efeito de dobramento espectral. A frequência de amostragem dos sinais era de 20 kHz. Dois conversores analógico-digitais (A/D) tinham que dividir o trabalho de análise dos catorze canais, exigindo desta forma a multiplexação dos sinais. O intervalo de amostragem dos conversores era de  $6 \mu\text{s}$ , resultando em um espalhamento da amostragem a duração de  $36 \mu\text{s}$ . Este espalhamento não foi considerado no software de Beamforming. O computador tinha uma memória de 48 kilobytes. Os dados e resultados eram armazenados em um disco flexível com capacidade de 0,3 Mbytes. Os sinais eram processados on-line e os resultados eram mostrados em cores em uma tela de televisão. A organização do sistema já era muito similar aos sistemas modernos de identificação de fontes de ruído baseados na técnica de Beamforming. O desenvolvimento tecnológico ocorrido durante as três décadas seguintes permitiu aumentar da frequência de amostragem, a resolução de digitalização, o número de microfones e diversas melhorias no software de análise.

---

Em 1987, Brooks *et al.* [16] utilizaram um arranjo bidimensional de microfones para medir o ruído do modelo em escala de um helicóptero submetido ao fluxo de ar dentro de uma câmara anecóica para medições aeroacústicas. Componentes de Fourier dos sinais captados pelos microfones foram somados com o atraso em fase adequada e o resultado médio, sobre vários blocos de tempo, foi utilizado para identificar fontes de ruído no modelo. O processamento apresentado inclui o efeito da refração do som através das camadas cisalhantes do fluido na determinação do atraso necessário em cada microfone.

A análise de fontes em movimento foi explorada no final da década de 70 por King e Bechert [17]. Os autores utilizaram arranjos em linha para o estudo do ruído de passagem de trens de alta velocidade. Durante a década de 80, trabalhos como o de Barsikow *et al.* [18] estenderam a capacidade do estudo do ruído de trens de alta velocidade, com o uso de algoritmos para a remoção do efeito Doppler. Esses trabalhos abordaram condições de medições bastante desafiadoras para a época, em que a distância de medição de cinco metros e a passagem dos trens a 80 m/s exigiam tempo entre médias na ordem de 0,05 segundos. Takano *et al.* [19] apresentam mapas bidimensionais de trens em passagem utilizando um arranjo em forma de cruz. Com esse tipo de arranjo os autores encontraram problemas utilizando o algoritmo convencional de Beamforming, pois geravam mapas contaminados por lóbulos laterais, resultante do efeito conhecido como dobramento espacial. Em 1995, Elias [20] descreve um método capaz de resolver esse problema aplicando uma janela no tempo apropriada nos sinais de saída de cada microfone do arranjo.

Oerlemans *et al.* [21] apresentaram um trabalho utilizando a técnica de Beamforming para a identificação de fontes de ruído de uma turbina eólica. O trabalho foi realizado com uma turbina de três pás com diâmetro de 58 m. O arranjo de 148 elementos, posicionado no solo, apresentava forma elíptica para balancear a resolução horizontal e vertical das imagens. Nesse estudo os autores foram capazes de estudar a influência de rugosidade na superfície das pás e identificar a região crítica para o ruído gerado pela pá.

A análise da emissão sonora da passagem de uma aeronave em vôo foi primeiramente mostrada em 1986 por Howell [22], utilizando um arranjo de quatro microfones em linha, separados por 3802 m. Nesse estudo, foram realizadas separadamente uma varredura longitudinal, na direção do vôo, e uma varredura transversal. As medições foram capazes de apresentar resultados consistentes. Enquanto que para aplicações com trens a posição do objeto em análise é bem determinada, para o caso de aeronaves em vôo isto se torna um problema. Howell utilizou uma câmera seguindo a trajetória da aeronave. As distâncias foram calculadas através do tamanho conhecido da aeronave. A acurácia da posição da fonte foi 2,16 m na direção do vôo, 0,15 m na direção transversal e 0,88 m na altitude.

O trabalho de Underbrink [23] apresenta com muitos detalhes o projeto de geometrias de arranjos bidimensionais para aplicações em banda larga. Com este estudo, Underbrink apresenta uma classe de geometria otimizada para o desenvolvimento de um arranjo de microfones. A sua forma é descrita por espirais logarítmicas com múltiplos braços interceptadas por círculos concêntricos que dividem seções de mesma área.

Mosher *et al.* [24] descreve o procedimento de calibração de um arranjo de microfones. O procedimento consiste na obtenção de ajustes de fase para cada microfone e a calibração da resposta de magnitude e direcionalidade do arranjo completo, utilizando a medição de uma fonte pontual de referência.

Nos últimos anos, diversos trabalhos foram publicados apresentando métodos avançados para o processamento de Beamforming. A maioria desses algoritmos busca melhorar os resultados obtidos com o Beamforming convencional. Segundo a literatura [25], Dougherty e Underbrink utilizaram arranjos em medição em túneis de vento desde o final da década de 80, explorando também o algoritmo MUSIC [26] para processar resultados de medição em túneis de vento. O algoritmo de deconvolução CLEAN foi inicialmente aplicado a fontes aeroacústicas por Dougherty e Stoker [27]. Este método tem origem na aplicação dos arranjos em radioastronomia e foi formulado por Hogbom [28]. O método consiste basicamente na utilização da resposta previamente conhecida do arranjo para remover padrões encontrados nos lóbulos laterais característicos do arranjo em questão.

O primeiro algoritmo baseado na técnica de Beamforming que foi proposto para resolver o problema inverso completo na identificação de fontes sonoras foi publicado por Brühl e Röder [29]. Desde então, uma série de algoritmos surgiram utilizando a abordagem de deconvolução. Os algoritmos de deconvolução representam um passo radical na capacidade do processamento de arranjos de microfones.

Em 2004, Brooks e Humphreys apresentam o algoritmo DAMAS, que se baseia num processo de deconvolução algébrica iterativo utilizando a técnica de mínimos quadrados não-negativos [30]. Os autores apresentam com sucesso uma melhoria significativa na capacidade de limpar os mapas de Beamforming. Segundo Dougherty [31], um fator limitante do algoritmo DAMAS é o tempo de processamento, que está na ordem de dias. Com isso, o autor apresenta uma alternativa de modificação do algoritmo. A comparação do desempenho de diferentes algoritmos baseados no método de deconvolução é apresentada por Ehrenfried e Koop [32].

---

Em 2005, Ravetta [33] apresenta uma nova abordagem de processamento de Beamforming baseado no método de deconvolução chamado LORE. O autor apresenta a aplicação do algoritmo na identificação de fontes de ruído aeroacústico em trens de pouso.

Devido ao alto custo associado aos instrumentos e sistemas de aquisição de dados necessários, a implementação dessa tecnologia restringiu-se nas últimas décadas às agências aeroespaciais governamentais (NASA<sup>4</sup>, DLR<sup>5</sup>, etc) e grandes companhias na indústria aeronáutica, como Boeing e Airbus. Uma das maiores restrições para o desenvolvimento da técnica é a exigência de um grande número de microfones, que pode variar de dezenas a centenas. Com o objetivo de reduzir o custo associado aos microfones utilizados em arranjos de alta densidade, Humphreys *et al.* [3] apresentam, em 2003, um trabalho sobre a análise de microfones de eletreto de baixo custo para uso em arranjos de microfones. Neste trabalho, os autores apresentam investigações com microfones construídos com a utilização de sensores econômicos. Os autores mostram que, para a aplicação de Beamforming, é possível selecionar amostras de um grupo de microfones de baixo custo que apresentem características semelhantes. Este trabalho representa uma etapa de mudança no conceito de construção de arranjos de microfones utilizando elementos de baixo custo.

Em 2006, Brusniak *et al.* [4] descrevem o trabalho que representa o estado-da-arte para a obtenção de mapas em ensaios com aeronaves utilizando grandes arranjos com microfones de eletreto de baixo custo. Nesta aplicação foram usados no total 614 microfones. Segundo os autores, a grande vantagem obtida com o arranjo em larga dimensão foi a capacidade de analisar resultados a partir de 150 Hz. Neste trabalho foram utilizados diferentes tipos de algoritmos de processamento, inclusive o algoritmo DAMAS2, que mostrou grande capacidade de analisar o ruído de subcomponentes da aeronave.

Desde a metade da década de 90, um número grande de aplicações de arranjos de microfones surge no estudo de fontes aeroacústicas. No livro editado por Mueller sobre medições aeroacústicas, Dougherty [34] apresenta com detalhes a teoria e prática do uso da técnica de Beamforming em medições acústicas, discutindo aspectos como o efeito do vento e a calibração dos arranjos. O autor também descreve o uso da remoção da diagonal da matriz de espectros cruzados, técnica largamente utilizada para suprimir interferências indesejadas em medições em túneis de vento. Underbrink [35] descreve com muitos detalhes os aspectos práticos da aplicação em túneis de vento de baixa velocidade e o projeto do arranjo de microfones. O livro de Mueller é um exemplo da aceitação do Beamforming como uma técnica padrão em medições aeroacústicas.

---

<sup>4</sup>Sigla em inglês para a Agência Aeroespacial Norte Americana.

<sup>5</sup>Sigla em alemão para o Centro Aeroespacial Alemão.

Por outro lado, durante a década de 90, pouco foi explorado aplicando a técnica em problemas relacionados a indústria automotiva. Um dos poucos exemplos a serem citados é o trabalho de Moebs *et al.* [36], onde os autores abordam o ruído de passagem de um veículo automotivo através de um sistema de Beamforming capaz de fazer a correção do efeito Doppler, adaptando a técnica utilizada em aplicações com trens de alta velocidade. O sistema desenvolvido utiliza um arranjo com geometria gerada aleatoriamente.

Nesta década, foram apresentados alguns sistemas comerciais que utilizam a técnica de Beamforming para a identificação de fontes [37, 38, 39], tornando a tecnologia, finalmente, disponível à indústria automotiva. Entretanto, a inflexibilidade desses sistemas, no que diz respeito ao uso de diferentes algoritmos e a possibilidade de mudanças na geometria do arranjo, torna o sistema ainda pouco interessante sob o ponto de vista da aplicação.

Para a indústria automotiva, a técnica de Beamforming é encontrada em conjunto com um grupo de outras técnicas utilizadas para a identificação de fontes de ruído. Marroquin [2] discute de maneira breve as diferentes técnicas disponíveis na indústria, dando ênfase aos aspectos práticos. A vantagem do método do Beamforming é enfatizada quando são analisadas regiões extensas, no campo acústico distante, com fontes incoerentes, com radiação em banda larga e a distâncias arbitrárias do arranjo.

Em 2004, Song [40] apresenta uma aplicação da técnica de Beamforming para obter mapas de parâmetros psicoacústicos que são largamente utilizados em avaliações de Qualidade Sonora. O trabalho analisa medições no compartimento do motor de um veículo.

Em 2005, um arranjo esférico é apresentado por Juhl *et al.* [41] para a utilização no mapeamento de fontes sonoras baseado em um método de Beamforming utilizando harmônicos esféricos. Dois anos depois, Marroquin *et al.* [42] exploram o uso desse sistema na identificação de ruídos no interior de um veículo.

O presente trabalho propõe um arranjo bidimensional com microfones de eletreto de baixo custo, com um circuito de condicionamento de sinais ainda mais simples que os descritos por Humphreys *et al.* [3]. A geometria do arranjo segue uma proposta de Underbrink [23], utilizando espirais logarítmicas com braços múltiplos em círculos concêntricos que dividem seções de mesma área. O processamento do arranjo é feito utilizando o algoritmo de Beamforming convencional no domínio da frequência, permitindo a utilização da técnica de remoção da diagonal da matriz de espectros cruzados. O sistema construído é utilizado para explorar aplicações na indústria automotiva.

## 3 Fundamentos da Técnica de Beamforming

O principal objetivo deste capítulo é fornecer ao leitor os conceitos da técnica de Beamforming aplicada ao mapeamento de fontes sonoras. Serão apresentadas aqui as considerações físicas do modelo de propagação das ondas, os algoritmos de processamento dos sinais, as características típicas da resposta de um arranjo de microfones e um método de calibração da resposta de um arranjo.

### 3.1 Propagação da onda sonora

As ondas sonoras propagam-se na atmosfera em forma de ondas longitudinais. As moléculas no ar movem-se para frente e para trás no eixo de propagação, produzindo regiões de compressão e rarefação, ou seja, variações locais de pressão. Neste caso, a variação na pressão atmosférica é chamada de pressão sonora. Uma equação que descreve a distribuição da pressão sonora durante a propagação da onda pode ser desenvolvida usando a equação do movimento de Newton, considerando um volume infinitesimal do fluido. A equação de onda generalizada para ondas acústicas é muito complexa, já que ela depende das propriedades do fluido. Entretanto, assumindo um fluido ideal com viscosidade desprezível [43], a equação da onda pode ser representada por:

$$\nabla^2 p(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (3.1)$$

onde  $p(\vec{r}, t)$  é uma função que representa a pressão sonora em um ponto no espaço e no tempo. A velocidade do som,  $c$ , depende da pressão e da densidade do fluido, podendo ser considerada aproximadamente constante no meio aéreo quando a temperatura é mantida constante ( $c = 343$  m/s a 20 °C).

Soluções da Equação (3.1) podem ser obtidas usando o método de separação de variáveis [43]. Entre elas, duas soluções elementares são facilmente encontradas: a onda com simetria plana e a onda com simetria esférica. No caso da onda com simetria de propagação esférica, a solução apresenta dois termos. Um que representa a onda que se propaga para fora e outro que representa a onda que se propaga para dentro do centro de simetria. Considerando um fluido infinito sem a existência de um contorno que permita reflexões, condição conhecida como **campo livre**, apenas a primeira parte da solução deve ser considerada. Sendo assim, a solução para ondas esféricas monocromáticas, ou seja, ondas compostas por uma única frequência, é descrita por:

$$p(\vec{r}, t) = -\frac{A}{4\pi r} e^{j(\omega t - kr)}, \quad (3.2)$$

onde  $r = |\vec{r}|$  é a distância da fonte e  $k$  é o número de onda, dado por  $2\pi/\lambda$ .

As ondas com simetria esférica representadas pela Equação (3.2) dão origem à representação de uma fonte sonora elementar do tipo monopólo. A Função de Green [43] oferece a solução geral para a radiação do monopólo em campo livre, podendo ser representada respectivamente no domínio do tempo e no domínio da frequência por:

$$g(r, t) = \frac{f(t - r/c)}{4\pi r} \quad (3.3)$$

e

$$G(r, \omega) = \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}. \quad (3.4)$$

O modelo de monopólo apresenta um papel importante nas aplicações práticas. Ele é capaz de descrever o comportamento de uma fonte sonora que é suficientemente compacta no espaço, quando comparada com a distância de análise<sup>1</sup>. Este é o conceito de uma fonte sonora pontual.

A Equação (3.2) também pode ser reescrita como:

$$p(\vec{r}, t) = -\frac{A}{4\pi r} e^{j\omega(t - r/c)}. \quad (3.5)$$

Esta forma torna explícita algumas características da descrição da radiação de um monopólo. O atraso no tempo  $r/c$  representa o tempo necessário para a onda viajar da

---

<sup>1</sup>Consideração a ser feita quando utilizando o modelo de monopólo na análise da radiação sonora.

fonte até o ponto  $r$  no espaço. A amplitude da fonte sonora é representada pela constante  $A$ . O espalhamento esférico da energia sonora impõe o fator de decaimento de  $1/r$  na amplitude do som<sup>2</sup>.

Ondas sonoras apresentam natureza tipicamente esférica. Entretanto, a natureza esférica pode ser degenerada para o caso de onda plana quando analisada a uma distância suficientemente grande da fonte. Isso pode ser observado no caso particular da solução de ondas esféricas na Equação (3.2) quando  $kr \gg 1$ , ou seja, para distâncias  $\vec{r}$  grandes quando comparadas com o comprimento de onda  $\lambda = 2\pi k$ .

Se definirmos uma nova variável  $v = t - r/c$ , então a solução para ondas esféricas pode ser expressa por:

$$p(v) = -\frac{A}{4\pi r} e^{j\omega v} \quad (3.6)$$

Devido à linearidade da equação de onda, a solução monocromática pode ser expandida para um caso mais geral, dito policromático, considerando a solução como uma soma ou integral dessas exponenciais complexas. A teoria de Fourier nos diz que qualquer função com uma integral de Fourier convergente pode ser expressa como uma somatória ponderada de exponenciais complexas. Com isso, podemos chegar a importante conclusão de que qualquer sinal com uma transformada de Fourier convergente satisfaz a equação de onda.

Nesta seção, vimos que a propagação de sinais acústicos pode ser descrita como uma função de uma única variável, com o espaço e o tempo vinculados por uma relação simples. Além disso, a informação no sinal acústico é preservada durante a sua propagação. Estas duas conclusões implicam em que, para um sinal com uma faixa de frequência limitada, é possível reconstruir o sinal em todo espaço e tempo através da:

- amostragem temporal do sinal em uma dada localização no espaço, ou
- amostragem espacial do sinal em um dado instante do tempo.

Baseando-se na informação temporal ou espacial, é possível inferir sobre o sinal em todo o espaço e tempo. Conseqüentemente, é possível determinar o sinal radiado pela fonte sonora. A amostragem espacial é a base para todas as técnicas de processamento de sinais utilizando arranjos de sensores. Outras implicações da teoria de ondas que são importantes nas aplicações de processamento de arranjo são largamente discutidas na literatura [10].

---

<sup>2</sup>Estas três características são a base para a definição do modelo de processamento de Beamforming para a identificação de fontes sonoras que será descrito nas próximas seções.

A discussão apresentada nesta seção manteve o nível de simplicidade, assumindo um meio fluido homogêneo e sem perdas, e desprezando efeitos como dispersão, difração e mudanças na velocidade de propagação da onda sonora. Estas serão as hipóteses do modelo mais simples de propagação da onda sonora, considerando, desta forma, o monopólo como fonte sonora elementar.

## 3.2 Arranjos de microfones para identificação de fontes

Arranjos de microfones podem ser utilizados para buscar uma direção, filtrar espacialmente sinais acústicos, formar feixes múltiplos, suprimir interferências e até mesmo obter imagens acústicas. Neste trabalho, o foco da utilização do arranjo de microfones será o mapeamento de fontes sonoras. Para isso, atrasos são aplicados aos sinais recebidos por cada microfone para direcionar ou focalizar a captação das ondas sonoras. Direcionar o arranjo significa selecionar atrasos em fase para “olhar” em uma direção particular e isto implica na consideração de um modelo de propagação de ondas planas no campo distante. Focalizar um arranjo significa selecionar atrasos para olhar para um ponto particular no espaço e implica na propagação de ondas esféricas, observadas no **campo próximo** do arranjo de microfones<sup>3</sup>. A última técnica é normalmente exigida para a aplicação no mapeamento de fontes de ruído.

Quando o arranjo é focalizado para um ponto de onde o ruído é gerado, todos os sinais estarão em concordância de fase, de tal forma que, quando somados, eles irão produzir um valor muito grande comparado com o valor obtido quando o arranjo é focalizado em um ponto de onde não é gerado ruído. Desta forma, é possível diferenciar uma região onde existe uma fonte de uma região sem fontes. A amplitude dos sinais somados, evidentemente, dependerá da amplitude da fonte no ponto de foco e nas várias distâncias de propagação entre fonte e microfone.

O sistema para o mapeamento de fontes de ruído deve conter, ao menos, um arranjo de microfones, um sistema de aquisição e uma unidade de processamento. A Figura 3.1 apresenta um esquema geral do sistema. A focalização é normalmente feita pela unidade de processamento que analisa os dados adquiridos pelos microfones. Os algoritmos de pro-

---

<sup>3</sup>É necessária atenção ao diferenciar os termos **campo próximo acústico** e **campo próximo de um arranjo**. O primeiro se refere a uma região muito próxima da fonte, onde é possível observar flutuações de pressão que não serão propagadas na forma de som (conhecida como ondas evanescentes [44]). O segundo indica a região próxima do arranjo de microfones onde a radiação do monopólo não pode mais ser descrita por ondas planas e sim por ondas esféricas [10]. Na prática, o campo próximo de um arranjo encontra-se numa região onde o campo acústico de um fonte já pode ser considerado distante ( $r > \lambda/2$ ).

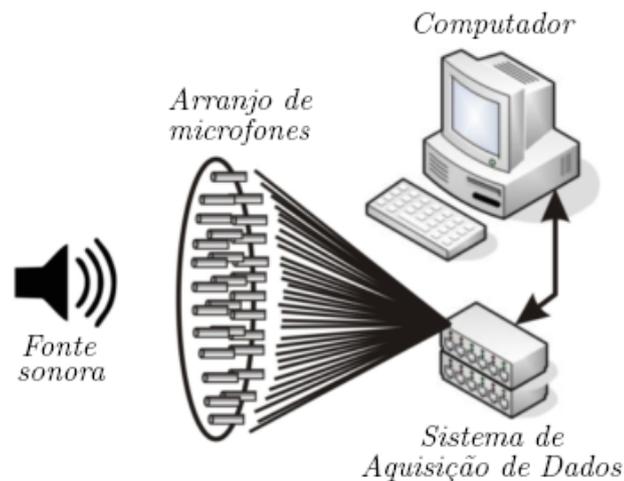


Figura 3.1: Esquema geral do sistema para o mapeamento de fontes sonoras.

cessamento que permitem focalizar ou direcionar o arranjo são chamados de algoritmos de Beamforming. A importância que a análise da fase tem no processamento realizado nesse tipo de sistema dá a essa classe de arranjo o nome de **arranjo em fase**<sup>4</sup>.

O Beamforming é a técnica de processamento de sinais que, de alguma forma, cria feixes espaciais seletivos, permitindo que a captação do sinal por um arranjo de sensores seja focalizada em uma direção particular. Essa técnica é a base para uma série de algoritmos que permitem processar espacialmente um campo acústico. Como apresentado anteriormente no Capítulo 2, diversos trabalhos exploram o uso de microfones em arranjos unidimensionais, bidimensionais, e, mais recentemente, arranjos tridimensionais. Em qualquer um desses casos, a radiação sonora de uma fonte pode ser sempre observada pelos microfones com um atraso no tempo e uma diferença de amplitude. É esse atraso no tempo e a diferença de amplitude entre os microfones que serão usados pelo algoritmo para identificar a localização e a amplitude de uma fonte sonora.

### 3.3 Algoritmos de Beamforming

Como o próprio nome indica, o Beamforming<sup>5</sup> baseia-se no processo de formação de um feixe seletivo [45]. Esse feixe deve, a princípio, ser focalizado em uma certa direção, permitindo a obtenção de um filtro espacial que analisa apenas as ondas incidentes sobre a direção escolhida. O algoritmo deve ser capaz de realizar esse processo a partir dos sinais

<sup>4</sup>Tradução livre do termo em inglês *phased array*

<sup>5</sup>O termo Beamforming pode ser traduzido como “formação de feixe”. Entretanto, devido à extensa utilização da palavra na língua inglesa, o nome original será mantido neste texto se referindo à técnica de processamento de sinais capaz de formar um feixe espacial seletivo em um conjunto de transdutores.

adquiridos pelo arranjo de microfones. O processo de Beamforming pode ser realizado tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência [46]. A seguir, serão apresentados os detalhes do processamento dos sinais para a formação do feixe espacial seletivo.

### 3.3.1 Algoritmo convencional no domínio do tempo

Considere-se um conjunto de  $M$  microfones omnidirecionais em um espaço livre. Seja a origem do sistema de coordenadas definida no centro do arranjo, onde  $\vec{x}_m$  denota a localização do microfone  $m$ . Agora considere-se um monopólio com função harmônica no tempo na posição  $\vec{x}'$  como mostrado na Figura 3.2. A pressão sonora no campo distante é governada pela solução esfericamente simétrica da equação de onda. Como vimos em seções anteriores, a Função de Green oferece a solução geral no campo livre para uma fonte do tipo monopólio. Desta forma, uma nova função similar à apresentada na Equação (3.3), é definida a seguir:

$$f(r, t) = \frac{s(t - r/c)}{r} \quad (3.7)$$

onde  $s(t)$  é uma função do tempo e  $r = |\vec{x} - \vec{x}'|$  é a distância da fonte ao ponto do campo. Notando a dependência espacial de  $r$ , sabemos que cada microfone irá experimentar um desvio no tempo e uma variação na amplitude do sinal propagado esfericamente.

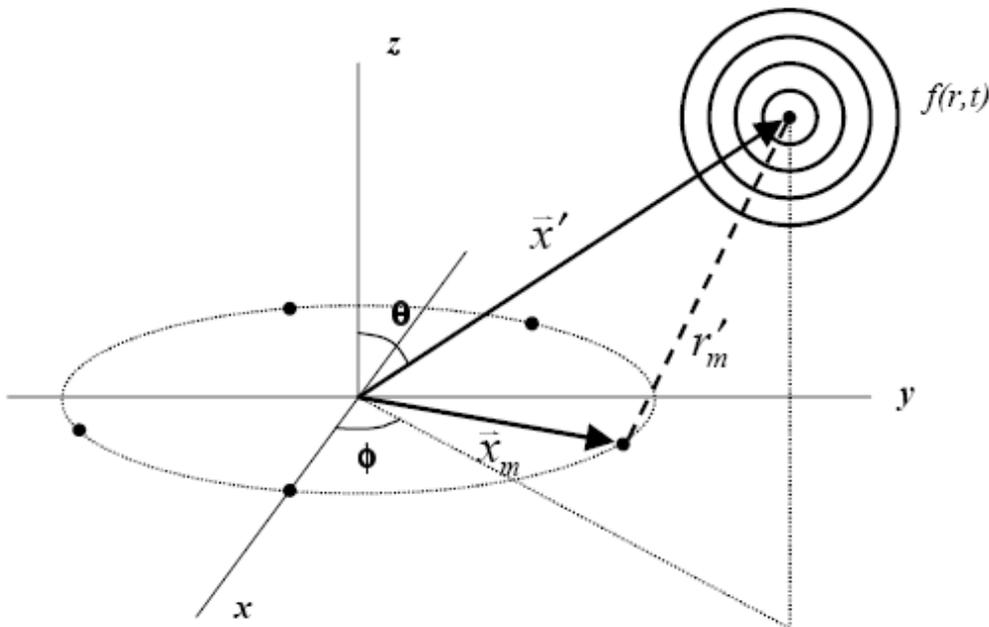


Figura 3.2: Representação geométrica de um arranjo de cinco microfones e uma fonte pontual.

Fazendo  $p_m(t) = f(r'_m, t)$  representar o sinal contínuo no tempo detectado pelo microfone  $m$ , onde  $r'_m = |\vec{x}_m - \vec{x}'|$  é a distância da fonte ao sensor. A equação clássica contínua no tempo do Beamforming, também chamada de **atraso-e-soma**, é dada pela soma linear ponderada dos sinais com atrasos no tempo:

$$b(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m), \quad (3.8)$$

onde  $w_m$  é a ponderação e  $\Delta_m$  é o tempo de atraso aplicado ao microfone  $m$  [10].

Selecionando os atrasos adequados, o sinal acústico de uma região específica escolhida é coerentemente amplificado, enquanto sinais provenientes de outras regiões são atenuados. A normalização do sinal é feita dividindo a expressão por  $M$ , para que o sinal não seja amplificado em função do número de microfones. O Beamforming funciona como um filtro espacial, que pode ser focado a um ponto do campo analisado.

Em operação, o arranjo é focalizado a uma região no espaço e o sinal de cada microfone é associado a uma ponderação  $w_m$  e a um tempo de atraso  $\Delta_m$ , referenciados ao centro do arranjo. Com a hipótese de propagação de ondas esféricas<sup>6</sup>, o tempo de atraso para o microfone  $m$  em relação ao centro do arranjo é dado por:

$$\Delta_m = \frac{|\vec{x}'| - r'_m}{c}. \quad (3.9)$$

Desta forma, os microfones mais próximos da localização do foco precisam de tempo de atraso positivo e os microfones mais distantes precisam de tempo de atraso negativo, ou seja, devem ser adiantados no tempo. Isto sincroniza no tempo cada um dos sinais medidos com o sinal no centro do arranjo. A ponderação é associada a cada microfone para compensar a atenuação das ondas esféricas durante a propagação:

$$w_m = \frac{r'_m}{|\vec{x}'|}. \quad (3.10)$$

As Equações (3.9) e (3.10) representam os atrasos e as ponderações usadas no Beamforming convencional para ondas esféricas. A modificação destes coeficientes é a base para as técnicas de Beamforming mais avançadas [3, 46].

---

<sup>6</sup>Nesse trabalho não será utilizada a hipótese de frente de ondas planas. Entretanto, é importante ressaltar que, para o caso de fontes localizadas no campo distante do arranjo, a expressão  $\Delta_m$  pode ser simplificada.

### 3.3.2 Algoritmo convencional no domínio da frequência

Se o histórico no tempo não é necessário em um experimento, o Beamforming no domínio da frequência oferece diversos benefícios sobre os métodos no domínio do tempo, incluindo técnicas para redução de lóbulos laterais, estreitando o lóbulo principal<sup>7</sup>, e reduzindo efeitos de ruídos externos e reflexões [5]. O Beamforming no domínio da frequência é baseado na propriedade de que um desvio no tempo corresponde a um desvio de fase no domínio de Fourier. Desta forma, a expressão apresentada na Equação (3.8) pode ser representada no domínio da frequência por:

$$B(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{-j\omega \Delta_m}, \quad (3.11)$$

onde  $P_m(\omega)$  e  $B(\omega)$  são as Transformadas de Fourier dos sinais no tempo de cada microfone  $p_m(t)$  e o sinal de saída  $b(t)$ , respectivamente. No domínio da frequência, as Equações (3.9) e (3.10) ainda são usadas para definir o desvio de fase e a ponderação em cada canal, respectivamente.

Na maioria dos casos, um sistema de aquisição é usado para obter amostras discretas no tempo do sinal a uma taxa de amostragem fixa  $f_s$ . A gravação no tempo para cada canal, denominada  $p[n]$ , é dividida em  $L$  blocos de tempo, onde cada bloco é constituído por  $N$  pontos. A Transformada Rápida de Fourier (TRF) dos  $N$  pontos em um único bloco de tempo é dada por:

$$P_k = \sum_{n=0}^{N-1} p[n] e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.12)$$

onde  $P_k$  representa o  $k$ -ésimo coeficiente da TRF [47]. A Equação (3.11) pode ser reescrita para definir o resultado do Beamforming discreto no domínio da frequência no  $k$ -ésimo segmento de frequência, como:

$$B_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m P_{m_k} e^{-j\omega_k \Delta_m}, \quad (3.13)$$

onde  $B_k$  é a resposta do arranjo no  $k$ -ésimo segmento de frequência e  $\omega_k = k2\pi f_s/N$  é a frequência radial correspondente.

<sup>7</sup>Os conceitos de lóbulos laterais e lóbulo principal serão apresentados na seção 3.5.

A utilização de expressões na forma matricial oferece novas oportunidades de processamento do algoritmo. Desta forma, a Equação (3.13) pode ser reescrita como:

$$B_k = \frac{\vec{g}_k^\dagger \vec{P}_k}{M}, \quad (3.14)$$

onde o símbolo  $\dagger$  denota o operador Hermitiano (conjugado complexo transposto). A função  $\vec{g}_k$ , conhecida como vetor de direção<sup>8</sup>, contém as ponderações e os desvios de fase a serem aplicados ao sistema, sendo dada por:

$$\vec{g}_k = \begin{bmatrix} w_1 e^{j\omega_k \Delta_1} \\ \vdots \\ w_M e^{j\omega_k \Delta_M} \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

O vetor  $\vec{P}_k$  é um vetor coluna contendo o  $k$ -ésimo coeficiente da TRF para todos os  $M$  canais:

$$\vec{P}_k = \begin{bmatrix} P_{i_k} \\ \vdots \\ P_{M_k} \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

O vetor de direção,  $\vec{g}_k$ , é usado para direcionar o arranjo para um ponto particular na região de análise, dando a cada sinal o atraso de fase e o fator de correção de amplitude adequados. Note que  $\vec{g}_k$  é definido em função da geometria do arranjo, onde diferentes geometrias necessitam de diferentes valores de  $w_M$  e  $\Delta_M$ .

Uma forma mais generalista pode ser desenvolvida para representar o vetor de direção. Ele deve oferecer um ganho unitário se existir uma fonte unitária na direção escolhida, exigindo que:

$$\vec{g}_k^\dagger \vec{G} = 1, \quad (3.17)$$

onde  $\vec{G}$  é o vetor de propagação do arranjo para uma fonte monopólo no campo-livre, cujas componentes são dadas pela Função de Green no espaço livre:

$$G_m = \frac{e^{-jk|\vec{x}_m - \vec{x}'|}}{4\pi|\vec{x}_m - \vec{x}'|} = \frac{e^{-jkr'_m}}{4\pi r'_m}. \quad (3.18)$$

---

<sup>8</sup>Tradução livre do termo em inglês *steering vector*. Outro termo também utilizado na literatura é *weight vector* [34]

O fator  $4\pi$  é normalmente desprezado, já que a calibração do arranjo irá compensar este fator (ver Seção 3.7). Deste modo, para satisfazer a Equação (3.17) e maximizar a contribuição do sinal proveniente da fonte sonora em um dado vetor de direção, este vetor de direção é escolhido unitário e paralelo ao vetor de propagação:

$$\vec{g}_k = \frac{\vec{G}}{\|\vec{G}\|}. \quad (3.19)$$

Note-se que tanto o atraso de fase quanto o fator de correção de amplitude estão inclusos no vetor de propagação  $\vec{G}$ . A utilização explícita da Função de Green na formulação do Beamforming torna o algoritmo ainda mais poderoso, já que, desta forma, modificações no campo acústico podem ser consideradas através da modificação de  $\vec{G}$ , considerando, por exemplo, o deslocamento do ar em medições feitas em túneis de vento.

É possível estimar a **resposta em potência do arranjo** [10], definida como a potência média contida no  $k$ -ésimo segmento de frequência do resultado de Beamforming para um vetor de direção particular,  $\vec{g}_k$ , através de:

$$|B_k|^2 = \frac{\vec{g}_k^\dagger E \left[ \vec{P}_k \vec{P}_k^\dagger \right] \vec{g}_k}{M^2}, \quad (3.20)$$

onde  $E[\cdot]$  denota o valor esperado de uma variável, enfatizando que o termo  $|B_k|^2$  é um valor real escalar com unidade de potência ( $\text{Pa}^2$ ). O termo do meio:

$$C_k = E \left[ \vec{P}_k \vec{P}_k^\dagger \right] = \begin{bmatrix} C_{11_k} & C_{12_k} & \cdots & C_{1M_k} \\ C_{21_k} & C_{22_k} & \cdots & C_{2M_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{M1_k} & C_{M2_k} & \cdots & C_{MM_k} \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

é conhecido como **matriz de correlação espacial** ou **matriz de espectros cruzados**, e forma a base para os algoritmos de Beamforming mais complexos [10]. Note-se que uma matriz representa apenas o resultado no  $k$ -ésimo coeficiente da TRF, ou seja, deve ser calculada para cada frequência. Cada termo da matriz é dado por:

$$C_{mm'_k} = E \left[ P_{m_k} P_{m'_k}^* \right], \quad (3.22)$$

onde o símbolo  $*$  denota o conjugado complexo e  $P_{m_k}$  é o  $k$ -ésimo coeficiente da TRF do sinal do microfone  $m$ . Esta matriz  $M \times M$  captura todas as relações de magnitudes e fases

relativas entre pares de microfones, contendo, portanto, as informações necessárias para calcular a localização da fonte geradora do sinal [10].

O procedimento de Bartlett [48] pode ser utilizado caso os sinais sejam assumidos estacionários. Desta forma, médias podem ser utilizadas para reduzir ruídos aleatórios nas medições [47]. Quando lidando com dados experimentais, a matriz de espectros cruzados deve conter o espectro cruzado médio de cada par de microfones nos elementos fora da diagonal e os auto-espectros dos microfones nos elementos da diagonal. A obtenção de médias da matriz de espectros cruzados irá oferecer uma medição robusta, já que a informação de fase relativa entre os microfones é conhecida de forma precisa [10]. A estimativa de cada termo da matriz é portanto:

$$C_{mm'_k} = \frac{\langle P_{m_k} P_{m'_k}^* \rangle}{2}, \quad (3.23)$$

onde  $\langle \cdot \rangle$  indica uma média no tempo. Na prática, a estimativa de cada termo da matriz de espectros cruzados é dada por uma média sobre os  $L$  intervalos de tempo:

$$C_{mm'_k} = \frac{1}{2L} \sum_{l=1}^L P_{ml_k} P_{m'l_k}^*, \quad (3.24)$$

onde  $P_{ml_k}$  é o  $k$ -ésimo coeficiente da TRF no  $l$ -ésimo intervalo de tempo no microfone  $m$ .

A estimativa da matriz de espectros cruzados é, portanto:

$$\hat{C}_k = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \vec{P}_{l_k} \vec{P}_{l_k}^\dagger, \quad (3.25)$$

onde  $\vec{P}_{l_k}$  é o vetor com o valor do  $k$ -ésimo coeficiente da TRF de todos os microfones no  $l$ -ésimo intervalo de tempo.

Finalmente, a **resposta em potência do arranjo** estimada será dada por:

$$|\hat{B}_k|^2 = \frac{g_k^\dagger \hat{C}_k g_k}{M^2}. \quad (3.26)$$

A **resposta em pressão do arranjo** é a raiz quadrada da resposta em potência do arranjo. Das Equações (3.25) e (3.26), é possível notar que a média no tempo da matriz de espectros cruzados precisa ser calculada apenas uma vez. Apenas o vetor de direção muda para o cálculo da resposta nos diferentes pontos de foco. Já que o sinal é considerado estacionário, a matriz de espectros cruzados contém todas as informações relevantes do campo

adquirido pelo arranjo. Podendo ela ser mantida, ao invés do sinal bruto no tempo, se fixados os parâmetros da análise espectral (tamanho do bloco no tempo, número de médias, janela temporal [49], etc). Isto pode oferecer uma redução significativa nos requisitos de armazenamento de dados do sistema.

O Beamforming no domínio da frequência é, normalmente, limitado ao processamento de bandas estreitas. Entretanto, algumas extensões para o processamento de bandas largas já foram recentemente apresentadas [50]. De modo geral, a faixa de análise deve ser uma fração pequena da frequência central para que a fase do sinal seja bem definida.

### 3.3.3 Remoção da diagonal da matriz de espectros cruzados

Durante medições em ambientes desfavoráveis, é comum o uso de técnicas capazes de reduzir o auto-ruído dos microfones e o efeito do ruído de fundo. A maneira mais utilizada de remover o ruído sem correlação é excluir os elementos da diagonal da matriz de espectros cruzados [51]. Estes termos estão associados aos auto-espectros dos microfones e incluem a potência total em cada sinal. É possível demonstrar que a remoção da diagonal é útil e não causa impacto significativo no resultado do Beamforming.

Conforme apresentado nas Equações (3.22) e (3.24), o auto-espectro no domínio da frequência pode ser escrito como:

$$C_{mm_k} = \frac{1}{2L} \sum_{l=1}^L P_{ml_k} P_{ml_k}^* \quad (3.27)$$

Supondo que o sinal  $P$  é composto por um sinal com amplitude  $S$  e um ruído  $u$ , o espectro de  $P$  seria:

$$P(f) = S(f) + u(f). \quad (3.28)$$

Desta forma, o valor esperado para o auto-espectro é:

$$\begin{aligned} E[C_{mm_k}] &= \frac{1}{2} E[PP^*] = \frac{1}{2} E[(S(f) + u(f))(S(f) + u(f))^*] \\ &= \frac{1}{2} E[SS^* + uu^* + Su^* + S^*u]. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Uma vez que o valor esperado equivale à estimativa de médias infinitas, o conteúdo que não tem correlação será anulado. Dado que os sinais  $S$  e  $u$  não apresentam correlação, o

valor esperado de seu produto é zero e o auto-espectro pode ser escrito como:

$$C_{mm_k} = \frac{S^2}{2} + \sigma^2, \quad (3.30)$$

onde  $\sigma^2$  é o valor médio quadrático do ruído sem correlação do sinal.

Desta forma, os termos da diagonal da matriz de espectros cruzados são constituídos pela soma da potência correlacionada do sinal com o valor médio quadrático do ruído.

Supondo agora o caso de dois sinais na forma anteriormente apresentada:

$$P_1(f) = S_1(f) + u_1(f), \quad P_2(f) = S_2(f) + u_2(f), \quad (3.31)$$

onde  $S_1$  e  $S_2$  representam o conteúdo correlacionado e  $u_1$  e  $u_2$  representam o conteúdo não correlacionado.

Então, o espectro cruzado é definido como:

$$C_{mm'_k} = \frac{1}{2L} \sum_{l=1}^L P_{1k} P_{2k}^*. \quad (3.32)$$

Assim, o valor esperado para o espectro cruzado é dado por:

$$\begin{aligned} E[C_{ij}] &= \frac{1}{2} E[(S_1(f) + u_1(f))(S_2(f) + u_2(f))^*] \\ &= \frac{1}{2} E[S_1 S_2^* + u_1 u_2^* + S_1 u_2^* + S_2^* u_1] = \frac{1}{2} E[S_1 S_2^*]. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Portanto, o espectro cruzado do sinal é dado por:

$$C_{mm'_k} = \frac{S_1 S_2^*}{2}. \quad (3.34)$$

Como podemos ver, o espectro cruzado apresentado não contém a potência do sinal não correlacionado,  $\sigma^2$ , da mesma maneira que o auto-espectro mostrado na Equação (3.30). Assim, excluindo a componente da diagonal da matriz de espectros cruzados, todo o ruído não correlacionado é removido. Esse procedimento é muito utilizado para “limpar” os mapas de Beamforming, sendo largamente usado em aplicações de medições aeroacústicas [46, 4, 52].

Para que a remoção da diagonal e outros algoritmos avançados sejam implementados no domínio do tempo, é necessário, de alguma forma, tornar explícita a matriz de espectros cruzados [46]. Isso pode ser realizado através da estimativa da **resposta em potência do**

**arranjo** utilizando a Equação (3.8). Deste modo, a resposta em potência do arranjo no domínio do tempo é:

$$|b|^2 = \frac{1}{M^2} \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m) \right]^2 dt. \quad (3.35)$$

A estimativa da **resposta em potência do arranjo** pode ser expressa por:

$$|\hat{b}|^2 = \frac{1}{M^2} \left\langle \left[ \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m) \right]^2 \right\rangle, \quad (3.36)$$

onde  $p_m(t)$  deve ser a pressão sonora no microfone  $m$  depois de passar inicialmente pelo filtro *anti-aliasing* e em seguida por um filtro passa-banda.

O uso da Equação (3.36) deve oferecer o mesmo resultado que a Equação (3.26) utilizando o vetor de direção dado pela Equação (3.15), quando aplicado a um sinal em banda estreita. Entretanto, a expressão é mais geral que a formulação no domínio da frequência porque considera diretamente o caso de um sinal em banda larga.

Para tornar explícita a diagonal da matriz de espectros cruzados, ou seja, a auto-correlação dos sinais, a Equação (3.36) pode ser reescrita como:

$$|\hat{b}|^2 = \frac{1}{M^2} \left\langle \sum_{m=1}^M w_m^2 p_m^2(t - \Delta_m) + \sum_{m \neq n} w_m w_n p_m(t - \Delta_m) p_n(t - \Delta_n) \right\rangle, \quad (3.37)$$

onde o primeiro somatório pode ser interpretado como os termos da “diagonal” na expressão de Beamforming, contendo as auto-correlações dos sinais dos microfones e a segunda somatória contendo as correlações cruzadas. Esta última é a parte que deve ser mantida no Beamforming com “remoção da diagonal”. Note que a avaliação direta dessa expressão seria muito lenta, já que ela é uma somatória dupla que deveria ser realizada para cada intervalo do tempo na integração.

Finalmente, a comparação direta das Equações (3.36) e (3.37) resulta na expressão do Beamforming com remoção da diagonal no domínio do tempo, ou de outra forma, Beamforming com remoção do auto-espectro do sinal dos microfones:

$$|\hat{b}|^2 = \frac{1}{M^2 - M} \left\langle \left[ \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m) \right]^2 - \sum_{m=1}^M w_m^2 p_m^2(t - \Delta_m) \right\rangle. \quad (3.38)$$

## 3.4 Construção dos mapas

Quando o algoritmo de Beamforming é utilizado, se o arranjo estiver focalizando uma fonte real, os sinais dos microfones somados coerentemente resultarão em um valor alto da função de Beamforming. Se a fonte não estiver presente neste ponto do espaço, os sinais serão somados destrutivamente resultando em uma função de Beamforming com valor baixo. É possível então construir um mapa, ou imagem acústica, utilizando o Beamforming. Para isso, é necessário realizar uma varredura sobre todos os pontos de uma região de análise. O mesmo procedimento pode ser repetido sucessivamente para cada intervalo de tempo ou frequência de interesse. Embora o algoritmo permita construir mapas sobre superfícies irregulares, a região de análise é normalmente um plano paralelo ao plano do arranjo, o que, na prática, simplifica muito o processo de obtenção das imagens. Depois que o processo de Beamforming estiver completo, o maior lóbulo indica a posição da fonte para cada intervalo no tempo ou na frequência. O exemplo do mapeamento feito na presença de uma única fonte é apresentado na Figura 3.3 (b). Nesta figura, o nível foi cortado em 20 dB abaixo do nível do lóbulo principal, definindo, assim, a faixa dinâmica do mapa apresentado. O plano analisado encontra-se paralelo ao arranjo a uma distância fixa, onde as coordenadas X e Y representam respectivamente o eixo de posição horizontal e vertical na região analisada. A faixa dinâmica de operação de um arranjo, por outro lado, é determinada pela diferença entre o lóbulo principal e os lóbulos laterais, modos secundários que não são associados a uma fonte, resultante do efeito de dobramento espacial do arranjo<sup>9</sup>. É comum definir uma região de visualização da fonte como a região até 3 dB abaixo do nível do maior lóbulo, como pode ser visto na Figura 3.3 (a). Esta pequena região de visualização do mapa determina, também, a largura de feixe do arranjo<sup>10</sup>, que dependerá das características específicas de cada arranjo.

Se mais de uma fonte estiver na mesma frequência ou no mesmo intervalo de tempo, elas podem também ser identificadas separadamente. Entretanto, deve ser tomado cuidado para não confundir fontes sonoras com os lóbulos laterais. Conhecendo a faixa dinâmica de um arranjo e o comportamento dos lóbulos laterais, é possível estabelecer critérios para diferenciar fontes reais de lóbulos laterais. Por exemplo, se a faixa dinâmica for de 8 dB, lóbulos próximos deste nível não podem ser associados a fontes sonoras reais.

De modo geral, o processo de obtenção dos mapas é baseado na premissa de que todas as medições são feitas em campo acústico distante, analisando a distribuição de pequenos

---

<sup>9</sup>O dobramento espacial será apresentado nas próximas seções.

<sup>10</sup>A largura de feixe será apresentada com mais detalhes nas próximas seções.

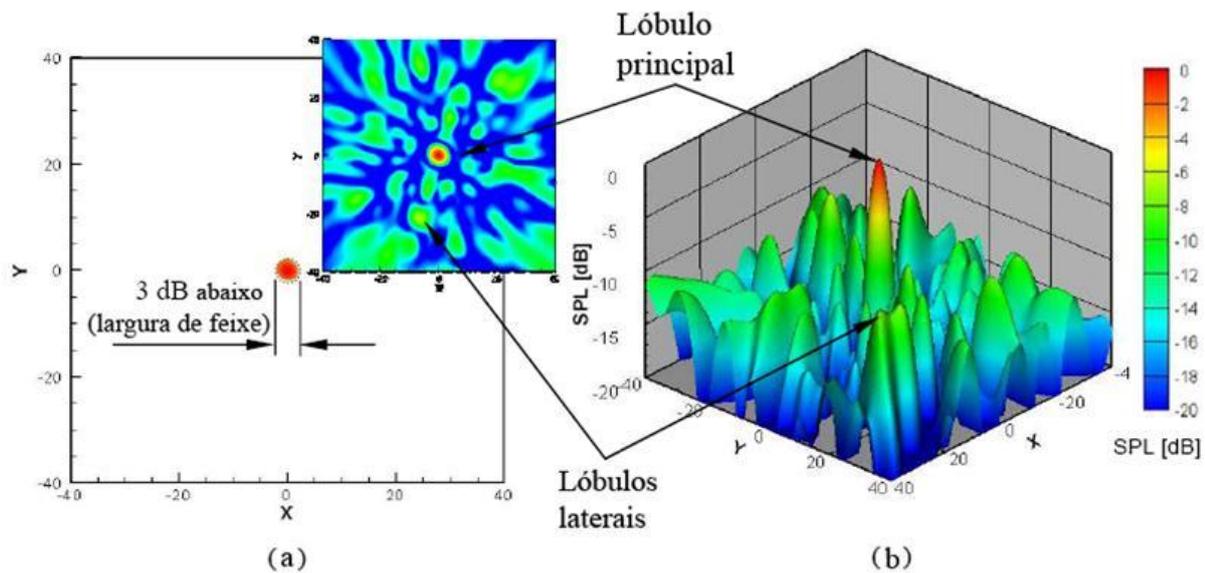


Figura 3.3: Mapa de Beamforming para uma única fonte posicionada na origem do plano XY, indicando o lóbulo principal, os lóbulos laterais e a largura de feixe (a).

O resultado de Beamforming também pode ser representado em uma variável no terceiro eixo, constituindo assim um mapa tridimensional (b) [33].

monopólos, separados espacialmente e mutuamente independentes [15]. A presença de fontes muito próximas ou coerentes, na forma de monopólos, dipólos, quadrupólos ou fontes continuamente distribuídas, limitam a acurácia das medições do arranjo. Uma vez que as fontes em um dado campo são geralmente desconhecidas *a priori*, os resultados obtidos usando o algoritmo de Beamforming de atraso-e-soma geralmente apresentam caráter qualitativo.

### 3.5 Características da resposta de um arranjo

A resposta direcional de um arranjo é chamada padrão de direcionalidade. A direcionalidade de um arranjo, que é determinada tanto pelo padrão de distribuição dos sensores como pelo algoritmo de Beamforming utilizado, é caracterizado por seu **lóbulo principal** e seus **lóbulos laterais**. Os lóbulos laterais serão discutidos em uma próxima seção. O lóbulo principal é o feixe principal, um nome que tem sua origem em arranjos que transmitem energia ao invés de recebê-la. Mesmo assim, o termo é ainda largamente utilizado ao se referir ao lóbulo principal do padrão de direcionalidade de um arranjo receptor.

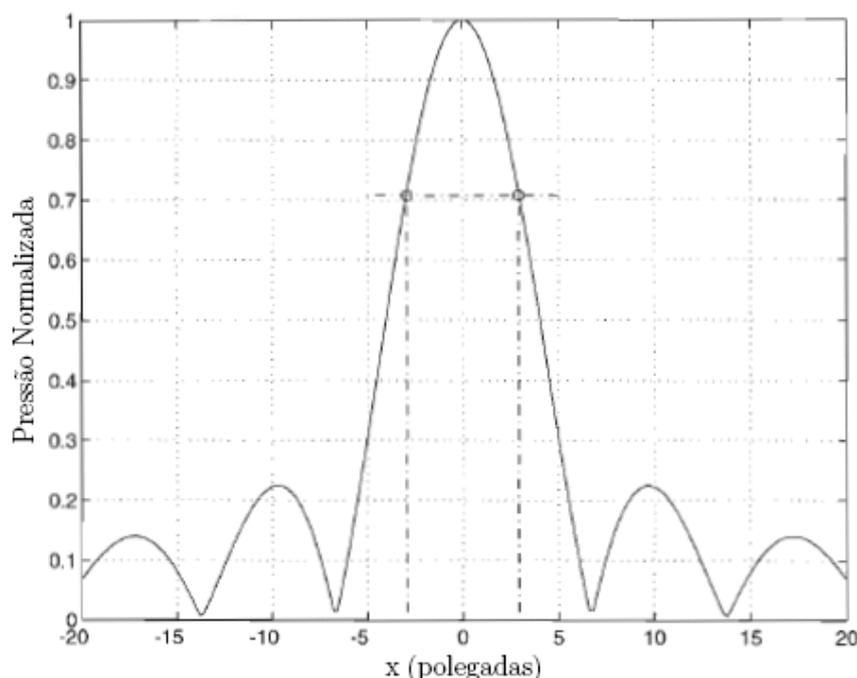


Figura 3.4: Determinação da largura de feixe em 3 dB de onde uma linha horizontal em  $1/\sqrt{2}$  intersecciona o lóbulo principal. Neste caso a largura de feixe a 3 dB é aproximadamente 6 polegadas [23].

### 3.5.1 Largura de feixe

A largura do lóbulo principal de um arranjo é chamada de **largura de feixe**. A largura de feixe é importante no projeto do arranjo porque ela indica a capacidade que um arranjo tem de analisar uma direção de propagação. Existem várias maneiras de estimar a largura de feixe [53, 10]. Um dos métodos mais comumente usados, e aquele que será utilizado neste trabalho, é a largura de feixe em 3 dB ou largura de feixe à meia potência. A meia-largura do lóbulo principal é o ângulo entre a direção de máxima resposta do lóbulo principal e a direção em que a resposta é reduzida em  $1/\sqrt{2}$ , o que corresponde a 3 dB abaixo do pico do lóbulo principal.

Para o mapeamento em campo próximo do arranjo, é conveniente expressar a largura de feixe em unidade de comprimento em uma distância de referência do arranjo, por exemplo, a distância em que o mapeamento de fonte será feito. Estas dimensões de largura de feixe irão, então, corresponder à resolução do mapeamento de fonte pelo arranjo na distância de referência associada. A Figura 3.4 ilustra o padrão de direcionalidade de um arranjo linear de elementos igualmente espaçados, e mostra como a largura de 3 dB é determinada. É importante notar que à medida que a região de mapeamento se afasta do arranjo, a largura de feixe linear aumenta, porque a largura de feixe angular permanece constante.

Neste trabalho, a largura de feixe de um arranjo será expressa apenas para feixes perpendiculares ao plano do arranjo e alinhados com seu centro. Esta será uma das características que representam o desempenho de um arranjo. Entretanto, deve-se reconhecer que a largura do feixe aumenta e, conseqüentemente, a resolução dos mapas diminui quando o feixe é direcionado para ângulos afastados da região central. Isto acontece porque a largura aparente do arranjo se torna menor em relação ao feixe a ser analisado.

A largura de feixe de um arranjo é normalmente expressa como uma função do comprimento de onda e da distância até a fonte, determinando a constante  $K$  na expressão:

$$BW_{R_z} = K\lambda, \quad (3.39)$$

onde  $R_z$  é a distância à fonte na direção normal do arranjo,  $K$  é a constante que depende das características do arranjo.

A largura de feixe varia também em uma função da frequência. Em uma frequência mais alta, o feixe principal é mais estreito. Em uma frequência mais baixa, o feixe principal é mais largo. Já que a largura de feixe é uma função da frequência, é importante entender como a largura do feixe varia com a frequência quando está se projetando um arranjo para uma aplicação em ampla faixa de frequência.

Outra maneira de interpretar o efeito da largura de feixe em um mapa de Beamforming é através da habilidade que o Beamforming tem de distinguir incidência de ondas vindas de direções próximas. Desta forma, é possível definir um parâmetro que descreve a resolução do arranjo [38]. A resolução, neste caso, está ligada à projeção da largura de feixe sobre o plano de análise. Uma consideração importante sobre este parâmetro é a sua dependência com o ângulo do vetor de direção. Se o ângulo do vetor de direção é perpendicular ao arranjo e ao plano de análise, a resolução tem o seu menor valor. À medida que o ângulo se afasta da direção perpendicular, a resolução aumenta progressivamente. No campo distante, utilizando o **critério de Rayleigh** [38], a razão entre a resolução a um ângulo  $\theta$  com o eixo normal ao plano do arranjo em relação a resolução no eixo normal, é descrita por:

$$\frac{R(\theta)}{R_{eixo}} = \frac{1}{\cos^3\theta} \quad (3.40)$$

A relação é apresentada na Figura 3.5, onde é possível observar que, para ângulos maiores que  $30^\circ$ , a resolução se torna 50% pior do que a resolução no eixo perpendicular ao arranjo. Este fato é normalmente utilizado para restringir as dimensões dos mapas a uma região compreendida entre  $-3^\circ$  e  $30^\circ$  em cada um dos eixos.

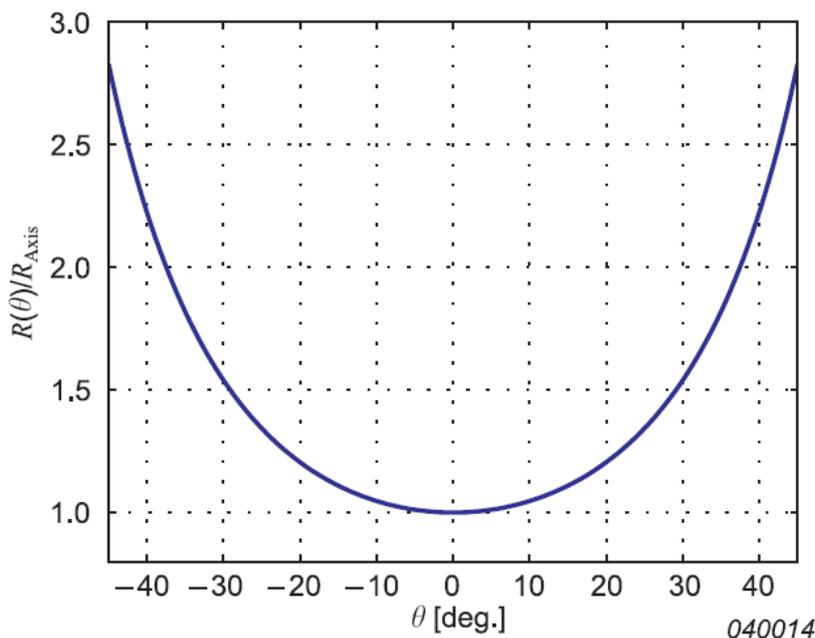


Figura 3.5: Razão entre a resolução na direção de focalização e a resolução no eixo perpendicular ao arranjo em função do ângulo  $\theta$ , definido entre a direção de focalização e o eixo perpendicular ao arranjo [38].

Note-se que a modificação da faixa dinâmica dos mapas pode ser confundida com a variação da resolução do arranjo. Por esse e outros fatores, a resolução não será usada como um parâmetro para caracterização do arranjo. A largura de feixe será o parâmetro mais importante na descrição da precisão do feixe principal de um arranjo.

### 3.5.2 Lóbulos laterais

Os lóbulos laterais são os lóbulos secundários da resposta de um arranjo. Diferentemente do lóbulo principal, os lóbulos laterais são menores e não correspondem à direção em que o arranjo está sendo apontado. Como já apresentado em seções anteriores, a amplitude do maior lóbulo lateral em relação a amplitude do lóbulo principal é uma característica importante para aplicação de mapeamento de fontes. A Figura 3.6 ilustra como o pico do lóbulo lateral define a faixa dinâmica efetiva de um arranjo. É comum definir um nível de rejeição do lóbulo lateral para estabelecer um limite na faixa dinâmica sem a presença de lóbulos laterais.

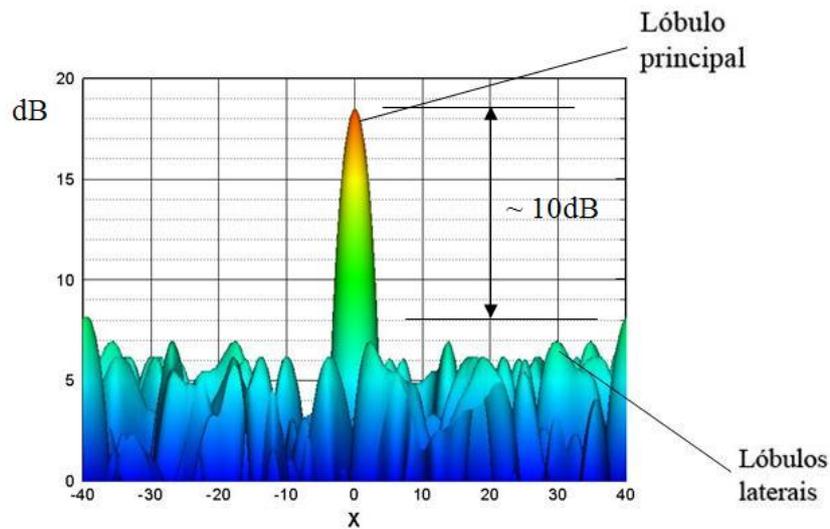


Figura 3.6: Definição da faixa dinâmica de operação de uma arranjo através da diferença de nível entre o lóbulo principal e o maior lóbulo lateral.

Uma série de estudos teóricos em arranjos lineares ou planos, com geometria geradas aleatoriamente, permite entender melhor os lóbulos laterais. Algumas considerações importantes feitas por Steinberg [53] são:

1. O número de elementos de um arranjo é o parâmetro dominante para determinar o pico e o nível médio dos lóbulos laterais;
2. A média teórica do nível de potência dos lóbulos laterais de um arranjo plano aleatório em relação ao lóbulo principal é aproximadamente  $10 \log (1/M) + 3$  dB, onde  $M$  é o número de microfones;
3. Uma regra geral sobre o nível do pico dos lóbulos laterais é que dificilmente ele ultrapassa a média de 10 dB.

O primeiro resultado acima aponta a conseqüência inevitável da limitação do número de sensores. O segundo oferece um guia sobre a média alcançável esperada para um dado número fixo de sensores. O último resultado indica, de certa forma, o limite superior para o nível do lóbulo lateral para uma dada geometria de arranjo. Para o mapeamento de fontes, é desejável ter os níveis de todos os lóbulos laterais o mais próximo do nível médio teórico. Buscando, desta forma, maximizar a faixa dinâmica efetiva do arranjo.

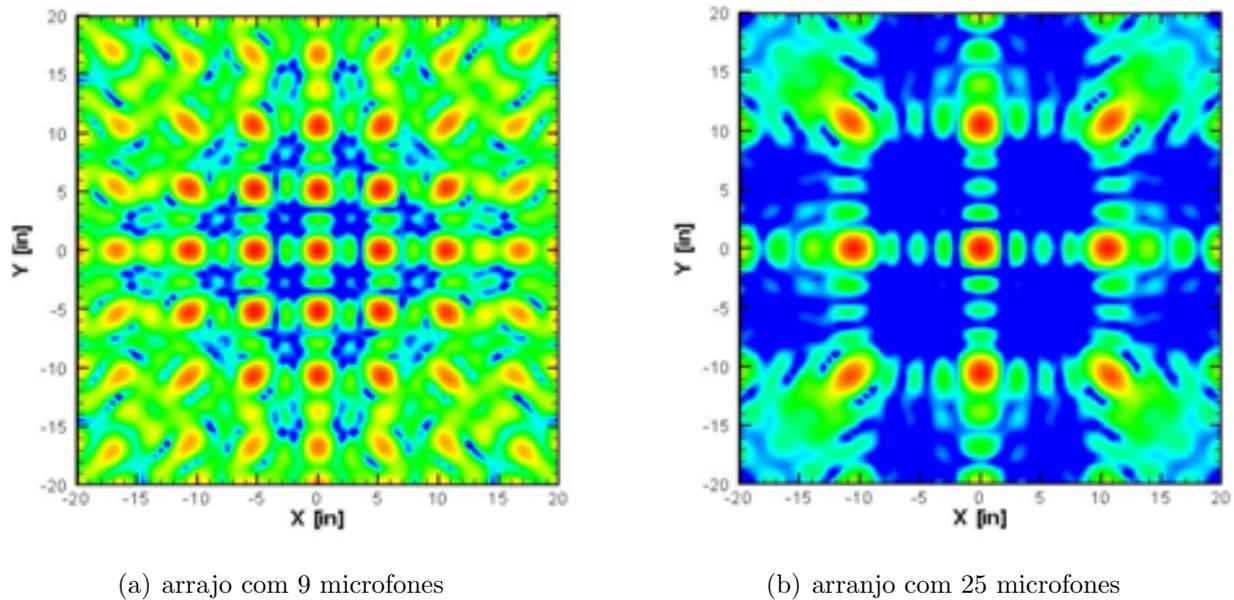


Figura 3.7: Mapeamento de uma única fonte utilizando arranjos regulares com mesmas dimensões externas [33].

### 3.5.3 Dobramento espacial

O dobramento espacial é um efeito indesejado resultante da amostragem espacial insuficiente de um arranjo, devido ao número finito de pontos analisados pelos microfones. A resposta de um arranjo com amostragem espacial insuficiente pode apresentar múltiplos lóbulos laterais com o mesmo nível que o lóbulo principal, tornando inviável a identificação do lóbulo principal. Neste caso, apenas o lóbulo principal corresponde à direção da fonte, os outros lóbulos são resultados do efeito de dobramento espacial. A Figura 3.7 mostra a resposta de dois arranjos regulares, ou periódicos, mapeando uma única fonte posicionada em um plano paralelo ao do arranjo, em uma posição alinhada com seu centro. Os dois arranjos apresentam números diferentes de sensores, mantendo as mesmas dimensões externas e espaçamento constante entre sensores. No exemplo, foi escolhida uma frequência onde ambos os arranjos apresentassem o efeito do dobramento espacial.

Assim como uma taxa de amostragem temporal insuficiente de um sinal não permite distinguir entre componentes de frequências múltiplas, um arranjo com amostragem espacial insuficiente não permite distinguir entre direções de propagação múltiplas. Esses lóbulos espúrios<sup>11</sup> surgem devido à ambigüidade espacial na função de resposta do arranjo. O efeito de dobramento espacial é predominante em arranjos com geometrias que apresentam forte simetria, como é o caso dos arranjos retangulares, com espaçamento constante entre sensores.

<sup>11</sup>Descrição do termo conhecido em inglês como *grating lobes*.

Normalmente, um arranjo apresenta amostragem espacial insuficiente, em uma dada frequência, se a distância entre os sensores for maior que meio comprimento de onda. Quando o arranjo analisa ondas planas, é possível encontrar diversas direções de propagação para as quais o sinal recebido pelo arranjo parece ser o mesmo e, desta forma, o dobramento espacial irá gerar lóbulos espúrios com mesma amplitude do lóbulo principal em posições diferentes do espaço. Quando um arranjo plano analisa ondas esféricas, não é possível encontrar dois pontos do mesmo lado de um arranjo plano para o qual ondas sonoras radiantes sejam idênticas para os sensores do arranjo. Desta forma, para fontes em campo próximo, os lóbulos espúrios resultantes do dobramento espacial serão menores que o lóbulo principal, como se pode notar facilmente na Figura 3.7 (a). Quanto mais próximo da fonte maior será a diferença entre os níveis dos lóbulos espúrios. Este benefício não elimina o problema do dobramento espacial em arranjos planos, porque continua sendo difícil distinguir quando uma “fonte” em uma imagem acústica é associada a um lóbulo espúrio ou a uma fonte real, ou ambos.

O dobramento espacial pode ser evitado pelo posicionamento dos sensores a uma distância menor do que meio comprimento de onda para a maior frequência de interesse. Em aplicações em banda larga, isto pode exigir um grande número de sensores. A princípio, o dobramento espacial define, para uma dada frequência, a região visível de um arranjo. Sendo a região estabelecida por uma abertura angular inferior àquela onde são encontrados os lóbulos espúrios. Este fato exigiria o conhecimento prévio da resposta do arranjo para definir a região de análise em cada banda de frequência. Esse recurso não se torna prático na maioria das aplicações de mapeamento de fontes em banda larga, onde a análise em altas frequências poderia restringir.

O posicionamento não periódico dos sensores torna difícil a análise do efeito de dobramento espacial. Dependendo da escolha do posicionamento do sensor a resposta do arranjo pode, ou não, apresentar periodicidade. Normalmente, arranjos irregulares sofrem pouco o efeito de dobramento espacial já que o efeito é “distribuído” homoganeamente ao longo do espaço mapeado, podendo-se afirmar que o uso da geometria irregular reduzir o efeito do dobramento espacial. Por outro lado, a distribuição irregular do efeito do dobramento espacial contribui para a diminuição da faixa dinâmica da resposta do arranjo, já que uma consequência dessa “distribuição” do efeito do dobramento espacial é justamente o aumento do ruído de fundo, diminuindo a relação sinal-ruído do arranjo. Alguns resultados utilizando arranjos irregulares são apresentados e discutidos na Seção 3.6.

### 3.5.4 Função de Espalhamento Pontual

A resposta de um arranjo a uma onda monocromática emitida por uma fonte pontual é a sua Função de Espalhamento Pontual (FEP). Teoricamente, este resultado é o mesmo que a análise em uma banda estreita da radiação de uma fonte pontual radiando em banda larga. De qualquer forma, a FEP é uma função da frequência, sendo então normalmente necessário um conjunto delas em diferentes faixas de frequência para que seja possível analisar adequadamente a resposta de um arranjo.

Esta função contém informações sobre a sensibilidade direcional do arranjo e, por isso, pode ser também chamada de padrão de direcionalidade. Ela oferece um meio de avaliar a largura de feixe, os lóbulos laterais e as características do dobramento espacial de um arranjo. A FEP é provavelmente uma das melhores formas de analisar as características de um arranjo, sendo especialmente útil na comparação do desempenho entre arranjos. Alguns exemplos de FEP serão apresentados na próxima seção.

## 3.6 Resposta de diferentes tipos arranjos planos

Aqui serão apresentados alguns resultados de simulações realizadas com diferentes geometrias de arranjos planos. Será mostrada a FEP de cada arranjo, com o objetivo de apresentar de maneira compacta as diversas características de cada geometria. Foram usados 32 microfones em cada arranjo, com exceção do arranjo retangular que não poderia manter esse número por uma questão geométrica, sendo possível, neste último caso, usar no máximo 30 microfones. As simulações foram feitas com uma fonte pontual a 1,0m de distância do arranjo. São mostradas as FEPs em 3 kHz e em 7 kHz, permitindo identificar o padrão de resposta de cada arranjo em função da variação de frequência. A faixa dinâmica dos mapas foi mantida constante em 20 dB.

Na Figura 3.8 é apresentada a geometria utilizada para o arranjo retangular e os resultados em 3 kHz e 7 kHz. Pode-se notar a dominância do efeito de dobramento espacial na FEP. Os resultados indicam que o efeito se torna crítico a partir de uma frequência que se encontra entre 3 kHz e 7 kHz. Os arranjos regulares não são vantajosos para o uso no mapeamento de fontes sonoras, já que o nível máximo dos lóbulos laterais é drasticamente reduzido a zero a partir de uma frequência crítica, em que o efeito de dobramento espacial se torna presente dentro dos limites de contorno dos mapas.

Um arranjo em forma de cruz é apresentado na Figura 3.9 (a). Com essa configuração, o menor distanciamento entre os sensores aumenta significativamente a frequência onde o dobramento espacial surge. Na Figura 3.9 (c), o resultado apresentado em 7 kHz indica que um lóbulo espúrio deve existir em um intervalo de frequência um pouco superior à 7 kHz.

Uma geometria com quatro espirais logarítmicas é mostrada na Figura 3.10 (a). Com essa geometria é possível observar a existência de lóbulos laterais fortes mesmo em 3 kHz. Por outro lado, com esse padrão não é esperado que exista algum lóbulo espúrio que tenha nível próximo do lóbulo principal. A comparação das Figuras 3.10 (b) e 3.10 (c) indica um padrão da FEP, em que os resultados obtidos em 7 Hz apresentam, em escala mais compacta, os resultados em 3 kHz.

Por fim, na Figura 3.11 são mostrados os resultados de uma geometria de arranjo gerada aleatoriamente. De modo geral, é possível notar a semelhança no nível do lóbulo lateral quando comparado com o arranjo espiral. Assim como no caso do arranjo com geometria em espirais, é possível notar um padrão de comportamento da FEP similar em função do aumento da frequência. Entretanto, este exemplo é capaz de mostrar que em altas frequências a largura dos lóbulos laterais é menor que no caso da geometria com espirais. Isto ocorre devido ao menor grau de simetria da geometria do arranjo aleatório. Deve-se ressaltar que embora a geometria aleatória apresente, de maneira ideal, a melhor distribuição para evitar o efeito do dobramento espacial, os padrões geométricos podem se tornar difíceis de serem implementados na prática, exigindo, normalmente, uma grade de posicionamento dos microfones com um alto grau de discretização. Este fato torna as geometrias com múltiplas espirais muito mais adequadas.

De modo geral, os resultados apresentados ilustram que, para altas frequências, arranjos mais irregulares apresentam vantagens devido à ausência do efeito de dobramento espacial. Por outro lado, os arranjos com formas irregulares são conseqüentemente mais difíceis de implementar. Uma melhor discussão sobre a geometria do arranjo utilizado neste trabalho é apresentada na Seção 4.5.

### 3.7 Calibração do arranjo de microfones

Na prática, realizar o processamento de Beamforming focalizando um dado ponto no espaço envolve o cálculo do vetor de propagação entre este dado ponto e a localização de cada microfone. Para que isso ocorra com sucesso é preciso que exista compatibilidade entre o vetor de direção considerado e os dados adquiridos pelos microfones. Desta forma, diferenças

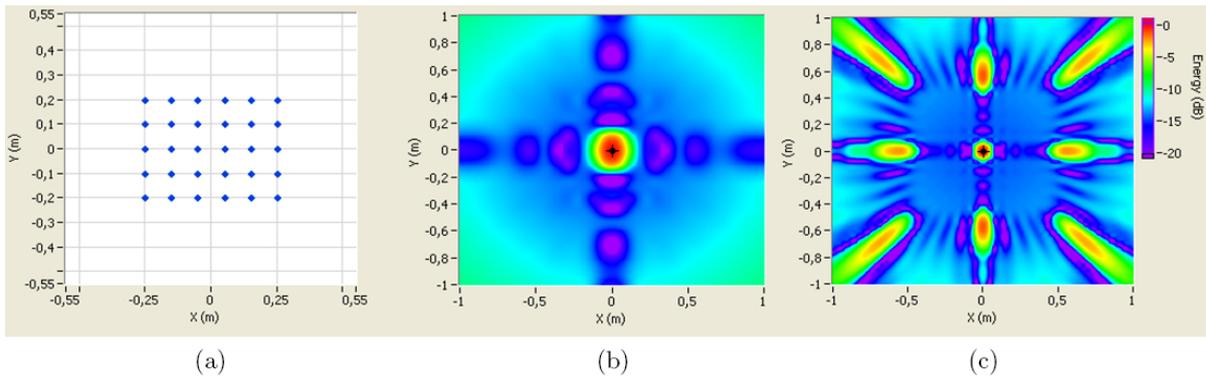


Figura 3.8: Arranjo retangular (a) e suas FEP em 3 kHz (b) e em 7 Hz (c).

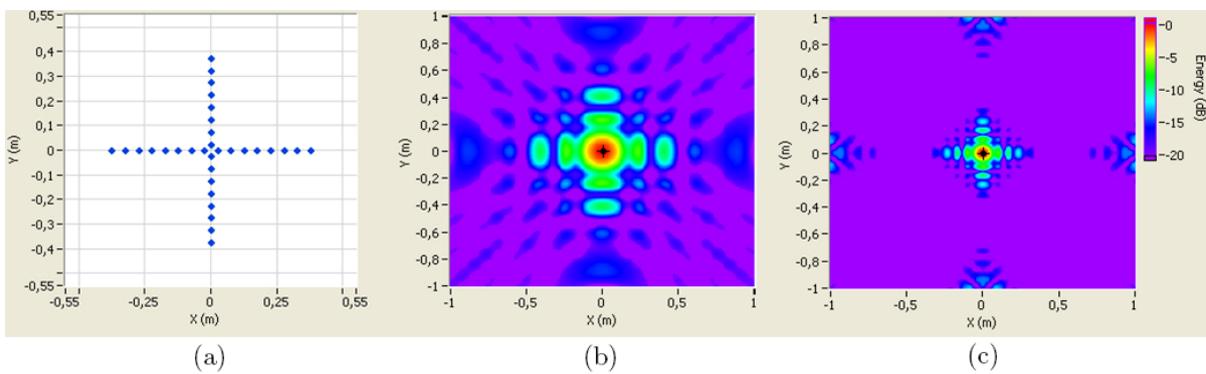


Figura 3.9: Arranjo em forma de cruz (a) e suas FEP em 3 kHz (b) e em 7 Hz (c).

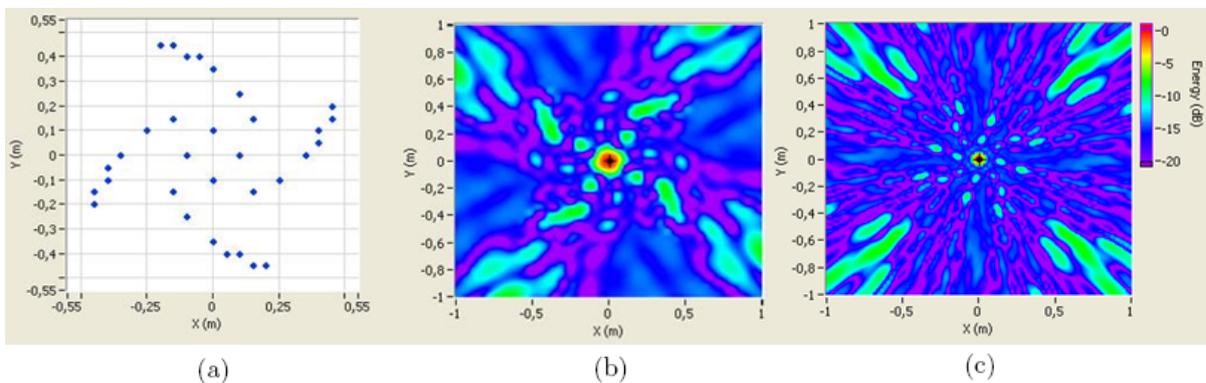


Figura 3.10: Arranjo com espirais múltiplas (a) e suas FEP em 3 kHz (b) e em 7 Hz (c).

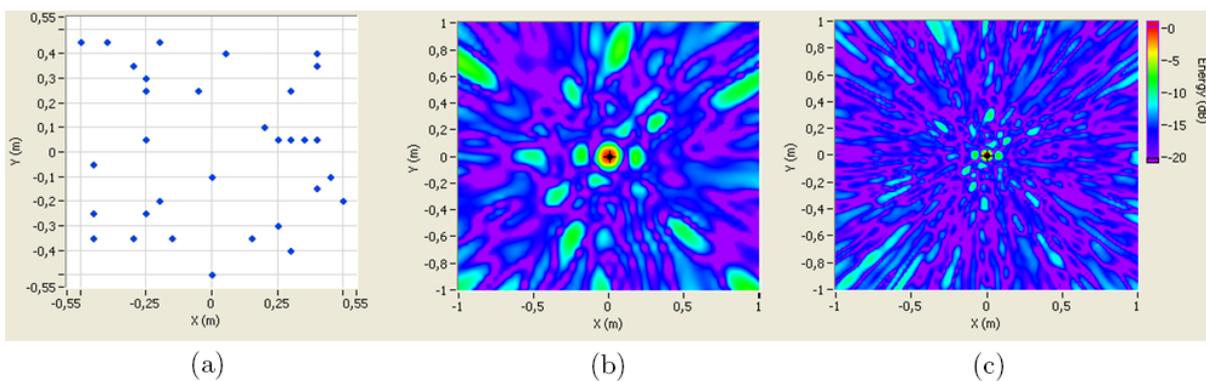


Figura 3.11: Arranjo aleatório (a) e suas FEP em 3 kHz (b) e em 7 Hz (c).

entre o modelo teórico e experimental podem introduzir desvios de fase inesperados. Um dos exemplos mais citados ocorre em altas frequências quando o microfone não se encontra exatamente na posição assumida. Como apresentado por Dougherty [34], neste caso o desvio de fase será o produto escalar entre o número de onda, na direção de propagação da onda, e a diferença entre a posição real e teórica do microfone. Em 15 kHz, por exemplo, o microfone precisa se mover apenas 6 mm para produzir um erro de fase de  $90^\circ$ . Se estas diferenças não forem levadas em consideração, o vetor de direção teórico não será compatível com os dados medidos e o nível das fontes reais será diminuído aproximando-se do nível dos lóbulos laterais.

Uma das formas de adaptar a resposta teórica do arranjo e considerar as diferenças é através da realização de uma calibração *in situ* utilizando uma fonte sonora conhecida. Com a devida cautela, um pequeno alto-falante pode ser usado como uma aproximação de uma fonte pontual. Este deve ser colocado na frente do arranjo, próximo ao objeto de análise. No caso de medições em túnel de vento que não apresentam terminação anecóica, deve-se construir uma cavidade anecóica em torno do arranjo e do alto-falante para eliminar reflexões das paredes e de outros objetos. Mais detalhes sobre as questões práticas da calibração em túnel de vento podem ser encontrados na literatura [24, 35, 54].

No experimento de calibração, a fonte sonora deve ser excitada em banda larga por um gerador de sinais e os dados medidos pelos microfones são coletados. Basicamente, o procedimento usa os sinais adquiridos de uma única fonte pontual e os compara com os valores teóricos de  $w_m$  e  $\Delta_m$  dados pelo vetor de direção  $\vec{g}_k$ . Um dos métodos encontrados na literatura [34] baseia-se no fato de que, em uma dada frequência, as linhas e colunas de  $C_k$  são respectivamente uma combinação linear de  $\vec{G}$  e  $\vec{G}^\dagger$ . Como apresentado no texto, é possível provar que na presença de uma única fonte,  $\vec{G}$  é um autovetor de  $C_k$  associado ao único autovalor não nulo  $\left\| \vec{G}(\vec{x}') \right\|^2$ , onde  $\vec{x}'$  é a posição do auto-falante. O autovetor normalizado,  $\vec{v}_{cal}$ , correspondente ao autovalor dominante na matriz de espectro cruzados, é então tomado como a expressão correta do vetor de propagação normalizado:

$$\vec{v}_{cal} = \frac{\vec{G}(\vec{x}')}{\left\| \vec{G}(\vec{x}') \right\|}. \quad (3.41)$$

O valor de cada componente do vetor de propagação teórico, baseado-se na Equação (3.18), é dado por:

$$(\vec{v}_{teórico})_m = \frac{\left(\vec{G}_{teórico}(\vec{x}')\right)_m}{\left\|\vec{G}_{teórico}(\vec{x}')\right\|} = \frac{\frac{e^{-jk|\vec{x}_m - \vec{x}'|}}{|\vec{x}_m - \vec{x}'|}}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \frac{1}{(\vec{x}_m - \vec{x}')^2}}} = \frac{e^{-jkr'_m}}{r'_m}. \quad (3.42)$$

Para estimar o fator de correção é calculada a razão entre os vetores de propagação teórica e experimental em cada microfone. A chamada matriz de calibração é, então, construída arranjando os fatores de calibração na diagonal de uma única matriz:

$$D_{cal} = \text{diag} \left( \frac{(\vec{v}_{cal})_1}{(\vec{v}_{teórico})_1}, \dots, \frac{(\vec{v}_{cal})_M}{(\vec{v}_{teórico})_M} \right). \quad (3.43)$$

Desta forma, para cada linha espectral a matriz de espectro cruzado calibrada é obtida através de:

$$C_{corr} = D_{cal}^\dagger C_k D_{cal}. \quad (3.44)$$

De maneira equivalente, a correção pode ser aplicada diretamente no vetor de direção teórico:

$$\vec{g}_{corr} = D_{cal} \vec{g}. \quad (3.45)$$

No mundo real, a matriz de espectro cruzado pode estar contaminada com o ruído de outras fontes ou com ruído no sinal dos microfones. Uma forma de analisar a qualidade dos dados de calibração é através da função de coerência entre os sinais de cada par de microfones [47]. Entretanto, uma prática muito comum é garantir que o autovalor dominante seja ao menos dez vezes maior que os outros autovalores. Caso isso não aconteça, é possível que a fonte não esteja suficientemente forte ou a faixa de frequência analisada seja muito grande para a configuração estabelecida entre fonte e arranjo.



## 4 Desenvolvimento do Sistema

Nas seguintes seções será discutido o projeto do sistema, considerando a análise, o desenvolvimento e a integração de seus elementos de hardware e de software.

### 4.1 Considerações iniciais

A principal proposta do desenvolvimento deste sistema, é a de seguir os passos para a popularização da técnica através do uso progressivo de elementos flexíveis e de baixo custo, tornando a técnica ainda mais adequada às aplicações de pequeno porte encontradas, por exemplo, na indústria automotiva. Este esforço teve início no começo desta década, quando os sistemas disponíveis [19, 36, 52, 55] eram considerados muito caros e não se mostravam suficientemente práticos para as aplicações buscadas pela maior parte da indústria. Com este propósito, diversos fatores e recursos foram limitados no projeto do sistema aqui apresentado.

O sistema proposto irá experimentar a restrição na qualidade e número de microfones e o uso de sistemas de aquisição portáteis com menor capacidade de processamento que os tradicionalmente utilizados nas aplicações aeronáuticas. Além disso, será usada uma plataforma de software mais flexível que as disponíveis nos atuais sistemas comerciais, permitindo, por exemplo, maior flexibilidade com relação à escolha de parâmetros no processamento do arranjo, mantendo, da melhor maneira possível, a interface amigável ao usuário. Todas estas escolhas baseiam-se na tendência de que os sistemas de aquisição se tornam cada vez mais acessíveis e a sua interface com software pode se tornar cada vez mais flexível, permitindo que o usuário final possa interferir cada vez mais no processamento dos sinais. Isto evita, desta forma, o uso de ferramentas que funcionam como uma “caixa-preta”. Além disso, a opção flexível na escolha da geometria do arranjo permite ao usuário definir a geometria mais adequada a cada condição de medição. Esse é o exercício esperado no desenvolvimento do sistema. Espera-se também que, a partir deste primeiro trabalho, seja possível iniciar uma série de investigações com o sistema já desenvolvido.

## 4.2 Sistema de aquisição de dados

A escolha do sistema de aquisição neste trabalho não foi delimitada apenas pelos requisitos técnicos da aplicação. Especial atenção foi direcionada para garantir a flexibilidade esperada na aquisição e análise dos sinais, para que futuros trabalhos possam ser realizados pelo grupo de pesquisa. Com estas idéias em mente, foi escolhida a plataforma de sistemas da National Instruments<sup>®</sup>. A empresa oferece um sistema de aquisição compacto com interface USB e um pacote pronto que integra a comunicação entre hardware e software. Nesta plataforma, o controle do sistema de aquisição e a análise dos sinais são realizados facilmente utilizando uma linguagem gráfica de programação bastante versátil conhecida como LabVIEW<sup>®</sup>.

Como visto no Capítulo 3, no processamento do algoritmo de Beamforming, a principal restrição ao sistema de aquisição diz respeito à sincronicidade entre os sinais analisados simultaneamente no arranjo de microfones, o que reflete diretamente na estimativa da diferença de fase entre os canais. Para o algoritmo no domínio do tempo, a taxa de amostragem deve ser superior à estabelecida pelo critério de Nyquist, já que a discretização do sinal no tempo está intimamente ligada a capacidade do arranjo em discretizar os feixes seletivos no espaço. Levando todos esses fatores em consideração, o sistema escolhido consiste de oito módulos de aquisição NI 9233, cada um com quatro canais, ligados à interface de comunicação de alta velocidade USB 2.0, através da unidade NI cDAQ-9172. Algumas das principais características do módulo de aquisição serão analisadas a seguir.

O sistema permite amostrar simultaneamente o sinal em cada canal de aquisição. O nível máximo do sinal de entrada deve ser de  $\pm 5$  V, sendo convertido digitalmente com resolução de 24 bits. O módulo de aquisição inclui uma referência de tempo interna, sendo também capaz de usar uma referência externa, se necessária. Usando a referência interna, é possível atingir uma taxa de amostragem de até 50 mil amostras por segundo, oferecendo incrementos no tempo na ordem de 20  $\mu$ s. Nesta taxa de aquisição, o sistema apresenta uma faixa dinâmica de 95 dB<sup>1</sup>. Na Figura 4.1 é apresentado o esquema elétrico de cada canal do módulo de aquisição.

No NI 9233 a referência do sinal pode ser aterrada na carcaça com uma resistência de 50  $\Omega$ . O acoplador de corrente alternada apresenta frequência de corte típica de 0,5 Hz, sendo usado para remover componentes de corrente contínua do sinal. O sinal analógico de entrada passa pelo amplificador e pré-filtros e em seguida é levado ao conversor A/D do tipo delta-sigma com 24 bits de resolução.

<sup>1</sup>O fabricante indica maiores valores para a faixa dinâmica quando a taxa de amostragem é inferior à vinte e cinco mil amostras por segundo [56].

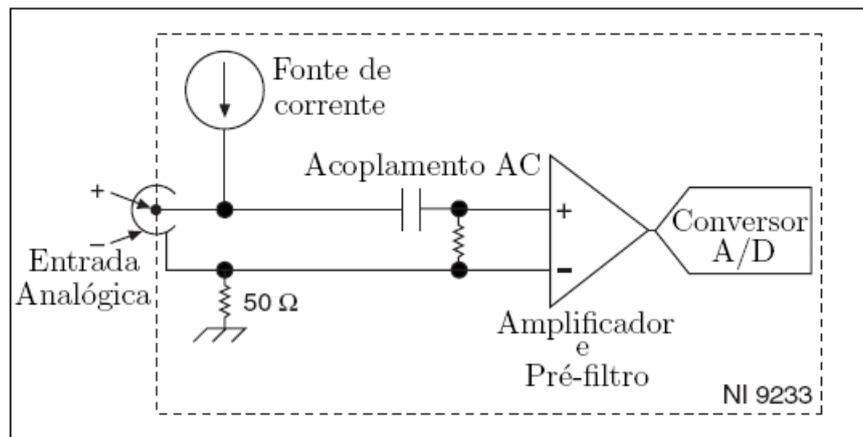


Figura 4.1: Esquema de cada canal de aquisição do módulo NI 9233 [56].

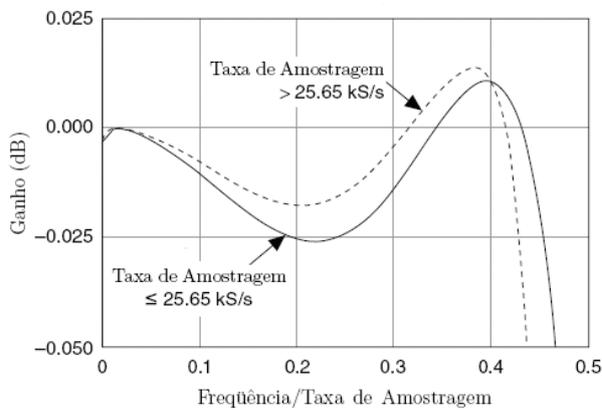


Figura 4.2: Desvios típicos no ganho do filtro passa-banda do NI 9233 [56].

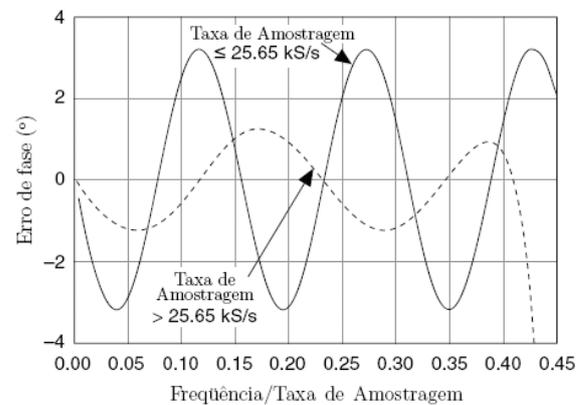


Figura 4.3: Erro de não-linearidade na estimativa de fase do NI 9233 [56].

O sistema conta com filtros analógicos e digitais para a seleção adequada do sinal, evitando o erro por dobramento espectral. O filtro passa-banda apresenta ganho dependente da frequência, demonstrando ondulações na faixa de frequência que deveria ser plana. Os filtros digitais do NI 9233 ajustam sua faixa de frequência em função da taxa de amostragem. Desta forma, o ganho em uma dada frequência, e conseqüentemente a faixa dinâmica, depende da taxa de amostragem escolhida. O desvio na magnitude indicado pelo fabricante é apresentado na Figura 4.2, onde a abscissa apresenta o valor da frequência normalizada em relação a taxa de amostragem. Pode-se notar que para a taxa de amostragem de 50 mil amostras por segundo o erro de magnitude é sempre inferior à 0,05 dB.

A fase relativa dos sinais no filtro passa-banda também apresenta um atraso dependente da frequência. A variação no atraso da fase em função da frequência é chamada pelo fabricante de não-linearidade na fase [56]. A Figura 4.3 mostra o erro em graus que depende

da taxa de amostragem. Para o caso da amostragem em 50 mil amostras por segundo, é esperado um desvio de  $\pm 1,3^\circ$ . O sistema também apresenta um filtro passa-baixa em 34 kHz, sendo usado com o objetivo principal de prevenir o efeito de dobramento espectral. Além disso, embora não seja apresentado de maneira explícita no manual do fabricante, o módulo deve apresentar algum estágio eletrônico compartilhado em pares de canais, já que ele afirma que a interferência entre os sinais em diferentes canais é de -100 dB para canais pareados (canais 0 e 1 ou 2 e 3) e -110 dB para canais não pareados. O nível dos sinais espúrios presentes na faixa dinâmica do sistema é de -60 dB em relação ao fundo de escala.

De maneira sintética, o fabricante considera a acurácia do sistema entre  $\pm 0,1$  dB e  $\pm 0,3$  dB quando o equipamento é adequadamente calibrado. A análise através dos dados oferecidos pelo fabricante indica que o módulo de aquisição escolhido apresenta ótimo desempenho para as aplicações de Beamforming até 15 kHz, garantindo os requisitos necessários para o processamento dos sinais.

O módulo oferece compatibilidade com os sensores com tecnologia IEPE<sup>2</sup>, oferecendo corrente de excitação típica de 2,2 mA, o que corresponde ao padrão para equipamentos portáteis. É importante ressaltar que em outros casos os sistemas fornecem uma corrente de excitação de 4 mA. Também deve ser lembrado que a característica de resposta de um microfone depende do nível de corrente de excitação utilizada. Deste modo, o microfone deve ser projetado para a condição de operação de 2,2 mA, sendo também capaz de operar nos sistemas com excitação de 4 mA.

A unidade NI cDAQ-9172 é responsável pelo gerenciamento da transferência de dados de cada módulo de aquisição para a interface USB, garantindo também a sincronização da aquisição dos dados entre os módulos. Nesta unidade a sincronização padrão é feita utilizando um sinal digital de uma fonte interna de 80 MHz. Deste modo, o fabricante afirma que uma boa sincronização no tempo pode levar a desvios inferiores à 6,2 ns [57]. O esquema da unidade de interfaceamento é apresentado na Figura 4.4.

A escolha do sistema de aquisição atende às expectativas técnicas da aplicação, sem comprometer o custo do sistema como um todo. Embora diversos fatores indiquem a adequação do sistema analisado, uma avaliação experimental foi feita para estabelecer limites reais de operação do sistema no que diz respeito à diferença na estimativa de magnitude e fase entre os diferentes canais. Os resultados desta análise serão apresentados na Seção 5.1.

---

<sup>2</sup>Sigla para “Integrated Electronics Piezo Electric”, referindo-se à tecnologia eletrônica que permite alimentar dispositivos sensores ativos através de uma corrente contínua inserida junto com a linha de entrada do canal de aquisição. Padrão também conhecido como ICP<sup>®</sup>.

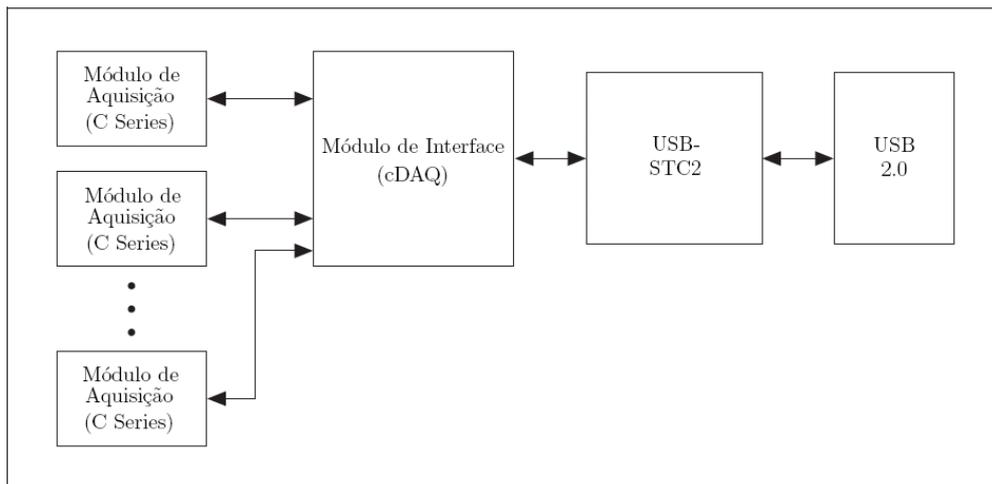


Figura 4.4: Esquema da unidade de interfaceamento NI cDAQ -9172 [57].

### 4.3 Construção dos microfones de baixo custo

Uma das partes mais críticas da instrumentação de um sistema de Beamforming para o mapeamento de fontes sonoras é justamente o transdutor. Tradicionalmente, a instrumentação desse tipo de sistema consiste na composição de microfone de medição capacitivo, um pré-amplificador e, em alguns casos, uma fonte de alimentação externa para cada canal de aquisição. Em aplicações que exigem a construção de arranjos de alta densidade utilizando centenas de sensores, como é o caso do mapeamento de grandes fontes aeroacústicas, o custo do microfone de medição tradicional é proibitivo. Mesmo em aplicações com sistemas de até 128 canais, o custo do sensor ainda é considerado um fator limitante. É, portanto, desejável o desenvolvimento de dispositivos e sistemas que apresentem o mesmo desempenho de medição que os atuais sistemas de arranjos de microfones, porém a um custo inferior.

Os microfones de eletreto industriais vêm se tornando cada vez mais acessíveis devido à crescente exigência de aplicações em dispositivos de comunicação e entretenimento. Isso contribuiu para que essa classe de sensor sofresse uma melhoria significativa na sua qualidade e se tornasse comercialmente mais atraente. No trabalho publicado em 2003 por Humphreys *et al.* [3], que apresenta a investigação sistemática dessa classe econômica de dispositivo sensor, uma série de microfones foi fabricada utilizando as cápsulas de eletreto WM-60A da Panasonic<sup>©</sup>. Os microfones construídos foram caracterizados e utilizados em experimentos com o sistema LADA<sup>3</sup>. Os autores utilizaram um circuito passivo para condicionar o sinal das cápsulas de eletreto e estender a sua faixa de resposta em frequência. Para

<sup>3</sup>Sigla para *Large Aperture Directional Array*, o sistema utilizado no Centro de Pesquisa Langley da Agência Aeroespacial Norte Americana.



Figura 4.5: Cápsulas comerciais da Panasonic<sup>©</sup> utilizadas no sistema desenvolvido.

isso, foi proposto um circuito amplificador para compensar o *roll-off*<sup>4</sup> de -6 dB por oitava para frequências acima de 20 kHz. Os experimentos mostraram que os microfones construídos apresentaram uma resposta em frequência adequada de 250 Hz até 40 kHz. Um circuito ainda mais simples foi proposto no presente trabalho, permitindo diminuir o seu custo, limitando a sua faixa de frequência até 15 kHz, ou seja, sem o uso do estágio de amplificação para compensar o *roll-off*.

O princípio de transdução desse tipo de microfone é o mesmo que de um microfone de medição capacitivo tradicional, só que o microfone de eletreto comercial é um microfone capacitivo pré-polarizado<sup>5</sup>. Basicamente, o seu elemento sensível é um dispositivo capacitivo onde um diafragma sensível à pressão sonora funciona como uma das placas de um capacitor. Na outra placa, normalmente mais rígida, é depositado o chamado eletreto. O eletreto é um material dielétrico cristalino com polarização elétrica permanente, ou seja, um material que apresenta cargas elétricas fixas. Assim, a carga permanente em um dos lados da placa mantém a polarização do capacitor que será, desta forma, utilizado como transdutor eletroacústico [58].

No presente trabalho, foi possível utilizar uma geração sucessora das cápsulas utilizadas por Humphreys *et al.* [3], os microfones de eletreto WM-61A do mesmo fabricante, mostrados na Figura 4.5. Além de apresentarem baixo custo, os microfones são, geralmente, de fácil alimentação, robustos, pequenos e apresentam resposta suficientemente plana. Em 2006, Tuss [59] publica os estudos preliminares de um arranjo utilizando exatamente este mesmo microfone, enfatizando o potencial para aplicações em Holografia Acústica. Oerlemans [21] também utilizou o mesmo microfone para o mapeamento de turbinas eólicas.

<sup>4</sup>Termo usado para descrever a atenuação na magnitude da resposta em altas frequências.

<sup>5</sup>Atualmente, muitos microfones de medição já são fabricados com uma tecnologia semelhante. Entretanto, a exigência metrológica nesses microfones ainda os tornam muito mais caros que os microfones de eletreto comerciais.

O sensor escolhido foi projetado para apresentar magnitude de resposta plana ao longo de toda a faixa de frequência de áudio de 20 Hz à 20 kHz. O dispositivo comercial incorpora um transistor de efeito de campo (FET) em sua saída e opera com uma tensão máxima de alimentação de 10 V, com um consumo de corrente de 0,5 mA. A sensibilidade acústica nominal da cápsula é de aproximadamente 17,7 mV/Pa quando alimentada por uma tensão constante de 2 V. Estes e outros detalhes fornecidos pelo fabricante são apresentados na Figura AA.1 do Anexo A.

A sensibilidade nominal do dispositivo não é adequada para o sistema de aquisição que opera a faixa dinâmica de  $\pm 5$  V, pois a sensibilidade acústica do microfone não permite utilizar toda a faixa de quantização dos conversores A/D, perdendo resolução na amplitude do sinal. Se o dispositivo fosse usado diretamente no sistema de aquisição, seria necessária uma excitação de um tom puro a um nível de pressão sonora maior que 130 dB (ref.  $20 \cdot 10^{-6}$  Pa) para gerar uma saída de pico de  $\pm 5$  V. Lembrando que 130 dB é uma condição completamente irreal de operação do sistema, sendo este o limite da dor para a percepção humana. É mais adequado esperar uma condição limite menor que 110 dB de nível de pressão sonora nos microfones do arranjo. Este fato mostra a necessidade de uma interface adequada para o condicionamento do sinal que mantenha a melhor qualidade do sinal depois do estágio de conversão analógico-digital ao longo de toda faixa dinâmica de operação do sistema.

Um circuito ativo simples foi previamente projetado por Zmijevski [60] para amplificar o sinal e, ao mesmo tempo, garantir a tensão operacional de alimentação da cápsula de eletreto. Para aumentar o valor da sensibilidade do conjunto foi introduzida uma etapa com ganho de cerca de 20 dB utilizando um transistor do tipo NPN da Farchild<sup>®</sup>, modelo BC549. Isto tornou mais adequada a faixa dinâmica do sinal de saída do conjunto do microfone, permitindo uma melhor conversão analógico-digital do sinal e garantindo a alimentação adequada ao dispositivo. Dessa forma, o circuito completo utilizado para o condicionamento e amplificação do sinal é apresentado em azul na Figura 4.6, onde o transistor é indicado por Q2. Em vermelho, é apresentado um modelo eletrônico disponível utilizado para simular o comportamento da cápsula de eletreto.

Os componentes eletrônicos foram montados de maneira compacta permitindo a sua integração em um conjunto único. Para isso, foi fabricada uma peça de alumínio com 1/2" de diâmetro que permite integrar o circuito de condicionamento e pré-amplificação, a cápsula de eletreto e o conector BNC. A Figura 4.7 mostra os componentes durante a montagem. Depois de montados, os microfones foram submetidos a alguns testes com sinais acústicos de referência para uma simples verificação de sua resposta eletroacústica.

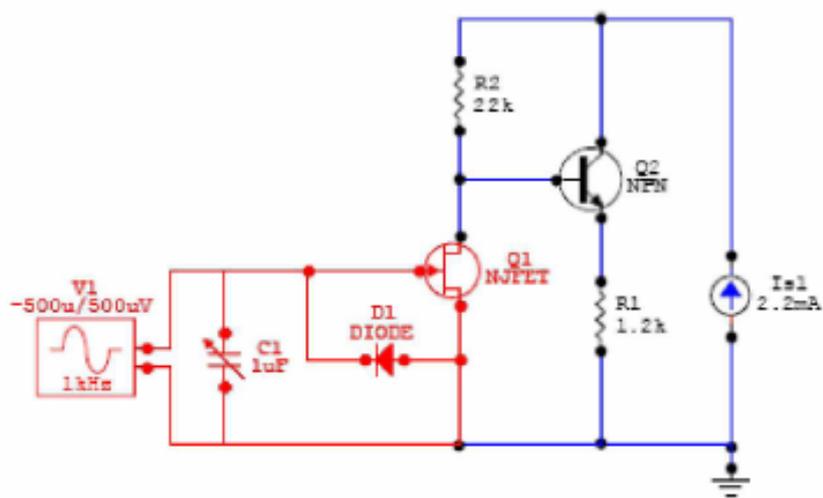


Figura 4.6: Diagrama elétrico do circuito de condicionamento do sinal a ser integrado a cápsula de eletreto [60].

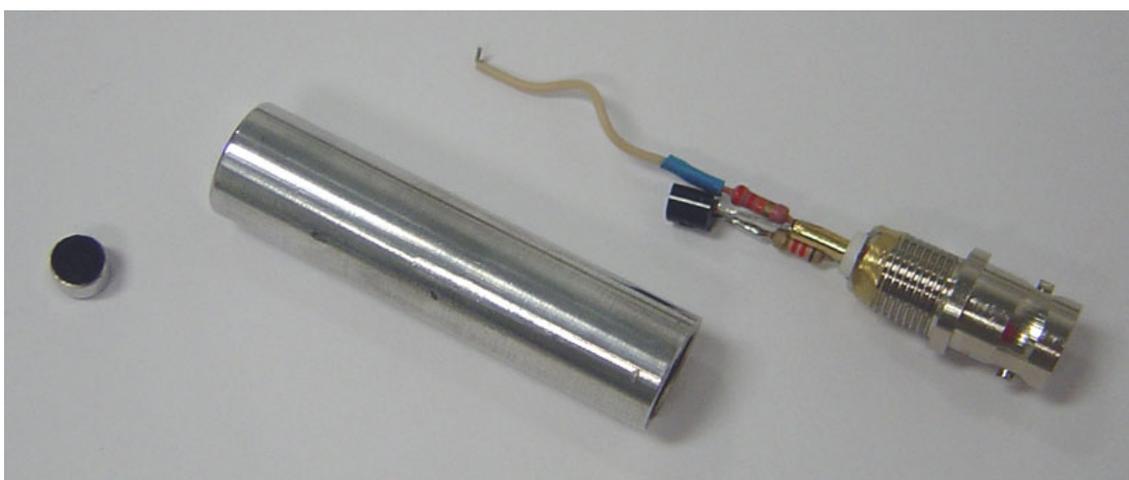


Figura 4.7: Componentes do microfone em seu último estágio de montagem.

Por fim, o resultado foi a construção de um microfone compatível com a tecnologia IEPE e com dimensões ainda menores que um microfone de medição tradicional de 1/2". Desta forma, foram fabricados no laboratório um total de 45 microfones. O custo em materiais não ultrapassou 15 dólares por unidade construída, apresentando assim um valor menor do que os 40 dólares relatado por Humphreys *et al.* [3]. No Capítulo 5, será apresentada a avaliação das características e diferenças encontradas entre os microfones construídos.

## 4.4 Software de análise e processamento dos sinais

O controle do sistema de aquisição e a análise dos sinais digitais são feitos usando a plataforma LabVIEW<sup>®</sup>. Utilizando pacotes prontos, esta plataforma permite controlar as condições de operação do sistema de aquisição e o acesso aos sinais através da interface USB do computador. O software usado para o processamento de Beamforming é baseado em um programa-modelo oferecido gratuitamente pelo fabricante para desenvolvedores. O programa-modelo, chamado *NI Microphone Array Startup* (NI MAS), é um software não-comercial de caráter experimental. Seu código é aberto, permitindo a personalização da interface e do algoritmo de processamento dos sinais.

O NI MAS oferece um gerenciador de projetos que organiza informações da geometria do arranjo, configurações do sistema de aquisição, arquivos de medições, dados de calibração e fotografias. Os dados brutos das medições podem ser armazenados em disco rígido no computador, permitindo que a análise e a construção dos mapas sejam feitas em forma de pós-processamento dos dados. A Figura 4.8 mostra o painel frontal onde os dados são organizados e gerenciados.

Cada módulo do software emprega um estrutura do tipo **produtor-consumidor**. A Figura 4.9 mostra o diagrama blocos em LabVIEW<sup>®</sup> utilizado para gerenciar as operações no NI MAS. No diagrama, é possível ver que a estrutura básica consiste de dois *loops*. O primeiro é o **loop produtor** e o segundo é o **loop consumidor**. Em poucas palavras, o **loop produtor** determina quando o usuário faz uma modificação na interface, enquanto o **loop consumidor** contém os códigos para cada operação solicitada. Desta forma, cada código em cada estrutura do **loop consumidor** funciona de maneira independente, permitindo a personalização de cada operação do software.

Felizmente, o NI MAS disponibiliza algoritmos clássicos de Beamforming implementados em LabVIEW. Uma análise do código disponível foi feita com o objetivo de compreender detalhes da manipulação dos dados. Informações do código são encontradas no Apêndice A,

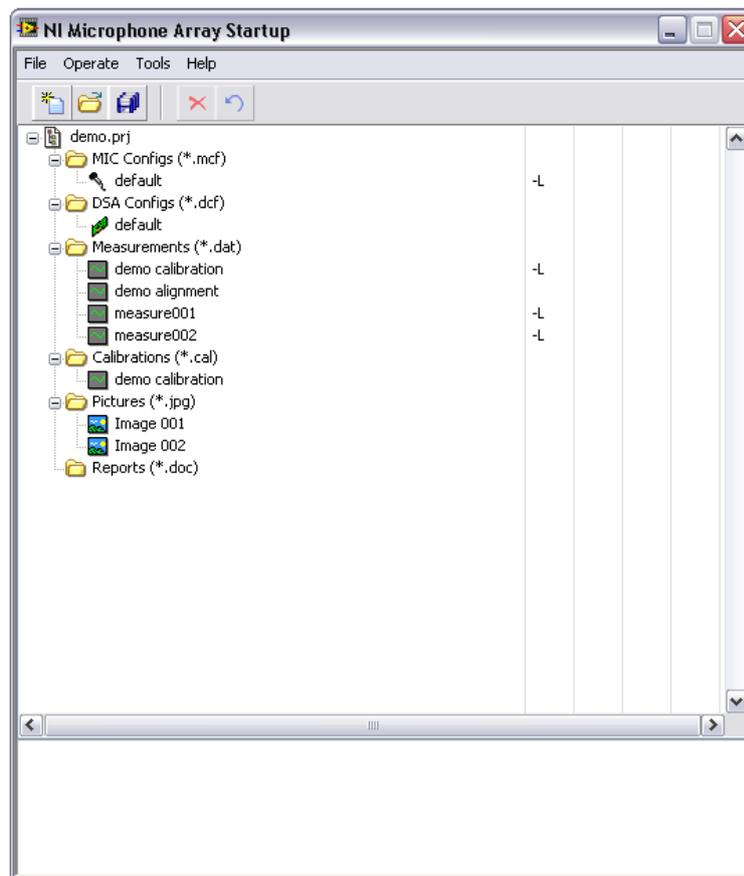


Figura 4.8: Painel frontal utilizado para gerenciar os arquivos no NI MAS.

onde o diagrama de blocos em LabVIEW que mostra o contexto do algoritmo de processamento de Beamforming no domínio da frequência é apresentado na Figura A.2. Neste diagrama é possível ver o fluxo de dados com alguns dos parâmetros de controle do programa, ressaltando especificamente a etapa de correção dos sinais dos microfones utilizando os coeficientes obtidos em calibração. Uma descrição do algoritmo implementado para obter o mapa de Beamforming é apresentada em forma de fluxograma na Figura A.1. Detalhes do código utilizado para implementar este algoritmo é mostrado no diagrama de blocos da Figura A.3.

O algoritmo de processamento do NI MAS calcula a resposta de Beamforming para cada ponto da região de análise. A região de análise, determinada pelo usuário, é discretizada em uma grade retangular de pontos. O programa define o espaçamento dos pontos da grade de análise em função de uma relação que é proporcional a razão entre a distância da região de análise e a largura do arranjo e ao mesmo tempo, proporcional a  $\lambda/2$ . Entretanto, o número mínimo de pontos na grade de análise em cada direção é sempre vinte, estabelecendo o maior espaçamento dos pontos na grade para limite em que o comprimento de onda for muito grande ou quando o plano de análise estiver muito longe do arranjo.

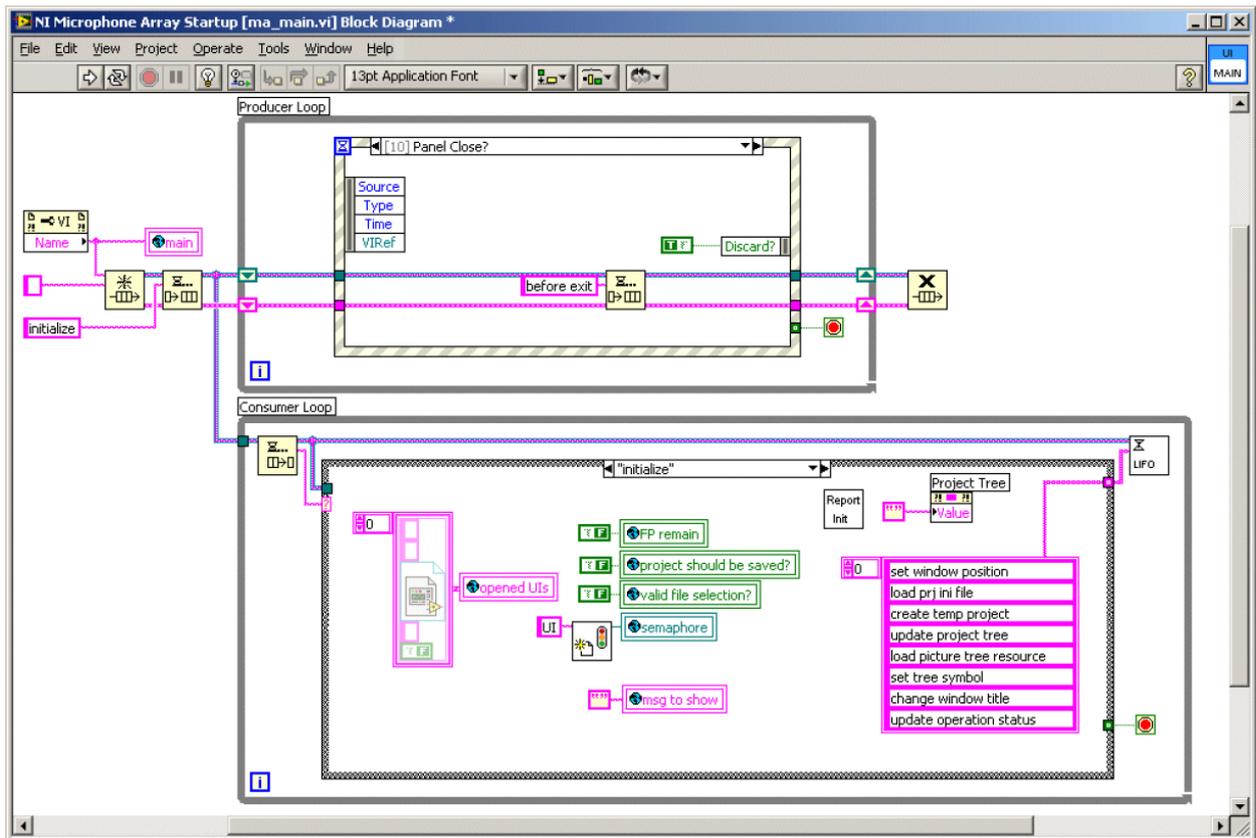


Figura 4.9: Diagrama de blocos que descreve o gerenciador no NI MAS.

Depois de obtida a matriz das respostas de Beamforming em cada ponto da grade de análise, o NI MAS realiza um processo de interpolação dos resultados para suavizar o mapa de Beamforming resultante. Esse resultado interpolado é sobreposto a imagem fotográfica da região de análise, facilitando, assim, o processo de identificação das fontes. Esse resultado é mostrado no painel frontal do programa onde o resultado pode ser exportado em formato de imagem.

O algoritmo implementado em LabVIEW que foi utilizado neste trabalho é equivalente ao algoritmo convencional no domínio da frequência apresentado na Seção 3.3.2. O código também permite usar também a técnica de remoção da diagonal dos espectros cruzados, conforme apresentada na Seção 3.3.3. Por fim, é importante ressaltar que não foram realizadas modificações no algoritmo disponível no NI MAS. As únicas modificações realizadas no programa foram feitas para facilitar a interface com o usuário e a manipulação dos dados e das imagens geradas.

## 4.5 Projeto da geometria do arranjo

O desempenho do mapeamento de um arranjo de microfones está intimamente ligado a sua geometria, já que esta define a FEP através do vetor de direção. Como se sabe, a FEP nos permite investigar as propriedades de uma dada geometria do arranjo. Entretanto, como será discutido a seguir, o problema reverso, desenhar um arranjo com largura de feixe e nível máximo de lóbulo lateral desejáveis, é muito mais complicado.

Em processamento digital de sinais, é comum encontrar o comprometimento de um parâmetro em função da escolha de outro. Como apresentado por Underbrink [23], em processamento de sinais de arranjos, as principais relações de comprometimento estão entre frequência, largura de feixe, nível de lóbulo lateral e número de sensores. Para expandir a faixa de frequência útil de um arranjo em faixas mais altas de frequência, é preciso reduzir o espaçamento entre os sensores para evitar o dobramento espacial. Por outro lado, para expandir em faixas de frequência mais baixas, é preciso aumentar o tamanho do arranjo para manter a mesma largura de feixe. Diminuir o espaçamento aumentando ao mesmo tempo o tamanho do arranjo exige o aumento do número de sensores. Além disso, como já discutido anteriormente, o aumento do número de sensores reduz o nível do lóbulo lateral.

Diminuir a largura de feixe de um arranjo exige, de alguma forma, aumentar o tamanho do arranjo. A primeira maneira de se conseguir isso é mover o arranjo mais próximo da fonte de tal forma que o arranjo aumente o seu “tamanho aparente”. A segunda é simplesmente aumentar o seu tamanho físico. Isso irá, novamente, exigir um maior número de sensores para manter o espaçamento entre sensores, mas irá, também, resultar na melhora da faixa dinâmica do arranjo.

Dadas algumas restrições de parâmetros, como o número de microfones e as dimensões do arranjo, ainda é possível, teoricamente, atingir qualquer exigência de projeto de um arranjo. No mundo real, tempo, custo, restrições quanto às dimensões físicas e tecnologia representam fatores ainda mais restritivos. O desafio principal é tentar fugir ao máximo da restrição do número de sensores. Entretanto, o sistema de aquisição estabeleceu a maior restrição, o número máximo de 32 microfones no arranjo.

Uma alternativa é seguir com uma estrutura de arranjo que apresente de maneira integrada dois arranjos diferentes com duas diferentes geometrias. Assim, dois arranjos são acessíveis ao sistema de aquisição, no qual um apresenta melhores características para baixas frequências e o outro com melhores características em altas frequências [10]. A restrição quanto à construção do arranjo e a exigência de um maior número de sensores não permitiu que esta solução fosse implementada.

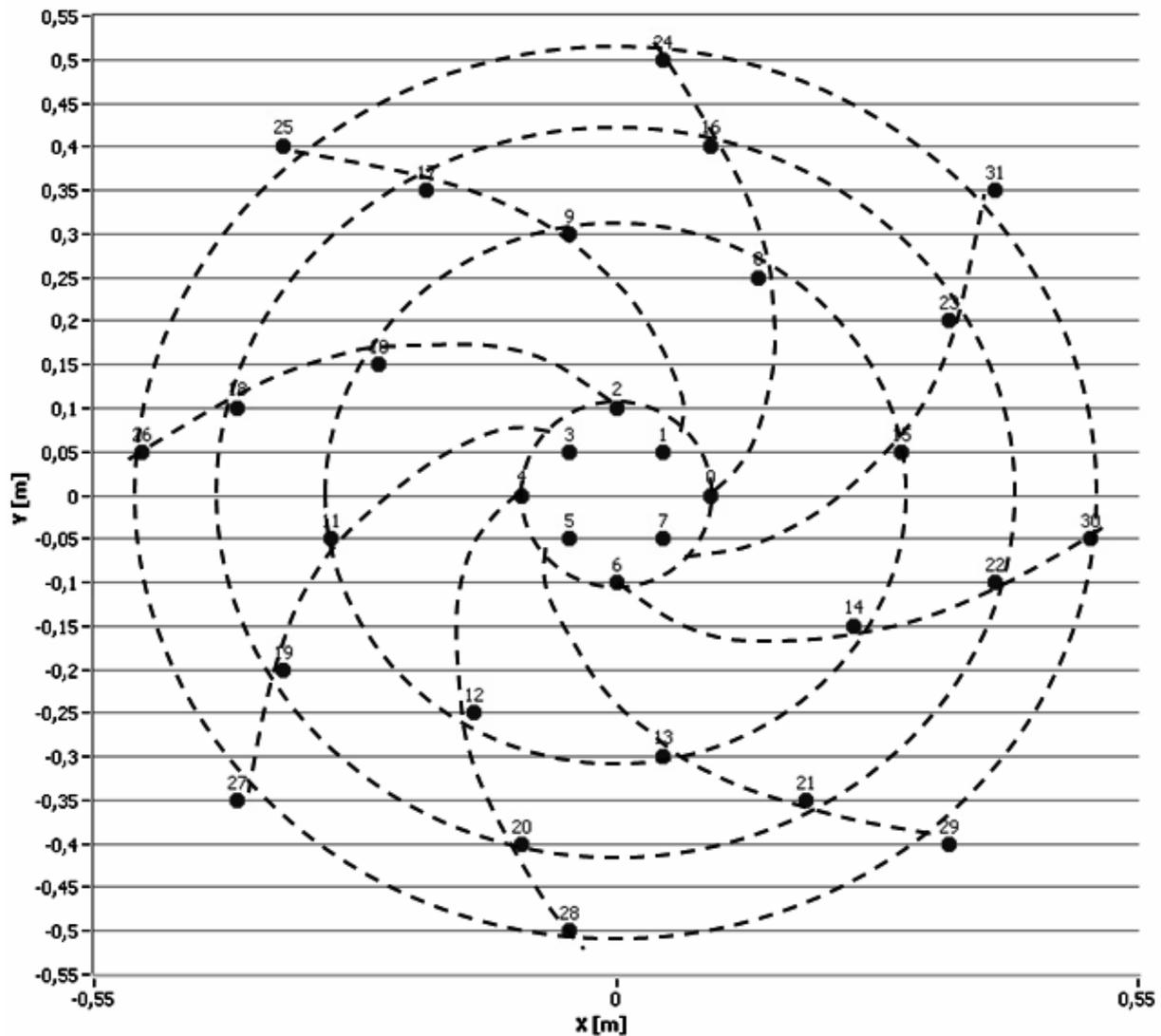


Figura 4.10: Visualização do conceito da geometria do arranjo a partir da intersecção das 8 espirais com 4 círculos concêntricos que dividem seções de mesma área.

A busca por diferentes geometrias na literatura [20, 61] aponta como mais adequada a solução de Underbrink [23], que apresentou pela primeira vez o uso de geometrias com espirais múltiplas. Um estudo baseado na simulação numérica de parâmetros, como tamanho do arranjo e espaçamento da grade do arranjo, apontou para um grupo de possíveis geometrias. A geometria implementada é apresentada na Figura 4.10, onde é colocada de maneira explícita a espiral baseada nos parâmetros de Underbrink. A geometria é definida pelos pontos de intersecção de 8 espirais logarítmicas reversas com coeficiente de 1,5 rad e 4 círculos concêntricos que dividem seções de mesma área.

A geometria de múltiplas espirais escolhida apresenta as posições dos microfones definidas pela intersecção das espirais logarítmicas reversas com círculos concêntricos que dividem seções de mesma área. Esse tipo de geometria provou ser capaz de minimizar a redundância de espaçamento entre microfones [23]. Os valores das coordenadas exatas utilizadas no arranjo são apresentadas no Apêndice B. Embora o uso de um número ímpar de espirais tenha sido recomendado por Underbrink, este fato limitaria o arranjo ao máximo de 30 canais, o que não se mostrou vantajoso em termos de construção física do arranjo, já que seria necessária uma maior discretização da grade de posicionamento dos microfones. Além disso, a diferença de desempenho do arranjo não se mostrou significativamente atraente em função da redução de dois microfones no arranjo.

A análise teórica da largura de feixe e da rejeição do lóbulo lateral, através da simulação numérica da resposta do arranjo, aponta para o resultado compatível com o reportado por Underbrink. Algumas das FEP teóricas são apresentadas na Figura 4.11. No Capítulo 5 serão apresentados os resultados experimentais.

Por fim, pode-se considerar que o método para determinar a geometria de um arranjo para este tipo de aplicação ainda exige, de certa forma, uma etapa de experimentações. Isso exige uma etapa de tentativa e erro para achar a melhor combinação dos parâmetros. Alguns algoritmos foram criados para estabelecer a busca por uma geometria ótima [62]. Entretanto, na essência, eles funcionam como um processo de seleção entre uma população de arranjos gerados através de algumas restrições sobre as dimensões e a discretização do arranjo.

## 4.6 Aspectos construtivos do arranjo

O arranjo de microfones precisa ser sustentado por uma estrutura que não permita movimento aos microfones. Para isso, é normalmente utilizada uma estrutura rígida. Existem basicamente dois tipos de estruturas utilizadas em arranjos de microfones. Uma delas seria usar uma superfície rígida onde os microfones passam por furos para se acomodarem no mesmo plano da superfície da estrutura. Desta forma, o arranjo funciona com uma parede rígida, onde a pressão sonora em cada microfone sofre com o efeito da condição de contorno, amplificando o nível de pressão sonora, quando comparado com a condição de campo livre. Uma vantagem desse tipo de estrutura é o fato de considerar ondas incidentes apenas em um dos lados do arranjo, já que ondas que incidem atrás dos microfones devem ser suficientemente atenuadas pela estrutura. Esse tipo de abordagem é particularmente muito útil em aplicações em túneis de vento que não tenham terminações anecóicas. Neste caso, o arranjo não precisa interferir no fluxo de ar, podendo ser instalado nas paredes do túnel.

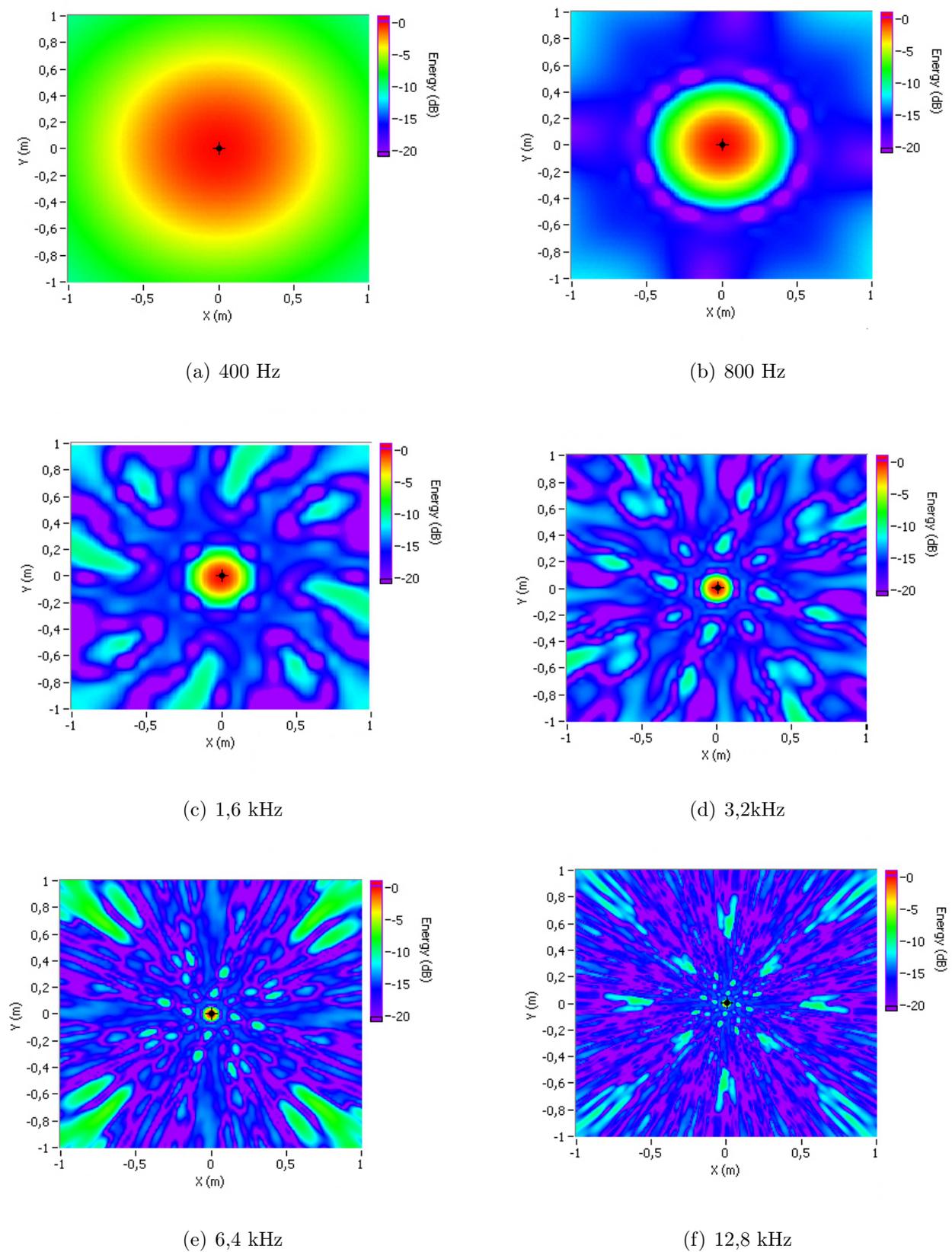


Figura 4.11: FEP em diferentes frequências em bandas de 1/3 de oitava.

O outro tipo de estrutura para os arranjos não utiliza a superfície rígida, o que garante a condição de campo livre. Normalmente elas se constituem de grades, círculos ou arcos, dependendo da geometria do arranjo. Em qualquer um dos casos a estrutura pode ser construída com partes modulares, o que oferece muito mais mobilidade e flexibilidade ao sistema. Uma desvantagem é a “transparência acústica” da estrutura, o que não permite diferenciar ondas sonoras que incidem por trás ou pela frente do arranjo, o que exige que, na prática, as ondas que incidem por trás do arranjo sejam de alguma forma controladas ou suprimidas.

A escolha por um suporte modular oferece, pelo menos, duas vantagens. A primeira é a possibilidade de se utilizar diferentes geometrias utilizando a mesma estrutura. A segunda é a facilidade no transporte, já que é esperado que uma estrutura modular possa ser desmontável. Esses dois fatores são muito importantes para garantir a flexibilidade da aplicação do sistema. Estruturas como o LADA [52] mostram-se extremamente inadequadas para esta aplicação.

Diversos fatores devem ser considerados durante o projeto: tamanho e número de cabos, conexão para alimentação do sistema, montagem do sistema de aquisição de dados, etc. Deve-se lembrar que a montagem do sistema proposto deve cumprir principalmente com critérios de flexibilidade e portabilidade. Além disso, a escolha de um sistema de aquisição portátil, como apresentado na Seção 4.2, torna mais adequado o projeto de uma estrutura modular para a estrutura do arranjo.

O arranjo construído utiliza basicamente uma série de tubos de alumínio posicionados na horizontal e suportados por dois tubos maiores, na direção vertical, que podem ser apoiados no chão através de dois tripés, conforme indicado na Figura 4.12. Nos tubos horizontais são instalados os suportes para cada microfone. O suporte fabricado escolhido foi de nylon, para garantir o isolamento elétrico da carcaça dos microfones e facilitar o processo de montagem e desmontagem do conjunto. Na Figura 4.13 é possível ver em mais detalhes o suporte de cada microfones.

Com a tecnologia IEPE sendo utilizada no sistema de aquisição, não são esperados problemas devido ao comprimento dos cabos. Entretanto, foram utilizados os cabos coaxiais RG-174, que são cabos blindados e com capacitância de 101 pF/m, oferecendo baixo nível de ruído elétrico. O fabricante indica início de perdas por atenuação apenas em 1 MHz, chegando, neste caso, a uma redução de 6,2 dB/m. Foram montados 32 cabos de sete metros de comprimento com conectores do tipo BNC. A identificação individual de cada cabo mostrou-se extremamente útil na rotina de uso do sistema. De modo geral, os cabos utilizados superam em todos os critérios os requisistos para a aplicação.

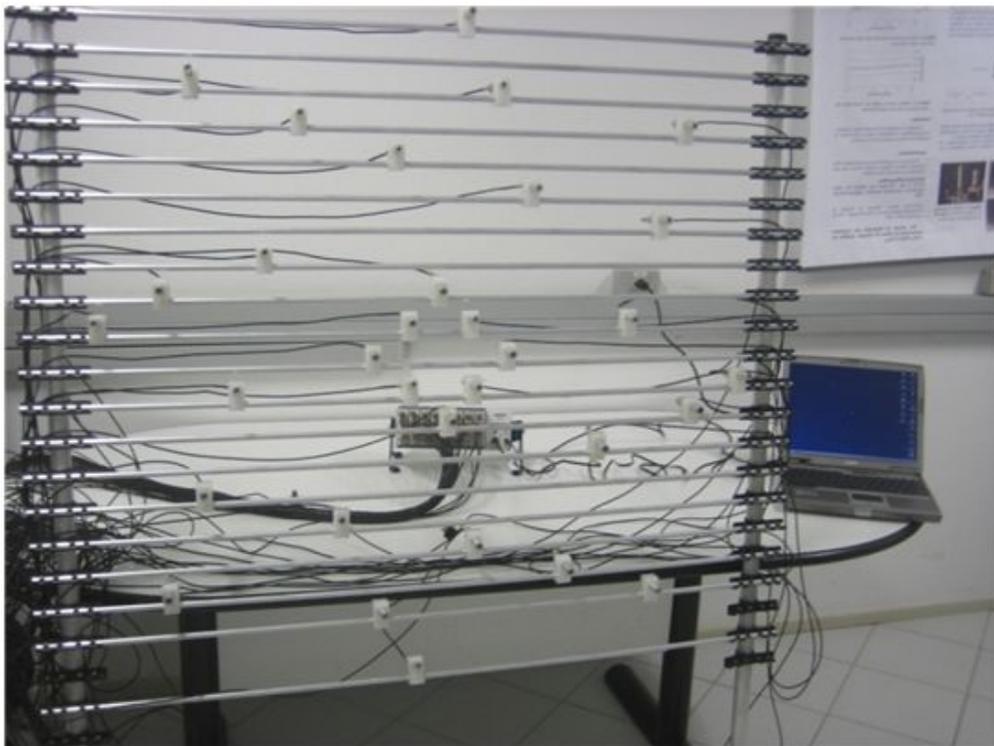


Figura 4.12: Visão geral do sistema construído.



Figura 4.13: Detalhes do suporte dos microfones montados nos tubos de alumínio.

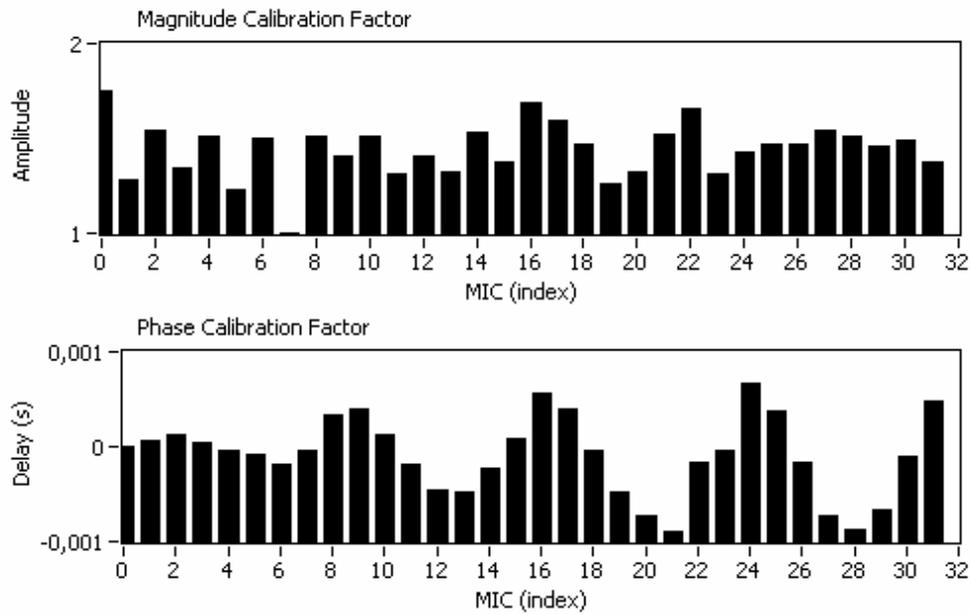


Figura 4.14: Exemplo de fatores de correção de magnitude e fase utilizados na calibração do arranjo na banda de 4 kHz.

## 4.7 Calibração e alinhamento da resposta do arranjo

Como visto na Seção 3.7, um procedimento de calibração pode ser usado para determinar fatores de correção da resposta de um arranjo. Neste ponto será apresentada de maneira sucinta a descrição do conceito de calibração aqui utilizado, já que uma análise detalhada excede os objetivos deste trabalho.

O NI MAS oferece um algoritmo que usa o mesmo princípio descrito na Seção 3.7, utilizando a estimativa do autovalor associado ao autovetor dominante na matriz de espectro cruzado. O algoritmo extrai fatores de correção de magnitude e fase separadamente em cada microfone para cada banda de frequência, definidas tipicamente entre 1 kHz e 4,5 kHz. Um exemplo do resultado é mostrado na Figura 4.14, onde é possível observar que o microfone 7 é escolhido como sinal de referência. Deste modo, apenas o microfone número 7 precisa ter sua resposta conhecida. Na prática, em um arranjo de 32 microfones, é possível obter a sensibilidade acústica de cada um dos microfones individualmente utilizando o método tradicional com um pistonfone, reduzindo assim os erros em função do desvio de magnitude.

Como mostrado no diagrama da Figura A.2 no Apêndice A, o fator de correção é aplicado diretamente no sinal de cada microfone antes de iniciar-se o processamento de Beamforming. Diferentemente do procedimento proposto por Mosher *et. al.*, o sistema não utiliza nenhum tipo de correção em função da direcionalidade do arranjo.

Além da calibração da resposta do arranjo, para a construção adequada da imagem é necessário o alinhamento de uma imagem da fonte com os mapas de Beamforming. Este procedimento consiste em obter, por exemplo, uma fotografia do objeto analisado para que seja sobreposta aos mapas de Beamforming. A sobreposição é feita utilizando-se a resposta de duas fontes conhecidas posicionadas em coordenadas igualmente conhecidas no plano de análise. As fontes utilizadas são normalmente auto-falantes excitados em banda larga e em intervalos de tempos distintos. Desta forma, obtendo-se a resposta e conhecendo-se a fonte excitada em cada um destes intervalos é possível fixar dois pontos de referência entre a imagem fotográfica e o mapa de Beamforming. O algoritmo determina a direção de cada uma das fontes através da estimativa do autovetor dominante em cada um dos intervalos de tempo, sendo que, desta forma, se utiliza um conceito similar a estimativa do fator de calibração, só que desta vez o parâmetro de interesse é a direção da fonte, que está diretamente associado ao autovetor dominante e não seu ao autovalor.



# 5 Caracterização Experimental do Sistema

Neste capítulo, a validação do sistema é realizada através de investigações experimentais. Os primeiros experimentos foram feitos nas instalações do Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC e os ensaios com a fonte sonora de referência foram realizados dentro da Câmara Anecóica do Laboratório de Ruídos e Vibrações da General Motors do Brasil.

## 5.1 Análise da cadeia de instrumentação

Para obter bons resultados de medição com arranjos de microfones utilizando o processamento de Beamforming é necessário garantir precisão na medição da fase do sinal acústico que chega em cada microfone do arranjo [24]. Isto implica em garantir precisão ao longo de toda a cadeia de instrumentação, dos transdutores, do circuito eletrônico de condicionamento do sinal e do sistema digital de aquisição de dados. Erros de fase podem surgir da imprecisão na localização dos microfones, diferença de fase entre as respostas dos circuitos eletrônicos, diferença de fase entre as respostas de cada microfone e até mesmo desvios de fase causados pela instalação dos microfones no arranjo. Nesta seção serão avaliadas características de resposta dos microfones em conjunto com os circuitos eletrônicos, desconsiderando, por enquanto, os efeitos do posicionamento e instalação dos microfones no arranjo.

### 5.1.1 Teste do sistema de aquisição

Embora o sistema de aquisição tenha sido escolhido para esta aplicação da melhor maneira possível (ver Seção 4.2), uma breve avaliação experimental foi feita, já que o fator mais crítico no processo de obtenção dos mapas de Beamforming é justamente a estimativa da magnitude e fase entre os canais. Os experimentos para medir os desvios de magnitude e fase encontrados no sistema foram realizados analisando-se a resposta de cada canal a uma mesma excitação aleatória. Para isso, a saída de um gerador de sinais foi ligada a cada par

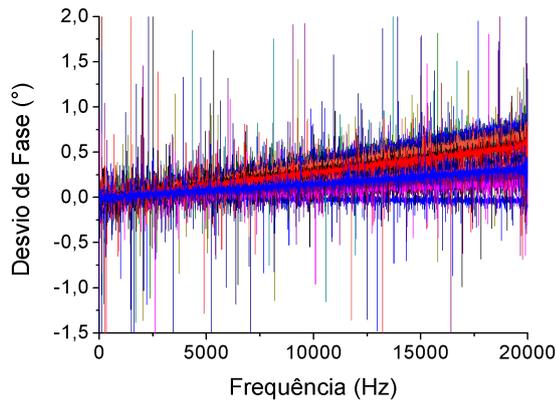


Figura 5.1: Desvio de fase entre os canais do sistema de aquisição.

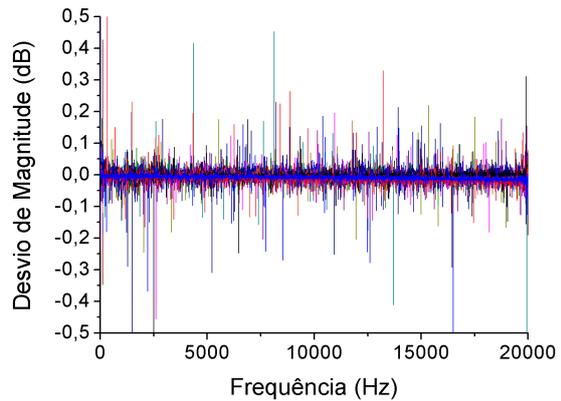


Figura 5.2: Desvio de magnitude entre os canais do sistema de aquisição.

de canais do sistema de aquisição através de um conector em “T” tipo BNC. A excitação utilizada foi um ruído branco até 20 kHz a uma tensão de  $1 V_{\text{rms}}$ . As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os desvios encontrados em cada um dos canais, utilizando como referência o sinal medido no primeiro canal do primeiro módulo de aquisição do sistema.

A variação dos desvios de fase entre os canais não apresentou correlação com a posição do canal no módulo de aquisição ou com a posição do módulo na interface de comunicação. Entretanto, é possível observar que o desvio de fase é diretamente proporcional à frequência em análise. Em 20 kHz foram observados valores de até  $1^\circ$  de desvio entre os canais, valor esse ainda inferior aos desvios de  $1,3^\circ$  apresentados pelo fabricante. Em todo o espectro de frequência o desvio de magnitude manteve-se inferior a 0,05 dB. Os resultados mostram desvios de magnitude e fase muito inferiores aos  $\pm 10^\circ$  e  $\pm 1$  dB recomendados por Mosher [24]. Com estes valores de desvio é possível garantir a qualidade na estimativa da diferença de magnitude e fase entre os canais do sistema de aquisição até 20 kHz.

Alguns testes com diferentes níveis de excitação foram feitos e observou-se que níveis maiores que  $1,5 V_{\text{rms}}$  levam os valores de desvios de fase a níveis um pouco maiores, o que indica que deve ser tomado cuidado quando são analisadas fontes com nível alto de tensão elétrica no sistema de aquisição.

### 5.1.2 Caracterização dos microfones

Conforme sugerido na Seção 5.3, os microfones desenvolvidos foram caracterizados no que diz respeito às suas principais características para a aplicação do Beamforming. Num primeiro momento, foi estimada a sensibilidade acústica de cada um dos quarenta e cinco microfones construídos. Em seguida foram analisadas as diferenças nas respostas de todos

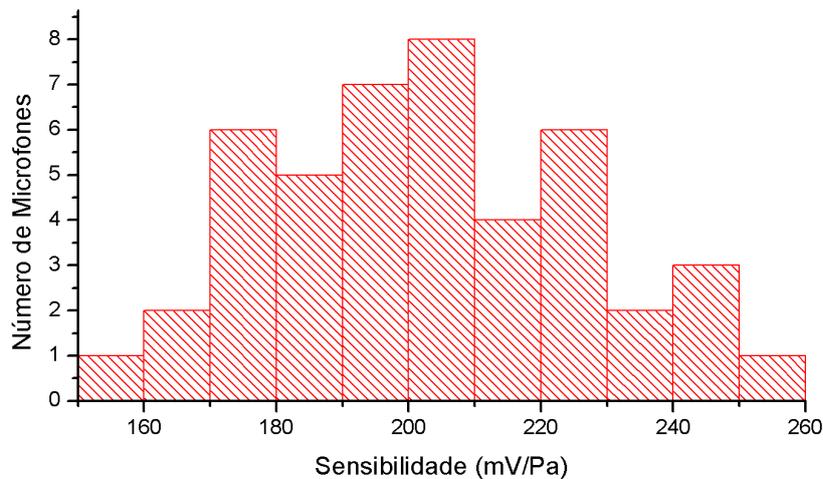


Figura 5.3: Valores de sensibilidade dos 45 microfones obtidos com o calibrador com excitação de 94 dB em 1 kHz.

os microfones construídos. O principal objetivo aqui foi obter parâmetros que permitissem a seleção de um conjunto de microfones que tivessem maior grau de similaridade de fase e magnitude em suas respostas.

A sensibilidade acústica foi estimada para cada um dos microfones. Para isso foi utilizado um calibrador com excitação de 94 dB (ref.  $20 \cdot 10^{-6}$  Pa) em 1 kHz. O histograma dos resultados é apresentado na Figura 5.3. Os valores de sensibilidade devem ser utilizados no software para estabelecer o nível de pressão sonora em cada microfone do arranjo em função do valor de tensão recebido no sistema de aquisição de sinais. Com a sensibilidade de cada microfone é possível estabelecer mais adequadamente os níveis nos mapas de Beamforming.

O ruído de fundo observado nos sinais captados pelos microfones em um experimento dentro da câmara semi-anecóica indica um nível de aproximadamente 30 dB (ref.  $20 \cdot 10^{-6}$  Pa). O nível superior de operação do microfone deve ser estabelecido através de um limite de distorção harmônica total. Humphrey *et al.* [3] sugerem um valor aceitável entre 1% e 2% para a distorção harmônica dos microfones.

Considerando que a grande maioria das aplicações foi feita por meio de análise de sinais acústicos de banda larga, a distorção harmônica não se torna um fator crítico. Além disso, a indisponibilidade de equipamento e infra-estrutura adequados para a realização desse tipo de ensaio contribuiu para que essa avaliação não fosse feita. Entretanto, recentemente um trabalho publicado por Tuss [59] apresenta resultados de análise de cápsulas de eletreto do mesmo modelo e fabricante que as utilizadas neste trabalho. Os resultados de Tuss indicam um limite superior de 135 dB (ref.  $20 \cdot 10^{-6}$  Pa) para uma distorção de 3%. Embora o seu

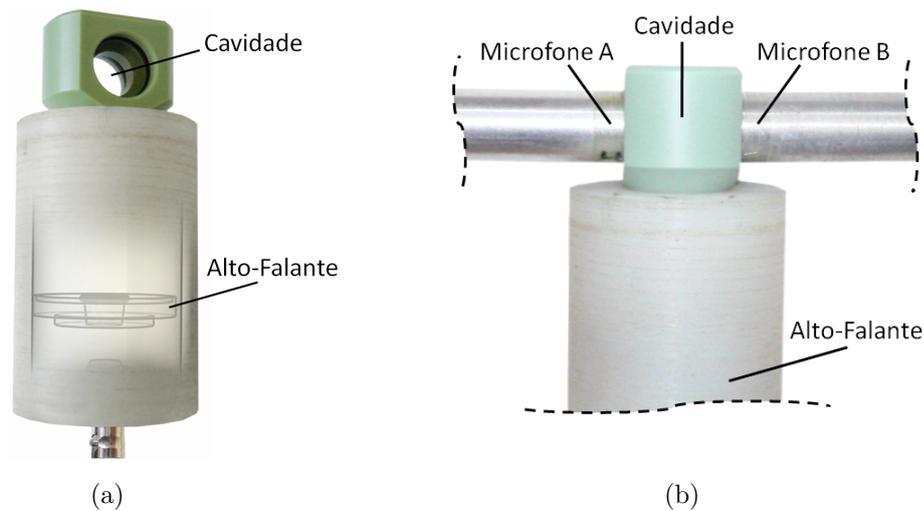


Figura 5.4: Dispositivo construído para a obtenção das diferenças de magnitude e fase nas respostas dos microfones (a) e os detalhes no posicionamento do par de microfones (b).

trabalho não tenha incluído um circuito de condicionamento como o aqui proposto, podemos esperar que o valor de 3% de distorção seja encontrado em níveis de excitação superiores a 100 dB nos microfones fabricados. Desta forma, a faixa dinâmica de operação entre 35 dB e 100 dB pode ser assumida com uma boa segurança, garantindo o bom desempenho nas condições de aplicação.

Os microfones também foram submetidos a uma avaliação de desvio de magnitude e fase até a frequência de 15 kHz. Esses resultados permitem a escolha dos melhores microfones através da seleção daqueles que apresentarem menores desvios. O critério de diferença de fase máxima sugerido por Mosher *et al.* [24] foi usado como guia para o processo de seleção. Já a diferença de magnitude deve ser usada para garantir um comportamento linear ao longo da faixa de frequência de interesse, permitindo o uso de fatores de correção em toda a faixa, através do procedimento usual de calibração de cada microfone.

Para a estimativa dos desvios nas respostas dos microfones, foi construído um dispositivo capaz de acoplar um par de microfones a um mesmo campo acústico. Como podemos ver na Figura 5.4, o dispositivo consiste-se de uma cavidade com um pequeno alto-falante que posiciona simetricamente um par de microfones. Conceitualmente, os diafragmas dos microfones devem sentir o mesmo campo de pressão produzido pela excitação acústica dentro da cavidade. Desta forma, qualquer diferença no comportamento entre os microfones pode ser atribuída às diferenças características do próprio microfone. Os experimentos foram realizados com 45 microfones, mantendo um mesmo microfone como referência.

A função de coerência é frequentemente utilizada para analisar a qualidade do processo de obtenção de uma Função de Resposta em Frequência, indicando, neste caso, o grau de

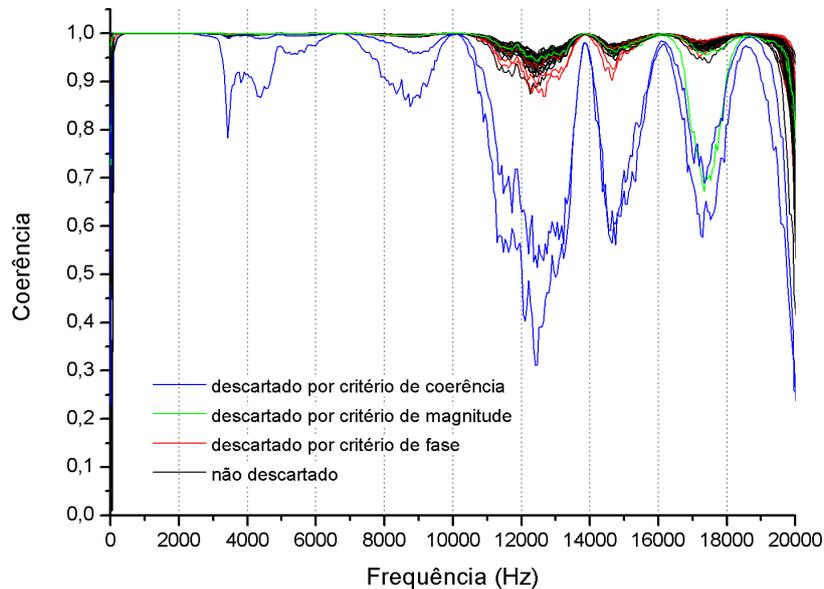


Figura 5.5: Funções de coerência obtidas durante as medições de resposta dos microfones, em azul são mostradas as que foram descartadas por critério de perda de coerência.

correlação entre a excitação e a resposta de um sistema [47]. A análise deste parâmetro foi o primeiro critério para o descarte dos microfones. A Figura 5.5 mostra a curva de coerência obtida durante a estimativa dos desvios entre os microfones, onde, em azul, são indicados os dois microfones que não apresentaram resposta satisfatória. A queda sistemática na coerência em algumas frequências sugere a existência de efeitos não lineares. Uma possibilidade é uma ressonância do circuito de condicionamento de sinais. A outra, mais provável, é a limitação do próprio dispositivo de medição que, em altas frequências ou em regiões de ressonância, é incapaz de entregar os mesmos sinais acústicos a cada microfone.

A Figura 5.6 apresenta as diferenças de magnitude em relação ao microfone de referência. Os resultados mostram que, com a seleção, é possível manter a variação nas características dos microfones em  $\pm 4$  dB  $V_{\text{rms}}$ . Além disso, a linearidade da resposta ao longo do espectro se mostra bastante satisfatória. Os três microfones descartados por critério de desvio de magnitude estão indicados em verde no gráfico.

As diferenças de fase nas respostas dos microfones são apresentadas na Figura 5.7. Os resultados mostram que sem a seleção dos microfones é possível encontrar um erro superior a  $30^\circ$  entre os microfones. Além dos microfones excluídos anteriormente por critérios de coerência e magnitude, foram descartados oito microfones devido às diferenças de fase nas respostas. Foi possível atingir o valor mínimo de  $\pm 10^\circ$  recomendado por Mosher [24].

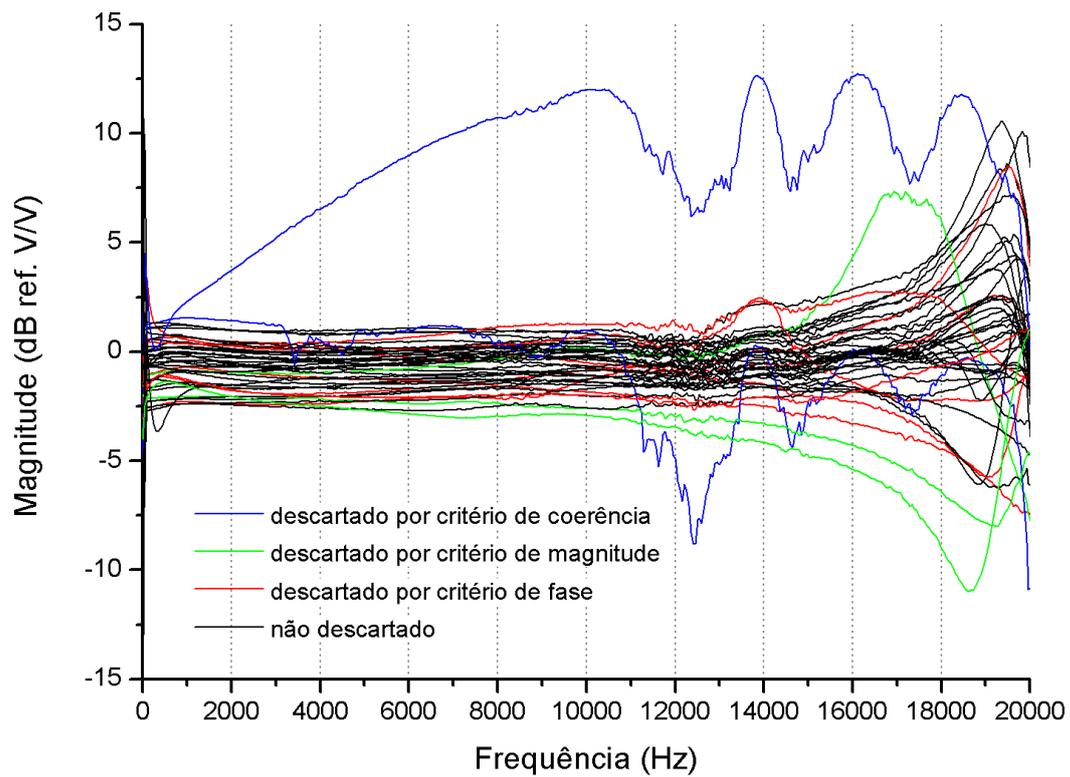


Figura 5.6: Diferença na magnitude da resposta em frequência dos microfones, em verde são mostradas as curvas dos que foram descartados por critério de desvio de magnitude.

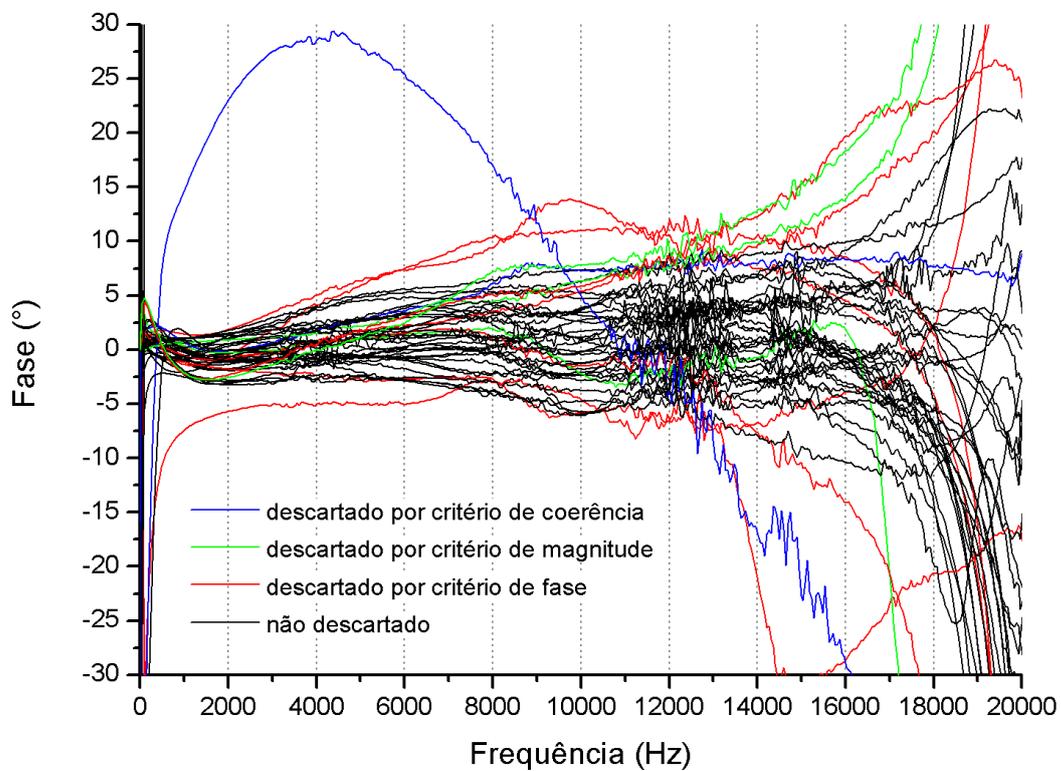


Figura 5.7: Diferença na fase da resposta em frequência dos microfones, em vermelho são mostrados os que foram descartados por critério de desvio de fase.

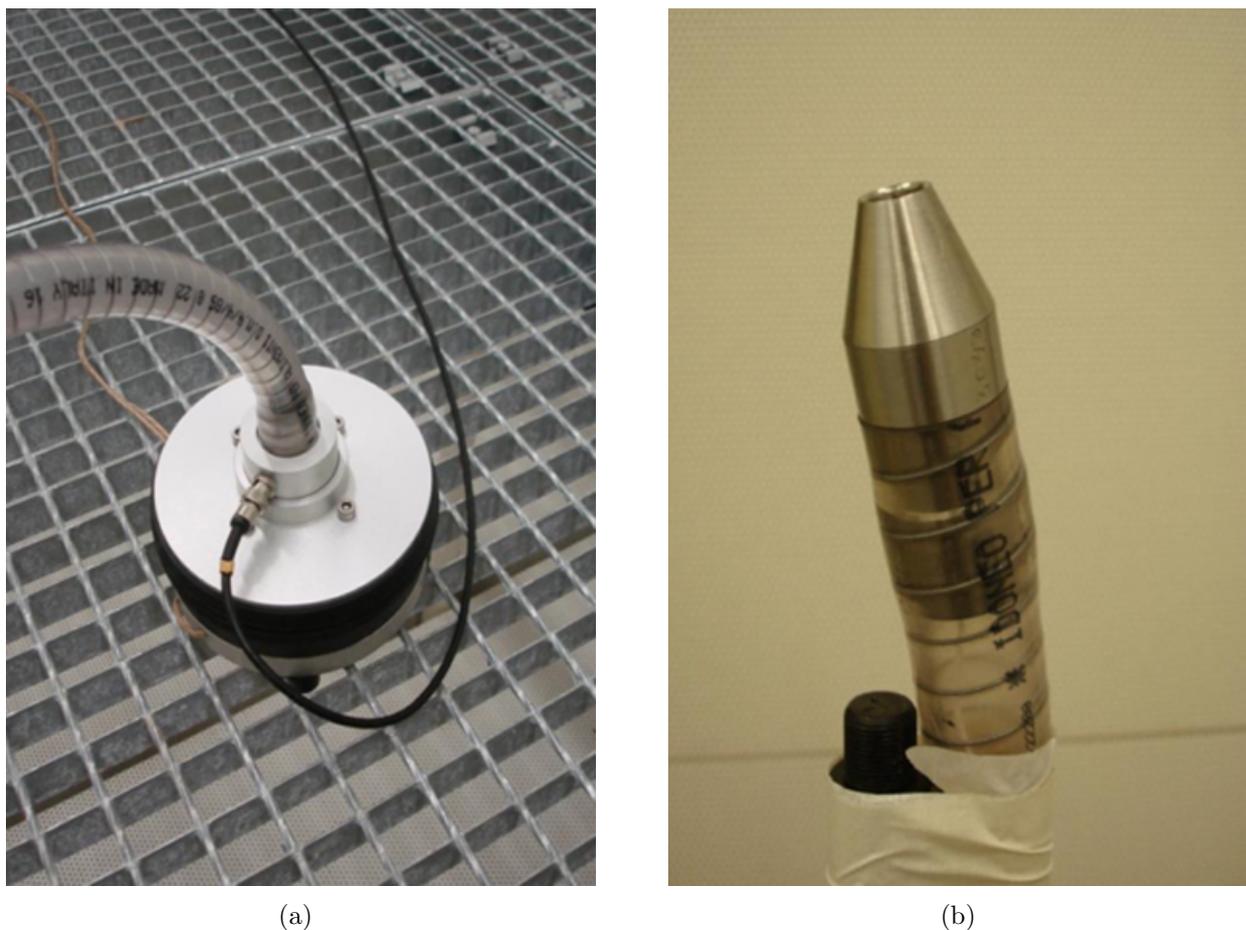


Figura 5.8: Fonte sonora de referência para médias frequências, destacando o *driver* de alta pressão (a) e o bocal por onde o som é radiado (b).

## 5.2 Medição do monopólo acústico

Depois de avaliado o sistema de aquisição e selecionados os melhores microfones, o sistema todo foi integrado, permitindo validar todo o processo de obtenção dos mapas de Beamforming. Nesta etapa, foi utilizada uma fonte sonora de referência em um ambiente acústico controlado. A excitação escolhida foi a de uma fonte de velocidade de volume<sup>1</sup> para a faixa de médias frequências do fabricante LMS. Neste dispositivo o som é gerado num *driver* de alta pressão e transmitido através de um tubo flexível até um bocal que distribui o som como uma fonte do tipo monopólo. O volume da parte ativa da fonte é mantido pequeno para evitar a difração. O fabricante indica que o centro acústico da fonte se encontra a 9 mm da saída do bocal. A Figura 5.8 mostra algumas imagens do dispositivo, para obter mais informações sobre a fonte veja Figura AA-2 no Anexo A.

<sup>1</sup>A velocidade de volume é um parâmetro acústico muito utilizado para descrever o nível de excitação de uma fonte sonora de referência [43].



Figura 5.9: Configuração experimental para medição da resposta do arranjo a uma fonte de referência usada como monopólo.

Os experimentos foram realizados na câmara anecóica da General Motors do Brasil. Algumas das características desta câmara são:

- Ruído de fundo 16 dB(A);
- Critério de ruído NC 20;
- Frequência de corte 150 Hz.

Foram medidas as respostas do arranjo com a fonte de referência emitindo uma excitação em banda larga até aproximadamente 16 kHz. A fonte foi posicionada em distâncias entre 60 cm e 340 cm do arranjo, sendo alinhada com o centro do arranjo. As medições foram feitas com taxa de amostragem de 50 mil amostras por segundo e com tempo de gravação de 6 segundos. A Figura 5.9 mostra a configuração para uma das distâncias medidas.

### 5.2.1 Função de espalhamento espectral

Através da medição do monopólo foi possível obter a função de espalhamento pontual experimental do arranjo. O algoritmo no domínio do tempo foi utilizado para processar os

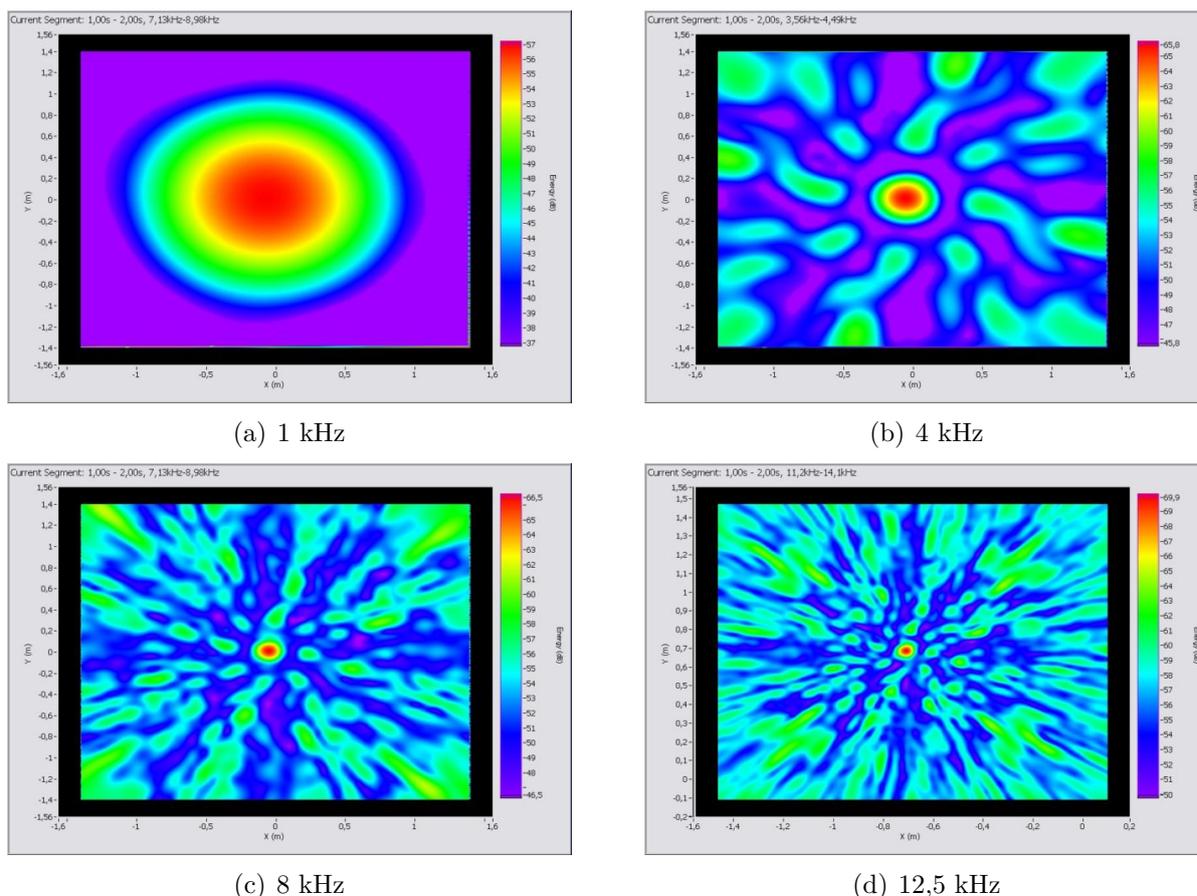


Figura 5.10: Resposta do arranjo em um plano a 2,6 m de distância para diferentes bandas de frequências em 1/3 de oitava.

dados com amostras de 1 segundo. Os mapas com 20 dB de faixa dinâmica são apresentados na Figura 5.10, onde são mostradas as respostas com a fonte em um plano a 2,6 m de distância.

Os resultados obtidos com a fonte em outras distâncias apresentam pequenas diferenças. Entretanto, o comportamento geral é mantido em todos os casos. A seguir, a análise da função de espalhamento pontual apresenta as características mais importantes do arranjo.

### 5.2.2 Avaliação do nível dos lóbulos laterais

Com as respostas medidas foi possível estimar a altura do lóbulo lateral em função da frequência. Foi observada uma pequena variação de 0,5 dB em função da distância do plano em análise, em que os maiores desvios foram encontrados para medições em distâncias inferiores a 1,0m. A rejeição em função do nível do lóbulo lateral avaliada em bandas de 1/3 de oitava a uma distância de 1,4m é apresentada na Figura 5.11. Esse resultado define a faixa dinâmica confiável dos mapas obtidos com esse arranjo. Na maior parte do espectro

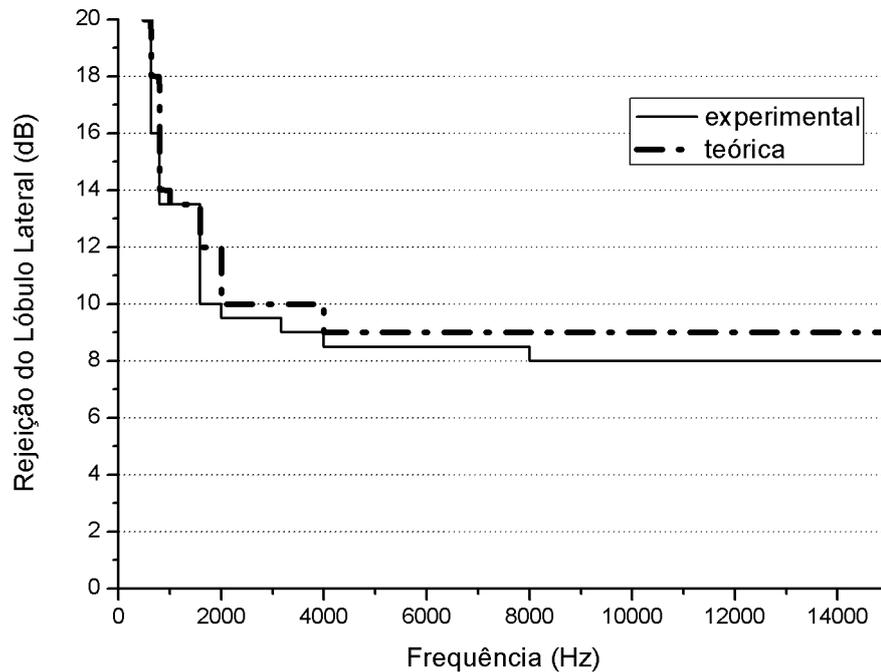


Figura 5.11: Nível de rejeição do lóbulo lateral observado a distância de 1,4 m.

de frequência a diferença dos resultados manteve-se igual ou inferior à 1 dB. Conforme esperado, foi observada experimentalmente uma redução sistemática da capacidade de rejeição do lóbulo lateral quando comparado com o valor obtido com a simulação. Indicando que, de alguma forma, os erros e desvios no processo de medição induzem a uma redução do desempenho do arranjo quanto a capacidade de rejeição dos lóbulos laterais. Entretanto, de modo geral, a comparação dos resultados indicam a boa adequação do modelo teórico na avaliação do nível máximo dos lóbulos laterais na fase inicial de projeto do arranjo. Sendo, desta forma, recomendado o uso da simulação computacional no desenvolvimento da geometria do arranjo.

### 5.2.3 Largura de feixe experimental

Através da medição da fonte de referência, foi possível estimar experimentalmente a largura de feixe do arranjo. Os resultados obtidos em cada distância analisados em função da frequência são apresentados na Figura 5.12. Nela é possível avaliar a degradação da largura de feixe no limite inferior de frequências para cada intervalo de distância da fonte. É importante ressaltar que os resultados obtidos no experimento foram muito semelhantes aos encontrados nas simulações apresentadas na Seção 4.5.

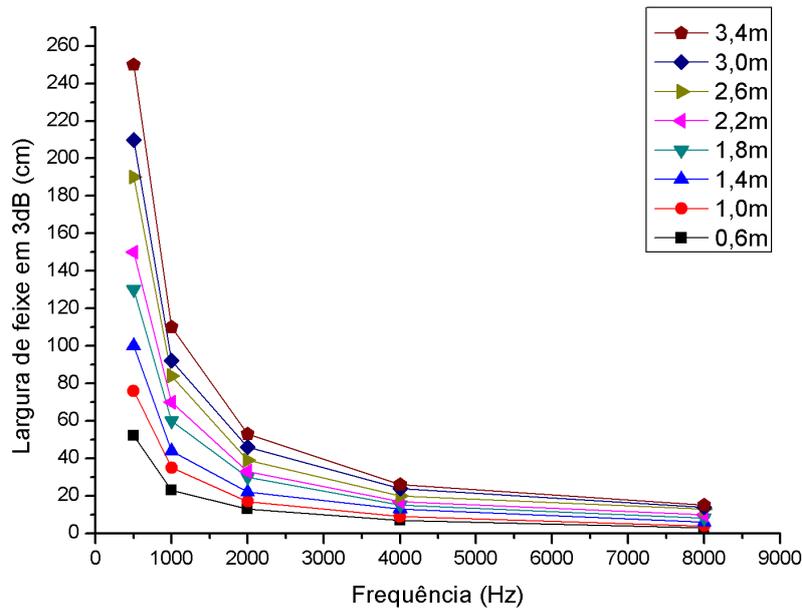


Figura 5.12: Largura de feixe em cada uma das distâncias medidas.

A constante  $K$ , descrita pela Equação (3.39), foi estimada fazendo um ajuste linear da curva de largura de feixe em função do comprimento de onda. Na Figura 5.13 são apresentados os pontos experimentais e as curvas ajustadas linearmente. Na legenda são indicados os valores de  $K$  obtidos no ajuste para cada distância da fonte. O valor de  $K$  é usado para estimar a largura de feixe em uma dada distância de análise do arranjo.

#### 5.2.4 Efeito do erro na distância da fonte

Uma breve investigação sobre o efeito do erro na definição da distância da fonte foi realizada no experimento em questão. Os fatores analisados foram a diminuição da faixa dinâmica das imagens, em função do aumento dos níveis dos lóbulos laterais, e o aumento da largura de feixe. A análise foi feita escolhendo distâncias para o plano de análise diferente da distância do plano real da fonte medida. Desta forma, as diferenças entre as distâncias dos planos de análise e a distância real da fonte são supostas como erros.

A análise mostra que quanto maior a proximidade da fonte ao arranjo, maior é a degradação dos lóbulos laterais em função da definição de uma distância errada. As fontes que são analisadas longe do arranjo sofrem menos impacto para um mesmo valor de erro relativo. Também foi notado que os erros apresentam maior influência nas imagens no caso em que a fonte é assumida mais próxima do que no caso onde ela é assumida mais distante.

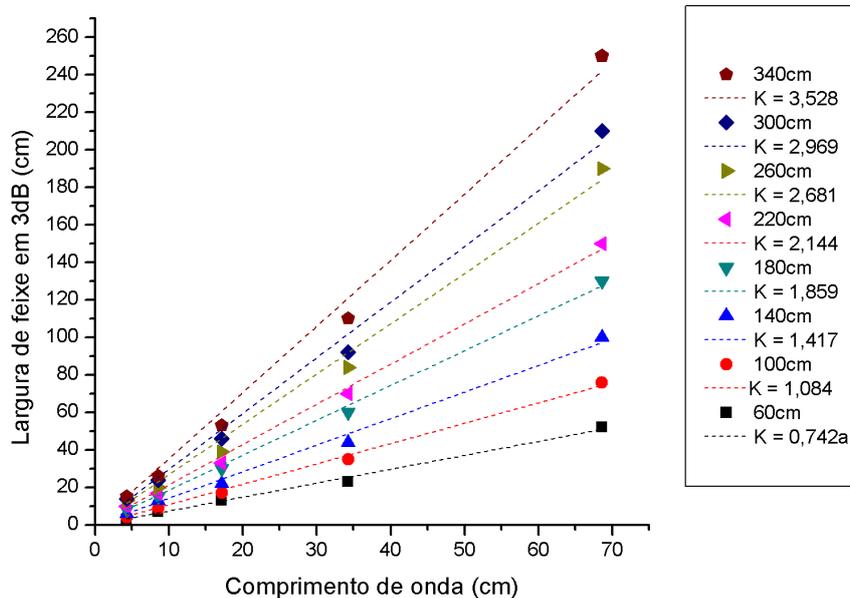
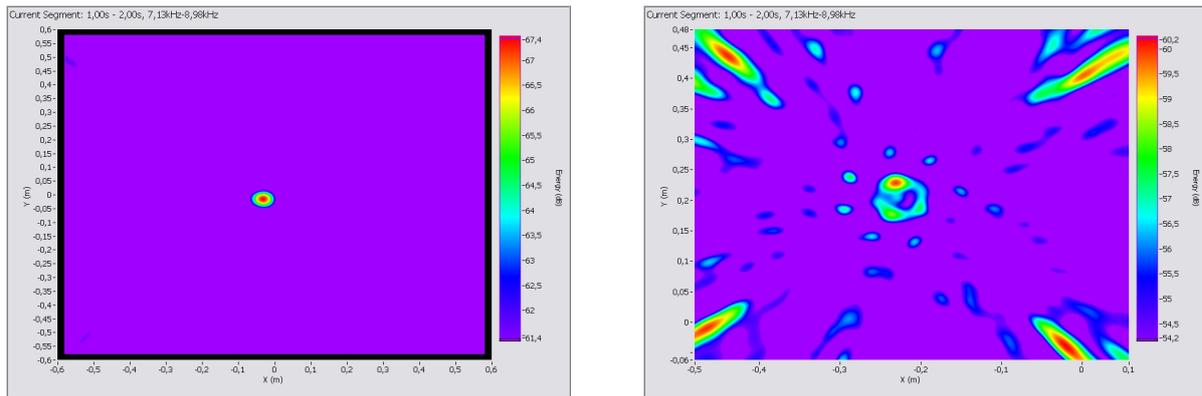


Figura 5.13: Estimativa da constante  $K$  do arranjo, definida pela razão entre a largura de feixe e o comprimento de onda, em cada distância medida.

O efeito também se mostrou diferente em função da largura da banda de frequência analisada. Erros causam menos impacto em bandas mais largas, como em bandas de oitava ou até bandas de 1/3 de oitava.

O efeito sobre a largura de feixe é relevante apenas no limite inferior de frequência ( $< 2$  kHz), especialmente em regiões próximas ao arranjo. Em intervalos maiores de frequência, o impacto do erro pode ser devastador. Como exemplo, a Figura 5.14 mostra as consequências da escolha do plano analisado em 0,8 m quando a fonte em medição encontrasse, na verdade, em 1 m de distância. Nesta situação é possível notar que o nível do lóbulo lateral chega a 0 dB, apresentando mesmo nível que o lóbulo principal. Ainda mais, o feixe principal perde a sua forma. É importante ressaltar que, como esperado, a estimativa do nível da fonte no mapa sofre igualmente grande impacto. O nível é subestimado se a fonte se encontra mais afastada que o plano mapeado e superestimada caso ela se encontre mais próxima.

De modo geral, uma breve análise indica que para frequências acima de 4 kHz o erro deve ser mantido inferior a 10%. Para frequências inferiores a 4 kHz o erro não deve chegar a 20%. A preocupação maior deve ser com mapas em frequências mais altas, especialmente em bandas mais estreitas. Resultados obtidos tanto proximamente ( $< 1,2$  m) como à maior distância ( $> 2,5$  m), mostram que erros na estimativa da distância da fonte podem causar



(a) plano de análise a 1,0 m de distância

(b) plano de análise a 0,8 m de distância

Figura 5.14: Mapas em 8 kHz da fonte posicionada a 1,0 m do arranjo. Diferentes resultados ilustram o efeito do erro na estimativa da distância da fonte

grande impacto no nível máximo dos lóbulos laterais. Por isso, deve-se ter cuidado ao inserir o valor de distância do plano analisado, especialmente quando este se encontram muito próximo do arranjo.

### 5.3 Separação de duas fontes

Um experimento para avaliar a capacidade de separação de duas fontes sonoras também foi realizado. Para isso, dois pequenos alto-falantes de uso doméstico foram alimentados com o mesmo sinal de excitação tonal em 2 kHz e posicionados a 1 m de distância do arranjo. Esse simples experimento pretende apenas expor a capacidade do arranjo na separação das fontes. Os mapas em 2 kHz em banda de 1/12 de oitava para as diferentes separações são mostrados na Figura 5.15. Como esperado, os dois alto-falantes não foram capazes de oferecer o mesmo nível de excitação sonora. Porém, ainda foi possível diferenciá-los no espaço utilizando o mapa com 3 dB de faixa dinâmica.

Conforme medido anteriormente, a largura de feixe do arranjo em 2 kHz e a 1m de distância da fonte é 17 cm. Entretanto, dificilmente é possível separar essas fontes a 20 cm. Este simples exemplo mostra que, na prática, a distância mínima de separação de duas fontes é maior que a largura de feixe, já que fatores como a diferença de nível entre fontes comprometem a estimativa simplificada considerando apenas a largura do feixe principal quando submetido. Com isso, é esperado que quanto maior a diferença de nível entre as fontes maior será a diferença entre a distância mínima da separação e a largura do feixe principal do arranjo.

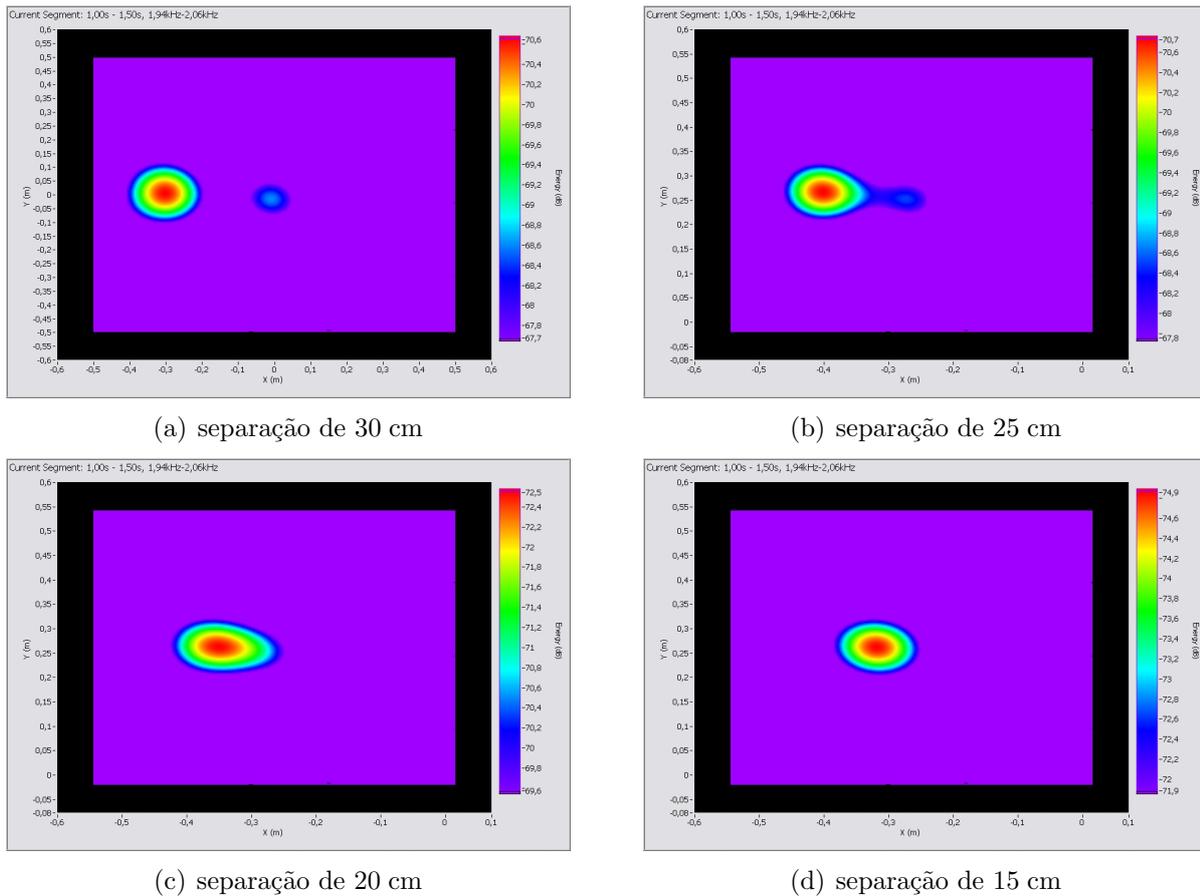


Figura 5.15: Resultados do experimento com dois alto-falantes emitindo um tom de 2 kHz.

## 5.4 Conclusões

O sistema de aquisição mostrou ter desempenho satisfatório para a aplicação com arranjos de microfones. Os microfones construídos se mostraram adequados, já que foi possível alcançar o critério recomendado pela literatura. Desta forma, é recomendado que, em próximos trabalhos, seja fabricado um maior número de microfones, permitindo chegar-se assim a valores ainda menores de diferença na resposta dos microfones.

O arranjo desenvolvido apresenta boas características para o uso na identificação de fontes de ruído. O nível do lóbulo lateral até a banda de 1250 Hz é de 15 dB. Para valores maiores de frequência é possível obter bons mapas com faixa dinâmica de até 6 dB. A constante  $K$ , que expressa a largura de feixe do arranjo, é de aproximadamente 1 para medições a 1 m de distância. Assim, foi obtido o mesmo nível de desempenho dos reportados com sistema de 32 canais encontrados na literatura [63, 38]. Infelizmente, os resultados mostram que a largura de feixe para frequências inferiores a 2 kHz são bastante comprometidos em experimentos com distâncias maiores que 2,0 m. Com isso, sugere-se futuras investigações

---

nas características dos arranjos, como número de microfones e dimensões da geometria, que permitam melhorar especificamente a largura de feixe nesse limite inferior de frequência.

Muitos dos resultados obtidos experimentalmente apresentam ótima concordância com resultados teóricos simulados no Capítulo 4. Isso mostra a importância da etapa de simulação durante o projeto do arranjo. Os maiores desvios entre os resultados teóricos e experimentais ocorreram com a análise de planos próximos do arranjo.



## 6 Aplicações na Identificação de Fontes de Ruído

A seguir, são exploradas algumas aplicações do sistema na análise acústica de um veículo. Além de atestar a capacidade do método, neste capítulo são expostos aspectos práticos do processo de identificação de fontes de ruído utilizando a técnica de Beamforming.

### 6.1 Possíveis aplicações na indústria automotiva

Com a avaliação prévia de inúmeras características do sistema desenvolvido, é possível definir condições que irão oferecer bons resultados na aplicação do sistema como ferramenta de identificação de fontes de ruído. Algumas informações importantes são trazidas para a escolha das aplicações, como a faixa dinâmica do arranjo e a limitação da largura de feixe em função da frequência e da distância. De modo geral, o bom desempenho em altas frequências aponta para o potencial de estudo de fontes e fenômenos acústicos relacionados à transmissão via aérea, que ocorrem tipicamente entre 400 Hz e 15 kHz.

Alguns outros fatores também devem ser considerados nas aplicações. Neste sistema, a limitação com relação a capacidade de separação de fontes exige que os objetos em análise sejam relativamente extensos, impossibilitando o estudo de objetos pequenos. Além disso, a hipótese de campo livre no modelo impossibilita aplicações dentro do compartimento do passageiro sem que seja necessário alterar artificialmente as características acústicas no interior do veículo. Uma certa atenção também deve ser tomada em relação à distância e à área do objeto em análise. O ângulo máximo de abertura em  $60^\circ$  pode exigir que uma fonte muito extensa tenha que ser posicionada a uma grande distância do arranjo de microfones, degradando assim o seu desempenho devido ao aumento da largura de feixe em função do aumento da distância.

Tendo esses fatores em mente, alguns exemplos de aplicações associadas a subsistemas automotivos podem ser propostos. Um exemplo seria a identificação de ruídos parasitas<sup>1</sup> de componentes automotivos como, assentos, painéis de instrumentos ou partes da carroceria montadas com os painéis interiores de um veículo. Neste caso, o ensaio deveria ser planejado para que os mapas de Beamforming pudessem ser obtidos analisando o ruído gerado durante um estímulo artificial de um excitador estrutural. Seria importante que as medições fossem feitas em um ambiente acústico controlado onde o sistema pudesse ser instalado em um suporte permitindo a análise separada do resto do veículo. Outro exemplo seria o isolamento acústico de painéis de uma carroceria. Neste último caso, as imagens acústicas poderiam ser usadas para auxiliar o processo de desenvolvimento identificando os pontos frágeis da transmissão sonora nessas estruturas.

Aplicações em veículos completos também podem ser sugeridas. O primeiro exemplo seria o ruído externo do veículo em marcha lenta, em que as regiões críticas para o vazamento acústico poderiam ser exploradas na condição de operação. Uma outra possibilidade seria o isolamento acústico da cabine de passageiros *in situ*. Para isso, poderia ser utilizada uma fonte sonora no interior do veículo enquanto o arranjo de microfones seria posicionado na região externa, sendo possível mapear os pontos frágeis da carroceria através do caminho acústico recíproco. O último exemplo proposto para este sistema seria o mapeamento dos ruídos no compartimento do motor. Neste caso, o veículo estaria rodando sobre um dinamômetro de chassi, permitindo que o arranjo de microfones fosse posicionado estaticamente em um local adequado.

O estudo do veículo em movimento também poderia ser explorado por este sistema. Entretanto, a forte natureza transiente do fenômeno e as questões relativas ao efeito Doppler durante a passagem em altas velocidades, dificultam o processo de identificação das fontes, como já apontado por alguns trabalhos encontrados na literatura [64]. A falta de capacidade de lidar com esses efeitos dificultam o estudo de fontes em movimento. Desta forma, apenas fontes estáticas serão exploradas neste trabalho.

Nas seguintes seções serão apresentadas as duas aplicações escolhidas como casos reais para o estudo de identificação de fontes de ruído. O primeiro estudo trata do isolamento acústico de um painel frontal<sup>2</sup> como exemplo de estudo de um subsistema separado do veículo. O segundo estudo é sobre a radiação sonora no compartimento do motor em um

---

<sup>1</sup>Ruídos como estalos, tinidos, chacoalhos que são tipicamente transitórios e de alta frequência provenientes normalmente de movimentos relativos entre peças em contato mecânico, largamente conhecidos na língua inglesa como *Squeak and Rattle*.

<sup>2</sup>Nome dado à placa, normalmente metálica, que divide o compartimento do motor e a cabine de passageiros.

veículo rodando em condições de carga. Um fator importante que diferencia drasticamente as duas aplicações é o grau de estacionaridade do campo sonoro. Na primeira, a excitação é feita artificialmente, garantindo um grau de estacionaridade do campo acústico durante as medições. Por outro lado, no experimento com um veículo operando em dinamômetro, as fontes sonoras podem apresentar comportamento instável. Além disso, a natureza do compartimento do motor pode permitir algumas reflexões e a existência de ruídos parasitas. Neste caso, a influência do ruído de fundo e de fontes intermitentes certamente torna o ambiente de medição muito mais severo que a condição estudada no isolamento acústico de painéis.

## 6.2 Vazamento acústico através de painéis

Durante o desenvolvimento do desempenho acústico de um veículo uma enorme atenção é dada ao chamado pacote acústico<sup>3</sup>. O exemplo mais importante do pacote é o material de isolamento acústico colocado entre o compartimento do motor e a cabine de passageiros. A geometria irregular do painel frontal e a dificuldade de modelar elementos como regiões de passagem de cabos exigem, normalmente, que o fabricante avalie experimentalmente o pacote acústico através da medição do seu isolamento acústico.

As medições do isolamento acústico por via aérea são normalmente usadas para comparar o desempenho de diferentes amostras do pacote acústico em diversas regiões da carroceria de um veículo, como, por exemplo, as portas ou o painel frontal. Isso permite a estimativa da perda de transmissão sonora do sistema montado em condições muito próximas do real. Em laboratório, essa medição é normalmente feita em uma suíte de transmissão acústica, que consiste na conexão de duas salas: uma sala-fonte e uma sala-receptora separadas por um elemento de teste. A Figura 6.1 mostra o conceito para a medição do isolamento acústico. Neste trabalho, o objetivo não foi o de estimar a perda de transmissão e sim o de usar a ferramenta com o objetivo de identificar pontos de vazamento acústico, ou seja, os elementos mais frágeis no isolamento acústico do painel automotivo. Para mais informações sobre isolamento acústico e o ensaio de perda de transmissão sonora, recomenda-se a leitura da literatura especializada [65].

---

<sup>3</sup>Nome dado aos sistemas e materiais que são capazes de controlar o ruído interno de um veículo.

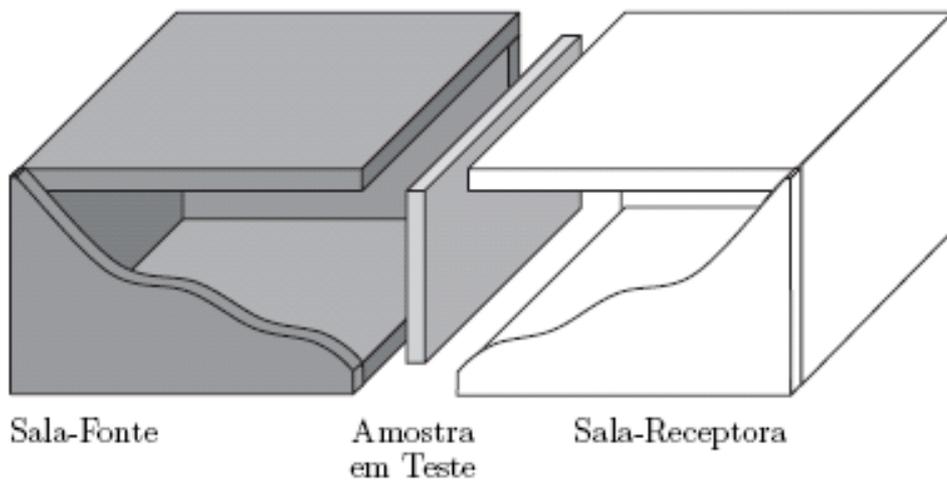


Figura 6.1: Conceito de uma suíte de transmissão acústica para medições de isolamento sonoro via aérea [65].

### 6.2.1 Descrição do experimento

Para a análise do vazamento acústico foi utilizado um procedimento similar ao da medição da perda de transmissão sonora. Na sala-fonte são colocadas fontes sonoras para a excitação em banda larga e na sala-receptora é deixado o arranjo de microfones direcionados para a amostra em teste. Assim, é possível obter os mapas de Beamforming sobre a região do painel em teste, indicando os pontos que permitem maior transmissão sonora através do painel. Desta forma, as fontes mapeadas durante o processamento são fontes equivalentes que representam o som transmitido através da estrutura.

Os experimentos foram executados na suíte de câmaras acústicas do Laboratório de Ruídos e Vibrações da General Motors do Brasil. Esta suíte consiste no acoplamento entre uma câmara reverberante e uma câmara anecóica, apresentadas respectivamente na Figura 6.2 e na Figura 6.3. A primeira funciona como sala-fonte e a segunda como sala-receptora. Entre as duas câmaras existe uma janela acústica onde é possível montar a amostra de teste. A montagem da janela acústica garante que a transmissão sonora ocorra apenas através da amostra em teste. A Figura 6.3 mostra, também, detalhes do painel frontal instalado na janela acústica. O arranjo de microfones foi posicionado a 2,5 m da placa em análise, com o objetivo de cobrir uma área de mapeamento maior do que os limites da amostra, permitindo, também, verificar possíveis vazamentos na moldura construída para a amostra em teste. Na seção 5.2 foram apresentadas algumas das características da câmara anecóica em que as medições com o arranjo foram realizadas. Os procedimentos de alinhamento e calibração foram realizados logo antes do início das medições.



Figura 6.2: Câmara reverberante mostrando em detalhe uma das fontes sonoras, o microfone de referência e a amostra em teste instalada na janela acústica.

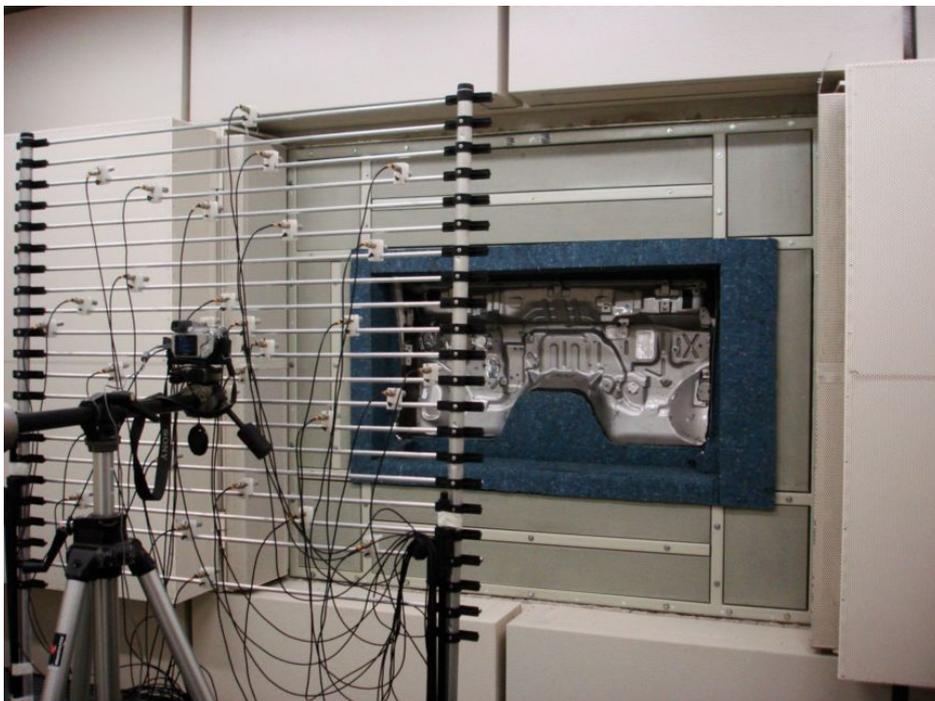


Figura 6.3: Arranjo de microfones na câmara anecóica, posicionado em frente a amostra em teste instalada na janela acústica.

Para a excitação acústica na câmara reverberante foi utilizado um gerador ligado a um amplificador de potência. O sinal elétrico de saída do amplificador de potência foi utilizado para alimentar as duas fontes sonoras. Foi utilizado um ruído branco até 12,8 kHz com um valor de tensão constante de  $30 V_{\text{rms}}$ . Dois microfones foram mantidos como referência, um microfone de campo difuso na câmara reverberante para monitorar o sinal de excitação acústica e um microfone de campo livre na câmara anecóica, sendo este último posicionado no plano do arranjo de microfones. Os sinais dos microfones foram amostrados pelo analisador de sinais e, paralelamente, foram feitas gravações de seis segundos com o sistema de Beamforming. O espectro foi obtido até 12,8 kHz, em 6400 linhas espectrais, através de médias lineares no tempo. O microfone na câmara reverberante foi usado para garantir que o nível de excitação acústica fosse o mesmo em todas as medições. O microfone na câmara anecóica foi utilizado como referência do conteúdo espectral na região do arranjo de microfones.

Além do sistema completo de Beamforming, já apresentado no Capítulo 4, foram utilizados:

- Gerador e Analisador de sinais - *Brüel & Kjær, Type 7539 e Type 3038*;
- Amplificador de potência para áudio - *CROWN, modelo macro-tech 2402*;
- Duas fontes sonoras omnidirecionais de 250 Watts - *Soundsphere, modelo Q-12A*;
- Microfone de medição para incidência aleatória - *Brüel & Kjær, Type 4942-A-21*;
- Microfone de medição de campo livre - *Brüel & Kjær, Type 4189-A-21*.

O objeto analisado nesta aplicação foi o painel frontal de um veículo (detalhes do sistema podem ser vistos na Figura C.1 do Apêndice C). Foram também utilizadas peças como cabos, tubos, alavancas e outros subsistemas que fazem passagem através do painel frontal para tornar o modelo em teste mais próximo das condições de aplicação em veículo.

Dois tipos diferentes de materiais para isolamento acústico, com diferentes pesos e desenhos especialmente para este painel frontal, também foram utilizados. O primeiro apresenta uma estratégia dissipativa, utilizando um feltro de duas camadas. O segundo apresenta estratégia de barreira, utilizando uma camada de feltro e uma camada de borracha. De modo geral, cada um deles apresenta valor de perda de transmissão muito diferente do outro, onde o material mais pesado apresenta maior área de cobertura, cobrindo regiões que o material mais leve deixa exposto. Assim, será possível analisar dois isolamentos com diferentes níveis de desempenho acústico.

O painel frontal foi analisado em quatro diferentes configurações. A Tabela 6.1 apresenta as informações de cada configuração. Na primeira configuração, foi feita a selagem acústica das passagens utilizando-se uma placa de aço grossa em conjunto com um material viscoelástico de alto fator de amortecimento, com o objetivo de garantir um grande valor de perda de transmissão nas regiões de passagem. Essa configuração foi utilizada com o objetivo de se tentar desconsiderar o vazamento através destas regiões.

Tabela 6.1: Configurações utilizadas durante o mapeamento do vazamento acústico.

	Passagens	Pacote Acústico
<b>Configuração 1</b>	seladas	-
<b>Configuração 2</b>	peças instaladas	-
<b>Configuração 3</b>	peças instaladas	isolamento leve
<b>Configuração 4</b>	peças instaladas	isolamento pesado

## 6.2.2 Resultados

Os espectros medidos com o microfone de referência são apresentados na Figura 6.4, permitindo conhecer as modificações na energia transmitida em cada configuração.

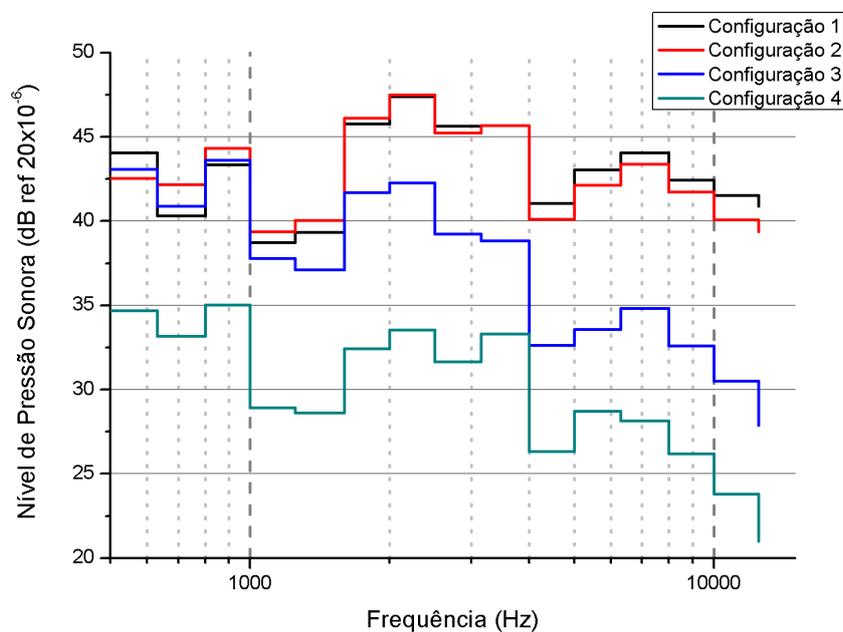
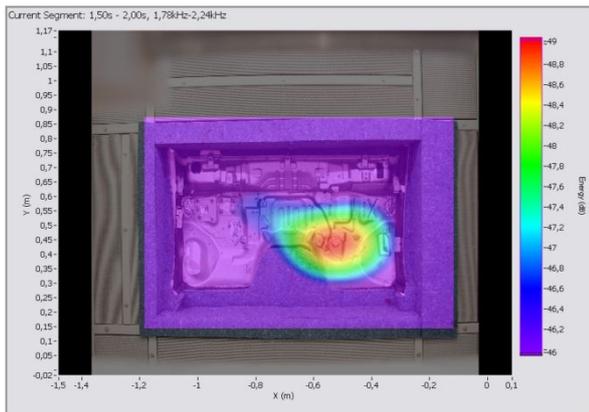
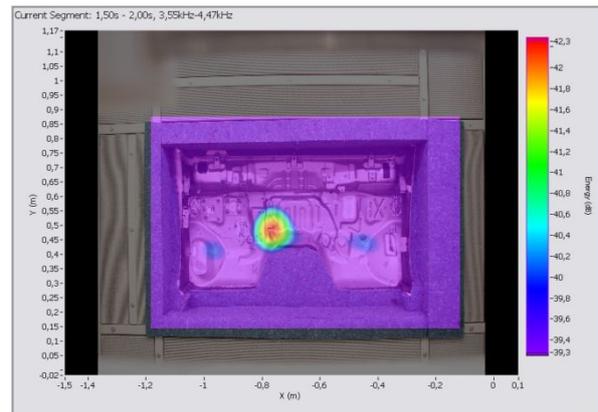


Figura 6.4: Espectros medidos em bandas de 1/3 de oitava com o microfone de referência na sala-receptora para cada configuração de ensaio.

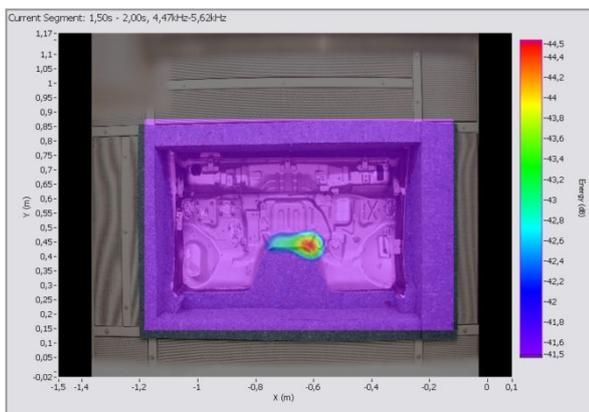
Os mapas de Beamforming foram gerados com os sinais dos 32 microfones para cada configuração de ensaio. Os sinais foram analisados em amostras de 0,5 segundo através de



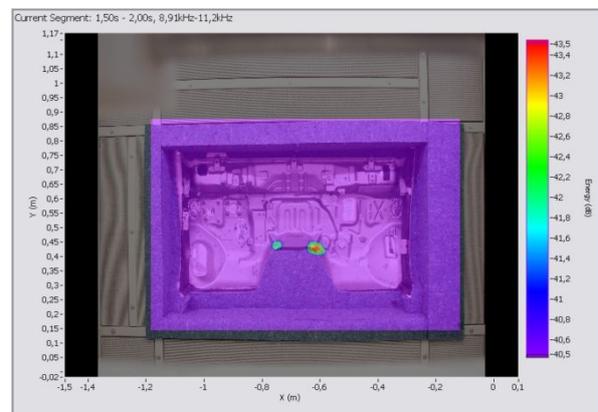
(a) 2 kHz - banda de 1/3 de oitava



(b) 4 kHz - banda de 1/3 de oitava



(c) 5 kHz - banda de 1/3 de oitava



(d) 10 kHz - banda de 1/3 de oitava

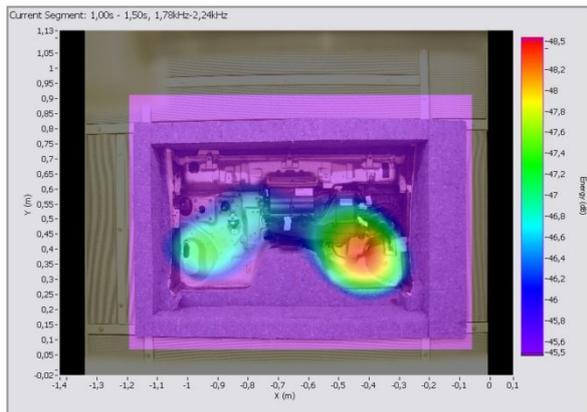
Figura 6.5: Resultados com passagens seladas e sem material de isolamento.

uma janela Hanning no tempo [49] e posteriormente foram processados com o algoritmo de Beamforming no domínio da frequência utilizando também os fatores de correções adquiridos durante a calibração do arranjo *in situ*. As imagens apresentam faixa dinâmica constante de 3 dB, facilitando a comparação entre os diferentes resultados.

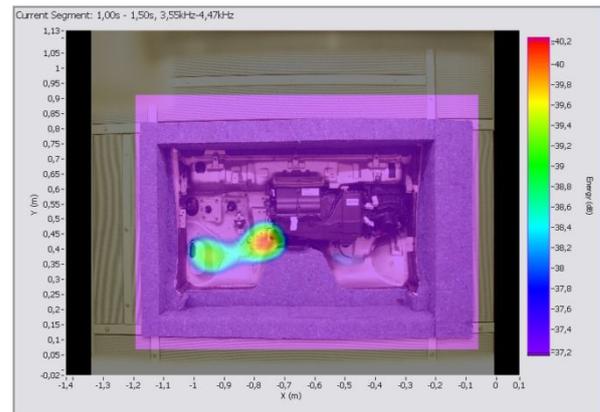
A condição ambiente dentro das câmaras foi monitorada. A temperatura média na câmara anecóica durante os experimentos foi de  $26\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$  e a umidade relativa do ar foi  $50\% \pm 4\%$ .

### 6.2.2.1 Configuração 1 - passagens seladas e sem material de isolamento

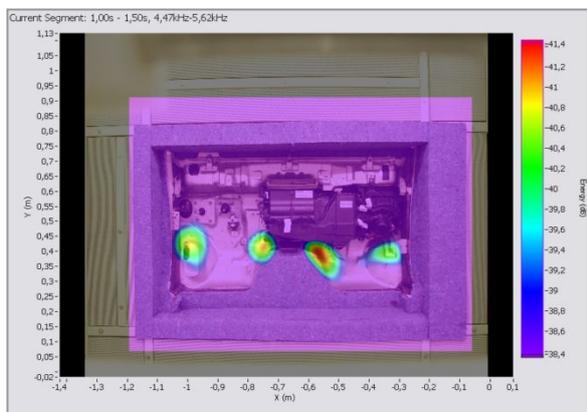
Alguns dos mapas de Beamforming obtidos com esta configuração são apresentados na Figura 6.5. Um resultado interessante é observado na banda de 10 kHz. Neste caso a região mais frágil é localizada justamente na junção entre o painel frontal e moldura da janela acústica, levando a crer que isto aconteceu devido à montagem inadequada da moldura entre a janela e a placa em análise.



(a) 2 kHz - banda de 1/3 de oitava



(b) 4 kHz - banda de 1/3 de oitava



(c) 5 kHz - banda de 1/3 de oitava



(d) 10 kHz - banda de 1/3 de oitava

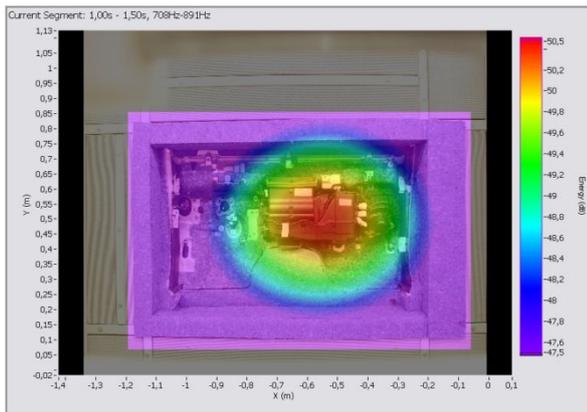
Figura 6.6: Resultados com passagens instaladas e sem material de isolamento.

### 6.2.2.2 Configuração 2 - passagens instaladas e sem material de isolamento

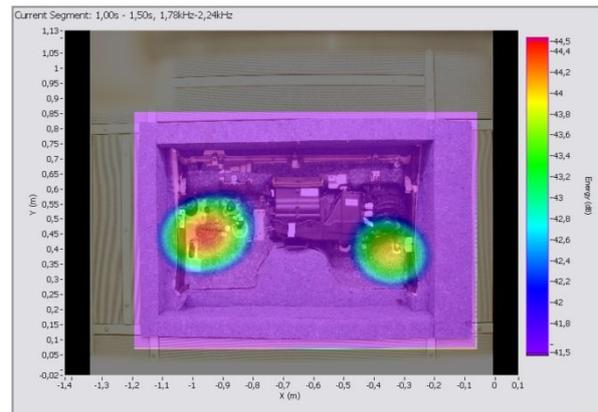
Nesta configuração, as bandas em análise foram mantidas para que fosse possível visualizar a modificação das regiões de vazamento acústico entre esta e a configuração 1. Como é possível ver na Figura 6.4, pouca mudança existe no conteúdo espectral do ruído transmitido. Entretanto, como é mostrado na Figura 6.6, os mapas sofreram grandes modificações, com exceção do resultado na banda de 10 kHz, que mostram comportamento bastante semelhantes.

### 6.2.2.3 Configuração 3 - passagens instaladas e isolamento leve

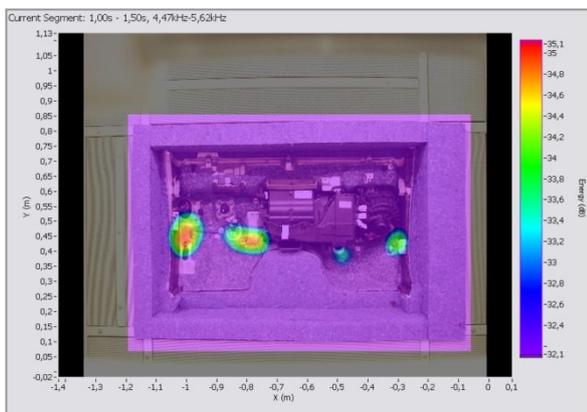
Na Figura 6.7 são apresentados alguns dos resultados desta configuração. Entre eles, são mostrados resultados para algumas das bandas de frequência mais críticas para o isolamento da placa nesta configuração, como é possível verificar na Figura 6.4. Algo muito interessante pode ser observado se são comparados os resultados da configuração 3 com os da configuração 2. Por exemplo, nas bandas de 2 kHz e 5 kHz, que são algumas das condições mais



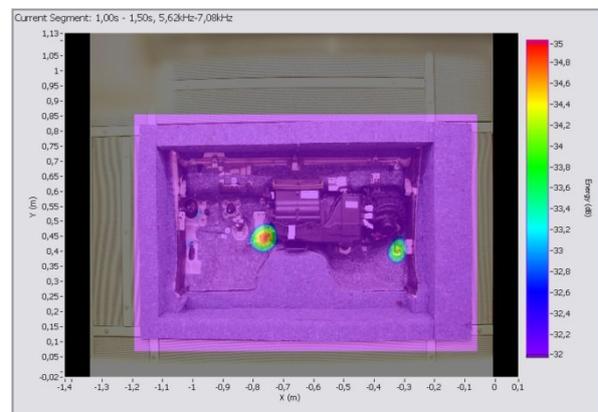
(a) 800 Hz - banda de 1/3 de oitava



(b) 2 kHz - banda de 1/3 de oitava



(c) 5 kHz - banda de 1/3 de oitava



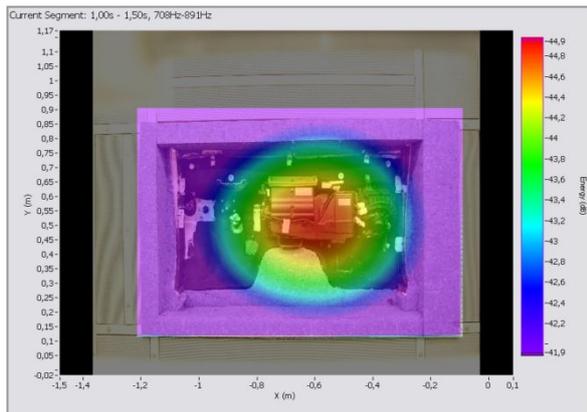
(d) 6,3 kHz - banda de 1/3 de oitava

Figura 6.7: Resultados com passagens seladas e com material de isolamento leve.

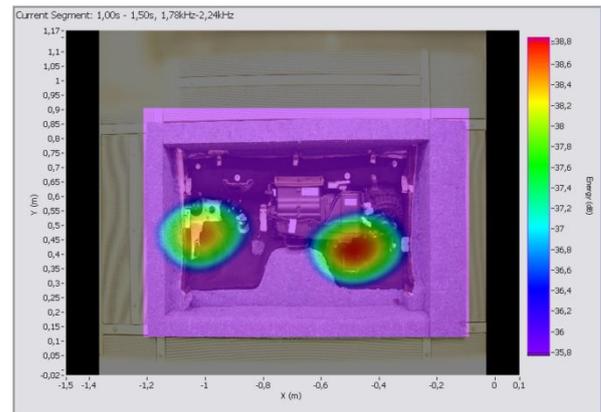
frágeis acima de 1 kHz, é possível notar que, mesmo existindo uma mudança no nível do espectro apresentado na Figura 6.4, as regiões frágeis na transmissão continuam sendo as mesmas. Nestes casos, os pontos de fragilidade são basicamente regiões de passagem, sendo esses os elementos do sistema que, se melhorados, ofereciam o maior ganho no isolamento acústico do sistema.

#### 6.2.2.4 Configuração 4 - passagens instaladas e isolamento pesado

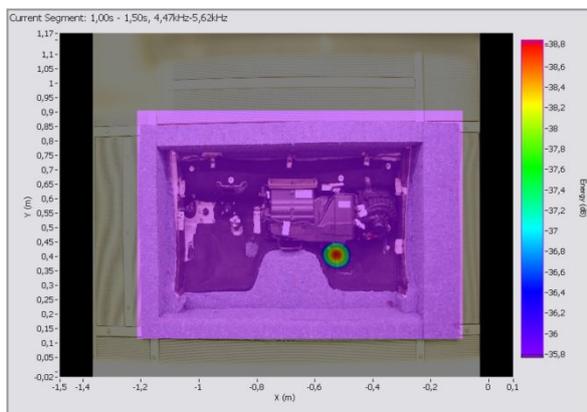
Alguns dos resultados com esta configuração são apresentados na Figura 6.8. Os mapas nas bandas em torno de 800 Hz e 2 kHz mostram as mesmas regiões de fragilidade observados na configuração 3. Entretanto, em bandas de frequências mais altas como 5 kHz e 6,3 kHz, é possível notar um vazamento acústico específico em uma região de passagem próxima da caixa de ar. No resultado apresentado com a configuração 3, não foi possível observar esse fenômeno, já que, naquele caso, algumas áreas descobertas pelo material mostraram-se mais frágeis nas bandas de 5 kHz e 6,3 kHz.



(a) 800 Hz - banda de 1/3 de oitava



(b) 2 kHz - banda de 1/3 de oitava



(c) 5 kHz - banda de 1/3 de oitava



(d) 6,3 kHz - banda de 1/3 de oitava

Figura 6.8: Resultados com passagens seladas e sem material de isolamento pesado.

### 6.2.3 Discussão dos resultados

Os resultados indicam com clareza os pontos frágeis do sistema de isolamento acústico, especialmente em faixas de frequências acima de 1 kHz. Os mapas obtidos abaixo desta frequência apontam regiões muito mais extensas, tornando difícil a identificação dos elementos críticos do isolamento. Isso se deve principalmente à perda em baixas frequências na largura de feixe do arranjo desenvolvido. Nestes casos, a diminuição da faixa dinâmica pode ajudar a estreitar o feixe. Entretanto, essa prática não é recomendada porque isso diminui a robustez da técnica.

Algumas considerações também podem ser feitas sobre o objeto de estudo. Nos casos mais próximos da aplicação real (configurações 3 e 4), as regiões de passagem de subsistemas foram os maiores contribuintes para a perda no isolamento na maioria das bandas de frequência. Dessa forma, é possível concluir que os elementos que oferecem um maior potencial de melhoria no isolamento do sistema estudado estão associados aos vazamentos nas regiões que, por algum motivo, não são cobertas pelo material de isolamento acústico.

Isso mostra que, nem sempre, a melhoria do pacote acústico é a melhor forma de melhorar o desempenho do isolamento acústico.

Com as informações obtidas através do Beamforming, seria possível tomar uma série de medidas para melhorar a eficiência do isolamento acústico na placa. As regiões específicas da placa que apresentam maior fragilidade nas regiões de médias frequências, por exemplo, poderiam ser tratadas localmente com o uso de material de amortecimento estrutural. Já os pontos críticos que foram identificados na região de passagem de peças, poderiam ser tratados com o uso de borrachas mais densas, com a sobreposição entre as camadas do material de isolamento em cada um dos sistemas e diminuindo as folgas existentes na montagem. Com o conhecimento aprofundado das características e elementos dos sistemas, diversas soluções poderiam ser geradas depois que o processo de identificação das fontes é realizado.

Nesta aplicação foi possível notar que a praticidade de se obter os diferentes resultados em um intervalo de tempo tão curto, torna viável a avaliação de sucessivas alterações do sistema, permitindo quantificar e entender a influência de cada modificação no sistema. De modo geral, algumas informações obtidas com os mapas de Beamforming mostraram-se extremamente importantes no processo de otimização do pacote de isolamento acústico. É importante ressaltar que, nesta aplicação, o uso do algoritmo de remoção da autocorrelação dos microfones não foi capaz de oferecer nenhuma melhoria na qualidade das imagens.

### 6.3 Ruído no compartimento do motor

Sem dúvida, as fontes de ruído mais importantes de um veículo estão localizadas no compartimento do motor. A grande complexidade acústica que existe nos problemas associados ao motor e aos seus sistemas auxiliares ainda torna extremamente necessário o estudo da radiação sonora em protótipos durante a fase de desenvolvimento desses sistemas. Desta forma, elementos do pacote acústico utilizados para controlar a radiação sonora no compartimento do motor normalmente são projetados depois que o motor foi desenvolvido, sendo ele, portanto, acessível ao estudo experimental.

Alguns exemplos de soluções acústicas no compartimento do motor são os materiais de absorção instalados na superfície interna do capô ou na região externa do painel frontal, além das coberturas que permitem o encapsulamento acústico parcial do motor ou de seus subsistemas. É nesse contexto que existe um grande potencial de aplicação do sistema de Beamforming. Os mapas de Beamforming poderiam ser utilizados para fornecer informações importantes, como direções da radiação de fontes críticas, durante o processo de desenvolvimento do pacote acústico localizado no compartimento do motor.



Figura 6.9: Configuração experimental usada durante as medições no dinamômetro de veículos instalado na câmara semi-aneecóica.

Mais uma vez a grande vantagem da ferramenta está na avaliação *in situ* do sistema real, minimizando, dessa forma, incertezas nas informações que serão usadas no desenvolvimento do pacote acústico. A princípio, esse estudo poderia ser iniciado com a análise do motor rodando em um dinamômetro de motores, mas é com o motor instalado no veículo que é possível reproduzir as condições mais próximas da operação de um usuário.

### 6.3.1 Descrição do experimento

Neste estudo foram realizadas medições com o arranjo de microfones a 1,2 m do plano contido pela superfície superior do motor, como ilustrado na Figura 6.9. Os mapas de Beamforming foram gerados com o objetivo de visualizar o ruído no compartimento do motor que é radiado para cima. Os ensaios foram realizados no dinamômetro de veículos instalado dentro da câmara semi-aneecóica no Laboratório de Ruídos e Vibrações da General Motors do Brasil. Como de costume, o procedimento de calibração e alinhamento foram realizados antes das medições.

Tabela 6.2: Características acústicas da câmara semi-aneecóica, com o dinamômetro desligado e em operação a uma velocidade de 100 km/h.

	<b>Dinamômetro desligado</b>	<b>Dinamômetro em operação</b>
<b>Ruído de fundo</b>	17 dB(A)	45 dB(A)
<b>Classificação de ruído</b>	NC 20	NC 45
<b>Fregüência de corte</b>	100 Hz	100 Hz

Tabela 6.3: Descrição das condições de ensaio no dinamômetro.

	<b>Rotação do motor</b>	<b>Velocidade de rodagem</b>
<b>Ensaio 1</b>	2500 RPM	55 km/h
<b>Ensaio 2</b>	3500 RPM	78 km/h
<b>Ensaio 3</b>	5000 RPM	110 km/h

Algumas das características da câmara semi-aneecóica são apresentadas na Tabela 6.2. Nela são mostrados tanto os valores encontrados com o dinamômetro e seus sistemas auxiliares desligados quanto os valores com o sistema completo em operação, o que inclui o sistema de resfriamento do veículo por ventilação.

O dinamômetro utilizado tem quatro rolos que permitem controlar veículos com tração nas quatro rodas. Com o sistema de controle do dinamômetro foi possível estabelecer condições de velocidade constante e de aceleração com condições reais de carga. O veículo analisado foi um utilitário esportivo médio com tração nas quatro rodas. Seu motor tem 3,7 litros, 6 cilindros e é movido a gasolina. A largura do compartimento do motor é de aproximadamente 1,5 m. O plano de análise das fontes foi escolhido no plano superior do motor. Detalhes da região de análise do compartimento do motor estudado são mostrados na Figura C.2 do Apêndice C. As diferentes condições estabelecidas para os ensaios estão listadas na Tabela 6.3.

Deve-se lembrar que restrições importantes desta aplicação são a existência de ruído de fundo e ruídos intermitentes em função da operação do dinamômetro e, especialmente, a presença de fluxo de ar utilizado para resfriar o motor que podem gerar flutuações nos sinais capturados pelos microfones. Esses fatores exigem muito mais cautela no uso da técnica, quando comparados com o estudo apresentado anteriormente.

### 6.3.2 Resultados

A grande quantidade de resultados disponíveis oferece muitas oportunidades de direcionar o processo de identificação das fontes de ruído, dependendo dos objetivos específicos buscados. Nesta etapa, poderia ser escolhida uma faixa de fregüência estabelecida em função

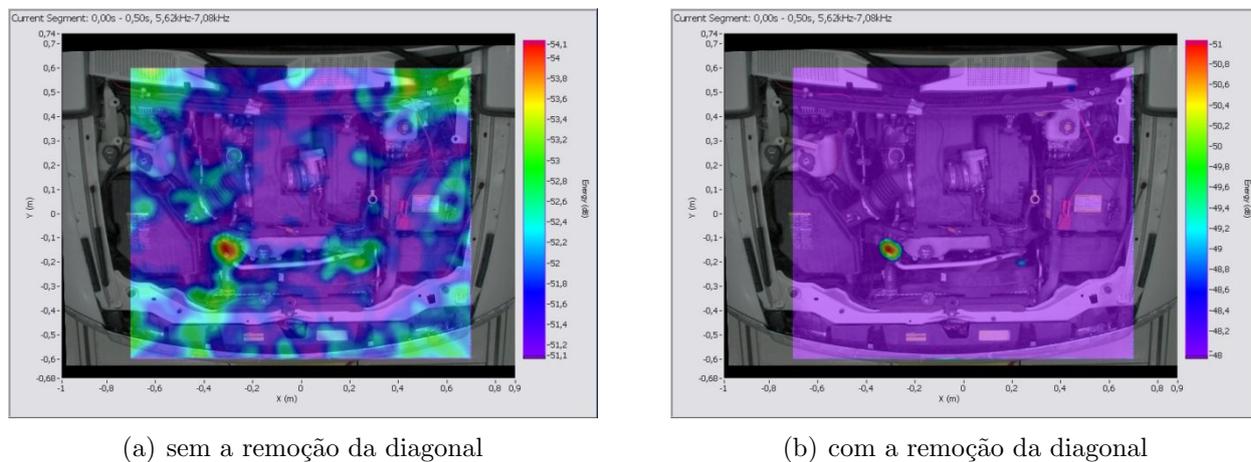


Figura 6.10: Influência da remoção da diagonal no mapa de 6,3 kHz, em banda de 1/3 de oitava, obtido no ensaio com o motor a 2500 RPM.

de reclamações de campo, para veículos já comercializados, ou baseada em uma demanda específica do projeto, para um veículo em fase de desenvolvimento. Dessa forma, seria possível utilizar a ferramenta para investigar uma fonte pré-estabelecida ou identificar os responsáveis pela radiação de certo conteúdo de frequência que, por exemplo, poderia ser responsável pela degradação do ruído percebido dentro da cabine de passageiros. Entretanto, neste estudo serão explorados exemplos para discutir aspectos importantes da aplicação. Em conjunto, alguns resultados serão apresentados para ilustrar a capacidade da técnica.

### 6.3.2.1 Considerações prévias

Antes de serem mostrados os resultados obtidos em cada condição de ensaio, serão apresentadas algumas considerações preliminares sobre as medições feitas no dinamômetro.

A condição de severidade na aplicação em dinamômetro sugere o uso da técnica de remoção da diagonal da matriz de espectro cruzado. Na Figura 6.10, um exemplo mostra claramente a melhoria obtida com o uso da técnica.

O resultado em frequências mais altas é bastante satisfatório. Por outro lado, no limite inferior da faixa de frequência de operação do Beamforming, isto não acontece. A Figura 6.11 apresenta um resultado em que o uso da técnica não oferece ganho significativo. No sistema apresentado neste trabalho, os mapas abaixo de 3 kHz não são muito sensíveis à remoção da diagonal, mesmo em condições severas. Na dúvida, será sempre usada a remoção da diagonal nos ensaios no dinamômetro.

Outro fator importante é a estacionaridade do sinal medido no arranjo de microfones. Analisando os mapas gerados em diferentes segmentos no tempo de um sinal medido durante

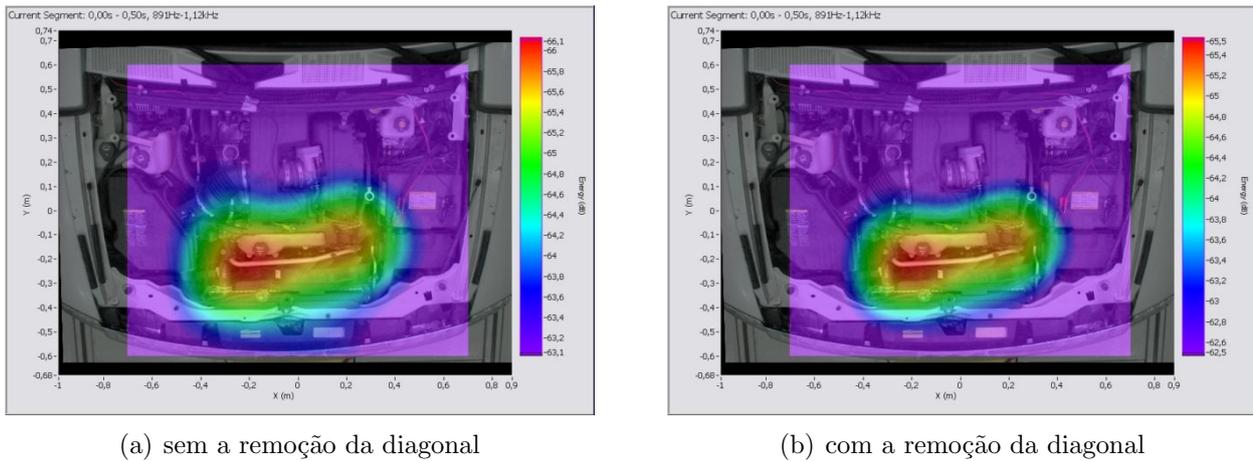


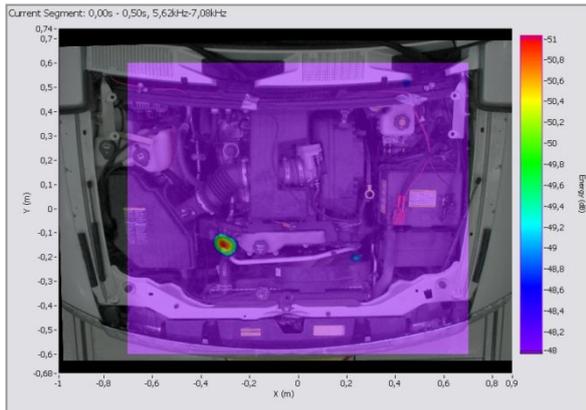
Figura 6.11: Influência da remoção da diagonal no mapa de 1 kHz, em banda de 1/3 de oitava, obtido no ensaio com o motor a 2500 RPM.

seis segundos, em condição mantida constante pelo dinamômetro, é possível notar grandes variações nos resultados obtidos. Especialmente em altas frequências, a escolha do segmento do tempo que será processado pelo algoritmo de Beamforming pode levar a uma variabilidade significativa nos mapas.

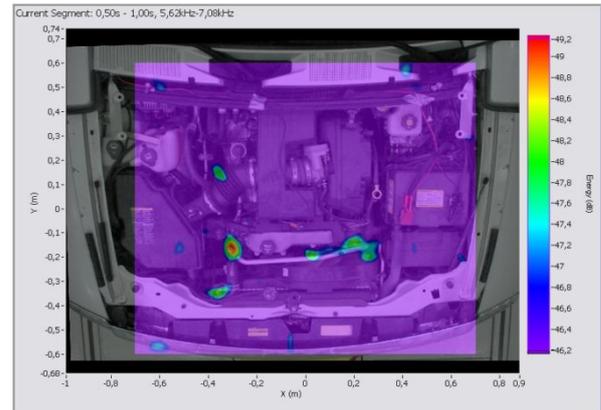
Como é possível ver na seqüência de imagens da Figura 6.12, existe a predominância de uma fonte sonora em todos os mapas. Entretanto, alguns segmentos no tempo levam o algoritmo a construir mapas contaminados. Uma segunda fonte se torna evidente no segmento entre 3,5 segundos e 4,0 segundos. O surgimento de indícios dessa fonte em alguns dos outros segmentos leva a crer que esta é, realmente, a segunda fonte mais importante nessa faixa de frequência. A condição de ensaio com o veículo em menor velocidade foi a que mais sofreu esse efeito, provavelmente porque o ruído do motor em si seja mais comparável aos ruídos intermitentes e espúrios. Por outro lado, na condição de maior velocidade, variações muito menores foram observadas.

Diferentemente, em baixas frequências foi observada uma grande robustez da técnica. A Figura 6.13 mostra os resultados obtidos na banda de 1 kHz. Neste intervalo de frequência foram observados os deslocamentos da região de maior radiação sonora. Entretanto, não são encontrados erros espúrios.

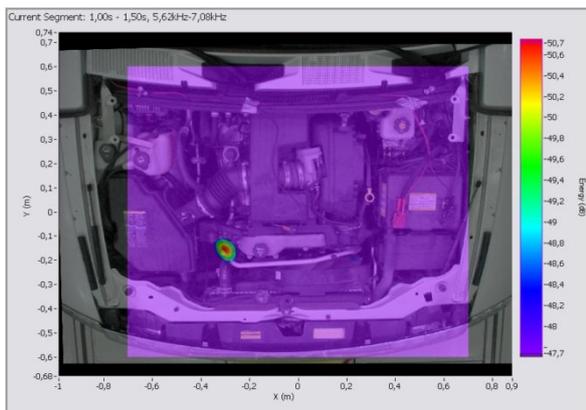
Os resultados apresentados acima mostram que nesta aplicação é necessário tomar cuidado com os mapas em alta frequência. É recomendada, neste caso, a análise de diferentes segmentos no tempo e a escolha do mapa que apresente de maneira mais limpa a distribuição das fontes de ruído mais relevantes. Além disso, o uso da técnica de remoção da diagonal é imprescindível na limpeza dos mapas em condições severas.



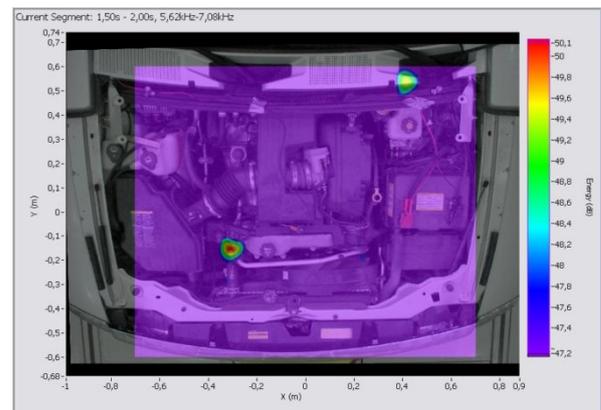
(a) segmento entre 0,0 s e 0,5 s



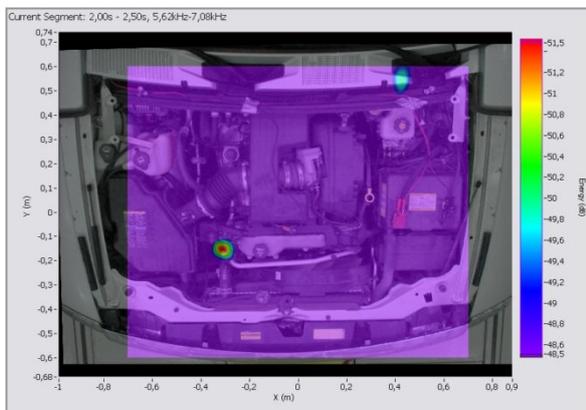
(b) segmento entre 0,5 s e 1,0 s



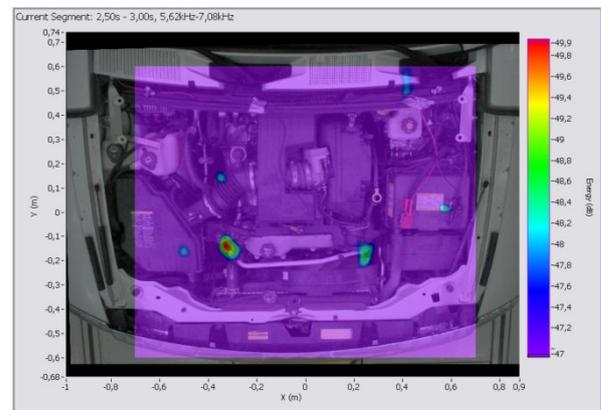
(c) segmento entre 1,0 s e 1,5 s



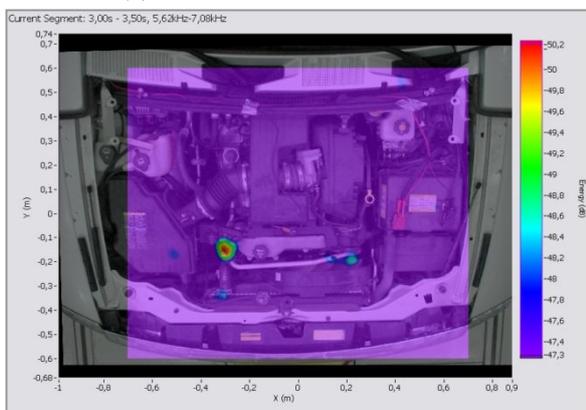
(d) segmento entre 1,5 s e 2,0 s



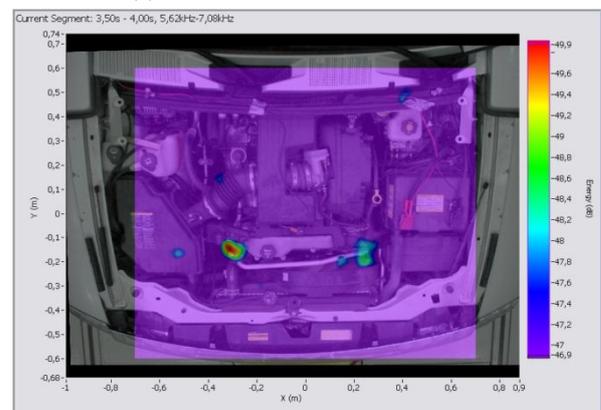
(e) segmento entre 2,0 s e 2,5 s



(f) segmento entre 2,5 s e 3,0 s

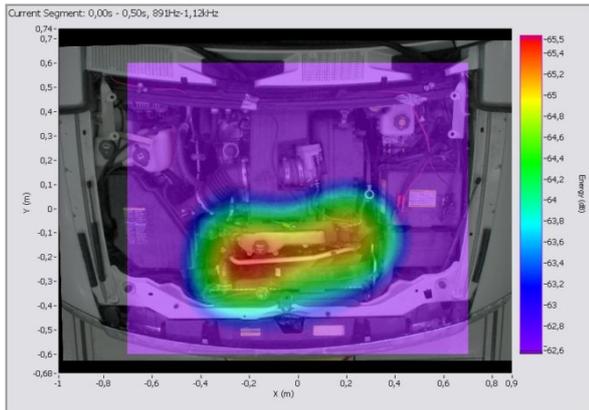


(g) segmento entre 3,0 s e 3,5 s

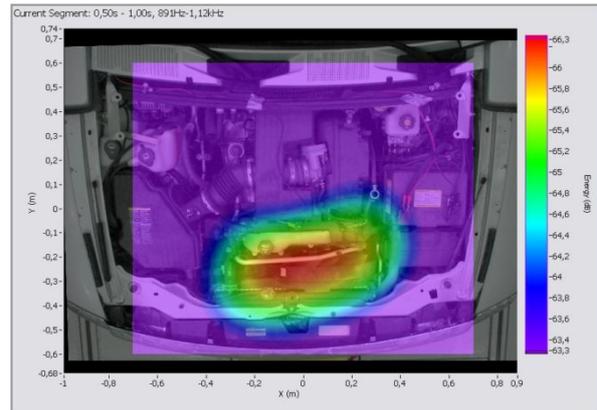


(h) segmento entre 3,5 s e 4,0 s

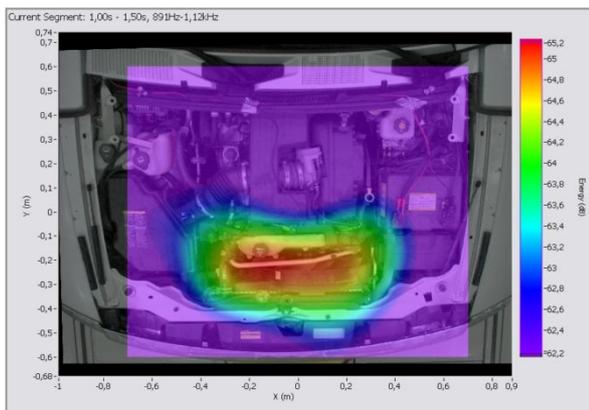
Figura 6.12: Variações no mapa de 6,3 kHz, em 1/3 de oitava, observadas em diferentes segmentos de tempo na condição de velocidade constante com o motor a 2500 RPM.



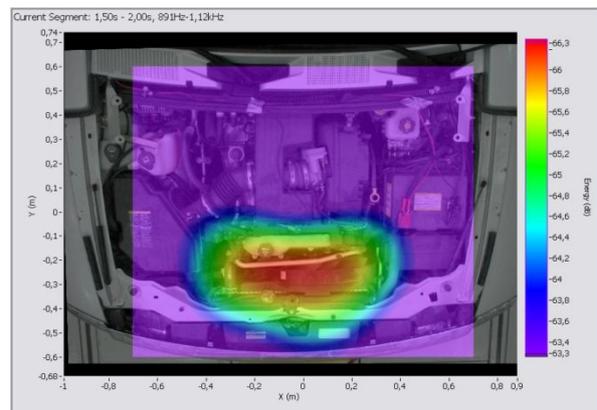
(a) segmento entre 0,0 s e 0,5 s



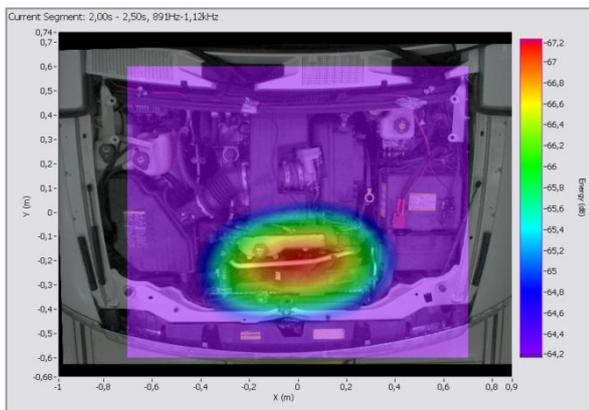
(b) segmento entre 0,5 s e 1,0 s



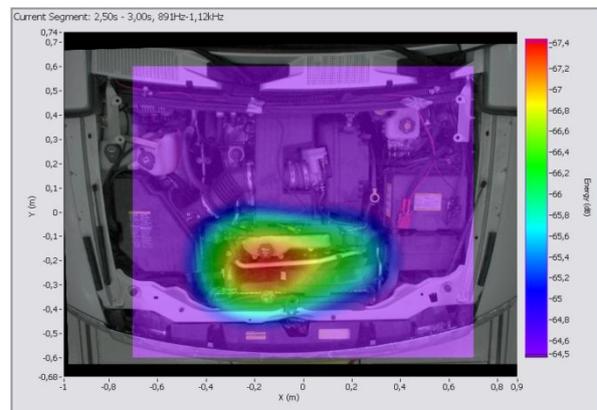
(c) segmento entre 1,0 s e 1,5 s



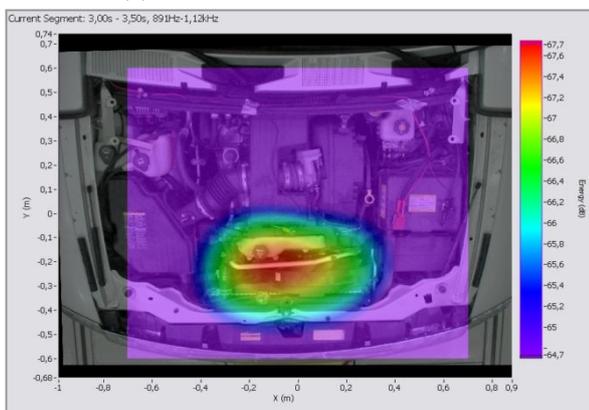
(d) segmento entre 1,5 s e 2,0 s



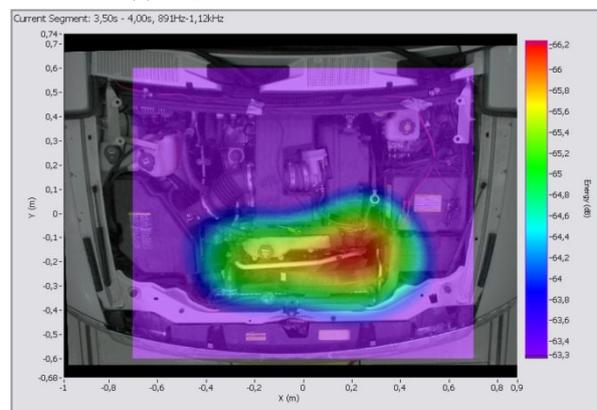
(e) segmento entre 2,0 s e 2,5 s



(f) segmento entre 2,5s e 3,0 s



(g) segmento entre 3,0 s e 3,5 s



(h) segmento entre 3,5 s e 4,0 s

Figura 6.13: Variações no mapa de 1 kHz, em 1/3 de oitava, observadas em diferentes segmentos de tempo na condição de velocidade constante com o motor a 2500 RPM.

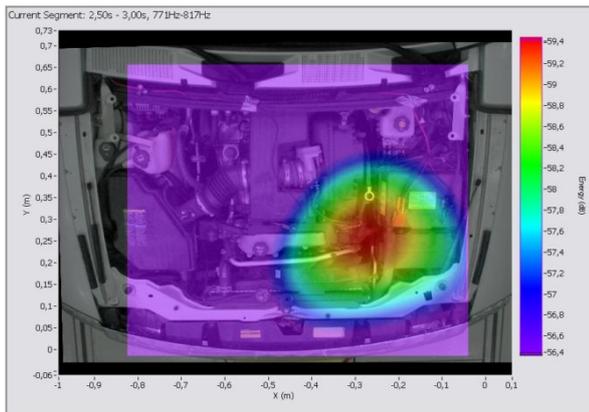
### 6.3.2.2 Ensaios com o veículo em diferentes velocidades

Assim como na aplicação do vazamento acústico, os sinais dos 32 microfones foram analisados em amostras de 0,5 segundo através de uma janela Hanning no tempo e, posteriormente, foram processados com o algoritmo de Beamforming no domínio da frequência. Além disso, a técnica de remoção da diagonal foi utilizada devido aos fatores apresentados na seção anterior.

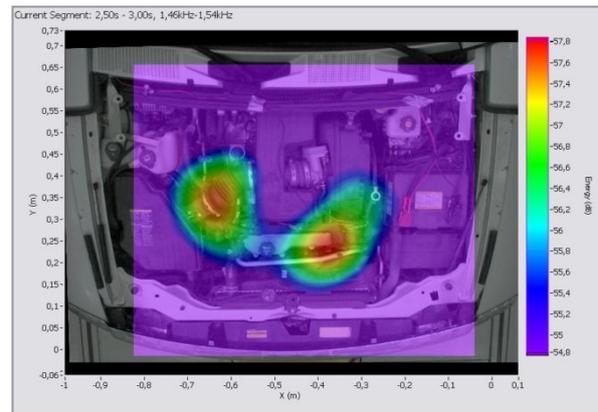
Alguns exemplos dos resultados obtidos nas três condições estacionárias são apresentados. Na primeira condição de ensaio o motor foi mantido a 2500 RPM com os rolos do dinamômetro rodando a 55 km/h na superfície de contato dos pneus. A Figura 6.14 mostra resultados nesta condição em diferentes bandas de frequência. Contribuições importantes como a do alternador, do sistema de admissão de ar e da radiação direta do motor podem ser vistas. O mapa obtido em 4,24 kHz mostra alguns dos resultados que não apresentam simples interpretação. Como esperado, foram observadas variações no resultado em função do segmento de tempo selecionado. Desta forma, é apresentado apenas o segmento que melhor representa os resultados em cada condição de ensaio. Neste caso é possível encontrar reflexões da carroceria, como, por exemplo, a fonte localizada na região inferior à direita do mapa de Beamforming apresentado na Figura 6.14. Esse tipo de fenômeno, que é supostamente considerado resultado de reflexões, foi encontrado diversas vezes em mapas de frequências acima de 5 kHz.

Na segunda condição manteve-se as rodas do veículo correndo a 78 km/h enquanto o motor operava a 3500 RPM. Alguns resultados interessantes obtidos nesta condição são mostrados na Figura 6.15.

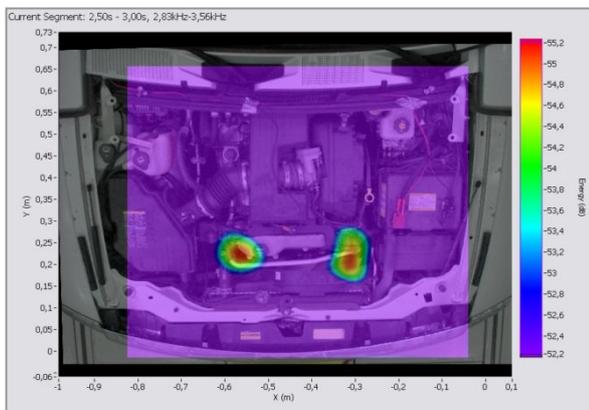
Durante o terceiro ensaio em que o motor foi mantido a 5000 RPM, as rodas giravam a 110 km/h. Assim como nas condições anteriores, alguns dos resultados são apresentados na Figura 6.16. Nesta condição é possível notar que a predominância da radiação, neste intervalo de faixa de frequências, refere-se ao ruído irradiado pelo alternador.



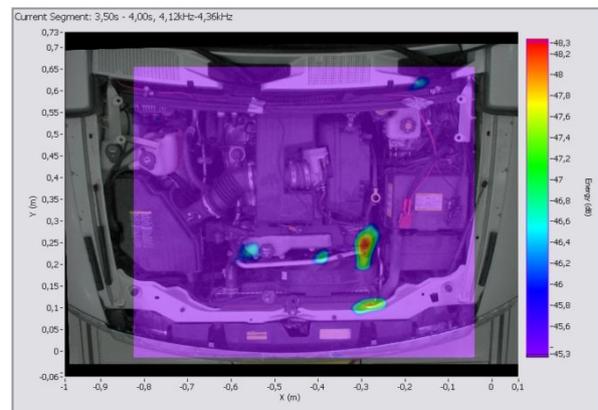
(a) 794 Hz - banda de 1/12 de oitava



(b) 1,5 kHz - banda de 1/12 de oitava

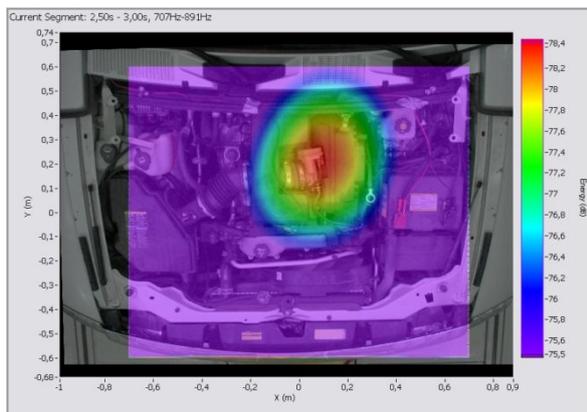


(c) 3,15 kHz - banda de 1/3 de oitava

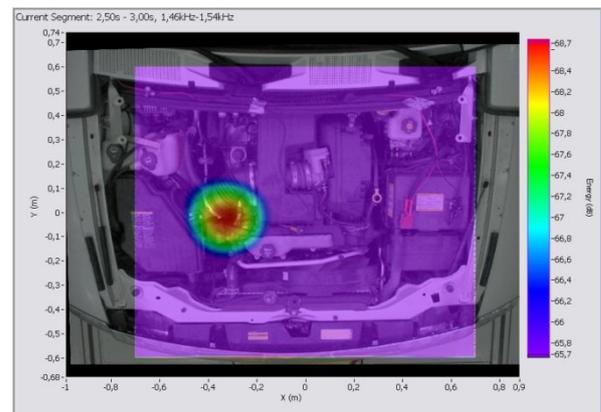


(d) 4,24 kHz - banda de 1/12 de oitava

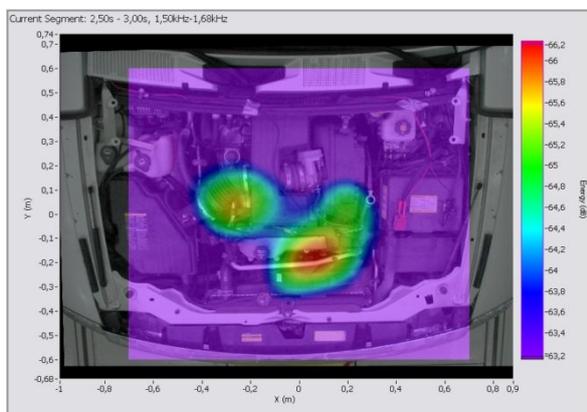
Figura 6.14: Resultados com o motor a rotação constante em 2500 RPM



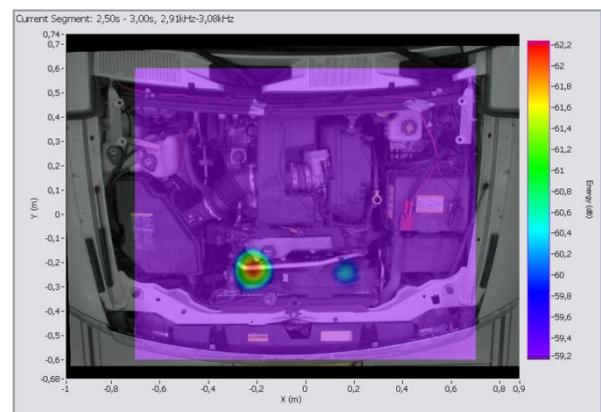
(a) 793 Hz - banda de 1/3 de oitava



(b) 1,5 kHz - banda de 1/12 de oitava

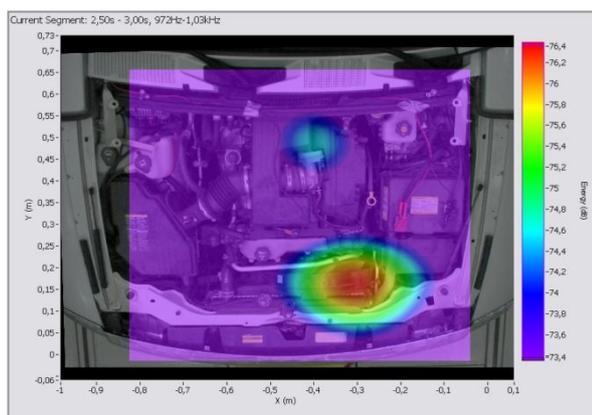


(c) 2 kHz - banda de 1/6 de oitava

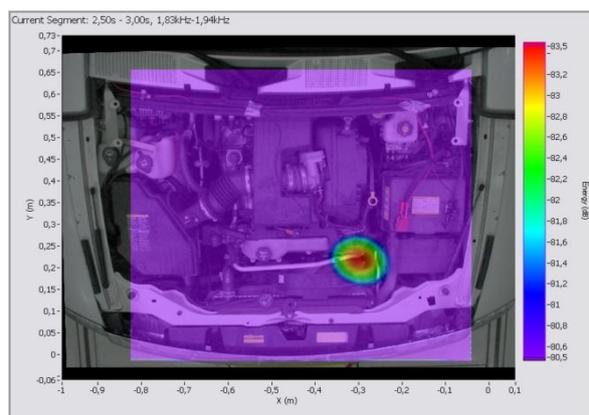


(d) 3 kHz - banda de 1/3 de oitava

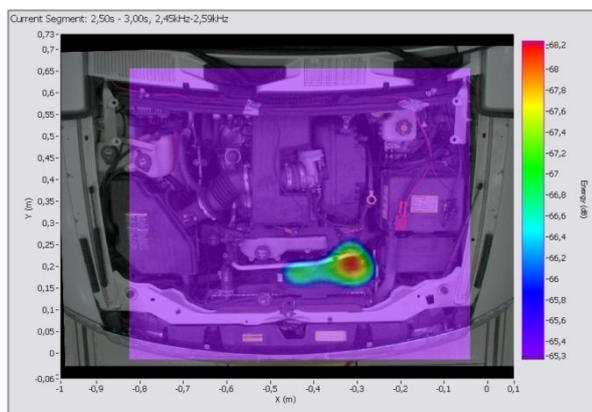
Figura 6.15: Resultados com o motor a rotação constante em 3500 RPM



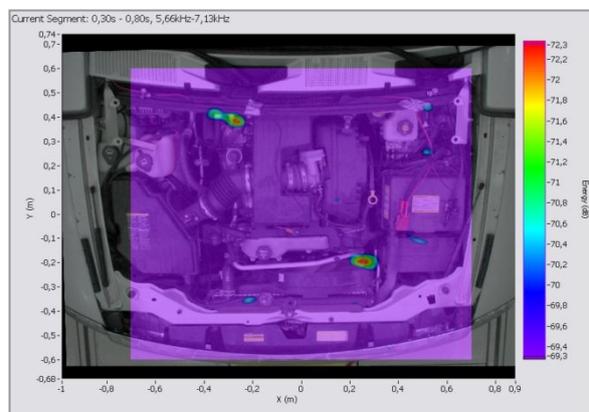
(a) 1 kHz - banda de 1/12 de oitava



(b) 1,89 kHz - banda de 1/12 de oitava



(c) 2,5 kHz - banda de 1/12 de oitava



(d) 6,35 kHz - banda de 1/12 de oitava

Figura 6.16: Resultados com o motor a rotação constante em 5000 RPM

### 6.3.3 Discussão dos resultados

Infelizmente não foi possível incluir nesse trabalho um novo protótipo do encapsulamento no motor, para que se pudesse comparar os desempenhos do sistema atual e o de um protótipo. De qualquer forma, os processos primários de análise e identificação das fontes foram apresentados.

Os resultados obtidos nesta aplicação mostram que o sistema proposto é capaz de identificar de maneira eficiente as principais fontes de ruído do compartimento do motor do veículo analisado. Embora a condição do ensaio tenha sido estacionária, foi possível identificar variações nos mapas que não existiam na primeira aplicação. Mesmo sob condições acústicas desfavoráveis, a técnica de remoção da diagonal da matriz de espectro cruzado se mostrou extremamente adequada para a obtenção dos mapas de Beamforming.

Durante esta aplicação foi possível notar que, especialmente no limite superior de frequências, a seleção adequada do segmento do tempo a ser analisado é extremamente importante. A análise de um intervalo mais extenso garante uma melhor qualidade no resultado dos mapas, mas a seleção adequada do sinal no tempo também permitiu gerar mapas mais limpos, sem comprometer o custo computacional relacionando ao processamento e armazenamento de dados de medição.

Não foi possível identificar a real causa das flutuações observadas nos mapas de Beamforming em altas frequências, embora alguns resultados grotescos observados levem a crer que sua causa é um problema no processamento ou na estacionaridade do sinal. É plausível pensar que os mapas poluídos representam, na verdade, variações reais no campo acústico, sejam em função da contaminação de fontes secundárias ou em função da violação da hipótese de campo estacionário.

Os resultados nesta aplicação permitem indicar guias para o desenvolvimento de soluções mais eficientes para o controle do ruído no compartimento do motor do veículo analisado. Uma das considerações mais importantes sobre o objeto de análise é a proposta de modificação da cobertura de encapsulamento do motor, onde seria possível conter a radiação proveniente de sistemas auxiliares do motor, em especial do alternador. Além disso, informações sobre as frequências características da radiação desses componentes podem ser utilizadas como parâmetros para a definição do desenho e dos materiais mais adequados para o sistema de encapsulamento. Certamente, a capacidade de modificar fisicamente partes do sistema e de realizar novos ensaios pode oferecer informações ainda mais ricas para o processo de identificação das fontes. Por fim, é importante ressaltar que, de fato, o conhecimento prévio sobre o veículo e seus sistemas permite uma imersão ainda mais profunda na análise das fontes de ruído.



# 7 Conclusões

## 7.1 Considerações finais

O Beamforming é uma técnica já bastante utilizada em diversas aplicações de processamento de sinais desde a Segunda Guerra Mundial. Sua capacidade de lidar com o conjunto de sensores, como um todo, a torna uma técnica bastante robusta, especialmente em ambientes com presença de ruídos indesejáveis.

Neste trabalho foram abordados os elementos mais importantes da aplicação da técnica de Beamforming na obtenção de mapas acústicos. Uma revisão sobre os principais trabalhos foi apresentada, mostrando a evolução e a diversidade de oportunidades com a utilização a técnica. Foi possível analisar os fundamentos envolvidos com os diferentes métodos convencionais para a implementação do algoritmo, apresentando-se suas características e limitações. A relação entre as diferentes características de resposta dos arranjos foi discutida, permitindo-se distinguir o desempenho de diferentes geometrias de arranjo.

Foi possível também passar pelas diferentes etapas do processo de desenvolvimento de um arranjo de microfones. De modo geral, o processo atualmente usado para definir a geometria de um arranjo mostrou-se bastante exaustivo. A complexidade existente nos fatores que definem a resposta de um arranjo ainda não permite que sua geometria seja estabelecida de maneira direta, dado o conjunto de restrições e características desejáveis para o arranjo. O que existe é um processo baseado em uma série de escolhas de engenharia, em que o compromisso com as diferentes características de resposta do arranjo deve ser balanceado e ponderado em função de limitações de ordem prática. A geometria de espirais múltiplas confirmou-se ser a mais adequada para a análise de fontes em banda larga, oferecendo as melhores características de resposta dentre as geometrias analisadas.

As respostas dos microfones construídos atenderam aos critérios indicados pela literatura, mostrando-se adequadas para as aplicações exploradas. Foi mostrado, então, que é possível utilizar microfones cada vez mais simples se o processo adequado de seleção for realizado.

O sistema desenvolvido mostrou-se flexível e foi capaz de atender às expectativas de portabilidade, apresentando desempenho similar aos apresentados na literatura, comprovando a eficácia do sistema de baixo custo proposto.

O sistema desenvolvido pode ser descrito de maneira sucinta. Um arranjo acústicamente transparente de 32 microfones com faixa de frequência de operação de 500 Hz a 15 kHz. O suporte construído permite a implementação de diferentes geometrias; entretanto, é recomendada a geometria projetada que utiliza os pontos de intersecção entre oito espirais logarítmicas reversas com coeficiente de 1,5 rad e quatro círculos concêntricos que dividem seções de mesma área. Dependendo do objeto de análise é recomendado uma distância de medição mínima de 60 cm. O nível de ruído de fundo observado é de aproximadamente 25 dB. Já o limite superior da faixa de operação não foi investigado.

Os resultados experimentais do arranjo foram semelhantes aos resultados numéricos obtidos através de simulação. Isso confirma a importância da simulação da resposta do arranjo antes da implementação física do sistema. Uma breve análise de diferentes possibilidades de aplicações na indústria automotiva mostra o grande potencial da técnica nos estudos relacionados aos caminhos acústicos por via aérea em sistemas veiculares.

De certa forma, o processo de identificação exigiu o conhecimento de algumas características de resposta do arranjo, para que a interpretação fosse adequada. Entretanto, o conhecimento do veículo e do fenômeno físico se mostrou essencial durante a análise dos resultados. A simples obtenção dos mapas não fornece informações detalhadas para a análise e identificação das fontes.

Durante a aplicação na identificação do vazamento acústico de painéis, a técnica foi capaz de oferecer informações importantes sobre as características específicas do sistema. A remoção da diagonal do espectro cruzado não ofereceu nenhuma vantagem nesta aplicação. Por outro lado, no estudo da radiação no compartimento do motor, ela se mostrou fundamental, permitindo limpar o mapa e indicar as fontes de maior radiação no sistema. Em ambos os casos foi possível obter informações valiosas sobre os sistemas de maneira muito rápida. Deve-se ressaltar que em poucas horas foi possível medir e analisar os resultados dos mapas, tornando viável a utilização de ciclos de medições com modificações físicas do sistema analisado.

Foi observado também durante as aplicações do sistema que o arranjo deve ser posicionado o mais próximo possível da fonte para não comprometer a resolução dos mapas. Entretanto, maior cautela é necessária com o uso do arranjo em regiões próximas do objeto de análise, já que efeitos como o erro associado à incerteza da distância da fonte e a hipótese de campo acústico distante podem comprometer a qualidade dos mapas.

Na prática, a limitação de resolução das imagens torna difícil obter resultados úteis nos limites inferiores de frequências e o número pequeno de microfones limita as formas de contornar esse problema. É necessário explorar sistemas maiores com 64 ou 128 canais para investigar estratégias capazes de minimizar o problema. Portanto, é muito importante que estudos para superar esta limitação sejam realizados para tornar as aplicações automotivas mais atraentes.

Sabendo que a obtenção da informação espacial do campo sonoro ainda não é uma realidade comum na indústria automotiva, a capacidade de avaliar o campo acústico *in situ* de maneira relativamente rápida e simples, utilizando a técnica de Beamforming, poderá se tornar uma prática constante no processo de desenvolvimento das características acústicas do produto. Desta forma, é esperada uma revolução na maneira de investigar e solucionar problemas à medida que esses tipos de sistemas se tornam cada vez mais disponíveis e acessíveis à indústria.

## 7.2 Trabalhos futuros

Os resultados obtidos aqui em pequena escala com os microfones de baixo custo encorajam a reprodução de um sistema de maior escala em um futuro trabalho. É esperado que, com o uso de um arranjo com maior número de microfones, sejam exploradas formas de compensar as limitações encontradas no limite inferior de frequências. Possivelmente, o uso de arranjos compartilhados, em que duas geometrias podem ser integradas num mesmo arranjo, possa oferecer um bom comprometimento entre a resolução em altas e baixas frequências.

Para melhorar os resultados em alta frequência é sugerido o maior refinamento do circuito de condicionamento do sinal e da fixação dos microfones, além de serem estabelecidos critérios mais rigorosos para a seleção dos microfones. É também recomendado realizar um estudo detalhado sobre os métodos de calibração, estendendo-se a análise do fator de correção em bandas mais altas de frequências e, ao mesmo tempo, investigando-se as restrições físicas do experimento.

Nos próximos estudos, sugere-se também a exploração da estimativa da potência sonora utilizando o arranjo como sugerido por Hald [66]. Assim, poderia ser explorada a medição da perda de transmissão sonora com o arranjo, permitindo-se obter mapas de perda de transmissão do painel em análise.

Além destas sugestões, a continuação natural da linha de pesquisa seria a investigação de fontes em movimento, devido ao grande potencial existente nos estudos relacionados ao

ruído de passagem de um veículo. Da mesma maneira, a exploração de algoritmos avançados pode ser feita utilizando-se o mesmo sistema aqui explorado. Alguns dos algoritmos citados na revisão apresentada no Capítulo 2, podem oferecer vantagens significativas nos resultados dos mapas. Os trabalhos citados podem guiar esse caminho de estudo.

Uma última possibilidade recomendada é a adaptação do código para o processamento dos sinais de um arranjo com geometria tridimensional, permitindo o estudo do campo acústico no interior de cavidades, como a cabine de um veículo.

# Referências

- [1] HÜTTL, T. The importance of acoustic research. In: WAGNER, C.; HÜTTL, T.; SAGAUT, P. **Large-Eddy Simulation for Acoustics**. Cambridge Aerospace Series, Cambridge Press, 2007. p. 1-6.
- [2] MARROQUIN, M. **A Comparison of Seven Different Noise Identification Techniques**. In: SAE Proc. of the 1999 Noise and Vibration Conference, Grand Traverse, MI, USA, May 2003, SAE technical paper 2003-0-1691.
- [3] HUMPHREYS Jr., W.M.; GERHOLD, C.H.; ZUCKERWAR, A.J.; HERRING, G.C.; BARTRAM, S.M. **Performance Analysis of a Cost-Effective Electret Condenser Microphone Directional Array**. In: 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Hilton Head, SC, 2003, AIAA paper 2003-3195.
- [4] BRUSNIAK, L.; UNDERBRINK, J.R.; STOKER, R.W. **Acoustic Imaging of Aircraft Noise Sources Using Large Aperture Phased Arrays**. In: 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Cambridge, MI, 2006, AIAA paper 2006-2715.
- [5] ELLIOT, R.S. **The Theory of Antenna Arrays**. In: Microwave Scanning Antennas, R.C. Hansen, Academic Press, 1966.
- [6] URICK, R.J. **Principles of Underwater Sound**. 3rd Edition, Mcraw-Hill, New York, 1983.
- [7] KELLERMAN, K.I.; MORAN, J.M. **The Development of High-Resolution Imaging in Radio Astronomy**. In: Annual Review of Astronomy and Astro-physics, Vol. 39, p. 457-509, 2001.
- [8] Informações sobre o *Very Large Array* disponíveis em <http://www.vla.nrao.edu/>.
- [9] WYGANT, I.O.; ZHUANG, X.D.; YEH, T.; ORALKAN, O.; ERGUN, A.S.; KARAMAN, M. **Integration of 2D CMUT Arrays with Front-End Electronics for Volumetric Ultrasound Imaging**. In: IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 55, no. 2, Feb 2008.
- [10] JOHNSON, D.H.; DUDGEON D.E. **Array Signal Processing**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.
- [11] RYAN, J.; GOUBRAN, R.A. **Application of near-field optimum microphone arrays to hands-free mobile telephony**. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology 52, p. 390-400, 2003.
- [12] KOMPIS, M.; DILLIER, N. **Performance of an adaptive beamforming noise reduction scheme for hearing aid applications. I. Prediction of the signal-to-noise-ratio improvement**. In: Journal of Acoustical Society of America vol. 109, p. 1123-1133, 2001.

- [13] VALIN, J.M.; MICHAUD, F.; ROUAT, J. **Robust 3D localization and tracking of sound sources using beamforming and particle filtering.** In: IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006.
- [14] SODERMAN, P.T.; NOBLE, S.C. **A Directional Microphone Array for Acoustic Studies of Wind Tunnel Models.** In: AIAA 8th Aerodynamic Testing Conference, Bethesda, Maryland, July 1974, Paper AIAA 74-640.
- [15] BILLINGSLEY, J.; KINNS, R. **The Acoustic Telescope.** In: Journal of Sound and Vibration, vol 48(4), p. 485-510, 1976.
- [16] BROOKS, T.F.; MARCOLINI, M.A. POPE, D. S. **A directional array approach for the measurement of rotor noise source distributions with controlled spatial resolution.** In: Journal of Sound and Vibration, vol. 112 , p. 192-197, 1987.
- [17] KING III, W. F.; BECHERT, D. **On the sources of wayside noise generated by high-speed trains.** In: Journal of Sound and Vibration vol. 66, p. 311-332, 1979.
- [18] BARSIKOW, B.; KING III, W.F. **On removing the Doppler shift from array measurements of railway noise.** In: Journal of Sound and Vibration, vol. 120 , p. 190-196, 1987.
- [19] TAKANO, Y.; TEREDA, K.; AIZAWA, E.; IIDA, A.; FUJITA, H. **Development of a 2-dimensional microphone array measurement system for noise sources of fast moving vehicles.** In: Proceedings of the 21th International Congress and Exposition of Noise Control Engineering, p. 1175-1178, 1992.
- [20] ELIAS, G. **Source Localization with Two-dimensional Focussed Array: Optimal Signal Processing for Cross-shaped Array.** In: Proceedings of the 24th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Newport Beach, USA, July 1995.
- [21] OERLEMANS, S.; Sijtsma, P.; LOPEZ, LOPEZ, B.M. **Location and quantification of noise sources on a wind turbine.** In: Journal of Sound and Vibration vol. 299, p. 869-883, 2007.
- [22] HOWELL, G.P.; BRADLEY, A.J.; MCCORMICK, M.A.; BROWN, J. D. **De-dopplerization and acoustic imaging of aircraft flyover noise measurements.** In: Journal of Sound and Vibration vol. 105(1), p. 51-167, 1986.
- [23] UNDERBRINK, J.R. **Practical Considerations in Focused Array Design For Passive Broad-Band Source Mapping Applications.** 1995. Dissertação (Master of Engineering in Acoustics) - The Pennsylvania State University, EUA.
- [24] MOSHER, M.; WATTS, M.E.; JOVIC, S.; JAEGER, S.M. **Calibration of Microphone Arrays for Phased Array Processing.** In: 3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Atlanta, GA, 1997, AIAA paper 97-1678.
- [25] WATTS, M.E.; MOSHER, M.; BARNESM, J. **The Microphone Array Phased Processing System (MAPPS).** In: 2nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, State College, PA, May 1996, AIAA paper 1996-1714.

- [26] SCHMIDT, R.O. **Multiple Source DF Signal Processing**: An Experimental System. In: IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. AP-34, No. 3, March 1986.
- [27] DOUGHERTY, R. P.; STOKER, R.W. **Sidelobe Suppression for Phased Array Aeroacoustic Measurements**. In: 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Toulouse, France, June 1998, AIAA paper 98-2242.
- [28] HOGBOM, J.A. **Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines**. In: Astronomy and Astrophysics Supplements vol. 15, p. 417-426, 1974.
- [29] BRÜHL, S.; RÖDER, A. **Acoustic noise source modelling based on microphone array measurements**. In: Journal of Sound and Vibration vol. 231(3), p. 611-617, 2000.
- [30] BROOKS, T. F.; HUMPHREYS, W. M. **A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays**. In: 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, May 2004, AIAA paper 2004-2954.
- [31] DOUGHERTY, R. P. **Extensions of DAMAS and Benefits and Limitations of Deconvolution in Beamforming**. In: 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Monterey, California, USA, 2005, AIAA paper 2005-2961.
- [32] EHRENFRIED, K.; KOOP, L. **A comparison of iterative deconvolution algorithms for the mapping of acoustic sources**. In: 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Cambridge, Massachusetts, USA, May 2006, AIAA paper 2006-2711.
- [33] RAVETTA, P. A. **LORE Approach for Phased Array Measurements and Noise Control of Landing Gears**. 2005. Tese (Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering) - Virginia Polytechnic Institute and State University, EUA.
- [34] DOUGHERTY, R. P. Beamforming in Acoustic Testing. In: MUELLER, T.S. **Aeroacoustic Measurements**. Springer-Verlag, New York, 2002. p. 62-97.
- [35] UNDERBRINK, J.R. Aeroacoustic Phased Array Testing in Low Speed Wind Tunnel. In: MUELLER, T.S. **Aeroacoustic Measurements**. Springer-Verlag, New York, 2002. p. 98-217.
- [36] MOEBS, G.B.; KOOK, H.; DAVIES, P.; BOLTON, J.S. **The Use of Two-Dimensionally Sparse Arrays to Visualize the Sound Field Radiated by a Moving Vehicle, with Application to Motor Vehicle Passby Testing**. In: Proceedings of Noise-Con 98, Ypsilanti, Michigan, April 1998. p. 519-524.
- [37] DÖBLER, D.; HEILMAN, G. **Perspectives of the Acoustic Camera**. In: Proceedings of the 34th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [38] CHRISTENSEN, J.J.; HALD, J. **Beamforming**. In: B & K Technical Review No. 1 (2004). Brüel and Kjær Sound and Vibration Measurement A/S, Nærum, Denmark, 2004.

- [39] DEBLAUWE, F.; JANSEN, K.; ROBIN, M. **Extending the Usability of Near-field Acoustic Holography and Beamforming by Using Focalization**. In: The 14th International Congress on Sound and Vibration, Cairns, Australia, July 2007.
- [40] SONG, W. **Sound quality metrics mapping using beamforming**. In: The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Prague, Czech Republic, Aug. 2004.
- [41] JUHL, P.M.; PETERSON, S.O.; HALD, J. **Localizing sound sources in 3-Dspace using spherical haronic beamforming**. In: Proceedings of the 34th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [42] MARROQUIN, M.; FRAZER, T.; HADDAD, K.; NEWTON Jr, G. **In-vehicle panoramic noise source mapping**. In: SAE Noise and Vibration Conference and Exhibition, Grand Traverse, MI, USA, 2007, SAE technical paper 2007-01-2273.
- [43] BLACKSTOCK, D.T. **Fundamentals of Physical Acoustics**. John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [44] WILLIAMS, E.G. **Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography**. Academic Press, London, 1999.
- [45] VEEN, B.D.V.; BUCKLEY, K.M. **Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering**. In: IEEE Acoustics, Speech and Signa Processing Magazine 4-24, April 1988.
- [46] DOUGHERTY, R.P. **Advanced Time-domain Beamforming Techniques**. In: 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, Manchester, United Kingdom, May 2004, AIAA paper 2004-2955.
- [47] BENDAT, J.S.; PIERSOL, A.G. **Random Data Analysis and Measurement Procedures**. 3rd Edition, John Wiley and Sons, New York, 2000.
- [48] BARTLETT, M.S. **Smoothing periodograms from time series with continuous spectra**. In: Nature, 161:686-687, 1948.
- [49] HARRIS, F.J. **On the use of windows for harmonic analysis with the Discrete Fouier Transform**. In: Proceeding of the IEEE, Vol.66, No.1, p. 51-83, 1978.
- [50] WANG, Y.; LI, J.; STOICA, P.; SHEPLAK, M.; NISHIDA, T. **Wideband RELAX and wideband CLEAN for aeroacoustic images**. In: J. Acoust. Soc. Am. Vol. 115, No. 2, Feb. 2004.
- [51] CHRISTENSEN, J.J.; HALD, J. **Improvements of the cross spectral beamforming**. In: Proceedings of the 32th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Seogwipo, Korea, 25-28 August, 2003.
- [52] HUMPHREYS Jr., W.H.; BROOKS, T.F.; HUNTER Jr., W.W.; MEADOWS, K.R. **Design and Use of Microphone Directional Arrays for Aeroacoustic Measurements**. In: AIAA Paper 98-0471, 36th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, Jan. 1998.

- [53] STEINBERG, B.D. **Principles of Aperture and Array System Design**. John Wiley and Sons, New York, 1976.
- [54] MOSHER, M. **Phased Arrays for Aeroacoustic Testing: Theoretical Development**. In: Proceedings of the 2nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, State College, PA, May 1996, AIAA paper 96-1713.
- [55] BOONE, M.M. **Design and Development of a Synthetic Acoustic Antenna for Highly Directional Sound Measurements**. 1987. Tese (Doctor of Philosophy) - Delft University of Technology, Netherland.
- [56] NI 9233 Operating Instructions and Specifications, National Instruments Corp., Austin, USA, 2008. Disponível em <http://www.ni.com/manuals>.
- [57] NI cDAQ 9172 User Guide and Specifications, National Instruments Corp., Austin, USA, 2008. Disponível em <http://www.ni.com/manuals>.
- [58] FRADEN, J. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications**. 3rd ed., Springer-Verlag, New York, 2004.
- [59] TUSS, J.R. **Nearfield acoustical holography microphone array development**. In: Proceedings of the 35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Honolulu, Hawaii, USA, 3-6 December 2006.
- [60] ZMIJEVSKI, T.R.L. **Desenvolvimento da técnica de técnica de beamforming para o mapeamento de fontes de ruído não-estacionários e em movimento**. Qualificação de Doutorado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, 21 de Setembro, 2006.
- [61] HALD, J.; CHRISTENSEN, J.J. **A class of optimal broadband based array geometries designs for easy construction**. In: Proceedings of the 31th International Congress and Exposition of Noise Control Engineering, Dearborn, MI, USA, Aug. 2002.
- [62] KOOK, H.; DAVIES, P.; BOLTON, J.S. **The Design and Evaluation of Microphone Arrays for the Visualization of Noise Sources on Moving Vehicles**. In: Proc. of the 1999 Noise and Vibration Conference, 1999, SAE technical paper 1999-01-1742.
- [63] UNDERBRINK, J.R.; DOUGHERTY, R.P. **Array Design for Non-Intrusive Measurement of Noise Sources**. In: Proc. of Noise-Con 96, Noise Control Foundation, New York, Vol. 2, Sept.29-Oct2, p. 757-762, 1996.
- [64] KOOK, H.; MOEBS, G.B.; DAVIES, P.; BOLTON, J.S. **An Efficient Procedure for Visualizing the Sound Field Radiated by Vehicles During Standardized Passby Tests**. In: Proceedings of the 1999 Noise and Vibration Conference, 1999, SAE technical paper 1999-01-1741.
- [65] HOPKINS, C. **Sound Insulation**. Elsevier Press, 2007.
- [66] HALD, J. **Estimation of the Partial Area Sound Power Data with Beamforming**. In: Proceedings of the 34th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Internoise 2005, Rio de Janeiro, Brasil, Aug. 2005.



## Apêndice A – Códigos em LabVIEW

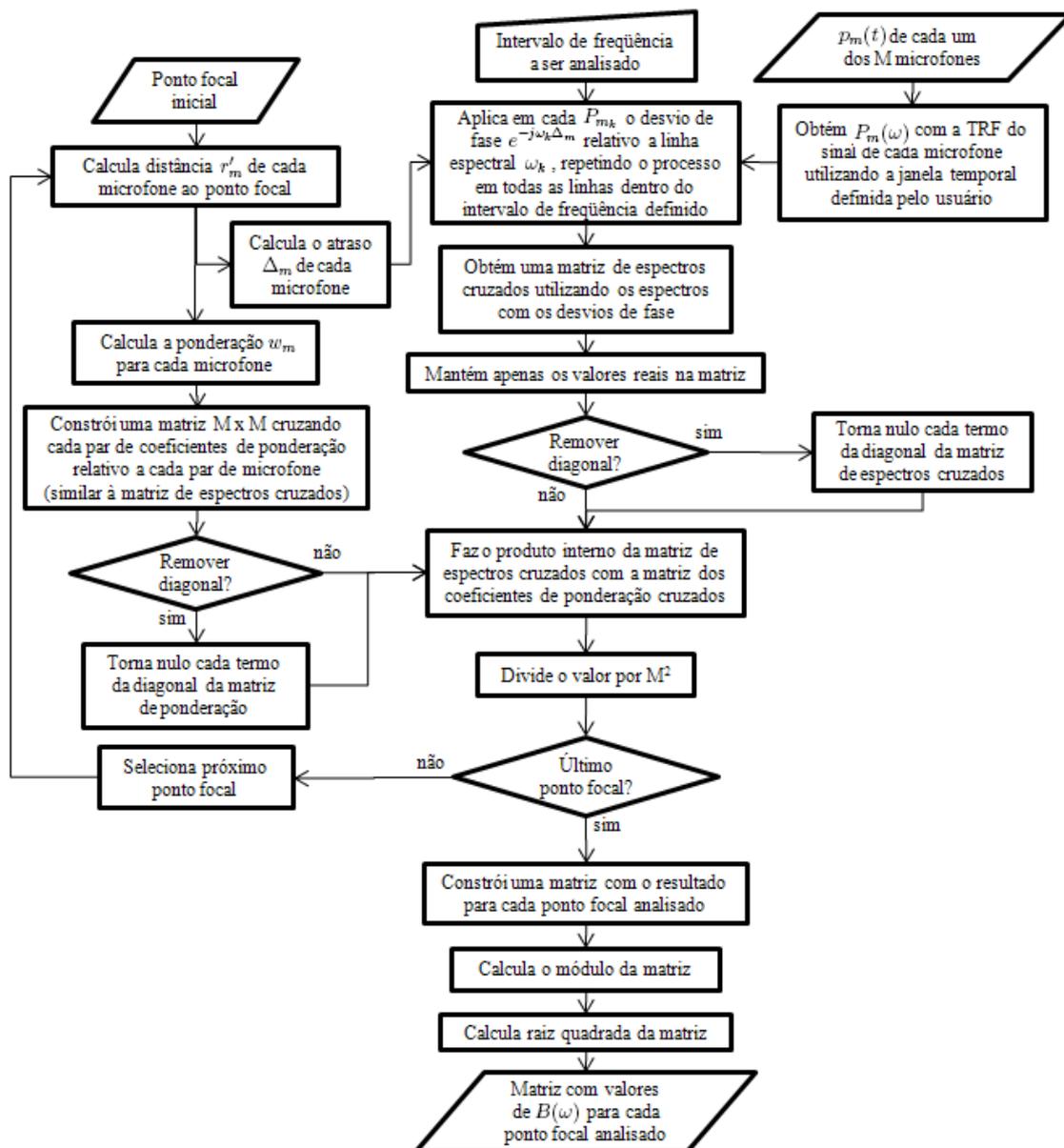


Figura A.1: Fluxograma que descreve o algoritmo disponível no NI MAS para implementar o processamento de Beamforming no domínio da frequência.

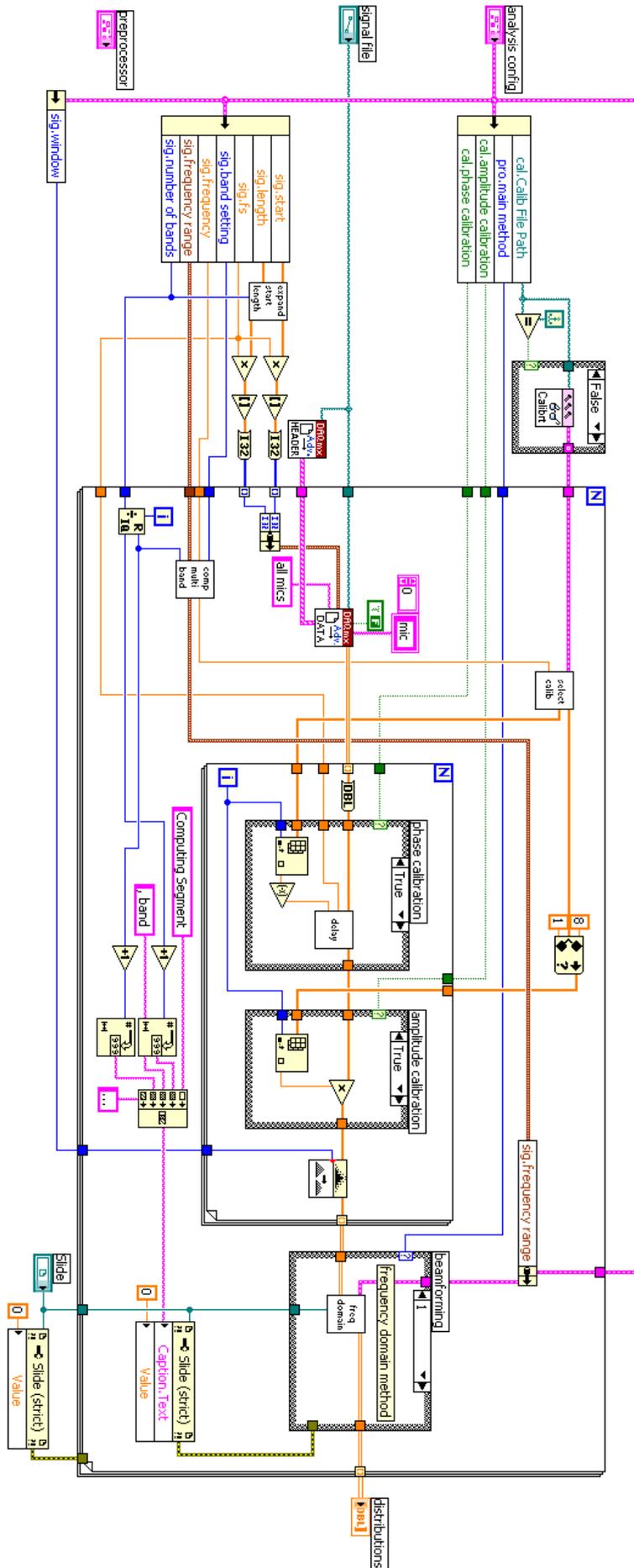


Figura A.2: Diagrama de blocos em LabVIEW com a rotina para o processamento dos dados e a análise de Beamforming.

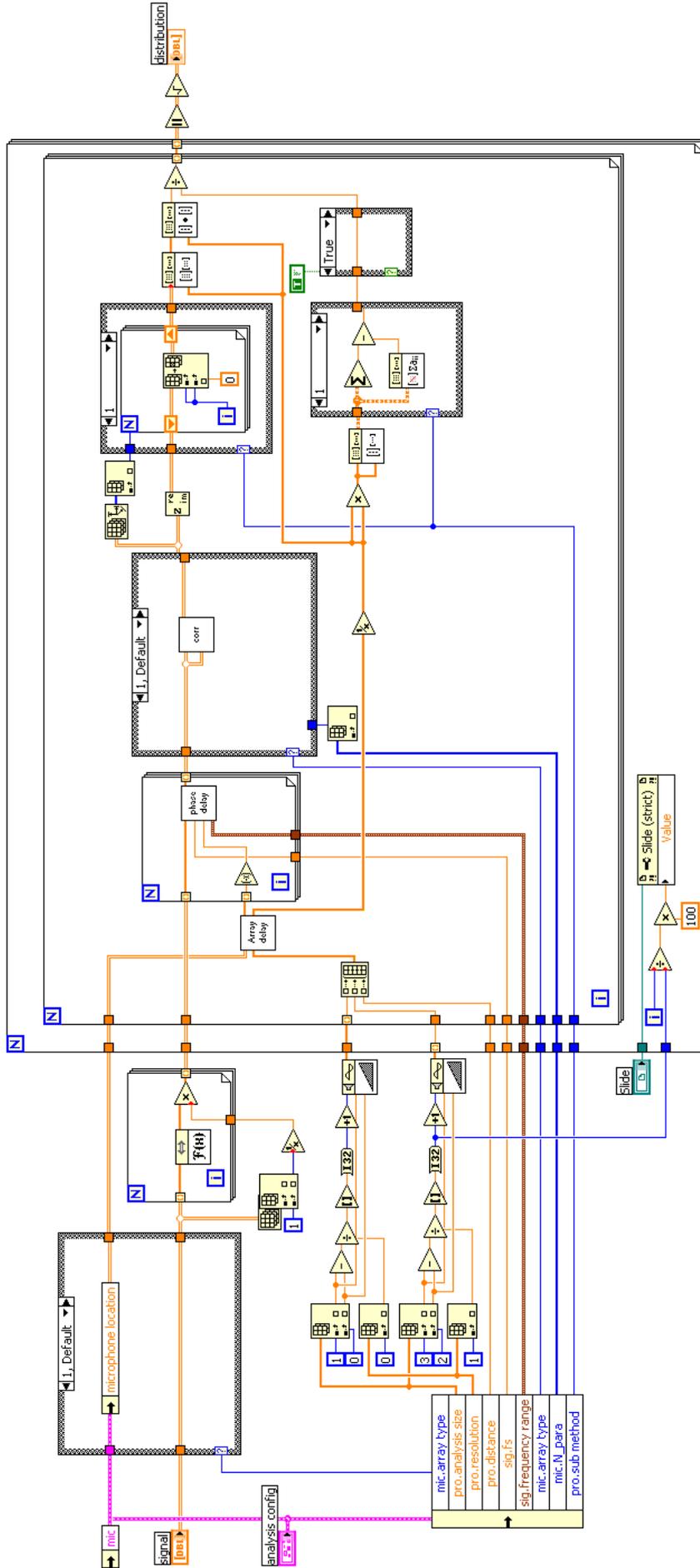


Figura A.3: Diagrama de blocos em LabVIEW apresentando detalhes da implementação do algoritmo de Beamforming utilizando o método no domínio da frequência, incluindo também a subrotina para a remoção da diagonal da matriz de espectros cruzados.



## Apêndice B – Configuração do arranjo

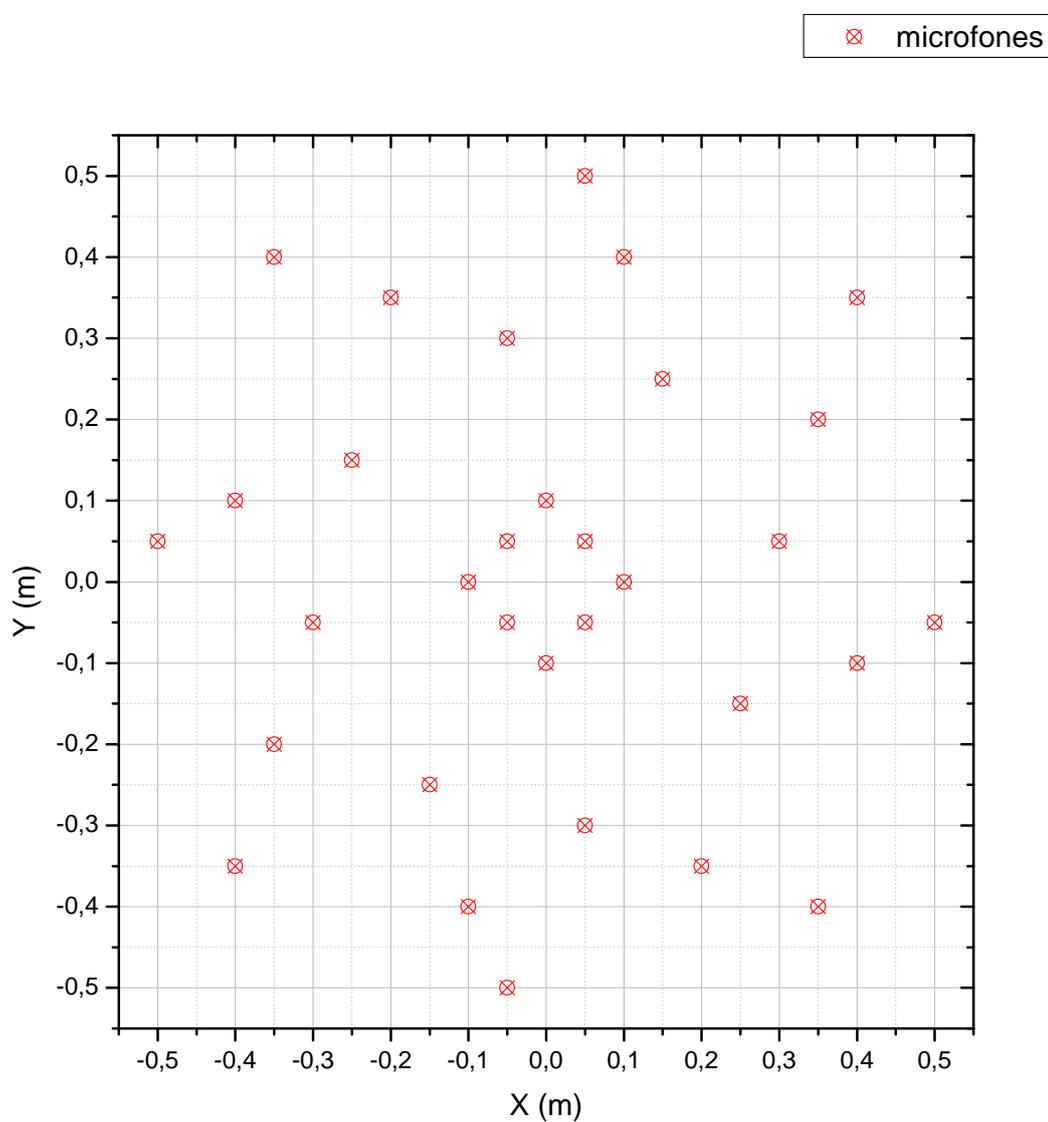


Figura B.1: Visualização das posições utilizadas na geometria de espirais múltiplas.

Tabela B.1: Coordenadas de cada microfone na geometria de espirias múltiplas.

	Coordenada em X	Coordenada em Y
Microfone 1	0,10	0,00
Microfone 2	0,05	0,05
Microfone 3	0,00	0,10
Microfone 4	-0,05	0,05
Microfone 5	-0,10	0,00
Microfone 6	-0,05	-0,05
Microfone 7	0,00	-0,01
Microfone 8	0,05	-0,05
Microfone 9	0,15	0,25
Microfone 10	-0,05	0,30
Microfone 11	-0,25	0,15
Microfone 12	-0,30	-0,05
Microfone 13	-0,15	-0,25
Microfone 14	0,05	-0,30
Microfone 15	0,25	-0,15
Microfone 16	0,30	0,05
Microfone 17	0,10	0,40
Microfone 18	-0,20	0,35
Microfone 19	-0,40	0,01
Microfone 20	-0,35	-0,20
Microfone 21	-0,10	-0,40
Microfone 22	0,20	-0,35
Microfone 23	0,40	-0,10
Microfone 24	0,35	0,20
Microfone 25	0,05	0,50
Microfone 26	-0,35	0,40
Microfone 27	-0,50	0,05
Microfone 28	0,40	-0,35
Microfone 29	-0,05	-0,50
Microfone 30	0,35	-0,40
Microfone 31	0,50	-0,05
Microfone 32	0,40	0,35

## Apêndice C – Objetos analisados

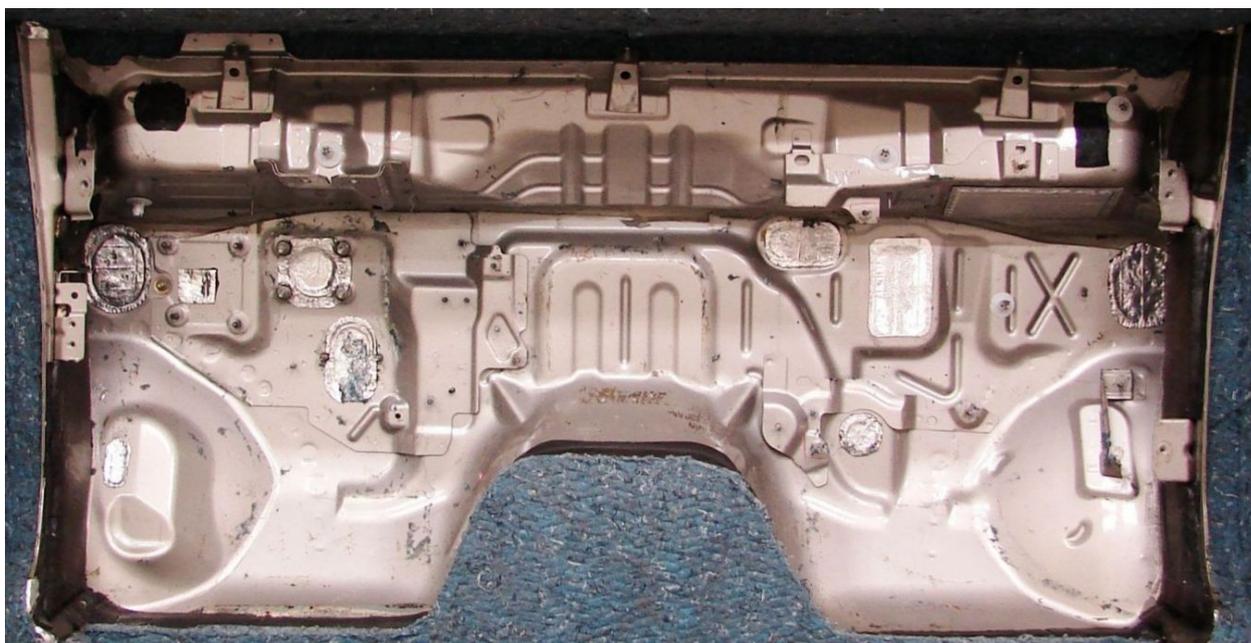


Figura C.1: Detalhes da placa corta-fogo com passagens seladas analisada na aplicação apresentada na Seção 6.2.



Figura C.2: Detalhes da região do compartimento do motor analisado na aplicação apresentada na Seção 6.3.

# Anexo A – Informações de fabricantes

## Panasonic

## Microphone Cartridges

### Omnidirectional Back Electret Condenser Microphone Cartridge

Series: **WM-61A**  
**WM-61B** (pin type)



■ **Features**

- Small microphones for general use
- Back electret type designed for high resistance to vibrations, high signal-to-noise ratio
- High sensitivity type
- Microphone with pins for flexible PCB (WM-61B type)

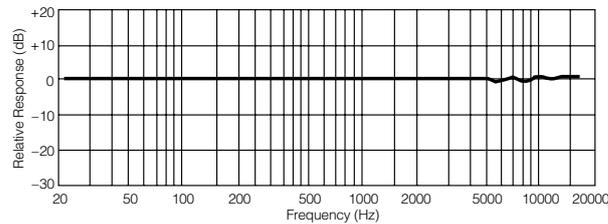
■ **Sensitivity**

$V_s = 2.0V$	$-35 \pm 4dB$
$R_L = 2.2k\Omega$	

■ **Specifications**

Sensitivity	$-35 \pm 4dB$ (0db = 1V/pa, 1kHz)
Impedance	Less than 2.2 k $\Omega$
Directivity	Omnidirectional
Frequency	20–20,000 Hz
Max. operation voltage	10V
Standard operation voltage	2V
Current consumption	Max. 0.5 mA
Sensitivity reduction	Within $-3$ dB at 1.5V
S/N ratio	More than 62 dB

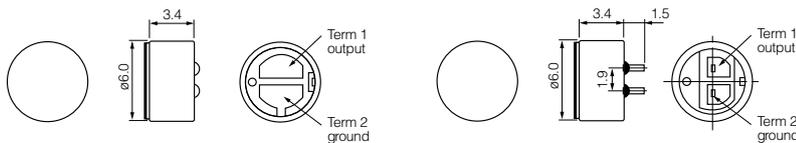
■ **Typical Frequency Response Curve**



■ **Dimensions in mm (not to scale)**

WM-61A

WM-61B



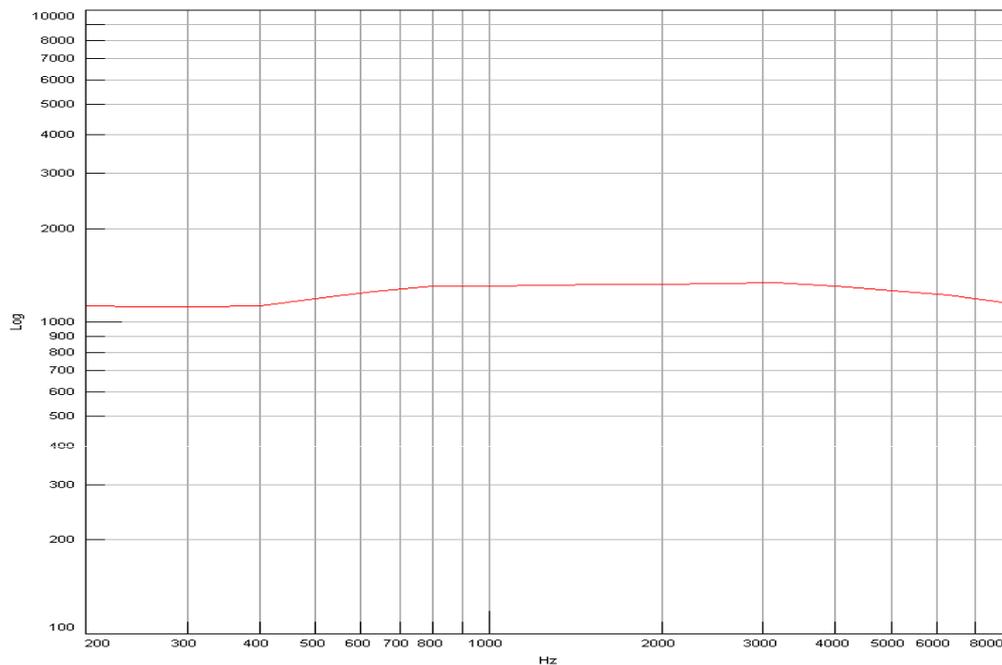
Design and specifications are subject to change without notice. Ask factory for technical specifications before purchase and/or use. Whenever a doubt about safety arises from this product, please contact us immediately for technical consultation.

Figura AA.1: Especificações das cápsulas de eletreto WM-61A utilizadas nos microfones.

**LMS Qsources**  
**Mid Frequency Volume Source**



**Sensitivity sheet\***



Unit : sn 5043  
 Sensitivity\*\* : 1271,00 (m3/s2)/Volt  
 Directivity : +- 0.5 dB at 200 Hz  
 : +- 3.0 dB at 8000 Hz  
 Date : 22-08-2006

\* Voltage sensitivity versus frequency of the signal from the volume acceleration sensor.

\*\*Frequency averaged RMS acceleration sensitivity value between 200 and 8000 Hz.

Figura AA.2: Informações técnicas fornecidas pelo fabricante da fonte sonora de referência.