

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
SANTA CATARINA**

**DIOGO SANCHES**

**AVALIAÇÃO DE ERROS DE  
POSICIONAMENTO DE  
MICROFONES E INFLUÊNCIA DA  
TEMPERATURA E UMIDADE  
RELATIVA NA TÉCNICA DE  
*BEAMFORMING***

**FLORIANÓPOLIS**

**2013**



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

**AVALIAÇÃO DE ERROS DE POSICIONAMENTO DE  
MICROFONES E INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E  
UMIDADE RELATIVA NA TÉCNICA DE  
*BEAMFORMING***

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

**DIOGO SANCHES**

Florianópolis, Julho de 2013



**AVALIAÇÃO DE ERROS DE POSICIONAMENTO DE  
MICROFONES E INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E  
UMIDADE RELATIVA NA TÉCNICA DE  
*BEAMFORMING***

**DIOGO SANCHES**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de concentração Vibrações e Acústica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Samir Nagi Yoursi Gerges, Ph.D.  
Orientador

---

Júlio César Passos, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Banca Examinadora:

---

Carlos Roberto Ilário da Silva, Dr. Eng.  
Presidente

---

Erasmio Felipe Vergara Miranda, Dr. Eng.

---

Júlio Apolinário Cordioli, Dr. Eng.



## **DEDICATÓRIA**

À meus pais Silvana e Aldo e aos  
meus irmãos Manuela e Lorenzo.



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família pelo apoio, amor, exemplo e incentivo em todas as novas etapas da vida.

Ao meu orientador de mestrado, Professor Samir Nagi Yousri Gerges, pela oportunidade, paciência e ótimos ensinamentos que com certeza levarei para a vida toda.

Ao William D'Andrea Fonseca por todo o apoio, ensinamentos e conselhos.

Ao João Paulo Ristow por toda a ajuda nos *softwares* e nas medições.

Ao Laboratório USICON (Laboratório de Usinagem e Comando Numérico) por todo o suporte na fabricação e usinagem das peças utilizadas no novo sistema de medição.

Ao Laboratório POLO (Laboratório de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica) por ceder a câmara de variação de temperatura e umidade relativa.

A todas as pessoas do LVA (Laboratório de Vibrações e Acústica) que de alguma forma ajudaram neste trabalho.



Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

**AVALIAÇÃO DE ERROS DE POSICIONAMENTO DE  
MICROFONES E INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E  
UMIDADE RELATIVA NA TÉCNICA DE  
BEAMFORMING**

**Diogo Sanches**

Julho / 2013

Orientador: Samir Nagi Yoursi Gerges, Ph.D..

Área de Concentração: Vibrações e Acústica.

Palavras-chave: *Beamforming*; erros de posicionamento dos microfones; temperatura; umidade relativa.

Número de Páginas: 266

Existe uma pressão contínua das pessoas e autoridades para a redução dos níveis de ruído das mais diversas áreas. Em muitos casos as fontes de ruído são bem conhecidas e as soluções para a redução de ruído podem ser aplicadas. Porém, em diversas situações, a origem do ruído não pode ser determinada. Para isto utilizam-se técnicas de visualização de campo acústico, sendo uma dessas técnicas o *beamforming*. O *beamforming* é capaz de identificar as fontes sonoras com a utilização de uma matriz de microfones, podendo ser aplicado em campo próximo ou campo distante. Este trabalho visa identificar as influências dos erros de posicionamento dos microfones e as influências da temperatura e umidade relativa nas medições. Para isto, o nível de pressão sonora, os mapas de *beamforming*, a correlação de resposta entre a matriz correta e a matriz com erros de posição, a faixa dinâmica e a largura de lóbulo para diversas perturbações e diversas frequências foram avaliados e comparados.



Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanical Engineering.

**EVALUATION OF MICROPHONE PLACEMENT  
ERRORS AND INFLUENCE OF TEMPERATURE AND  
RELATIVE HUMIDITY IN THE TECHNIQUE OF  
BEAMFORMING**

**Diogo Sanches**

Jul / 2013

Advisor: Samir Nagi Yoursi Gerges, Ph.D..

Area of Concentration: Acoustic and Vibration.

Keywords: Beamforming; positioning errors of the microphones, temperature, relative humidity.

Number of pages: 266

There is a continuous pressure from people and authorities to reduce noise levels from several areas. In many cases, the noise sources are well known and solutions for noise reduction can be applied. However, in many situations, the noise source can not be determined. With this purpose, it is used sound field visualization techniques, being one of these techniques the beamforming. The beamforming is able to identify the sound source using an array of microphones, which can be applied in the near field or far field. This dissertation aims to identify the influence of microphones positioning errors and the influence of temperature and relative humidity in the measurements. With this aim, the sound pressure level, the beamforming maps, the correlation between the correct matrix array and the positioning errors matrix array, dynamic range and lobe wide for several disturbances and frequencies were evaluated and compared.



## SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	xxi
Lista de Tabelas .....	xlii
Nomenclatura .....	xlviii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Som e Ruído .....	1
1.2 Técnicas de Visualização do Campo Acústico .....	1
1.3 Objetivos e Contribuições .....	4
1.3.1 Objetivos Específicos .....	4
1.4 Organização do Trabalho .....	5
1.5 História do <i>beamforming</i> acústico .....	6
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>9</b>
2.1 Pressão Sonora Para Ondas Esféricas .....	9
2.2 Algoritmos de <i>Beamforming</i> .....	11
2.2.1 Algoritmo Clássico no Domínio do Tempo .....	12
2.2.2 Algoritmo Clássico no Domínio da Frequência .....	14
2.3 <i>Array</i> de Medição .....	17
2.3.1 Padrão de Resposta de um <i>Array</i> .....	17
2.3.2 Lóbulo Principal e Largura de Feixe .....	19
2.3.3 Lóbulos Laterais .....	20
2.3.4 Nível dos Lóbulos Laterais e Faixa Dinâmica .....	21
2.3.5 Média do Nível dos Lóbulos Laterais .....	21
2.3.6 Resolução .....	21
2.3.7 Máximo Nível dos Lóbulos Laterais .....	25
2.3.8 Lóbulos Espelhos .....	25
2.3.9 Ganho do <i>Array</i> .....	28
2.4 Revisão bibliográfica - Publicações relacionadas a este trabalho	29
2.5 YARDIBI, 2009 .....	30
2.5.1 Incerteza de posição dos microfones na medição de <i>beamforming</i> .....	30
2.5.2 Influência da temperatura na medição de <i>beamforming</i>	33
2.6 TRAPET, 2009 .....	34
2.7 TRAPET e DIETRICH, 2010 .....	40
2.7.1 Fatores de Incerteza .....	40

3	INSTRUMENTAÇÃO .....	43
3.1	Construção do novo <i>array</i> .....	43
3.2	Definição da Geometria de <i>Array</i> .....	47
3.3	Precisão das peças de encaixe dos microfones .....	50
3.4	Sensor de Temperatura e Umidade .....	51
3.5	Microfones utilizados .....	53
3.6	Plataforma de Aquisição .....	54
4	ERROS DE POSICIONAMENTO DE MICROFONES .....	55
4.1	Estudo dos erros de posicionamento .....	57
4.1.1	Geometria 1 - 1,0 cm .....	59
4.1.2	Mapas de <i>beamforming</i> em uma dimensão .....	62
4.1.3	Correlação .....	65
4.1.4	Comportamento da faixa dinâmica ao variar a frequência .....	70
4.1.5	Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência .....	71
4.1.6	Comportamento da largura de lóbulo ao variar a frequência .....	71
5	EFEITOS DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA .....	73
5.1	Absorção Atmosférica .....	73
5.2	Velocidade do Som .....	77
5.3	Efeitos da temperatura .....	80
5.3.1	Temperatura no valor de 15,0°C .....	81
5.3.2	Temperatura no valor de 30,0°C .....	82
5.3.3	Resposta de <i>beamforming</i> em uma dimensão para a comparação de distintas temperaturas .....	83
5.3.4	Faixa dinâmica - Variação de temperatura .....	86
5.3.5	Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - Variação de temperatura .....	87
5.3.6	Largura de lóbulo - Variação de temperatura .....	88
5.4	Efeitos da umidade relativa .....	90
5.4.1	Umidade relativa no valor de 50,0 % .....	91
5.4.2	Umidade relativa no valor de 80,0 % .....	92
5.4.3	Resposta de <i>beamforming</i> em uma dimensão para a comparação de umidades relativas .....	93
5.4.4	Faixa dinâmica - Variação de umidade relativa .....	96

5.4.5	Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - Variação de umidade relativa . . . . .	97
5.4.6	Largura de lóbulo - Variação de umidade relativa . . . . .	98
6	CONCLUSÕES . . . . .	101
6.1	Trabalhos futuros . . . . .	102
Apêndice A – Medições de Erros de Posicionamento de Microfones . . . . .		103
A.1	Erros de posicionamento de até 1,0 cm . . . . .	104
A.1.1	Geometria 2 - 1,0 cm . . . . .	104
A.1.2	Geometria 3 - 1,0 cm . . . . .	107
A.1.3	Geometria 4 - 1,0 cm . . . . .	110
A.1.4	Geometria 5 - 1,0 cm . . . . .	113
A.1.5	Correlação - 1,0 cm . . . . .	116
A.1.6	Comportamento da faixa dinâmica ao variar a frequência - 1,0 cm . . . . .	117
A.1.7	Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - 1,0 cm . . . . .	119
A.1.8	Comportamento da largura de lóbulo ao variar a frequência - 1,0 cm . . . . .	120
A.2	Erros de posicionamento de até 2,5 cm . . . . .	122
A.2.1	Geometria 1 - 2,5 cm . . . . .	122
A.2.2	Geometria 2 - 2,5 cm . . . . .	125
A.2.3	Geometria 3 - 2,5 cm . . . . .	128
A.2.4	Geometria 4 - 2,5 cm . . . . .	130
A.2.5	Geometria 5 - 2,5 cm . . . . .	133
A.2.6	Mapas de <i>beamforming</i> em uma dimensão - 2,5 cm . . . . .	136
A.2.7	Correlação - 2,5 cm . . . . .	139
A.2.8	Comportamento da faixa dinâmica ao variar a frequência - 2,5 cm . . . . .	140
A.2.9	Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - 2,5 cm . . . . .	142
A.2.10	Comportamento da largura de lóbulo ao variar a frequência - 2,5 cm . . . . .	143
A.3	Erros de posicionamento de até 5,0 cm . . . . .	145
A.3.1	Geometria 1 - 5,0 cm . . . . .	145
A.3.2	Geometria 2 - 5,0 cm . . . . .	148
A.3.3	Geometria 3 - 5,0 cm . . . . .	151
A.3.4	Geometria 4 - 5,0 cm . . . . .	154

A.3.5	Geometria 5 - 5,0 cm . . . . .	157
A.3.6	Mapas de <i>beamforming</i> em uma dimensão - 5,0 cm . . . . .	160
A.3.7	Correlação - 5,0 cm . . . . .	163
A.3.8	Comportamento da faixa dinâmica ao variar a frequência - 5,0 cm . . . . .	164
A.3.9	Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - 5,0 cm . . . . .	166
A.3.10	Comportamento da largura de lóbulo ao variar a frequência - 5,0 cm . . . . .	168
A.4	Erros de posicionamento de até 6,5 cm . . . . .	169
A.4.1	Geometria 1 - 6,5 cm . . . . .	169
A.4.2	Geometria 2 - 6,5 cm . . . . .	172
A.4.3	Geometria 3 - 6,5 cm . . . . .	175
A.4.4	Geometria 4 - 6,5 cm . . . . .	178
A.4.5	Geometria 5 - 6,5 cm . . . . .	181
A.4.6	Mapas de <i>beamforming</i> em uma dimensão - 6,5 cm . . . . .	184
A.4.7	Correlação - 6,5 cm . . . . .	187
A.4.8	Comportamento da faixa dinâmica ao variar a frequência - 6,5 cm . . . . .	188
A.4.9	Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - 6,5 cm . . . . .	190
A.4.10	Comportamento da largura de lóbulo ao variar a frequência - 6,5 cm . . . . .	191
Apêndice B – Medições dos Efeitos da Temperatura e Umidade Relativa		193
B.1	Efeitos da Temperatura . . . . .	193
B.1.1	Ruído de Fundo . . . . .	194
B.1.2	Temperatura no valor de 15,0°C . . . . .	195
B.1.3	Temperatura no valor de 17,5°C . . . . .	196
B.1.4	Temperatura no valor de 20,0°C . . . . .	197
B.1.5	Temperatura no valor de 22,5°C . . . . .	198
B.1.6	Temperatura no valor de 25,0°C . . . . .	199
B.1.7	Temperatura no valor de 27,5°C . . . . .	200
B.1.8	Temperatura no valor de 30,0°C . . . . .	201
B.1.9	Mapas de <i>beamforming</i> em uma dimensão para a comparação de temperaturas . . . . .	202
B.1.10	Faixa dinâmica - Variação de temperatura . . . . .	205
B.1.11	Máximo pico de energia - Variação de temperatura . . . . .	206
B.1.12	Largura de lóbulo - Variação de temperatura . . . . .	207

B.2	Efeitos da umidade relativa . . . . .	208
B.2.1	Umidade relativa no valor de 50,0 % . . . . .	209
B.2.2	Umidade relativa no valor de 55,0 % . . . . .	210
B.2.3	Umidade relativa no valor de 60,0 % . . . . .	211
B.2.4	Umidade relativa no valor de 65,0 % . . . . .	212
B.2.5	Umidade relativa no valor de 70,0 % . . . . .	213
B.2.6	Umidade relativa no valor de 75,0 % . . . . .	214
B.2.7	Umidade relativa no valor de 80,0 % . . . . .	215
B.2.8	Mapas de <i>beamforming</i> em uma dimensão para a comparação de umidades relativas . . . . .	216
B.2.9	Largura de lóbulo - Variação de umidade relativa . . . . .	221
Apêndice C – Definição de Nova Geometria de <i>Array</i> . . . . .		223
C.1	Passo 1 - Definição do grid de raio . . . . .	224
C.2	Passo 2 - Definição da angulação entre os microfones . . . . .	226
C.3	Passo 3 - Evitando redundâncias . . . . .	229
C.4	Rotação do <i>array</i> em torno do seu próprio eixo . . . . .	231
Apêndice D – Absorção Atmosférica . . . . .		235
D.1	Método da Norma SAE . . . . .	235
D.2	Método da Norma ANSI . . . . .	236
D.2.1	Formulação . . . . .	236
D.2.2	Exatidão dos Resultados . . . . .	239
D.2.3	Estudo de Caso para a Cidade de Florianópolis . . . . .	240
D.3	Método de BLACKSTOCK . . . . .	252
Apêndice E – Ultrassom . . . . .		255
Apêndice F – Aspectos Construtivos do <i>Array</i> . . . . .		257



## LISTA DE FIGURAS

1.1	Medição de <i>beamforming</i> no aeroporto de Amsterdam, com o avião modelo <i>Boeing 737-400</i> , sobrevoando a matriz de microfones [5]. . . . .	2
1.2	Mapa de <i>beamforming</i> da medição realizada no aeroporto de Amsterdam, com o avião modelo <i>Boeing 737-400</i> , altitude de 40 m, velocidade de 245 km/h, frequência de 2 kHz [5]. . . . .	3
1.3	Primeiro <i>array</i> de microfones desenvolvido, utilizado na Primeira Guerra Mundial [6]. . . . .	6
2.1	Gráfico de sistema de coordenadas esféricas. . . . .	10
2.2	Diagrama do <i>beamforming</i> clássico no domínio do tempo. . . . .	12
2.3	Diagrama de <i>beamforming</i> clássico no domínio da frequência. . . . .	17
2.4	<i>Padrão de resposta de um array</i> , lóbulo principal, largura de feixe e lóbulos laterais. . . . .	18
2.5	Lóbulo principal, largura de feixe e lóbulos laterais (3D). . . . .	19
2.6	Lóbulo principal, largura de feixe, lóbulos laterais, faixa dinâmica, média do nível dos lóbulos laterais. . . . .	20
2.7	Resolução de <i>beamforming</i> . Descreve a capacidade do <i>array</i> de distinguir fontes que estão em posições próximas. . . . .	22
2.8	Resolução de <i>beamforming</i> . Duas ondas planas incidindo na antena de <i>beamforming</i> [34]. . . . .	23
2.9	Relação entre resolução e ângulo ( $^{\circ}$ ) [34]. . . . .	24
2.10	Máximo nível dos lóbulos laterais. . . . .	25
2.11	<i>Aliasing</i> espacial, lóbulos espelhos e lóbulo principal. . . . .	26
2.12	Lóbulos espelhos. Simulação de uma fonte de 10 kHz pontual no centro a 1 metro de distância do <i>array</i> . . . . .	27
2.13	Resposta da medição em 3 dimensões, onde fica evidenciada a média (preto) e o intervalo de confiança de 95 % (amarelo e vermelho). Perturbação de 1,0 cm, frequência de 5 kHz [22]. . . . .	31

2.14	Faixa central da medição da Figura 2.13 para ilustrar em duas dimensões a média e o intervalo de confiança de 95 %. A linha preta sólida e a linha azul tracejada indicam os valores médios e os valores nominais simulados com a geometria correta, respectivamente. A figura a direita mostra um zoom na região do feixe principal. Perturbação de 1,0 cm, frequência de 5 kHz [22]. . . . .	31
2.15	Histograma da localização de pico em cada um dos <i>arrays</i> com erros de posição em comparação com o <i>array</i> correto. Perturbação de 1,0 cm, frequência de 5 kHz [22]. . . . .	32
2.16	Média e o intervalo de confiança de 95 % na medição de <i>beamforming</i> quando a temperatura varia 3°C [22]. . . . .	33
2.17	Geometria correta (preto) e 20 geometrias erradas (em vermelho) sobrepostas. Geometria espiral com diâmetro de 1,2 m [39]. . . . .	34
2.18	Geometria correta (preto) e 20 geometrias erradas (em vermelho) sobrepostas, aplicando um <i>zoom</i> em um microfone da Figura 2.17 para a melhor observação [39]. . . . .	35
2.19	Resultados de <i>beamforming</i> ao serem variadas as posições de cada microfone. Frequência de 2 kHz, erros de: a) 0,5 cm; b) 1,0 cm; c) 2,0 cm; d) 5,0 cm [39]. . . . .	36
2.20	Resultados de <i>beamforming</i> ao serem variadas as posições de cada microfone. Frequência de 4 kHz, erros de: a) 0,5 cm; b) 1,0 cm; c) 2,0 cm; d) 5,0 cm [39]. . . . .	37
2.21	Resultado de <i>beamforming</i> ao serem variadas as posições de cada microfone. Frequência de 8 kHz, erros de: a) 0,5 cm; b) 1,0 cm; c) 2,0 cm; d) 5,0 cm [39]. . . . .	38
2.22	Correlação cruzada normalizada entre o resultado para diferentes posições de microfones e o resultado original. Localização de <i>beamforming</i> utilizando uma geometria espiral com diâmetro de 1,2 m [39]. . . . .	39
2.23	Coeficiente de correlação cruzada para a variação na posição dos microfones no eixo <i>xy</i> (no plano) [41]. . . . .	41
2.24	Coeficiente de correlação cruzada para a variação na posição dos microfones no eixo <i>z</i> (fora do plano).[41]. . . . .	41
3.1	Projeto do <i>array</i> desenvolvido em <i>software</i> com geometria espiral, barras de sustentação com maior rigidez e maior precisão nas peças de encaixe dos microfones. . . . .	43

3.2	Foto do <i>array</i> construído, com a nova geometria projetada, disposto no interior da câmara semianecoica do LVA, local onde ocorreram as medições de erros de posicionamento dos microfones. É possível observar a geometria projetada.	44
3.3	Detalhe do <i>array</i> construído com 32 microfones de baixo custo (A); 2 microfones de alta performance (B); Sensor de temperatura e umidade relativa (C); 2 acelerômetros na barra central de sustentação dos microfones.	45
3.4	Curvas de aceleração <i>versus</i> tempo da resposta dos acelerômetros ao aplicar ruído branco. A aceleração horizontal mede a vibração no eixo <i>x</i> da barra de sustentação e a aceleração vertical mede a vibração no eixo <i>y</i> . Fonte posicionada a 2,5 m de distância, altura de 1,4 m, temperatura de 24,55°C e umidade relativa de 64,61%. . . . .	46
3.5	Curvas de pressão sonora <i>x</i> frequência do espectro de pressão ao aplicar ruído branco dos microfones de alta performance calibrados. Detalhe de resposta dos dois microfones de alta precisão, de 1/4 de polegada, do fabricante <i>G.R.A.S.</i> Microfone central posicionado no centro do <i>array</i> e o microfone lateral posicionado na barra abaixo do microfone central e distante de 0,2 m. Fonte posicionada a 2,5 m de distância, altura de 1,4 m, temperatura de 24,55°C e umidade relativa de 64,61%. . . . .	47
3.6	Nova geometria utilizada neste trabalho. Diâmetro de 1,2 m, espaçamento de 7,5 cm entre barras, 4,5 rad de angulação entre os "braços" de microfones e ângulo de giro 0°. . . . .	48
3.7	Projeto das peças de encaixe dos microfones mm utilizados nas barras do <i>array</i> . . . . .	50
3.8	Sensor de temperatura e umidade relativa, modelo <i>E11050</i> .	51
3.9	Comparação da temperatura medida no laboratório POLO (ambiente controlado) em relação ao sensor <i>E11050</i> . Gráfico de temperatura <i>x</i> tempo. . . . .	52
3.10	Comparação da umidade relativa medida no laboratório POLO (ambiente controlado) em relação ao sensor <i>E11050</i> . Gráfico de umidade relativa <i>x</i> tempo. . . . .	52

3.11	Detalhe dos microfones utilizados. Cápsula de eletreto, corpo de alumínio de 1/2 polegada e circuito pré-amplificador (da esquerda para a direita). . . . .	53
3.12	Plataforma de aquisição NI cDAQ-9172 com os 8 módulos NI 9233 com 4 canais analógicos de entrada cada [42]. . .	54
4.1	Geração de erros no posicionamento dos microfones no <i>software</i> criado. . . . .	56
4.2	Detalhes da geração de erros no posicionamento dos microfones no <i>software</i> criado. . . . .	56
4.3	Erros de posicionamento dos microfones, perturbação gerada aleatoriamente por <i>software</i> . Geometria 1 - Erros de até 1,0 cm. . . . .	57
4.4	Erros de posicionamento dos microfones, perturbação gerada aleatoriamente por <i>software</i> . Geometria 2 - Erros de até 2,5 cm. . . . .	57
4.5	Erros de posicionamento dos microfones, perturbação gerada aleatoriamente por <i>software</i> . Geometria 3 - Erros de até 5,0 cm. . . . .	58
4.6	Erros de posicionamento dos microfones, perturbação gerada aleatoriamente por <i>software</i> . Geometria 4 - Erros de até 6,5 cm. . . . .	58
4.7	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 1 gerada com até 1,0cm de erro na posição de cada microfone (erros no eixo <i>x</i> ). . . . .	59
4.8	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 1,0cm; Geometria número 1 gerada. . . . .	60
4.9	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 1,0cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 1. Fonte posicionada a 1,4m de altura, 2,5m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 24,7°C e umidade relativa de 64,4%. . . .	61
4.10	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0cm. Frequência de 500 Hz. . . . .	62

4.11	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 1 kHz. . . . .	63
4.12	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 2 kHz. . . . .	63
4.13	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 4 kHz. . . . .	64
4.14	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 8 kHz. . . . .	64
4.15	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 16 kHz. . . . .	65
4.16	Gráfico de correlação para todos os erros de posicionamento dos microfones (1,0 cm; 2,5 cm; 5,0 cm; 6,5 cm), nas frequências de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz. . . . .	68
4.17	Faixa dinâmica média dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento dos microfones ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	70
4.18	Comportamento médio do lóbulo principal dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento dos microfones ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	71
4.19	Largura de lóbulo média dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento dos microfones ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	72
5.1	Absorção atmosférica $x$ frequência para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis. . . . .	74

5.2	Absorção atmosférica $x$ frequência para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis. Temperatura fixa em 21,08°C. . . . .	75
5.3	Absorção atmosférica $x$ frequência para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis. Umidade relativa fixa em 79,17%. . . . .	76
5.4	Medição de <i>beamforming</i> no interior de uma câmara de variação de temperatura e umidade relativa. . . . .	80
5.5	Efeitos da temperatura na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: Ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 15,0°C e umidade relativa fixa em 50,0%. . . . .	81
5.6	Efeitos da temperatura na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: Ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 30,0°C e umidade relativa fixa em 50,0%. . . . .	82
5.7	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 500 Hz. Umidade relativa fixa em 50,0%. . . . .	83
5.8	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 1 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0%. . . . .	84
5.9	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 2 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0%. . . . .	84
5.10	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 4 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0%. . . . .	85
5.11	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 8 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0%. . . . .	85

5.12	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 16 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %. . . . .	86
5.13	Faixa dinâmica ao variar a temperatura, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Umidade relativa fixa em 50,0 %. . . . .	87
5.14	Comportamento do lóbulo principal ao variar a temperatura, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Umidade relativa fixa em 50,0 %. . . . .	88
5.15	Largura de lóbulo ao variar a temperatura, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Umidade relativa fixa em 50,0 %. . . . .	89
5.16	Medição de <i>beamforming</i> no interior de uma câmara de variação de temperatura e umidade relativa. . . . .	90
5.17	Efeitos da umidade relativa. Fonte: Ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Umidade relativa de 50,0 % e temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	91
5.18	Efeitos da umidade relativa. Fonte: Ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Umidade relativa de 80,0 % e temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	92
5.19	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 500 Hz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	93
5.20	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 1 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	94
5.21	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 2 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	94

5.22	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 4 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	95
5.23	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 8 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	95
5.24	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 16 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	96
5.25	Faixa dinâmica ao variar a umidade relativa, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	97
5.26	Comportamento do lóbulo principal ao variar a umidade relativa, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	98
5.27	Largura de lóbulo ao variar a umidade relativa, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	99
A.1	Detalhes da geração de erros no posicionamento dos microfones no <i>software</i> criado. . . . .	103
A.2	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 2 gerada com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone.	104
A.3	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 1,0 cm; Geometria número 2 gerada. . . . .	105
A.4	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 1,0 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 2. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 24,9°C e umidade relativa de 64,3%. . . .	106
A.5	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 3 gerada com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone.	107

A.6	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 1,0 cm; Geometria número 3 gerada. . . . .	108
A.7	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 1,0 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 3. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,0°C e umidade relativa de 64,3 %. . . .	109
A.8	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 4 gerada com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone.	110
A.9	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 1,0 cm; Geometria número 4 gerada. . . . .	111
A.10	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 1,0 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 4. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,0°C e umidade relativa de 64,4 %. . . .	112
A.11	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 5 gerada com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone.	113
A.12	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 1,0 cm; Geometria número 5 gerada. . . . .	114
A.13	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 1,0 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 5. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,0°C e umidade relativa de 64,5 %. . . .	115
A.14	Gráfico de correlação dos erros de posicionamento dos microfones de até 1,0 cm. Gráfico com interpolação entre os dados de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz. . . . .	117
A.15	Faixa dinâmica dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 1,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	118
A.16	Faixa dinâmica média dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 1,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	118

A.17	Comportamento do lóbulo principal dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 1,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	119
A.18	Comportamento médio do lóbulo principal dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 1,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	120
A.19	Largura de lóbulo dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento dos microfones de até 1,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	121
A.20	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 1 gerada com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone.	122
A.21	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 2,5 cm; Geometria número 1 gerada. . . . .	123
A.22	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 2,5 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 1. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,5°C e umidade relativa de 60,5%. . . .	124
A.23	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 2 gerada com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone.	125
A.24	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 2,5 cm; Geometria número 2 gerada. . . . .	126
A.25	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 2,5 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 2. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,6°C e umidade relativa de 60,5%. . . .	127
A.26	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 3 gerada com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone.	128
A.27	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 2,5 cm; Geometria número 3 gerada. . . . .	129

A.28	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 4 gerada com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone.	130
A.29	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 2,5 cm; Geometria número 4 gerada.	131
A.30	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 2,5 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 4. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 24,8°C e umidade relativa de 62,4%.	132
A.31	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 5 gerada com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone.	133
A.32	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 2,5 cm; Geometria número 5 gerada.	134
A.33	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 2,5 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 5. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,0°C e umidade relativa de 62,6%.	135
A.34	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 500 Hz.	136
A.35	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 1 kHz.	137
A.36	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 2 kHz.	137
A.37	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 4 kHz.	138

A.38	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 8 kHz. . . . .	138
A.39	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 16 kHz. . . . .	139
A.40	Gráfico de correlação dos erros de posicionamento dos microfones de até 2,5 cm. Gráfico com interpolação entre os dados de 500 Hz, 1 kHz , 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz. . . . .	140
A.41	Faixa dinâmica dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 2,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	141
A.42	Faixa dinâmica média dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 2,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	141
A.43	Comportamento do lóbulo principal dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 2,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	142
A.44	Comportamento médio do lóbulo principal dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 2,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	143
A.45	Largura de lóbulo dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento dos microfones de até 2,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	144
A.46	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 1 gerada com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone.	145
A.47	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 5,0 cm; Geometria número 1 gerada. . . . .	146

A.48	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 5,0 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 1. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,1°C e umidade relativa de 62,7%. . . .	147
A.49	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 2 gerada com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone.	148
A.50	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 5,0 cm; Geometria número 2 gerada. . . . .	149
A.51	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 5,0 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 2. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,2°C e umidade relativa de 62,2%. . . .	150
A.52	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 3 gerada com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone.	151
A.53	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 5,0 cm; Geometria número 3 gerada. . . . .	152
A.54	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 5,0 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 3. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,2°C e umidade relativa de 62,6%. . . .	153
A.55	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 4 gerada com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone.	154
A.56	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 5,0 cm; Geometria número 4 gerada. . . . .	155
A.57	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 5,0 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 4. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,2°C e umidade relativa de 62,4%. . . .	156
A.58	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 5 gerada com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone.	157

A.59	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 5,0 cm; Geometria número 5 gerada. . . . .	158
A.60	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 5,0 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 5. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,3°C e umidade relativa de 62,5%. . . . .	159
A.61	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 500 Hz. . . . .	160
A.62	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 1 kHz. . . . .	161
A.63	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 2 kHz. . . . .	161
A.64	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 4 kHz. . . . .	162
A.65	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 8 kHz. . . . .	162
A.66	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 16 kHz. . . . .	163
A.67	Gráfico de correlação dos erros de posicionamento dos microfones de até 5,0 cm. Gráfico com interpolação entre os dados de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz. . . . .	164
A.68	Faixa dinâmica dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 5,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	165

A.69	Faixa dinâmica média dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 5,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	166
A.70	Comportamento do lóbulo principal dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 5,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	167
A.71	Comportamento médio do lóbulo principal dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 5,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	167
A.72	Largura de lóbulo dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento dos microfones de até 5,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	168
A.73	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 1 gerada com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone.	169
A.74	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 6,5 cm; Geometria número 1 gerada. . . . .	170
A.75	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 6,5 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 1. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,2°C e umidade relativa de 62,6%. . . .	171
A.76	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 2 gerada com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone.	172
A.77	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 6,5 cm; Geometria número 2 gerada. . . . .	173
A.78	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 6,5 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 2. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,5°C e umidade relativa de 62,5%. . . .	174
A.79	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 3 gerada com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone.	175

A.80	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 6,5 cm; Geometria número 3 gerada. . . . .	176
A.81	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 6,5 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 3. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,5°C e umidade relativa de 62,4%. . . .	177
A.82	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 4 gerada com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone.	178
A.83	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 6,5 cm; Geometria número 4 gerada. . . . .	179
A.84	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 6,5 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 4. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,5°C e umidade relativa de 62,4%. . . .	180
A.85	Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo <i>software</i> criado em MATLAB. Geometria número 5 gerada com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone.	181
A.86	Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 6,5 cm; Geometria número 5 gerada. . . . .	182
A.87	Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 6,5 cm gerado aleatoriamente por <i>software</i> , geometria número 5. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,5°C e umidade relativa de 62,1%. . . .	183
A.88	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 500 Hz. . . . .	184
A.89	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 1 kHz. . . . .	185
A.90	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 2 kHz. . . . .	185

A.91	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 4 kHz. . . . .	186
A.92	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 8 kHz. . . . .	186
A.93	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 16 kHz. . . . .	187
A.94	Gráfico de correlação dos erros de posicionamento dos microfones de até 6,5 cm. Gráfico com interpolação entre os dados de 500 Hz, 1 kHz , 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz. . . . .	188
A.95	Faixa dinâmica dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 6,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	189
A.96	Faixa dinâmica média dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 6,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	189
A.97	Comportamento do lóbulo principal dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 6,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	190
A.98	Comportamento médio do lóbulo principal dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento de até 6,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	191
A.99	Largura de lóbulo dos <i>arrays</i> com erros de posicionamento dos microfones de até 6,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. . . . .	192
B.1	Ruído de fundo no interior da câmara térmica do POLO. . . . .	194

B.2	Efeitos da temperatura na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 15,0°C e umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	195
B.3	Efeitos da temperatura na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 17,5°C e umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	196
B.4	Efeitos da temperatura na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 17,5°C e umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	197
B.5	Efeitos da temperatura na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 22,5°C e umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	198
B.6	Efeitos da temperatura na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 25,0°C e umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	199
B.7	Efeitos da temperatura na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 27,5°C e umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	200
B.8	Efeitos da temperatura na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Temperatura de 30,0°C e umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	201
B.9	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 500 Hz. Umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	202
B.10	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 1 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	203

B.11	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 2 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	203
B.12	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 4 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	204
B.13	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 8 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	204
B.14	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 16 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	205
B.15	Efeitos da temperatura na faixa dinâmica x frequência, com a umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	206
B.16	Efeitos da temperatura no máximo pico de energia x frequência, com a umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	206
B.17	Efeitos da temperatura na largura de lóbulo x frequência, com a umidade relativa fixa em 50,0 % . . . . .	207
B.18	Efeitos da umidade relativa na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Umidade relativa de 50,0 % e temperatura fixa em 20,0°C . . . . .	209
B.19	Efeitos da umidade relativa na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Umidade relativa de 55,0 % e temperatura fixa em 20,0°C . . . . .	210
B.20	Efeitos da umidade relativa na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Umidade relativa de 60,0 % e temperatura fixa em 20,0°C . . . . .	211
B.21	Efeitos da umidade relativa na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Umidade relativa de 65,0 % e temperatura fixa em 20,0°C . . . . .	212

B.22	Efeitos da umidade relativa na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Umidade relativa de 70,0 % e temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	213
B.23	Efeitos da umidade relativa na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Umidade relativa de 75,0 % e temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	214
B.24	Efeitos da umidade relativa na medição de <i>beamforming</i> . Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do <i>array</i> e centralizada. Umidade relativa de 80,0 % e temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	215
B.25	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 500 Hz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	216
B.26	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 1 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	217
B.27	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 2 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	217
B.28	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 4 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	218
B.29	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 8 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	218
B.30	Mapa de <i>beamforming</i> observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 16 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	219
B.31	Efeitos da umidade relativa na faixa dinâmica x frequência. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	220

B.32	Efeitos da umidade relativa no máximo pico de energia x frequência. Temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	221
B.33	Efeitos da umidade relativa na largura de lóbulo x frequência, com a temperatura fixa em 20,0°C. . . . .	222
C.1	Simulação de faixa dinâmica. Passo 1 - Definição do grid de raio. . . . .	224
C.2	Melhor geometria do passo 1 - Definição do grid de raio. . . . .	225
C.3	Angulação entre os microfones externos. . . . .	226
C.4	Simulação de faixa dinâmica. Passo 2 - Definição da angulação entre os microfones. . . . .	227
C.5	Melhor geometria do passo 2 - Definição da angulação entre os microfones. . . . .	228
C.6	Simulação de faixa dinâmica. Passo 3 - Evitando redundâncias. . . . .	229
C.7	Melhor geometria do passo 3 - Evitando redundâncias. . . . .	230
C.8	Simulação de faixa dinâmica. Passo 4 - Rotação do <i>array</i> em torno do seu próprio eixo. . . . .	231
C.9	Melhor geometria simulada. . . . .	232
D.1	Absorção Atmosférica Norma SAE x ISO. . . . .	237
D.2	Ponto triplo da água. . . . .	239
D.3	Estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina. Estação utilizada para coletar dados para o estudo de caso. . . . .	241
D.4	Dados obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis (dados de temperatura). . . . .	242
D.5	Dados obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis (dados de umidade relativa). . . . .	242
D.6	Dados obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis (dados de pressão atmosférica). . . . .	243
D.7	Gráfico de absorção atmosférica x frequência do estudo de caso da cidade de Florianópolis. . . . .	244
D.8	Gráfico de absorção atmosférica x temperatura para a frequência de 20 kHz do estudo de caso da cidade de Florianópolis. . . . .	246

D.9	Gráfico de absorção atmosférica $x$ umidade relativa para a frequência de 20 kHz do estudo de caso da cidade de Florianópolis. . . . .	247
D.10	Gráfico de absorção atmosférica $x$ temperatura para diversas frequências do estudo de caso da cidade de Florianópolis. . . . .	248
D.11	Gráfico de absorção atmosférica $x$ temperatura para diversas frequências do estudo de caso da cidade de Florianópolis. . . . .	249
D.12	Gráfico de absorção atmosférica $x$ umidade relativa para diversas frequências do estudo de caso da cidade de Florianópolis. . . . .	250
D.13	Gráfico de absorção atmosférica $x$ umidade relativa para diversas frequências do estudo de caso da cidade de Florianópolis. . . . .	251
E.1	Escala de 26 % de um <i>Boeing 777</i> instalado no túnel de vento da NASA [51]. . . . .	255
F.1	Projeto da construção das peças de encaixe dos microfones.	257
F.2	Microfone no interior da peça de encaixe projetada em <i>software</i> . . . . .	258
F.3	Projeto da construção das peças de encaixe dos microfones na barras de sustentação. . . . .	258
F.4	Detalhe das peças fabricadas no laboratório USICON. . .	259
F.5	Medidas das peças de sustentação dos microfones ( <i>mm</i> ). As peças foram desenvolvidas em <i>software</i> e construídas no laboratório USICON da Universidade Federal de Santa Catarina. . . . .	260

## LISTA DE TABELAS

2.1	Número de microfones $x$ ganho do <i>array</i> (dB). . . . .	29
3.1	Posição dos microfones do novo <i>array</i> em formato espiral. . .	49
4.1	Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 1,0 cm. . . . .	66
4.2	Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 2,5 cm. . . . .	66
4.3	Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 5,0 cm. . . . .	67
4.4	Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 6,5 cm. . . . .	67
4.5	Erros de posicionamento e comprimento de onda para a correlação de 95 %. . . . .	69
4.6	Erros de posicionamento e comprimento de onda para a correlação de 90 %. . . . .	69
5.1	Média dos dados meteorológicos da cidade de Florianópolis. . . . .	74
5.2	Comportamento da velocidade do som ao variar a umidade relativa. . . . .	79
A.1	Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 1,0 cm. . . . .	116
A.2	Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 2,5 cm. . . . .	139
A.3	Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 5,0 cm. . . . .	163
A.4	Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 6,5 cm. . . . .	187
C.1	Posição dos microfones do novo <i>array</i> em formato espiral simulado. . . . .	233
D.1	Absorção Atmosférica Norma SAE $x$ ISO. . . . .	236
D.2	Média dos dados obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina da cidade de Florianópolis. . . . .	243
D.3	Tabela de absorção atmosférica $x$ frequência do estudo de caso da cidade de Florianópolis. . . . .	245



## NOMENCLATURA

### Símbolos Gerais

$\vec{G}$	Vetor de propagação para uma fonte do tipo monopolo em campo livre, eq. (2.17), pág. 16.
$\vec{g}_k$	Vetor de direção, eq. (2.18), pág. 17.
$\vec{k}_1, \vec{k}_2$	Vetores de número de onda, pág. 25.
$\vec{r}$	Posição [m], eq. (2.1), pág. 11.
$\vec{x}$	Posição arbitrária de ponto focal do <i>array</i> [m], eq. (2.8), pág. 14.
$\vec{x}'$	Posição arbitrária da fonte pontual [m], eq. (2.8), pág. 14.
$\vec{x}_m$	Distância entre o centro de coordenadas e o microfone $M$ [m], eq. (2.8), pág. 14.
$A$	Amplitude complexa de pressão sonora [ $\frac{N}{m^2}$ ], eq. (2.2), pág. 11.
$ASL$	Média do nível dos lóbulos laterais, eq. (2.29), pág. 23.
$B$	Amplitude complexa de pressão sonora [ $\frac{N}{m^2}$ ], eq. (2.2), pág. 11.
$B(k, \omega)$	Sinal de saída de <i>beamforming</i> , pág. 25.
$b(t)$	Função <i>beamforming</i> no domínio do tempo, eq. (2.9), pág. 15.
$C$	Constante dependente das características do <i>array</i> , eq. (2.28), pág. 22.
$c$	Velocidade do som [m/s], eq. (2.1), pág. 11.
$C_k$	Matriz de espectros cruzados (CSM), eq. (2.18), pág. 17.
$E[\cdot]$	Valor esperado para uma variável randômica, pág. 30.
$f(r, t)$	Solução da equação da onda, em coordenadas esféricas para um monopolo, eq. (2.13), pág. 16.
$f_{rO}, f_{rN}$	Frequência de relaxação do oxigênio e nitrogênio respectivamente [Hz], eq. (5.1), pág. 77.

$f_s$	Frequência de amostragem do sistema de aquisição [Hz], eq. (2.17), pág. 16.
$FFT$	Transformada Rápida de Fourier, eq. (2.26), pág. 19.
$G_m$	Função de <i>Green</i> , eq. (2.17), pág. 16.
$h$	Concentração molar de vapor de água [%], eq. (5.4), pág. 81.
$h$	Concentração molar de vapor de água [%], eq. (5.3), pág. 81.
$h_r$	Umidade relativa [%], eq. (5.4), pág. 81.
$k$	Número de onda [ $1/m$ ], eq. (2.2), pág. 11.
$LF$	Largura de feixe, eq. (2.28), pág. 22.
$M$	Número total de microfones no <i>array</i> , eq. (2.8), pág. 14.
$P(t)$	Pressão acústica [ $\frac{N}{m^2}$ ], eq. (2.1), pág. 11.
$P_a$	Pressão atmosférica local [kPa], eq. (5.4), pág. 81.
$P_r$	Pressão atmosférica de referência [kPa], eq. (5.4), pág. 81.
$P_{sat}$	Pressão de saturação do vapor [kPa][%], eq. (5.4), pág. 81.
$P_a, P_r$	Pressão atmosférica local e pressão atmosférica de referência [kPa], eq. (5.1), pág. 77.
$P_{sat}$	Pressão de saturação do vapor [kPa], eq. (5.1), pág. 77.
$R(\theta)$	Separação mínima das fontes na direção radial, pág. 26.
$R_k$	Largura do lóbulo principal, pág. 26.
$r'_m$	Distância entre a fonte pontual e o microfone [m], eq. (2.10), pág. 15.
$r'$	Distância entre a fonte pontual e o centro do <i>array</i> [m], eq. (2.10), pág. 15.
$s(t)$	Função no tempo [m], eq. (2.13), pág. 16.
$SNR$	Relação sinal-ruído, pág. 30.
$t$	Tempo [s], eq. (2.1), pág. 11.

$T, T_r$	Temperatura local e temperatura de referência [K], eq. (5.1), pág. 77.
$T_{01}$	Ponto triplo da temperatura isotérmica [K], eq. (5.6), pág. 82.
$T_0$	Constante de tempo, eq. (2.17), pág. 16.
$W$	Padrão de resposta de um <i>array</i> , eq. (2.26), pág. 19.
$w_m$	Fator de ponderação da amplitude do sinal, eq. (2.8), pág. 15.
$z$	Distância até a fonte na direção normal do <i>array</i> [m], eq. (2.28), pág. 22.
<i>CSM</i>	<i>Cross Spectral Matrix</i> , pág. 9.
<i>LSAF</i>	<i>Low Speed Aeroacoustics Facility</i> , pág. 8.
<i>MUSIC</i>	Técnica de <i>beamforming</i> , pág. 8.

### Símbolos Gregos

$\alpha$	Coefficiente de atenuação [dB/m], eq. (5.1), pág. 77.
$\dagger$	Operador Hermitiano, conjugado complexo transposto, eq. (2.18), pág. 17.
$\Delta_m$	Atraso no tempo associado ao sinal de cada microfone, eq. (2.8), pág. 15.
$\lambda$	Comprimento de onda [m], eq. (2.28), pág. 22.
$\omega$	Frequência [rad/s], eq. (2.2), pág. 11.
$\theta, \phi$	Coordenadas esféricas [°], eq. (2.3), pág. 12.

### Operadores Matemáticos

$\frac{\partial^2}{\partial t^2}$	Derivada de segunda ordem em relação ao tempo, eq. (2.2), pág. 11.
$\nabla^2$	Operador Laplaciano, eq. (2.1), pág. 11.
$i$	Número imaginário, eq. (2.2), pág. 11.

### Símbolos Pertencentes ao Apêndice

$B_1, B_2$ e $B_3$	Funções da temperatura [K], eq. (D.15), pág. 331.
$f_0$	Frequência central da banda [Hz], eq. (D.1), pág. 313.
$FE$	Fator de escala, eq. (E.1), pág. 335.
$P_a$	Pressão local[kPa], eq. (D.3), pág. 314.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Som e Ruído

Ruído e som não são sinônimos, o som é uma forma de energia que é transmitida por variações de pressão atmosférica que a orelha humana pode detectar. Definir ruído como som indesejável nem sempre é verdade, pois depende do contexto e da subjetividade. Por exemplo, a sirene de uma ambulância pode soar como ruído para uma pessoa andando na rua, porém para quem a espera, a qualificação é distinta. A subjetividade também entra neste aspecto, pois um som indesejável para algumas pessoas, pode não ser para outras, por diversos fatores. Existem vários elementos que devem ser levados em conta na subjetividade, como: duração, magnitude e as características do som.

A preocupação das autoridades com ruídos de alta intensidade aumentou com o passar dos tempos, com isso foram criadas legislações para regular os níveis de ruído. Exposição a níveis altos de ruído por longo tempo, além de causar nervosismo e irritação às pessoas, causa também perda auditiva. Isto pode ser exemplificado da seguinte forma: quando uma pessoa vai a uma festa com elevados níveis de pressão sonora, e quando volta a sua casa, nota um "zumbido" em sua orelha. Essa perda auditiva temporária pode ser de ordens de 5 a 50 dB (dependendo da exposição), sendo que o tempo de recuperação natural sem o uso de medicamentos pode chegar a uma semana.

## 1.2 Técnicas de Visualização do Campo Acústico

Visando o maior benefício a saúde das pessoas, nota-se que é necessário reduzir os níveis de ruído de equipamentos, máquinas, carros, aviões, entre outros. Porém, para reduzi-lo, é necessário primeiramente conhecê-lo e é neste ponto que as técnicas de visualização do campo acústico podem ajudar. Uma delas é a holografia acústica [2], que estima a reconstrução do campo acústico. Sua medição é desempenhada no campo acústico próximo da fonte, e devido ao fato de ser uma técnica que exige um processo de medição muito refinado e lento, torna-se inviável para algumas aplicações. Existe também a técnica da intensidade acústica [3], em que são feitas várias medições em vários pontos com uma sonda no campo próximo da fonte, também é uma técnica dispendiosa e pouco ágil. E por fim a técnica que será estudada neste

trabalho que é o *beamforming*<sup>1</sup> acústico.

Na localização de fontes de ruído, o *beamforming* tornou-se uma técnica muito atraente, pois ele pode fornecer uma estimativa da distribuição da fonte com uma única medição rápida. O *beamforming* pode ser utilizado para diversas aplicações como, por exemplo, nas indústrias de aviação e automotivas.

O *beamforming* [4] é uma técnica de processamento de sinais na qual se pode obter imagens acústicas através de medições com a utilização de um conjunto de microfones. Através de uma filtragem espaço-temporal a partir dos sinais dos microfones, as ondas provenientes de uma direção desejada são amplificadas, enquanto que as de outras direções são atenuadas mesmo na presença de ruído. De forma diferente das outras técnicas citadas anteriormente, a medição de *beamforming* pode ser rápida e ágil. Um exemplo de uma medição pode ser observada nas Figuras 1.1 e 1.2, que ilustram uma medição de um avião, modelo *Boeing 737-400*, pousando no aeroporto de Amsterdam e um dos seus respectivos resultados [5].

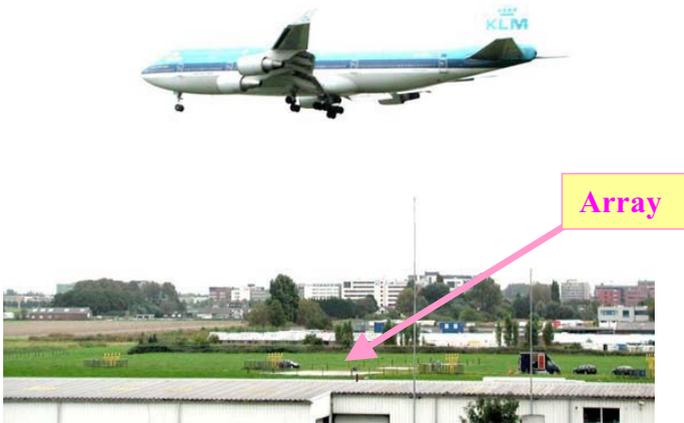


Figura 1.1: Medição de *beamforming* no aeroporto de Amsterdam, com o avião modelo *Boeing 737-400*, sobrevoando a matriz de microfones [5].

---

<sup>1</sup>*Beamforming*, uma tradução livre seria "conformação de feixe".

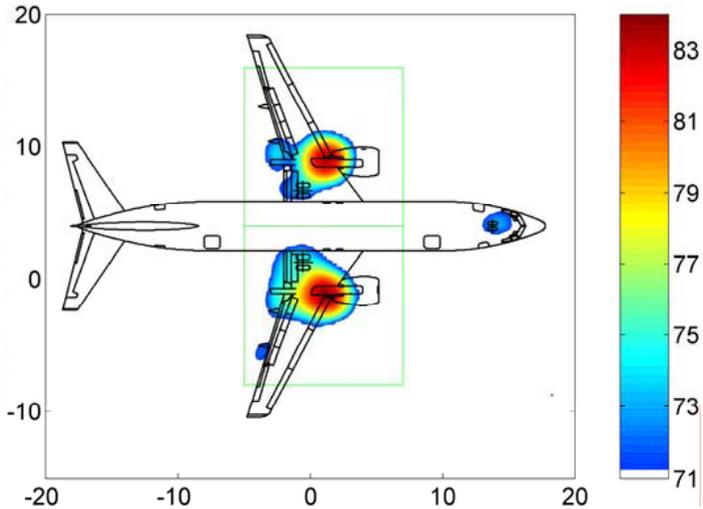


Figura 1.2: Mapa de *beamforming* da medição realizada no aeroporto de Amsterdam, com o avião modelo *Boeing 737-400*, altitude de 40 m, velocidade de 245 km/h, frequência de 2 kHz [5].

Ao observar a Figura 1.2 nota-se que na frequência de 2 kHz o ruído é quase que totalmente dominado pela exaustão dos motores. A correção de Efeito Doppler foi utilizada nessa medição.

Como vantagens do *beamforming* em relação às outras técnicas pode-se citar: possibilidade de utilizar microfones de baixo custo, medição em campo próximo e campo distante, bom desempenho em médias e altas frequências, sendo que as medições em baixas frequências estão limitadas pela quantidade de sensores e a geometria do *array de microfones*<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>Grupo de microfones organizados em posições distintas, também pode ser chamado de antena de microfones ou matriz de microfones.

### 1.3 Objetivos e Contribuições

Os objetivos deste trabalho são o de avaliar a confiabilidade e robustez da técnica frente a erros de posicionamento de microfones e influências da temperatura e umidade relativa nas medições de *beamforming*.

#### 1.3.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Validar o sistema de *beamforming* para fontes estáticas;
- Construção de um novo *array* de medição aprimorando os aspectos construtivos;
- Estudar e definir uma nova geometria para o novo *array* para aplicações em banda larga;
- Estudo da robustez da técnica frente a erros de posicionamento de microfones;
- Estudo e avaliação de *beamforming* ao variar a temperatura e umidade relativa;
- Estudo da absorção atmosférica e velocidade do som frente a condições atmosféricas distintas (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa).

## 1.4 Organização do Trabalho

Esse trabalho é dividido em 6 capítulos, 6 apêndices e 6 anexos.

**Capítulo 1:** Fornece uma introdução sobre o contexto geral do trabalho, bem como a descrição dos objetivos e procedimentos metodológicos.

**Capítulo 2:** É dedicado à revisão bibliográfica de *beamforming* e seus parâmetros, bem como a revisão bibliográfica das influências dos erros de posicionamento dos microfones e os efeitos da temperatura na técnica.

**Capítulo 3:** Fornece detalhes da instrumentação, bem como a construção do novo *array*, detalhes do sensor de temperatura e umidade relativa, dos microfones e do sistema de aquisição.

**Capítulo 4:** Apresenta os efeitos dos erros de posicionamento dos microfones na medição de *beamforming*.

**Capítulo 5:** Mostra a investigação dos efeitos da temperatura e umidade relativa nas medições de *beamforming*.

**Capítulo 6:** Apresenta os resultados, discussões e conclusões.

**Apêndice:** Fornece detalhes das medições dos efeitos dos erros de posicionamento dos microfones, efeitos da temperatura e umidade relativa, definição da nova geometria de *array* utilizada, estudo de absorção atmosférica e velocidade do som e detalhes dos aspectos construtivos do novo *array*.

**Anexos:** Apresenta os dados dos equipamentos utilizados.

## 1.5 História do *beamforming* acústico

Uma das primeiras utilizações do uso de sensores acústicos na identificação de fontes sonoras foi a implementada na primeira guerra mundial pelo Sargento Jean Perrin [6], à direita na Figura 1.3, da França. O dispositivo era constituído de dois arranjos de sensores, contendo seis microfones cada um. Os sensores eram conectados a um duto que era ligado a orelha do operador. Para a identificação de fontes sonoras, o sensor era rotacionado, e quando o operador identificava a máxima pressão sonora, poderia identificar a direção da artilharia inimiga.

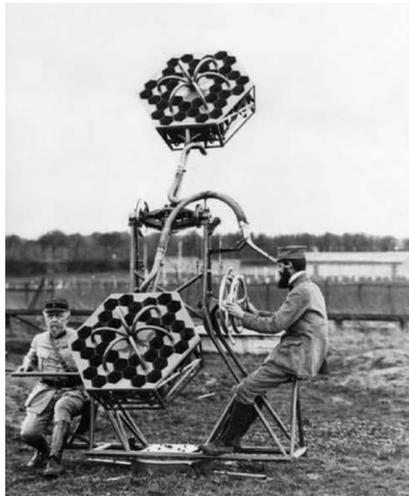


Figura 1.3: Primeiro *array* de microfones desenvolvido, utilizado na Primeira Guerra Mundial [6].

No ano de 1974, Billingsley e Kinns [7], da Universidade de Cambridge, aplicaram um sistema de *beamforming* ao ruído do motor Rolls-Royce/SNECMA (utilizado no Concorde). Foi desenvolvido um sistema utilizando um *array* linear com 14 microfones equidistantes, ligados a um computador com 48 kilobytes de memória e os resultados eram mostrados em uma televisão colorida. Os sinais eram processados em tempo real utilizando a técnica de fontes correlacionadas e não-correlacionadas.

Também no ano de 1974, Soderman e Noble [8], da NASA, desenvolveram um *array* linear para investigar o ruído de uma turbina no interior de um túnel de vento. Com técnicas de *beamforming* os autores conseguiram investigar a rejeição de ruído de fundo na presença de reverberação.

No final da década de 70 começaram os primeiros estudos da utilização da técnica de *beamforming* para fontes em movimento. A técnica foi explorada inicialmente por King e Bechert [9], ambos da Alemanha, utilizando um *array* linear com 15 microfones equidistantes, que foi aplicado na passagem de trens com velocidade acima de 250 km/h. Na década seguinte a técnica foi aprimorada utilizando algoritmos para a remoção do Efeito Doppler, que foi estudado por Barsikow e King [10] e também por Takano, et.al. [11]. O Efeito Doppler é percebido quando carros, trens, aviões, etc., se movimentam com velocidades acima de aproximadamente 30 km/h e emitem um ruído de passagem [12, 13]. Quando a fonte sonora se aproxima, a frequência percebida aumenta, e quando a fonte sonora se afasta, a frequência percebida diminui.

No ano de 1986, Howel [14] da empresa Rolls-Royce, realizou o primeiro ensaio de *beamforming* para a avaliação da passagem de uma aeronave em vôo, o autor encontrou grandes dificuldades com a posição da aeronave em análise, no entanto o ensaio apresentou resultados satisfatórios para os sistemas disponíveis da época.

No ano de 1987, Brooks utilizou um *array* bi-dimensional para medir ruído de um helicóptero em escala no interior de uma câmara anecoica com jato de vento incluindo o efeito de refração do som nas camadas cisalhantes [15].

Em 1997 e 1998, ocorreram testes de *flyover*<sup>3</sup> realizados por Michel, et.al. [16], no aeroporto de Frankfurt. Foram utilizados 111 microfones aplicados a um *array* de dimensões: 8 metros por 8 metros. A altitude do avião em relação ao *array* era em torno de 35 metros a 40 metros. Foram medidos cerca de 170 pousos de aeronaves.

Em 1997 um procedimento de calibração de microfones foi descrito por Mosher, et.al. [17]. Este procedimento consiste no ajuste de fase e magnitude para cada microfone utilizando na calibração uma fonte pontual de referência.

No ano de 1999, Dougherty e Underbrink utilizaram um *array* 2D no túnel de vento LSAF (*Low Speed Aeroacoustics Facility*) da Boeing, onde foram testadas diversas fontes sonoras, utilizando os algoritmos de *beamforming* clássico e MUSIC [18]. Neste caso o *array* utilizado foi projetado para fornecer resultados úteis em uma ampla faixa de frequência.

A partir do ano de 2002, em ambientes altamente ruidosos, técnicas especiais

---

<sup>3</sup>Medição na qual um avião sobrevoa a antena de microfones.

de processamento foram criadas para diminuir os efeitos de ruído de fundo. Uma das técnicas notáveis foi a de remoção da diagonal principal da matriz de espectros cruzados - CSM<sup>4</sup> (se utilizado algoritmo no domínio da frequência), antes de estimá-la, [19, 20, 21]. Com esta técnica pode-se remover o auto-ruído do microfone, visto que este ruído geralmente não é coerente com os sinais da medição propriamente dita.

A partir do ano de 2009 foram realizados alguns estudos levando em conta a incerteza de posição dos microfones e os efeitos da temperatura no sistema. O autor Yardibi [22], avaliou as diferenças nas respostas de *beamforming* ao aplicar uma perturbação de até 1 cm na posição dos microfones. O autor também avaliou as influências da temperatura ao variar até 3°C entre uma medição e outra.

Nos últimos anos, os avanços na área estão principalmente focados na melhora do sistema de pós-processamento com a utilização de diferentes metodologias de algoritmos, que visam principalmente a supressão dos lóbulos laterais.

---

<sup>4</sup>Matriz de espectros cruzados é a tradução livre de *Cross spectral matrix*.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo dar-se-á uma breve introdução sobre princípios básicos do som, como ele se propaga, algumas definições, para poder então aprofundar-se na teoria de *beamforming*.

O som pode ser definido como uma variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo, onde essa menor variação é da ordem de  $2 \times 10^{-5}$  N/m<sup>2</sup>, que corresponde ao limiar de audição [23]. O som pode se propagar em gases (ar), líquidos (água) e sólidos (ferro, concreto), ou seja, em qualquer meio elástico.

### 2.1 Pressão Sonora Para Ondas Esféricas

Considerando que o fluido seja ideal e desprezando a condução térmica entre elementos de volume adjacentes, a propagação de ondas sonoras é considerado isentrópico [24]. Utilizando as equações de continuidade e de quantidade de movimento, obtém-se a equação geral da onda, que é válida para acústica linear, em coordenadas cartesianas [25]:

$$\frac{\partial^2 P(\vec{r}, t)}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 P(\vec{r}, t) = 0, \quad (2.1)$$

onde  $P(\vec{r}, t)$  é a pressão acústica na posição  $\vec{r}$  no instante  $t$ ,  $\nabla^2$  é o operador Laplaciano<sup>1</sup> e  $c$  é a velocidade de propagação da onda.

A solução harmônica da equação da onda plana é dada pela expressão da pressão sonora sob a forma complexa, que é:

$$P = Ae^{i(\omega t - kx)} + Be^{i(\omega t + kx)}, \quad (2.2)$$

onde  $i = \sqrt{-1}$  é o número imaginário,  $A$  é a amplitude complexa de pressão sonora de uma onda plana de frequência  $\omega$  e número de onda  $k = \omega/c$ , propagando-se no sentido positivo de  $x$ ,  $B$  é a amplitude complexa da onda propagando-se no sentido negativo de  $x$ .

---

<sup>1</sup> $\nabla^2 = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ .

A Equação 2.1 pode ser expressa em coordenadas esféricas, a qual oferece um melhor entendimento a respeito das ondas propagantes e é manipulada de forma diferente. Para as ondas em coordenadas esféricas, o operador  $\nabla^2$  (Laplaciano) é dado pela Equação 2.3; as componentes envolvidas estão representadas na Figura 2.1:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}, \quad (2.3)$$

onde:

$$x = r \sin(\theta) \cos(\phi),$$

$$y = r \sin(\theta) \sin(\phi),$$

$$z = r \cos(\theta).$$

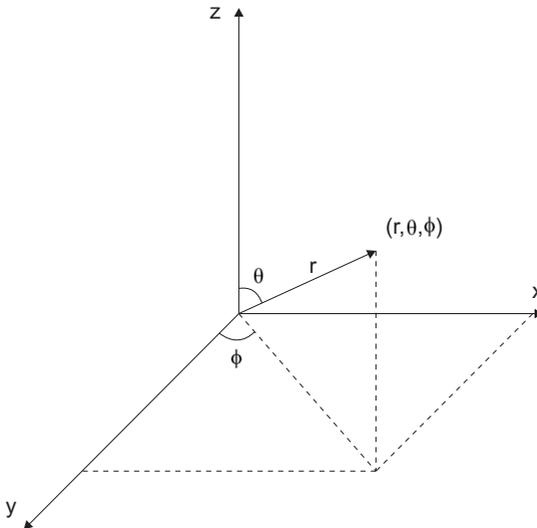


Figura 2.1: Gráfico de sistema de coordenadas esféricas.

Se a onda tem simetria esférica, isto é, se a pressão acústica  $P = P(\vec{r}, t)$  é função do raio e do tempo e independente de  $\theta$  e  $\phi$ , as Equações 2.1 e 2.3, utilizando as equações de continuidade e de quantidade de movimento [25], em coordenadas esféricas tornam-se:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - c^2 \left( \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \right) = 0, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial^2 (rP)}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \left( \frac{\partial^2 (rP)}{\partial r^2} \right). \quad (2.5)$$

Se o produto  $rP$  nessa equação é considerado uma variável simples, a equação tem a mesma forma que a da onda plana (Equação 2.2), e a solução geral é:

$$P(\vec{r}, t) = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)} + \frac{B}{r} e^{i(\omega t + kr)}. \quad (2.6)$$

Considerando um sistema causal, apenas a onda esférica divergente harmônica existe e a representação na forma complexa resulta em:

$$P(\vec{r}, t) = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)}. \quad (2.7)$$

## 2.2 Algoritmos de *Beamforming*

As primeiras técnicas de *beamforming* eram realizadas somando-se sinais com atrasos distintos, de modo a reforçar as contribuições de uma determinada direção, esta técnica é chamada de "atraso-e-soma", também conhecido como "*Beamforming* Clássico". Esta técnica permite processar no domínio do tempo ou da frequência, onde o processamento no domínio da frequência requer maior custo computacional quando analisado em banda larga.

As técnicas mais recentes e mais promissoras estão utilizando o processo de deconvolução algébrica [19, 26]. Este tipo de técnica melhora significativamente a capacidade de "limpar" os mapas de *beamforming*.

### 2.2.1 Algoritmo Clássico no Domínio do Tempo

É uma das formas mais simples de processamento de *beamforming*, na qual supõe-se que as direções com os níveis de ruído máximo indicam a direção das fontes sonoras. Esta técnica é comumente utilizada com um outro método de pós-processamento para melhorar a resposta em relação aos lóbulos laterais e lóbulos espelhos.

O processamento no domínio do tempo não tem limitação de largura de banda, então pode ser eficiente para o processamento em banda larga, especialmente para um *array* de pequena dimensão.

Admite-se que há uma fonte sonora do tipo monopolo  $f(r,t)$  que se encontra na posição  $\vec{x}'$ . São considerados então um total de  $M$  microfones omnidirecionais em um campo livre localizados nas posições:

$$\vec{x}_m, m = 1, 2, \dots, M, \quad (2.8)$$

onde o centro de coordenadas é definido no centro do *array* e  $\vec{x}_m$  é a distância entre o centro de coordenadas e o microfone,  $\vec{x}$  é a posição arbitrária de ponto focal do *array* e  $\vec{x}'$  é a posição arbitrária da fonte pontual. A Figura 2.2 ilustra o método de *beamforming* no domínio do tempo.

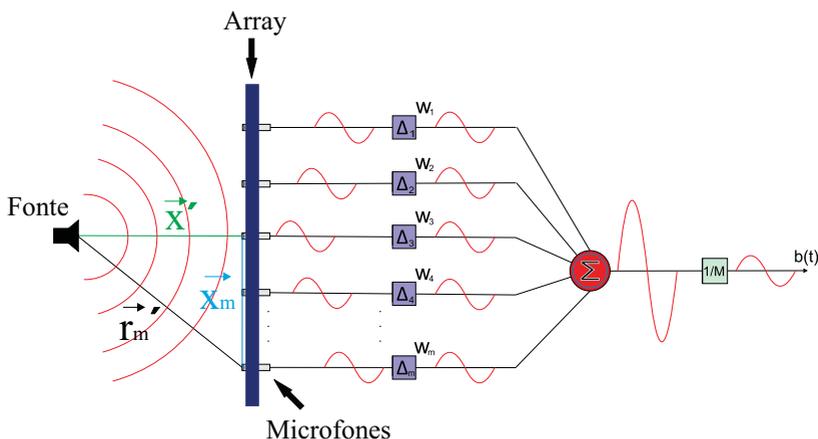


Figura 2.2: Diagrama do *beamforming* clássico no domínio do tempo.

Cada microfone sofre um atraso ou soma no tempo,  $\Delta_m$ , devido ao fato de alguns microfones estarem mais próximos da fonte receberem o sinal antes dos que estão mais longe. Cada transdutor pode ter a amplitude ponderada por um fator  $w_m$ , conforme se queira dar ênfase a uma região específica do *array* (por exemplo, lado esquerdo ou direito), ou se quer utilizar sub-*arrays* dentro da antena. Para que o sinal não seja amplificado em função do número de microfones  $M$ , deve-se normalizar a expressão. Assim, os sinais são somados linearmente, ponderados e normalizados formando a função do *Beamforming* Clássico [4]:

$$b(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m P_m(t - \Delta_m). \quad (2.9)$$

O *array* é focalizado a uma região no espaço, o sinal obtido do  $m$ -ésimo microfone é uma função do tipo  $P_m(r'_m, t)$  com uma ponderação  $w_m$  e um tempo de atraso  $\Delta_m$ , referenciados ao centro do *array*.

A ponderação geralmente é feita para compensar a atenuação das ondas esféricas durante a propagação para cada microfone,

$$w_m = \frac{r'_m}{|\vec{x}'|}, \quad (2.10)$$

onde:

$$r'_m = |\vec{x}_m - \vec{x}'| \quad (2.11)$$

é a distância entre a fonte pontual e um microfone  $m$ .

Os microfones mais distantes da localização do foco precisam ser adiantados, enquanto que os microfones mais próximos precisam ser atrasados no tempo. O tempo de "atraso" é dado pela expressão:

$$\Delta_m = \frac{|\vec{x}'| - r'_m}{c}. \quad (2.12)$$

Considerando a solução da equação da onda, em coordenadas esféricas para um monopolo, Equação 2.7, o sinal  $f(r, t)$  em um ponto arbitrário é dado por:

$$f(r, t) = \frac{s(t - |\vec{x} - \vec{x}'|/c)}{|\vec{x} - \vec{x}'|}, \quad (2.13)$$

onde  $s(t)$  é uma função no tempo. Como  $r'_m = |\vec{x} - \vec{x}'|$  é a distância entre a fonte e um ponto genérico do campo, o sinal recebido pelo microfone  $m$  é:

$$P_m(r'_m, t) = \frac{s(t - r'_m/c)}{r'_m}. \quad (2.14)$$

### 2.2.2 Algoritmo Clássico no Domínio da Frequência

O algoritmo no domínio da frequência requer maior custo computacional quando utilizado em banda larga, porém possui algumas vantagens se comparado ao domínio do tempo, como a possibilidade de redução de lóbulos laterais e lóbulos espelhos [27, 28, 29, 30].

Ele é baseado na propriedade de que um atraso no domínio do tempo corresponde a um desvio de fase no domínio da frequência [31, 32].

$$y(t - T_0) \leftrightarrow Y(\omega)e^{-i\omega T_0}, \quad (2.15)$$

onde  $y(t)$  e  $Y(\omega)$  são os pares da Transformada de Fourier e  $T_0$  é uma constante de tempo. Então a Equação 2.9, no domínio da frequência pode ser escrita na forma:

$$B(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m P_m(\omega) e^{-i\omega \Delta_m}, \quad (2.16)$$

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.

A Equação 2.16 no domínio da frequência, para o  $k$ -ésimo termo, pode ser reescrita na forma discreta como:

$$B_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m P_{m_k} e^{-i\omega_k \Delta_m}, \quad (2.17)$$

onde  $B_k$  é a resposta do  $k$ -ésimo termo de frequência,  $\omega_k = 2\pi f_s k/N$  é a frequência e  $f_s$  é a frequência de amostragem do sistema de aquisição.

A utilização das expressões na forma matricial torna o processamento do algoritmo menos custoso. Depois de alguns passos na formulação matemática chega-se em uma expressão da "resposta em potência do array" [28, 29].

$$|\hat{B}_k|^2 = \frac{g_k^\dagger \hat{C}_k g_k}{M^2}, \quad (2.18)$$

onde  $\vec{g}_k$  é o *vetor de direção*<sup>2</sup> que contém as ponderações e desvios de fase a serem aplicados ao sistema,  $\hat{C}_k$  é a *matriz de espectros cruzados* que contém todas as informações relevantes do campo sonoro adquirido pelo array,  $M$  é o número de microfones e o símbolo  $\dagger$  significa o Hermitiano (conjugado complexo transposto).

O termo  $\vec{g}_k$  é o vetor de direção que contém as ponderações  $w_m$  e os desvios de fase  $\Delta_m$  que serão aplicados ao sinal. Como nas Equações 2.10 e 2.12, ele direciona o array para determinada região do espaço de interesse, então:

$$\vec{g}_k = \begin{pmatrix} w_1 e^{i\omega_k \Delta_1} \\ w_2 e^{i\omega_k \Delta_2} \\ \vdots \\ w_M e^{i\omega_k \Delta_M} \end{pmatrix}. \quad (2.19)$$

O vetor de direção  $\vec{g}_k$  assume um ganho unitário para uma fonte unitária na direção de interesse, então:

$$\vec{g}_k \vec{G} = 1, \quad (2.20)$$

onde  $\vec{G}$  é o *vetor de propagação* para uma fonte do tipo monopolo em campo livre, que aplicando a *Função de Green* de campo livre torna-se:

$$G_m = \frac{e^{-ik|\vec{x}_m - \vec{x}'|}}{4\pi|\vec{x}_m - \vec{x}'|}. \quad (2.21)$$

Da Equação 2.11,  $r'_m = |\vec{x}_m - \vec{x}'|$ , a expressão de  $G_m$  torna-se:

$$G_m = \frac{e^{-ikr'_m}}{4\pi r'_m}. \quad (2.22)$$

---

<sup>2</sup>Vetor de direção é a tradução livre de *steering vector*.

Para maximizar a resposta do *array*, o vetor de direção,  $\vec{g}_k$ , deve ser paralelo ao vetor de propagação,  $\vec{G}$  [26]:

$$\vec{g}_k = \frac{\vec{G}}{\|\vec{G}\|}. \quad (2.23)$$

A *matriz de espectros cruzados* ou *matriz de correlação espacial* é a base para processamentos no domínio da frequência.

$$\hat{C}_k = \begin{pmatrix} C_{11k} & C_{12k} & \cdots & C_{1Mk} \\ C_{21k} & C_{22k} & \cdots & C_{2Mk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{M1k} & C_{M2k} & \cdots & C_{MMk} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

A matriz  $C_k$  contém todas as magnitudes e fases relativas entre todos os microfones, possibilitando assim, a localização do sinal no domínio da frequência.

Portanto, como mencionado na Equação 2.18, a “resposta em potência do *array*” na forma matricial é:

$$|\hat{B}_k|^2 = \frac{\mathbf{g}_k^\dagger \hat{C}_k \mathbf{g}_k}{M^2}. \quad (2.25)$$

A “resposta em pressão do *array*” é a raiz quadrada da “resposta em potência do *array*”, conforme:

$$B_k = \sqrt{|B_k|^2}, \quad (2.26)$$

como ilustrado no diagrama da Figura 2.3.

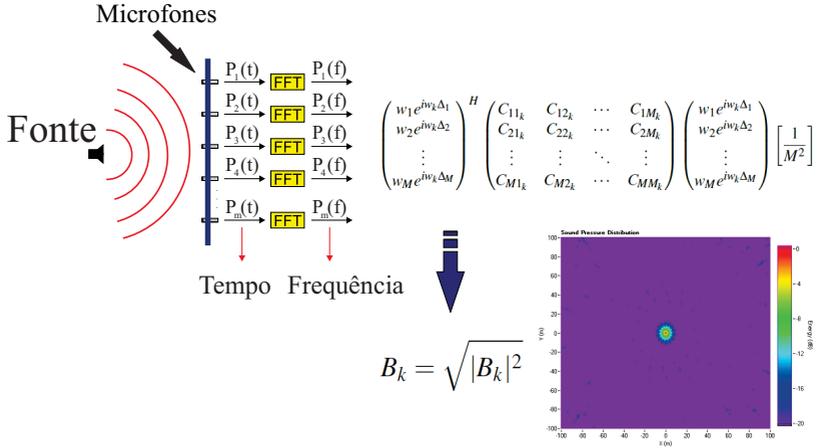


Figura 2.3: Diagrama de *beamforming* clássico no domínio da frequência.

## 2.3 Array de Medição

### 2.3.1 Padrão de Resposta de um Array

O padrão de resposta de um array<sup>3</sup> ( $W$ ) é determinado pelo algoritmo de *beamforming* e pelo formato do array utilizado. O padrão de resposta é uma função da posição da fonte, posição arbitrária de ponto focal e frequência [4]:

$$W(\omega, \vec{x}, \vec{x}') = \sum_{m=1}^M w_m \frac{r'}{r_m} e^{i\frac{\omega}{c} [(r' - r'_m) - (r - r_m)]}, \quad (2.27)$$

onde  $\vec{x}$  e  $\vec{x}'$  denotam o valor assumido e o valor real da posição da fonte,  $r$  e  $r'$  denotam a distância assumida e a distância real entre o centro do array e a fonte,  $r_m$  e  $r'_m$  denotam a distância assumida e a distância real entre o microfone  $m$ -ésimo e a fonte.

<sup>3</sup>Padrão de resposta de um array ( $W$ ) é a tradução livre do termo *Array Pattern*, também é chamado de *aperture smoothing function*.

O *padrão de resposta* é caracterizado por apresentar um lóbulo principal localizado na região de máxima sensibilidade para onde o *array* está direcionado, onde a largura desse lóbulo é chamado de largura de feixe no qual está ligado com a *resolução do array*. Também apresenta lóbulos laterais que são radiações indesejadas, as Figuras 2.4 e 2.5 ilustram esses parâmetros.

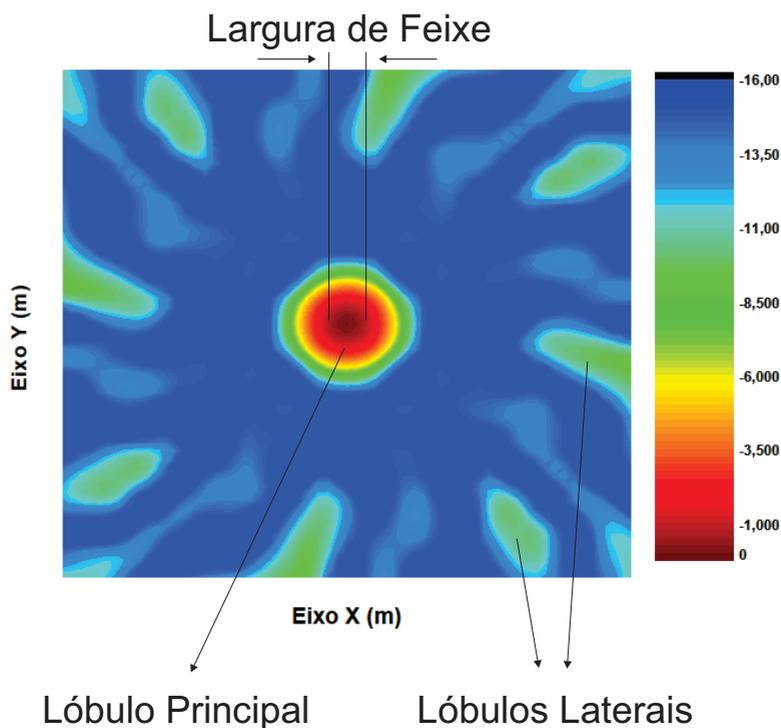


Figura 2.4: *Padrão de resposta de um array*, lóbulo principal, largura de feixe e lóbulos laterais.

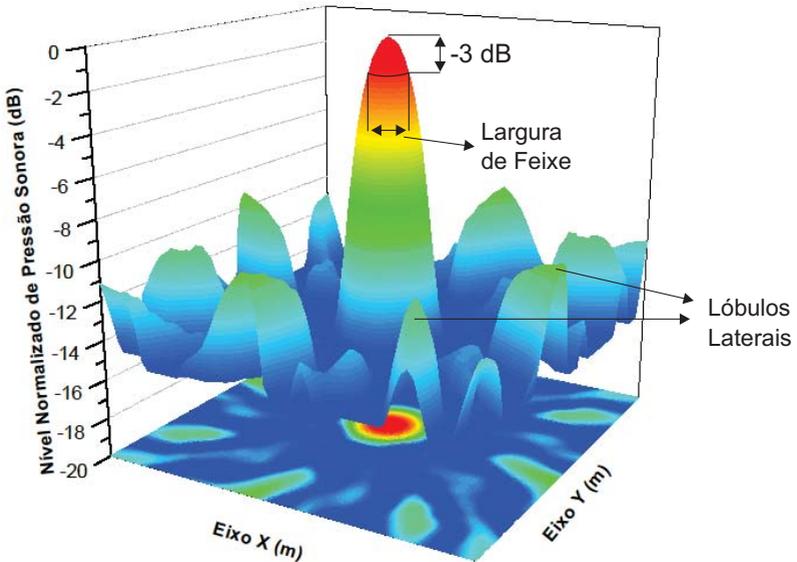


Figura 2.5: Lóbulo principal, largura de feixe e lóbulos laterais (3D).

### 2.3.2 Lóbulo Principal e Largura de Feixe

A largura do lóbulo principal é chamada de *largura de feixe*<sup>4</sup>, e este fator indica o quão bem o sistema é capaz de determinar a direção de propagação das ondas que chegam no *array*.

A largura de feixe é definida como a distância entre os pontos em que a amplitude do lóbulo principal decai  $1/\sqrt{2}$ , ou seja, 3 dB. A Figura 2.6 ilustra a diretividade de um *array* e demonstra como a largura de feixe é determinada a partir do caimento de 3 dB do lóbulo principal.

É importante notar que à medida que a largura de feixe aumenta, a resolução diminui (a resolução será explicada na Seção 2.3.6). A largura de feixe depende das características do *array* e é expressa em função do comprimento de onda e da distância até a fonte, sendo que dada uma aproximação linear, determina-se uma constante  $C$  empírica. A largura de feixe ( $LF$ ) pode então ser representada como:

<sup>4</sup>Largura de Feixe é a tradução livre do termo *Beamwidth*.

$$LF_z = C * \lambda, \quad (2.28)$$

onde  $LF$  é a largura de feixe,  $z$  é a distância até a fonte na direção normal do *array* e  $C$  é a constante dependente das características do *array*.

Observando a Equação 2.28, como  $\lambda = c/f$ , a largura de feixe é inversamente proporcional à frequência, ou seja, a largura do lóbulo principal será mais estreita em frequências mais altas.

### 2.3.3 Lóbulos Laterais

São lóbulos secundários e usualmente representam radiações de direções indesejadas, como demonstrado na Figura 2.6.

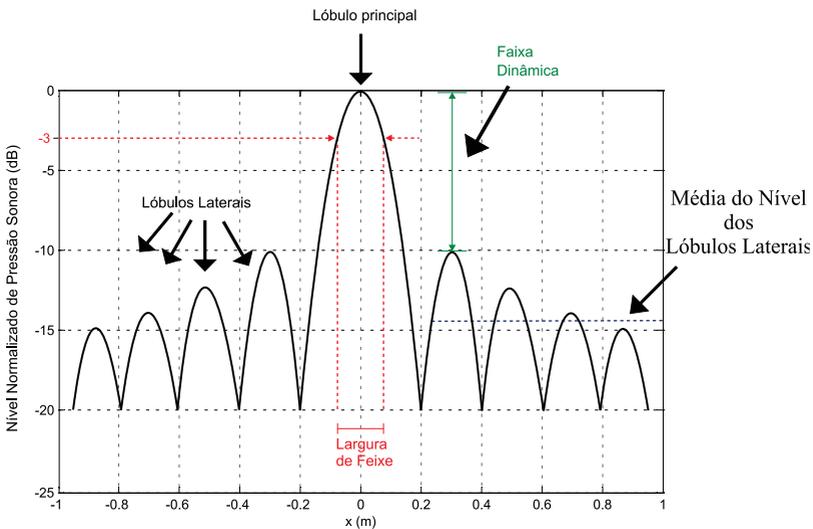


Figura 2.6: Lóbulo principal, largura de feixe, lóbulos laterais, faixa dinâmica, média do nível dos lóbulos laterais.

### 2.3.4 Nível dos Lóbulos Laterais e Faixa Dinâmica

O nível dos lóbulos laterais<sup>5</sup> são menores que o lóbulo principal e uma relação muito importante entre eles, é que a diferença entre a amplitude do lóbulo principal e o maior lóbulo secundário é o que define a *faixa dinâmica*<sup>6</sup> do array, Figura 2.6.

### 2.3.5 Média do Nível dos Lóbulos Laterais

A densidade de potência nos lóbulos laterais é geralmente muito menor do que no feixe principal. A média do nível dos lóbulos laterais é dada por [33]:

$$ASL = 10 \log(1/M), \quad (2.29)$$

onde *ASL* é a *média do nível dos lóbulos laterais*<sup>7</sup> de um array plano e aleatório e *M* é o número de microfones, Figura 2.6. Ou seja, o número de microfones é o parâmetro principal para determinar o nível médio dos lóbulos laterais.

### 2.3.6 Resolução

A resolução no *beamforming* descreve a capacidade do array de distinguir fontes que estão em posições próximas; levando-se em conta o comprimento de onda e a distância entre a fonte e o array, Figura 2.7.

---

<sup>5</sup>Nível dos Lóbulos Laterais é a tradução livre do termo *Sidelobe Level*.

<sup>6</sup>Faixa Dinâmica é a tradução livre do termo *Dynamic Range*.

<sup>7</sup>Média do nível dos lóbulos laterais é a tradução livre do termo *average sidelobe level*.

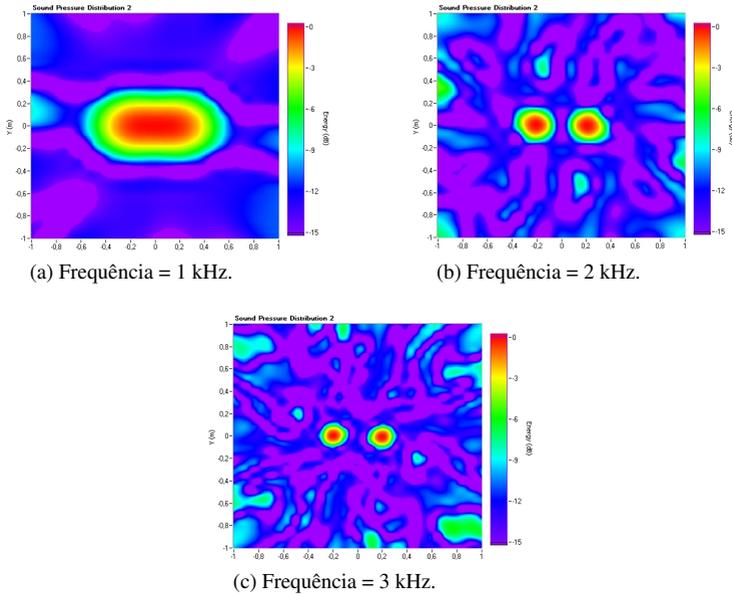


Figura 2.7: Resolução de *beamforming*. Descreve a capacidade do *array* de distinguir fontes que estão em posições próximas.

Considere duas ondas planas com vetores de número de onda  $\vec{k}_1$  e  $\vec{k}_2$ , onde  $|k_1| = |k_2| = k$ , incidindo na antena de *beamforming* com padrão de resposta  $W$ , Figura 2.8 [34].

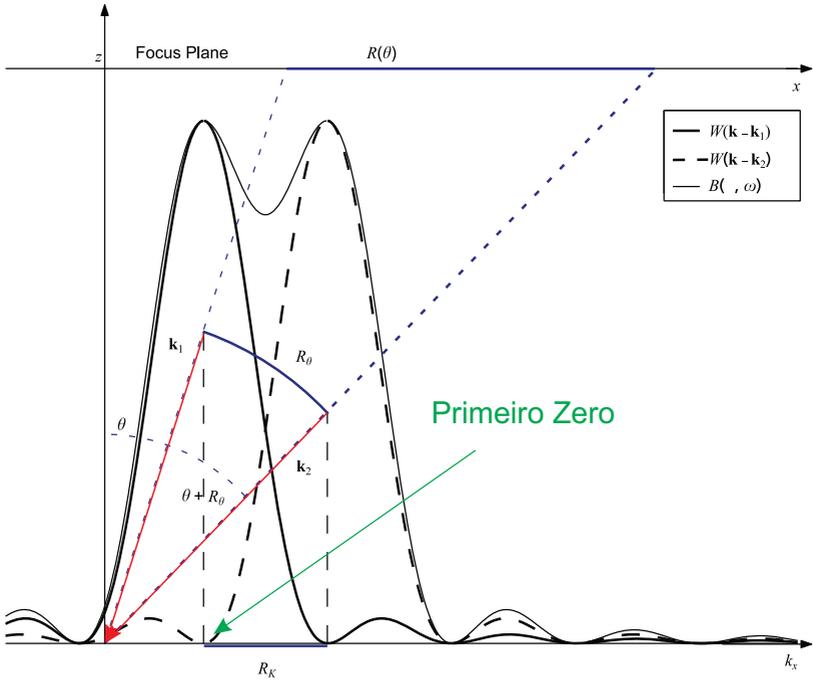


Figura 2.8: Resolução de *beamforming*. Duas ondas planas incidindo na antena de *beamforming* [34].

O espectro resultante é uma superposição da forma:

$$B(k, \omega) = W(k - k_1) + W(k - k_2), \quad (2.30)$$

onde  $B(k, \omega)$  é o sinal de saída de *beamforming*.

O critério de Rayleigh [4] afirma que as duas direções podem ser exatamente resolvidas quando o pico de  $W(k - k_2)$  recai sobre o primeiro zero de  $W(k - k_1)$ .

Assumindo que a separação angular exigida entre  $k_2$  e  $k_1$  é pequena [34]:

$$R(\theta) = \frac{zR_k}{k} \frac{1}{\cos(\theta)^3}, \quad (2.31)$$

onde  $R(\theta)$  é a separação mínima das fontes na direção radial,  $R_k$  é a *largura do lóbulo principal*<sup>8</sup> do *padrão de resposta do array*,  $z$  é a distância entre a fonte e o *array*, e  $\theta$  é o ângulo de abertura do *array*.

O valor de  $R_k$ , de acordo com o critério de Rayleigh, é dado pelo primeiro nulo,  $K_{min}^\circ$ , no *padrão de resposta do array*.

A resolução é proporcional ao comprimento de onda, abertura do *array* e a distância entre a fonte e o *array* (assim como uma câmera fotográfica, por exemplo). A resolução melhora com o aumento do diâmetro e piora com o aumento da distância entre a fonte e o *array*, a Equação 2.31 pode ser verificada na Figura 2.9.

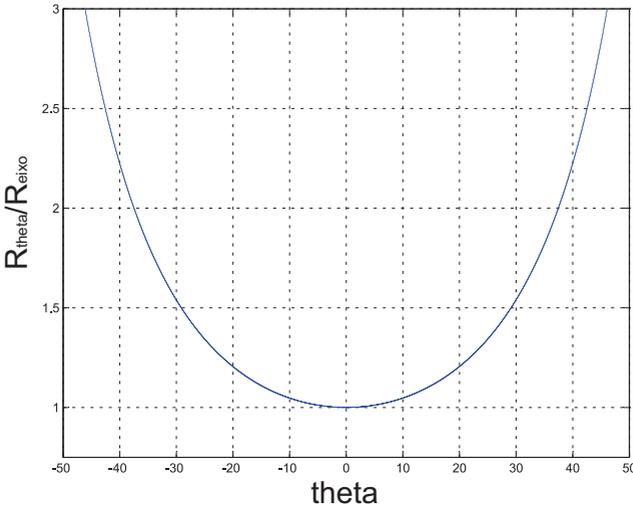


Figura 2.9: Relação entre resolução e ângulo (°) [34].

Observa-se que para ângulos de incidência maiores que 30° em relação ao centro, a resolução piora cerca de 50%. Por esta razão o ângulo de abertura utilizado em *beamforming* é geralmente restrito a 30° na prática.

<sup>8</sup>Largura do Lóbulo Principal é a tradução livre de *Beamwidth*.

### 2.3.7 *Máximo Nível dos Lóbulos Laterais*

A presença de lóbulos laterais representam radiações indesejadas, o que causará perda de energia do lóbulo principal. Um bom projeto de *array* minimiza esses problemas e pode ser caracterizado por apresentar o *Máximo Nível dos Lóbulos Laterais*<sup>9</sup> com valores baixos, se comparado ao nível do lóbulo principal, Figura 2.10.

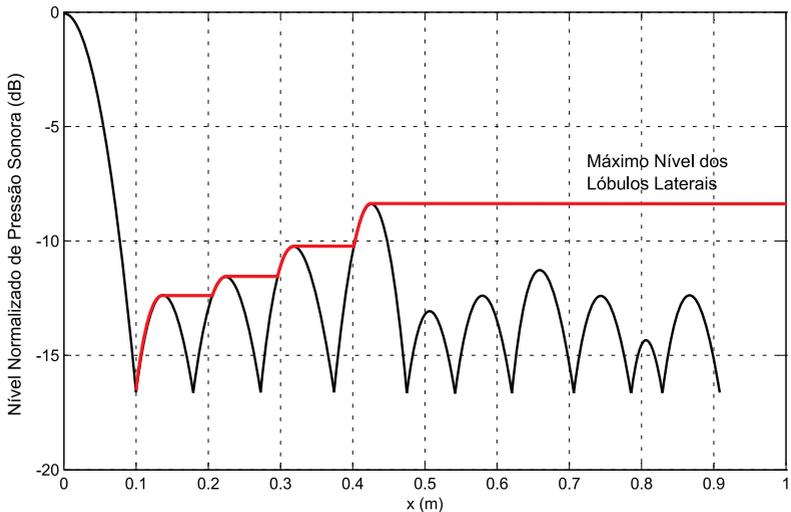


Figura 2.10: Máximo nível dos lóbulos laterais.

Se o padrão de resposta do *array* apresenta o *máximo nível dos lóbulos laterais* com valores baixos, a aplicação de *beamforming* vai apresentar mapas com menos lóbulos laterais (imagens falsas) e conseqüentemente irá melhorar a faixa dinâmica e a visualização da fonte.

### 2.3.8 *Lóbulos Espelhos*

Para antenas de abertura discreta, no qual o espaçamento entre microfones é muito maior do que meio comprimento de onda, o *aliasing*<sup>10</sup> espacial faz com que alguns lóbulos laterais tornem-se substancialmente maior em amplitude,

<sup>9</sup>Máximo Nível dos Lóbulos Laterais é a tradução livre do termo *Maximum Sidelobe Level*.

<sup>10</sup>Amostragem espacial inadequada que culmina no aparecimento de lóbulos principais secundários.

se aproximando do nível do lóbulo principal, dificultando muitas vezes a observação correta das fontes. Estes são os chamados *lóbulos espelhos*<sup>11</sup>, Figura 2.11.

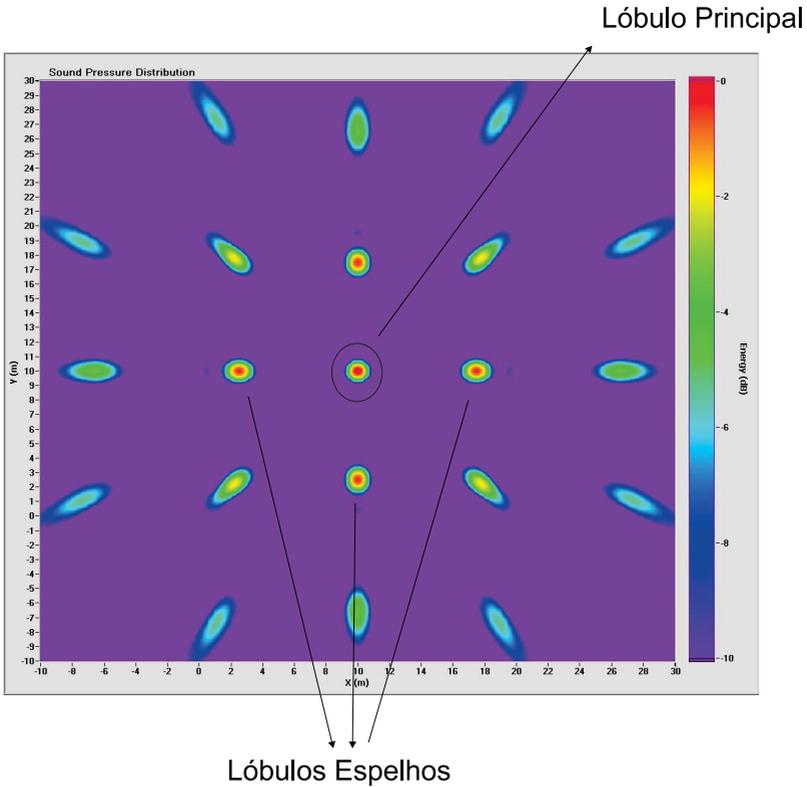


Figura 2.11: *Aliasing* espacial, lóbulos espelhos e lóbulo principal.

<sup>11</sup>Lóbulos espelhos, são originados do termo em inglês *grating lobes* (para mais detalhes consulte a página 90 do livro: *Array Signal Processing* [4]).

Na Figura 2.12 foi plotada a resposta do *array* utilizado neste trabalho, para uma fonte localizada a um 1 metro de distância com frequência de 10 kHz. Os lóbulos espelhos são um caso especial de lóbulos laterais. Nesse caso, os lóbulos laterais devem ser considerados como todos os lóbulos que ficam entre o lóbulo principal e o primeiro lóbulo espelho.

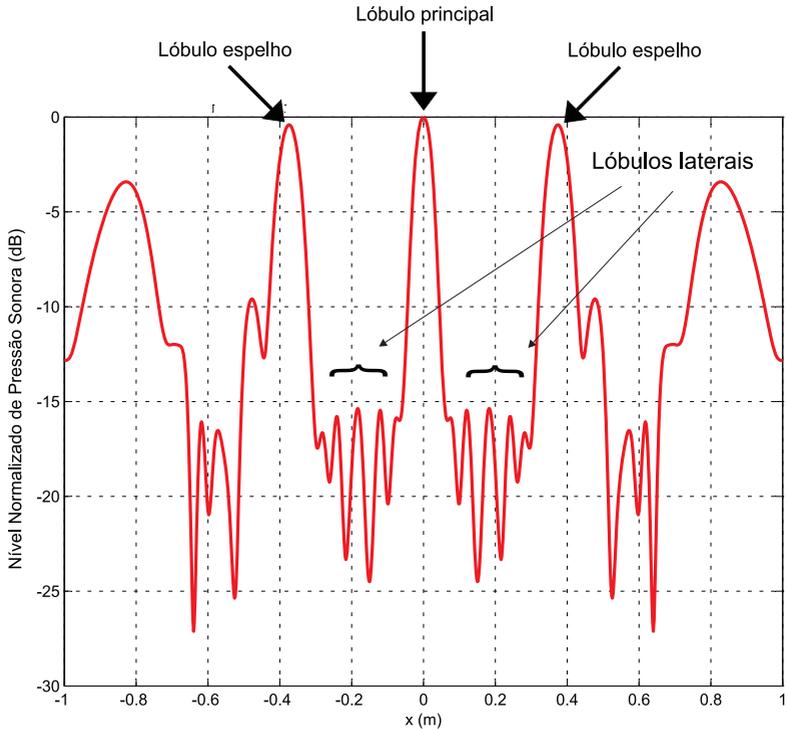


Figura 2.12: Lóbulos espelhos. Simulação de uma fonte de 10 kHz pontual no centro a 1 metro de distância do *array*.

### 2.3.9 Ganho do Array

O ganho do *array* mede a relação sinal-ruído, isto é a medida de quão bem o *array* e o processamento de sinais rejeitam o ruído.

Para observar a quantidade dos sinais que são aperfeiçoados por um *array* de  $M$  elementos, considere os sinais recebidos  $p_m(t)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$  observados nos  $M$  microfones. Supondo que cada sinal tenha o mesmo componente determinístico,  $s(t)$ , e uma média zero, não correlacionado de microfone a microfone, o ruído randômico pode ser denotado como  $n_m(t)$ . Deste modo, a relação pode ser descrita como [35]:

$$y_m(t) = s(t) + n_m(t). \quad (2.32)$$

A *relação sinal-ruído*<sup>12</sup> é definida como a taxa da média quadrática no tempo das componentes do sinal e do ruído, a qual conceitualmente expressa uma relação de potências [36]. Para um simples sensor tem-se:

$$\text{SNR}_{\text{sensor}} = \frac{E[s^2(t)]}{E[n^2(t)]}, \quad (2.33)$$

onde  $\text{SNR}$  é a relação sinal-ruído e  $E[\cdot]$  denota o *valor esperado* para uma variável randômica.

A relação-sinal ruído do *array* é dada por [35]:

$$\text{SNR}_{\text{array}} = \frac{E[s^2(t)]}{\frac{1}{M^2} E \left[ \sum_{m=1}^M n_m^2(t) \right]} = M \frac{E[s^2(t)]}{E[n^2(t)]}. \quad (2.34)$$

Comparando as Equações 2.33 e 2.34 chega-se numa relação entre a relação sinal-ruído do *array* e dos sensores, que é dado por:

$$\text{SNR}_{\text{array}} = M \cdot \text{SNR}_{\text{sensor}}. \quad (2.35)$$

Como o ganho do *array* é definido como a razão entre a relação sinal-ruído do *array* e dos sensores:

$$G_{\text{array}} \equiv \frac{\text{SNR}_{\text{array}}}{\text{SNR}_{\text{sensor}}}. \quad (2.36)$$

Logo,

---

<sup>12</sup>Relação Sinal-Ruído é a tradução livre de *Signal-to-Noise Ratio*.

$$G_{\text{array}} = M. \quad (2.37)$$

Expressando o ganho do *array* em dB:

$$G_{\text{array}} = 10 \log(M). \quad (2.38)$$

Analisando o ganho do *array*, Tabela 2.1, observa-se que a relação sinal-ruído melhora em 10 dB ao se dispor de 10 microfones quando comparado com um único sensor, mas para obter uma melhora de 20 dB a antena necessitaria dispor de 100 microfones. O estudo sobre o número de microfones deve ser realizado e posteriormente avaliado se vale a pena o gasto da construção de uma antena com muitos microfones, ou se é mais vantajoso investir em outros parâmetros do sistema.

Tabela 2.1: Número de microfones  $x$  ganho do *array* (dB).

Número de Microfones (M)	Ganho do Array (dB)
1	00,00
10	10,00
32	15,05
48	16,81
64	18,06
100	20,00
200	23,01
500	26,99
1000	30,00

A discussão sobre o ganho do *array* e a relação sinal-ruído também pode ser encontrada nas referências [4, 36, 37, 38].

## 2.4 Revisão bibliográfica - Publicações relacionadas a este trabalho

Como em quase todas as situações de medição, diversos fatores de incerteza podem levar a um mapa de *beamforming* perturbado, tornando a avaliação de resultados difícil. As fontes mais comuns de incerteza são a incerteza na localização dos microfones e os erros de calibração [22].

Na literatura, o efeito das incertezas de medição tem sido coberto até certo ponto. Todas as considerações são baseadas em suposições muito teóricas, especialmente sobre o objeto de teste, que afirma que a fonte é um monopolo

ideal, o quê nem sempre é verdade dependendo da faixa de frequência de interesse.

Nesta seção serão expostos alguns trabalhos publicados que tem ligação com as influências dos erros de posicionamentos de microfones e as influências da temperatura e umidade na análise de *beamforming*. Para isto, serão expostos os trabalhos por ordem cronológica.

## 2.5 YARDIBI, 2009

O autor realizou um vasto estudo de *beamforming*. Em um de seus capítulos ele considerou as incertezas na posição dos microfones, na sensibilidade e fase dos microfones, na temperatura, na Matriz de Espectros Cruzados e na distância entre o *array* e a fonte [22].

### 2.5.1 Incerteza de posição dos microfones na medição de *beamforming*

Primeiro foi investigado a incerteza de posição dos microfones, enquanto as outras variáveis de entrada permaneceram constantes. Para elaborar este estudo, o autor posicionou a fonte 1,48 m distante do *array*, sob a temperatura de 20°C e aplicou uma perturbação de até 1,00 cm no posicionamento dos microfones. Para a aplicação desta perturbação foram utilizadas variáveis randômicas Gaussianas em cada posição dos microfones.

A medição de *beamforming*, analisando a média e o intervalo de confiança de 95 % pode ser observado na Figura 2.13.

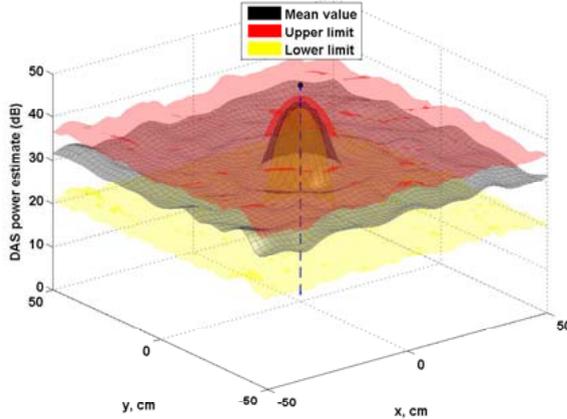


Figura 2.13: Resposta da medição em 3 dimensões, onde fica evidenciada a média (preto) e o intervalo de confiança de 95 % (amarelo e vermelho). Perturbação de 1,0 cm, frequência de 5 kHz [22].

Na Figura 2.14 fica melhor evidenciada a medição de *beamforming*. O autor retira uma linha central da Figura 2.13, ou seja, em  $x=0$  e faz uma varredura no eixo  $y$ .

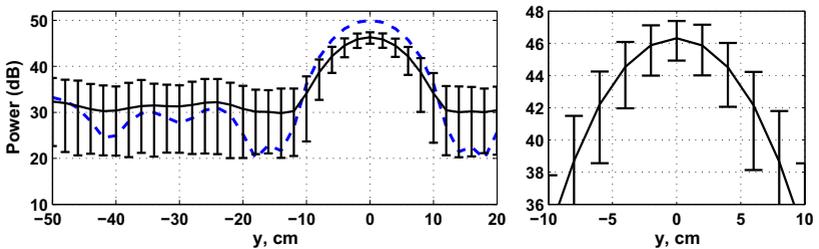


Figura 2.14: Faixa central da medição da Figura 2.13 para ilustrar em duas dimensões a média e o intervalo de confiança de 95 %. A linha preta sólida e a linha azul tracejada indicam os valores médios e os valores nominais simulados com a geometria correta, respectivamente. A figura a direita mostra um zoom na região do feixe principal. Perturbação de 1,0 cm, frequência de 5 kHz [22].

Uma observação importante que pode ser feita a partir da Figura 2.14 é que

as estimativas de energia tendem a ficar menores em relação ao valor nominal para os valores de pico e tendem a ficar maiores em relação ao valor nominal para os lóbulos laterais, ou seja, a faixa dinâmica diminui.

Para aprofundar no tema, o autor mostra o histograma da localização de pico em cada um dos *arrays* com erros de posição em comparação com o *array* correto, Figura 2.15.

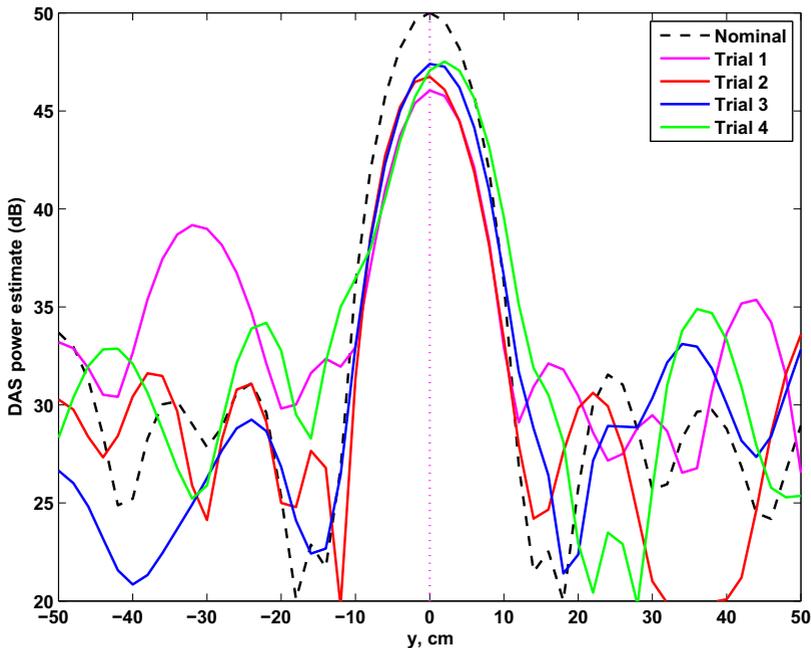


Figura 2.15: Histograma da localização de pico em cada um dos *arrays* com erros de posição em comparação com o *array* correto. Perturbação de 1,0 cm, frequência de 5 kHz [22].

Observa-se que mesmo quando o pico aparece no local de origem verdadeiro, o valor de potência estimada é inferior ao valor nominal. Os lóbulos laterais, na média tendem a ser maiores, mas quando observados individualmente nota-se que em algumas geometrias e algumas frequências os valores são menores.

Como observado anteriormente, os erros de localização no posicionamento dos microfones podem causar problemas significativos se não forem

contabilizados.

### 2.5.2 Influência da temperatura na medição de *beamforming*

Na presença de fluxo de ar, a não uniformidade da temperatura na seção de teste pode causar diferenças na velocidade do som acarretando em diferenças na medição.

Nota-se que uma incerteza de  $3^{\circ}\text{C}$  na temperatura causa uma perturbação relativa a 0,5 % na velocidade do som. O autor ressalta que a incerteza da temperatura só foi considerada através de seus efeitos na velocidade do som. Na prática, as respostas dos microfones podem também serem afetadas pela temperatura, resultando em maiores incertezas.

A Figura 2.16 mostra a média e os intervalos de confiança de 95 % quando a temperatura é perturbada. Na prática, os erros de temperatura são insignificantes, devido à ausência de fluxo. No entanto, durante os testes do modelo, a incerteza da temperatura pode ser significativa.

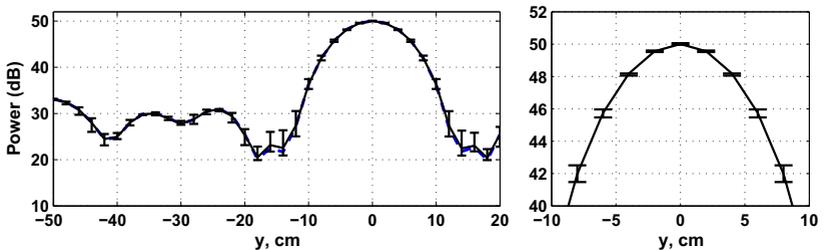


Figura 2.16: Média e o intervalo de confiança de 95 % na medição de *beamforming* quando a temperatura varia  $3^{\circ}\text{C}$  [22].

## 2.6 TRAPET, 2009

Neste trabalho o autor pesquisou sobre a comparação de métodos de localização do som para estruturas vibratórias. Em um capítulo de sua pesquisa ele se dedicou a avaliação de erros de posicionamento de microfones no qual aplicou valores aleatórios de até 5,0 cm de perturbação no posicionamento em todas as três dimensões [39].

Foram estudadas 20 posições erradas de geometria, as quais foram utilizadas para obter uma média de resultados. A Figura 2.17 mostra a geometria original (em preto) e as 20 geometrias erradas (em vermelho) sobrepostas. Na Figura 2.18 foi aplicado um *zoom* para a melhor observação da variação de posição em um microfone da Figura 2.17.

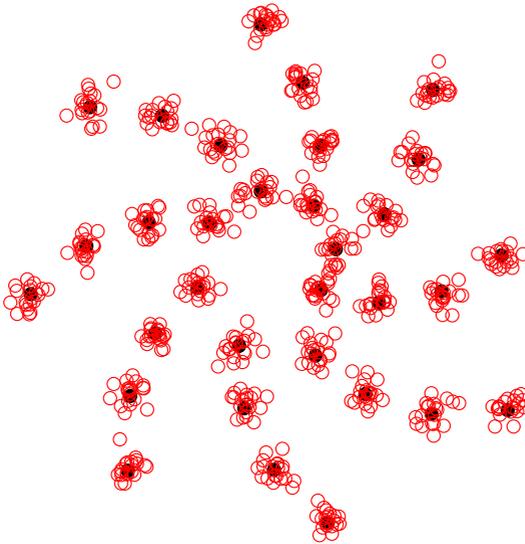


Figura 2.17: Geometria correta (preto) e 20 geometrias erradas (em vermelho) sobrepostas. Geometria espiral com diâmetro de 1,2 m [39].

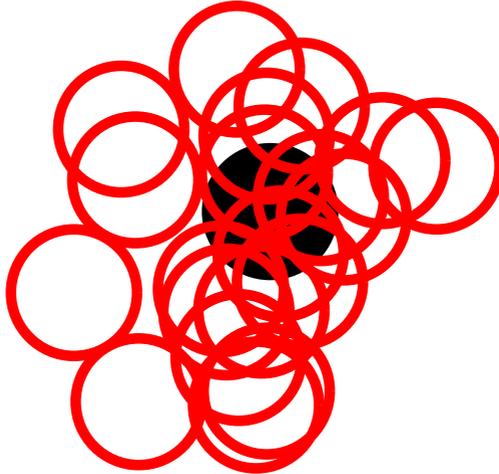
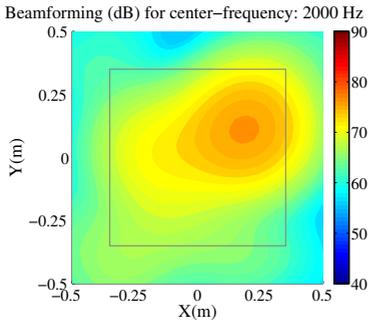


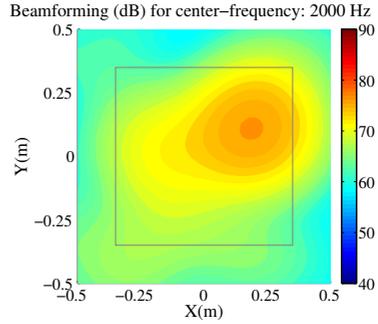
Figura 2.18: Geometria correta (preto) e 20 geometrias erradas (em vermelho) sobrepostas, aplicando um *zoom* em um microfone da Figura 2.17 para a melhor observação [39].

Em relação ao referencial teórico simulado de *beamforming* é óbvio que um posicionamento correto dos microfones é um ponto crucial na obtenção de resultados, pois o método é baseado na relação de fase entre os microfones individuais. Se as posições dos microfones não são exatamente conhecidas, a estimativa do deslocamento de fase também será errada, acarretando maiores desvios nas altas frequências.

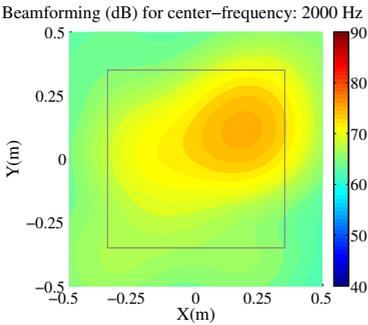
O problema do posicionamento incorreto pode ser observado na Figura 2.19, para a frequência de 2 kHz na banda de terço de oitava, os mapas de *beamforming* parecem idênticos, mesmo para uma média de erro de posicionamento de microfones de 2,0 cm. Já com o fator de erro relativamente grande de 5,0 cm (que já está próximo da distância média entre os microfones da geometria correta) os resultados são inutilizáveis, pois não mostram uma correlação com o resultado original.



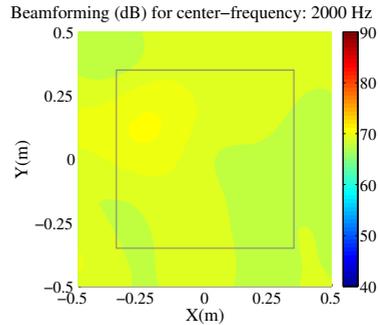
(a) 0,5cm.



(b) 1cm.



(c) 2cm.



(d) 5cm.

Figura 2.19: Resultados de *beamforming* ao serem variadas as posições de cada microfone. Frequência de 2 kHz, erros de: a) 0,5 cm; b) 1,0 cm; c) 2,0 cm; d) 5,0 cm [39].

Nota-se que ao aumentar a frequência, o fator de desvio de posicionamento diminui pois o erro de fase está relacionado com o comprimento de onda. Na frequência de 4 kHz só o mapa de *beamforming* correspondente a primeira (0,5 cm) e segunda (1,0 cm) geometrias podem ser interpretados (Figura 2.20).

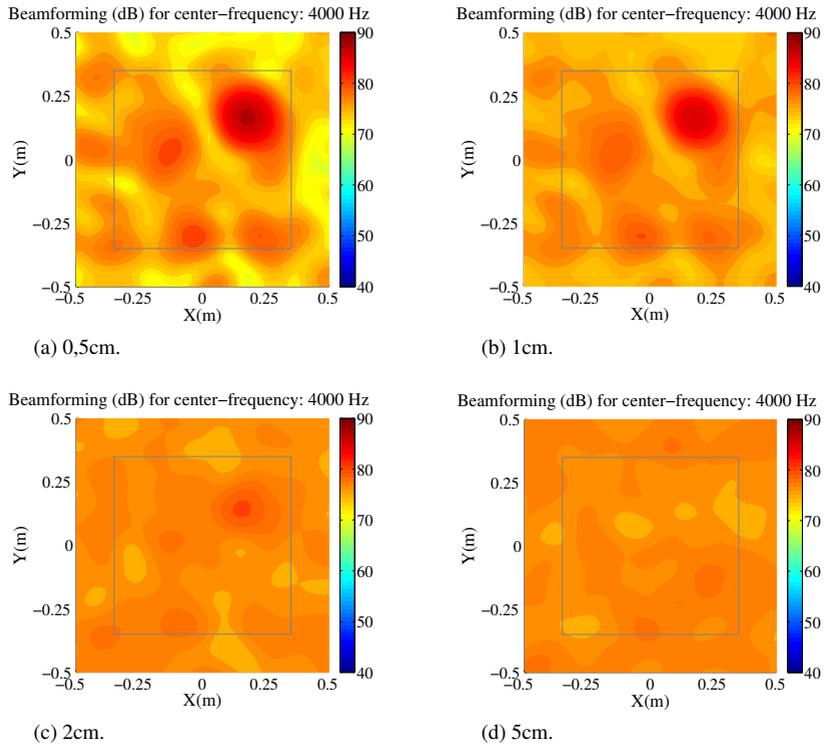
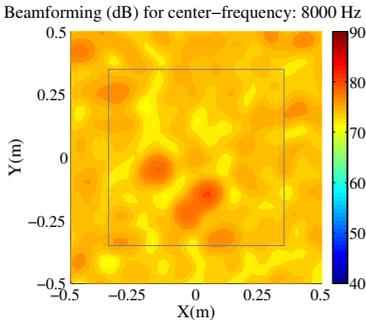
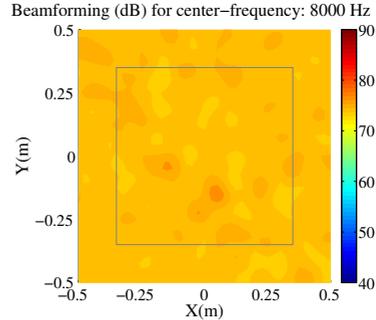


Figura 2.20: Resultados de *beamforming* ao serem variadas as posições de cada microfone. Frequência de 4 kHz, erros de: a) 0,5 cm; b) 1,0 cm; c) 2,0 cm; d) 5,0 cm [39].

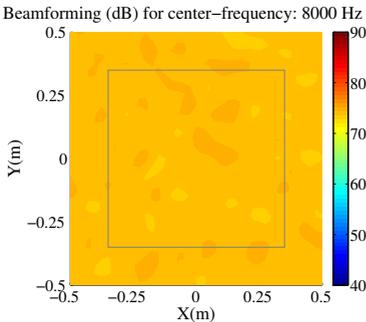
Na frequência de 8 kHz somente o mapa de *beamforming* correspondente à primeira geometria (0,5 cm) pode ser interpretado (Figura 2.20).



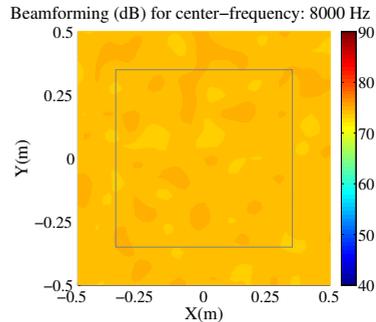
(a) 0,5cm.



(b) 1cm.



(c) 2cm.



(d) 5cm.

Figura 2.21: Resultado de *beamforming* ao serem variadas as posições de cada microfone. Frequência de 8 kHz, erros de: a) 0,5 cm; b) 1,0 cm; c) 2,0 cm; d) 5,0 cm [39].

Os resultados da correlação ao variar as posições dos microfones suportam estas observações (Figura 2.22). A inclinação das curvas na transição entre a correlação perfeita e a correlação incorreta demonstra que o caimento dos resultados não correlacionados é muito íngreme.

Em teoria da probabilidade e estatística, correlação, também chamada de coeficiente de correlação, indica a força e a direção do relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias [40].

Como regra geral, pode-se afirmar que os resultados imperfeitos concordam bem com o resultado original, desde que os erros de posicionamento dos microfones correspondem a menos de  $\lambda/5$ , utilizando uma correlação de 95 %.

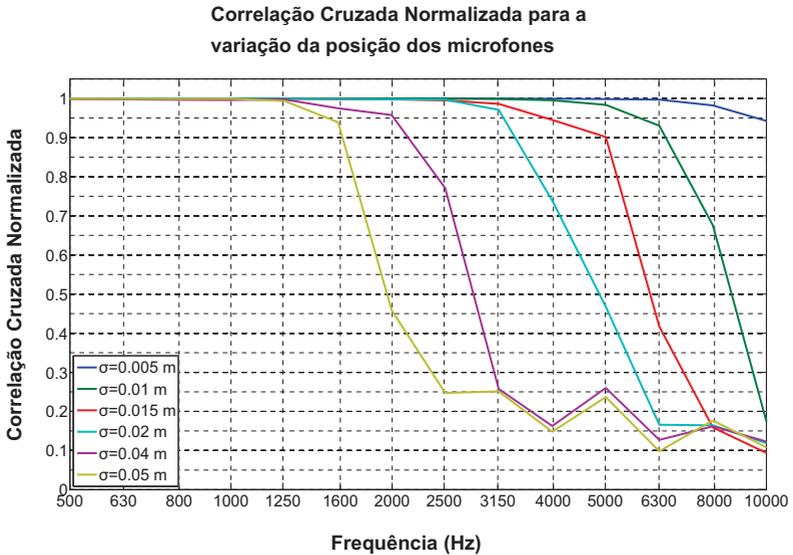


Figura 2.22: Correlação cruzada normalizada entre o resultado para diferentes posições de microfones e o resultado original. Localização de *beamforming* utilizando uma geometria espiral com diâmetro de 1,2 m [39].

## 2.7 TRAPET e DIETRICH, 2010

O autor Trapet continuou suas pesquisas, com o auxílio de Dietrich e publicou um trabalho mais recente e mais completo do que o último apresentado [41]. Os autores realizaram diversas simulações para investigar o efeito de algumas das incertezas que podem ser encontradas durante as medições de *beamforming*, no qual adicionaram erro no eixo  $z$  (normal ao *array*). Para efeitos de comparação, foi aplicada a correlação cruzada normalizada entre o mapa correto e o mapa com a adição de incertezas. Os resultados serão avaliados e discutidos nesta seção.

### 2.7.1 Fatores de Incerteza

A incerteza no conhecimento das posições de microfones foi modelada pela adição aleatória de valores com um desvio padrão entre 0,2 cm e 5,0 cm para os locais exatos dos microfones. Como apenas geometrias de disposição planar são consideradas, os erros no eixo  $z$  foram investigados separadamente dos erros no plano  $xy$ .

Para a avaliação tem que ser mencionado que todos os valores da correlação cruzada neste estudo encontram-se entre 0,0 e 1,0, ou seja, apenas valores não negativos são usados como entrada para a correlação. Como um limite para o resultado obtido com as incertezas de medição pode ser avaliado corretamente, um valor do correlação de 0,9 (ou 90 %) foi escolhido pelo autor. Apenas os resultados para a matriz espiral logarítmica serão apresentados, pois é uma das geometrias de *beamforming* mais utilizadas.

Os resultados para os erros de posicionamento no plano do *array* (eixo  $xy$ ) podem ser vistos na Figura 2.23.

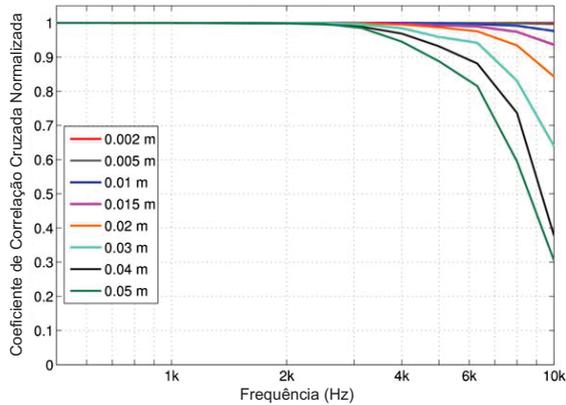


Figura 2.23: Coeficiente de correlação cruzada para a variação na posição dos microfones no eixo  $xy$  (no plano) [41].

Os resultados para os erros de posicionamento na profundidade dos microfones (eixo  $z$ ) podem ser vistos na Figura 2.24.

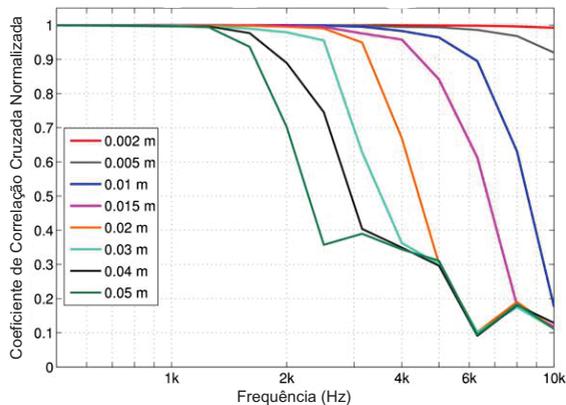


Figura 2.24: Coeficiente de correlação cruzada para a variação na posição dos microfones no eixo  $z$  (fora do plano).[41].

Em geral, a diminuição da correlação versus frequência é mais drástica do que para a maioria dos outros fatores de incerteza. Isto se deve ao fato da forte dependência sobre as diferenças de fase entre os microfones.

Comparando os resultados, o posicionamento incorreto dos microfones fora do plano do *array* (eixo  $z$ ) é muito mais crítica, pois a queda na correlação começa em frequências muito mais baixas, fato que pode ser explicado devido a uma maior diferença de fase entre os microfones.

### 3 INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os detalhes dos equipamentos utilizados neste trabalho, bem como a definição e detalhes da construção do novo *array* de medição.

#### 3.1 Construção do novo *array*

Para este trabalho foi construído um novo *array* no qual foi aprimorado os aspectos construtivos em relação aos outros protótipos construídos anteriormente no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) [42, 43]. Também foi estudada uma nova geometria em espiral para otimizar a faixa dinâmica da resposta do sistema, (Figuras 3.1 e 3.2). Algumas características deste novo protótipo incluem:

1. Dimensão da geometria, 1,2 m x 1,2 m;
2. Barras de sustentação dos microfones com maior rigidez para evitar a flexão e torção;
3. Maior precisão na fabricação das peças de encaixe dos microfones.



Figura 3.1: Projeto do *array* desenvolvido em *software* com geometria espiral, barras de sustentação com maior rigidez e maior precisão nas peças de encaixe dos microfones.



Figura 3.2: Foto do *array* construído, com a nova geometria projetada, disposto no interior da câmara semianecoica do LVA, local onde ocorreram as medições de erros de posicionamento dos microfones. É possível observar a geometria projetada.

Na Figura 3.3 é possível observar os microfones utilizados no processamento de *beamforming* nas peças de encaixe construídas. Além disso, também foi utilizado na medição, um sensor de temperatura e umidade relativa, dois microfones de alta performance (Tipo 1), bem como dois acelerômetros foram instalados na barra central.

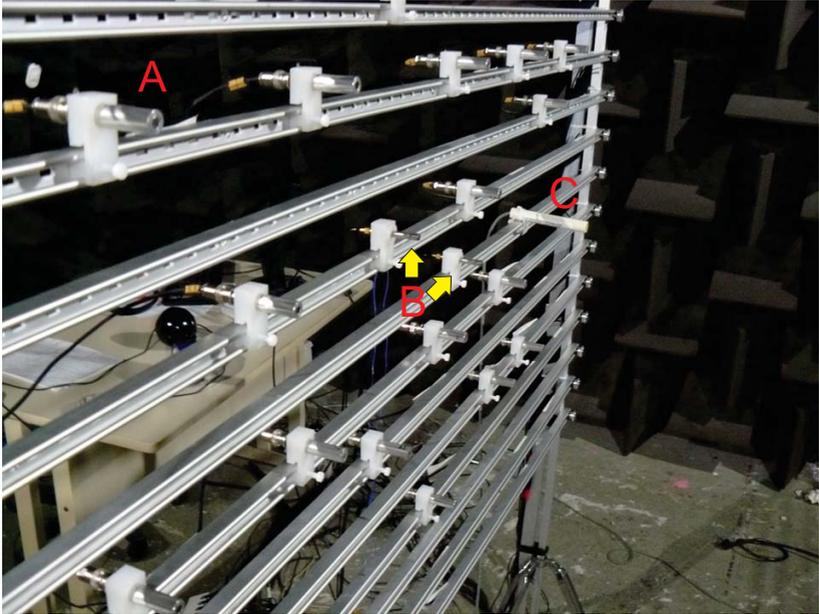


Figura 3.3: Detalhe do *array* construído com 32 microfones de baixo custo (A); 2 microfones de alta performance (B); Sensor de temperatura e umidade relativa (C); 2 acelerômetros na barra central de sustentação dos microfones.

Foi avaliado como as barras de sustentação vibram ao aplicar uma fonte sonora em frente ao *array*, Figura 3.4. O gráfico dispõe de curvas de amplitude de aceleração em relação ao tempo. Foram utilizados dois acelerômetros, onde um mede a vibração no eixo  $x$  (aceleração horizontal) e o outro mede a vibração no eixo  $y$  (aceleração vertical).

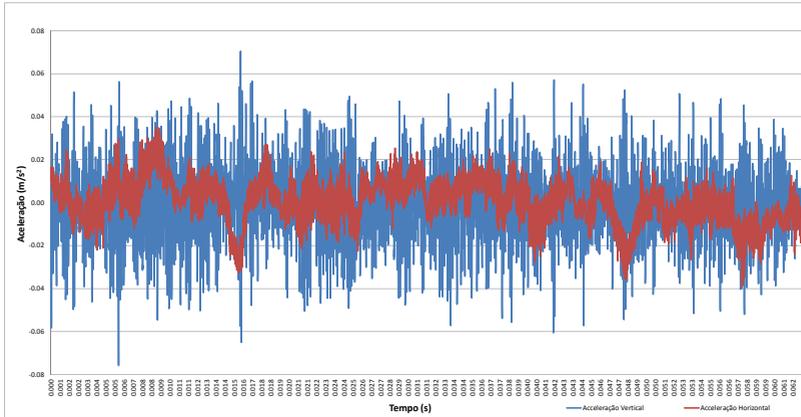


Figura 3.4: Curvas de aceleração *versus* tempo da resposta dos acelerômetros ao aplicar ruído branco. A aceleração horizontal mede a vibração no eixo  $x$  da barra de sustentação e a aceleração vertical mede a vibração no eixo  $y$ . Fonte posicionada a 2,5 m de distância, altura de 1,4 m, temperatura de 24,55°C e umidade relativa de 64,61 %.

Ao avaliar a vibração dos dois eixos (Figura 3.4), nota-se que a vibração no eixo  $y$  é maior. Ou seja, a influência da vibração das barras causa maior incerteza de posicionamento na altura dos microfones.

A Figura 3.5 apresenta o gráfico de curvas de pressão sonora  $x$  frequência do espectro de pressão dos microfones de alta performance calibrados. Foram utilizados dois microfones de alta precisão, de 1/4 de polegada, do fabricante G.R.A.S. (modelo: 48B).

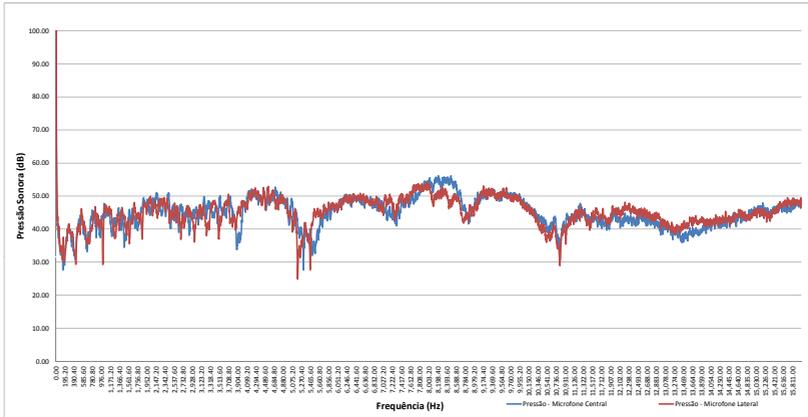


Figura 3.5: Curvas de pressão sonora  $x$  frequência do espectro de pressão ao aplicar ruído branco dos microfones de alta performance calibrados. Detalhe de resposta dos dois microfones de alta precisão, de  $1/4$  de polegada, do fabricante *G.R.A.S.* Microfone central posicionado no centro do *array* e o microfone lateral posicionado na barra abaixo do microfone central e distante de 0,2 m. Fonte posicionada a 2,5 m de distância, altura de 1,4 m, temperatura de  $24,55^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de 64,61 %.

### 3.2 Definição da Geometria de Array

Conforme estudado em Fonseca [42], será utilizada a geometria em formato espiral. Este tipo de geometria foi escolhida pois apresenta um posicionamento semelhante ao randômico, porém ainda com o controle sobre o posicionamento dos microfones.

Foram simuladas diversas formas de *array* com geometria espiral, variando a distância entre barras, a angulação entre "braços" de microfones, o formato do centro da geometria e o giro do *array* em torno do plano  $xy$ .

O principal parâmetro observado foi a faixa dinâmica, ou seja, a diferença entre o lóbulo principal e os lóbulos laterais. As frequências abaixo de 10 kHz foram priorizadas pois abrangem a maioria das aplicações de *beamforming*.

No Apêndice C está o desenvolvimento passo a passo da nova geometria em formato espiral. A melhor geometria encontrada utilizando diâmetro de 1,2 m é a que possui espaçamento de 7,5 cm entre barras, 4,5 rad de angulação entre

os microfones, centro circular e ângulo de giro  $0^\circ$ , Figura 3.6, Tabela 3.1.

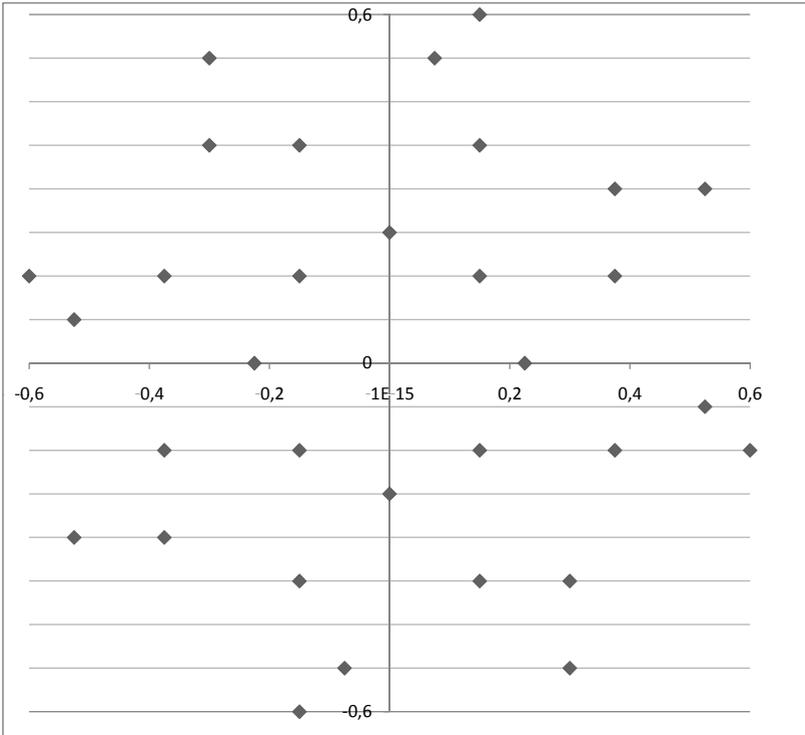


Figura 3.6: Nova geometria utilizada neste trabalho. Diâmetro de 1,2 m, espaçamento de 7,5 cm entre barras, 4,5 rad de angulação entre os "braços" de microfones e ângulo de giro  $0^\circ$ .

Tabela 3.1: Posição dos microfones do novo *array* em formato espiral.

Microfones	Eixo x (m)	Eixo y (m)
1	0,225	0,000
2	0,150	0,150
3	0,000	0,225
4	-0,150	0,150
5	-0,225	0,000
6	-0,150	-0,150
7	0,000	-0,225
8	0,150	-0,150
9	-0,375	0,150
10	-0,375	-0,150
11	-0,150	-0,375
12	0,150	-0,375
13	0,375	-0,150
14	0,375	0,150
15	0,150	0,375
16	-0,150	0,375
17	-0,375	-0,300
18	-0,075	0,375
19	0,300	-0,375
20	0,525	-0,075
21	0,375	0,300
22	0,075	0,525
23	-0,300	0,375
24	-0,525	0,075
25	-0,150	-0,600
26	0,300	-0,525
27	0,600	-0,150
28	0,525	0,300
29	0,150	0,600
30	-0,300	0,525
31	-0,600	0,150
32	-0,525	-0,300

### 3.3 Precisão das peças de encaixe dos microfones

Foram confeccionadas novas peças de suporte para os microfones, Figura 3.7, mais precisas e de melhor encaixe (em relação aos protótipos anteriores). As peças foram projetadas pelo grupo de *beamforming* do LVA e manufaturadas no laboratório USICON (Laboratório de Usinagem e Comando Numérico).

Depois de confeccionadas, as peças foram testadas de modo a observar a precisão de suas dimensões. Para isso, foram realizadas 10 medições em cada posição para cada peça de nylon, totalizando 2500 medições utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,03 mm.

As peças utilizadas apresentaram desvios pequenos dos valores projetados, com valores abaixo de 0,5 mm de erro. O resultado completo das medições pode ser observado no Apêndice F.

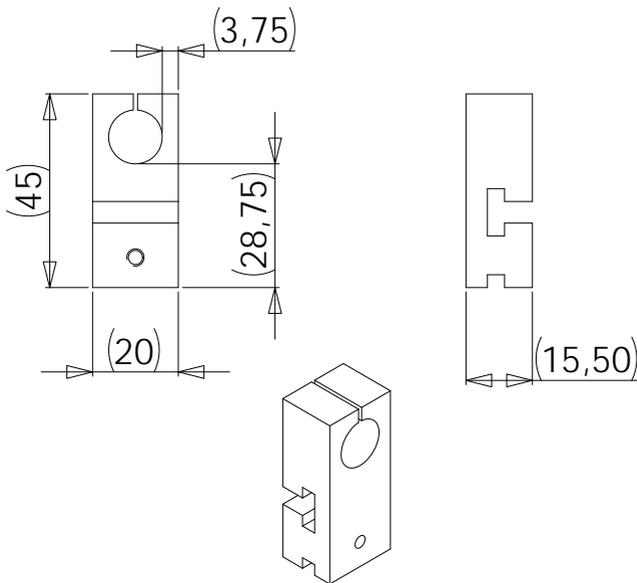


Figura 3.7: Projeto das peças de encaixe dos microfones mm utilizados nas barras do *array*.

### 3.4 Sensor de Temperatura e Umidade

Para observar a temperatura e umidade relativa no momento em que a medição está acontecendo, foi acoplado ao sistema um sensor que atua em tempo real, podendo capturar assim os parâmetros instantâneos.

Foi realizada uma comparação do sensor na câmara de controle de temperatura e umidade do laboratório POLO (Laboratório de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica) da Universidade Federal de Santa Catarina. A câmara possui precisão de medida de 0,05 % de umidade relativa e de 0,1°C de temperatura.

Assumindo que o valor da câmara é o correto, notou-se que o sensor Labjack (modelo: EI1050), Figura 3.8, apresentou valores muito semelhantes para a temperatura, Figura 3.9. No entanto, a umidade relativa possui erros da ordem de  $\pm 10\%$  em relação aos ensaios realizados no POLO, Figura 3.10.



Figura 3.8: Sensor de temperatura e umidade relativa, modelo *EI1050*.

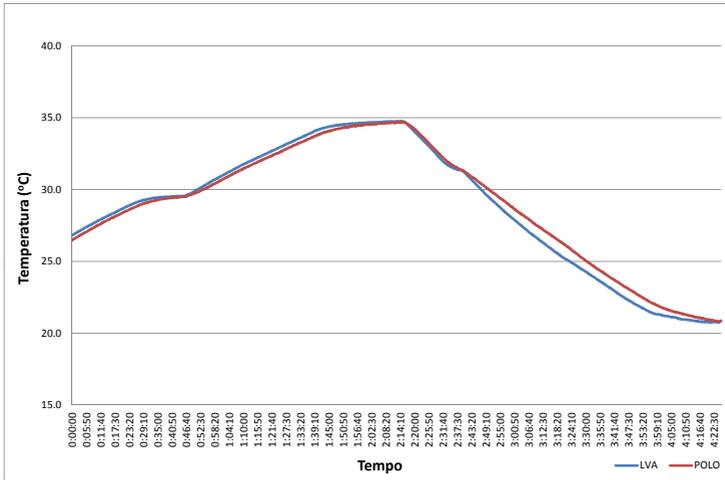


Figura 3.9: Comparação da temperatura medida no laboratório POLO (ambiente controlado) em relação ao sensor *E11050*. Gráfico de temperatura  $x$  tempo.

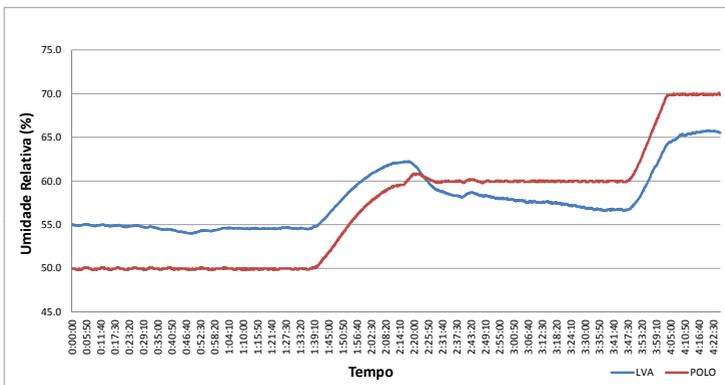


Figura 3.10: Comparação da umidade relativa medida no laboratório POLO (ambiente controlado) em relação ao sensor *E11050*. Gráfico de umidade relativa  $x$  tempo.

### 3.5 Microfones utilizados

O presente trabalho propõe um *array* bi-dimensional com a utilização de microfones de eletreto de baixo custo com um circuito pré-amplificador simples.

Os microfones foram construídos com cápsulas de eletreto (elemento sensível a pressão sonora) do fabricante Panasonic (modelo: Panasonic WM-61A). Para amplificar o sinal foi utilizado um circuito eletrônico simples [43]. Posteriormente o microfone e o circuito amplificador foram colocados em uma cápsula de alumínio de 1/2 polegada, com sua terminação em um conector BNC (conector comumente usado em transmissão), Figura 3.11.



Figura 3.11: Detalhe dos microfones utilizados. Cápsula de eletreto, corpo de alumínio de 1/2 polegada e circuito pré-amplificador (da esquerda para a direita).

Os microfones utilizados neste trabalho foram os mesmos utilizados no trabalho de Fonseca [42], onde o autor realizou um estudo citando todos os detalhes e descrições de cada microfone.

Os microfones são afetados pela temperatura e umidade relativa. Consta nas cartas de calibração dos mesmos um coeficiente médio de temperatura, o qual quantifica a mudança de sensibilidade em relação à temperatura.

É importante ressaltar que neste trabalho, a incerteza da temperatura só foi considerada através de seus efeitos na velocidade do som e não nas mudanças de sensibilidade dos microfones.

### 3.6 Plataforma de Aquisição

O sistema de aquisição de sinais deve realizar a aquisição de todos os canais com o menor atraso possível, para que as defasagens entre os microfones não sejam calculadas erroneamente.

O sistema utilizado neste trabalho foi o portátil com oito módulos de quatro canais da National Instruments (modelo: NI 9233), ligado à interface de comunicação USB 2.0 através da unidade National Instruments (modelo: NI cDAQ-9172). Este *hardware* possui taxa de amostragem máxima de 50 kS/s e uma faixa dinâmica de 95 dB, corrente de polarização de 2,2 mA, Figura 3.12.



Figura 3.12: Plataforma de aquisição NI cDAQ-9172 com os 8 módulos NI 9233 com 4 canais analógicos de entrada cada [42].

Assim como os microfones, a plataforma de aquisição foi a mesma da utilizada no trabalho de Fonseca [42], que trata com maiores detalhes este tópico.

## 4 ERROS DE POSICIONAMENTO DE MICROFONES

Nesta seção serão estudados os efeitos dos erros de posicionamento dos microfones na medição de *beamforming*. Por questões experimentais a ênfase foi dada nos erros de posicionamento dos microfones no eixo do *array*, ou seja, no plano *xy*. Os erros de posicionamento na profundidade dos microfones (eixo *z*) não foram estudados neste trabalho e surge como sugestão para trabalhos futuros.

Em relação ao referencial teórico, é óbvio que o posicionamento correto dos microfones é um ponto crucial na obtenção de resultados, pois o método é baseado na relação de fase entre os microfones. Se as posições dos microfones não são exatamente conhecidas, a estimativa do deslocamento de fase também será errada, principalmente nas altas frequências [39].

O resultado torna-se completamente inútil em alguns casos quando a distribuição espacial do posicionamento dos microfones não apresenta uma estrutura definida, conseqüentemente indicando erroneamente a posição das fontes sonoras.

Conforme observado na revisão bibliográfica (Seção 2.4), os autores elaboraram estudos simulados no qual obtiam apenas o mapa de *beamforming*. Neste trabalho serão estudados os efeitos deste mal posicionamento nos mapas de *beamforming*, no nível de pressão sonora, na correlação de resposta entre a matriz correta e a matriz com erros de posição, na faixa dinâmica, no comportamento do lóbulo principal quanto ao máximo pico de energia e largura de lóbulo (largura de feixe) para alguns desvios de posição (1,0 cm; 2,5 cm; 5,0 cm; 6,5 cm) e diversas frequências.

O valor máximo de 6,5 cm foi escolhido pois é a distância máxima que um microfone pode se deslocar sem encostar em um microfone conseqüente da mesma barra. A distância máxima entre os microfones é de 15,0 cm, como a peça de encaixe possui 2,0 cm precisa-se descontar as 2 metades de cada peça, ou seja, 1,0 cm de cada peça, totalizando 2,0 cm. A partir daí chega-se no valor de 6,5 cm, que seria o valor que cada microfone poderia se deslocar sem transpor o outro.

Para realizar o estudo dos efeitos do posicionamento incorreto dos microfones, foi necessário a criação de um *software* criado na plataforma MATLAB para a geração das perturbações aleatórias no posicionamento. Na Figura 4.1 pode ser observado um exemplo de erros nos posicionamentos dos microfones gerado pelo *software*. A Figura 4.2 ilustra um exemplo de uma posição de microfone para o melhor entendimento da simbologia usada.

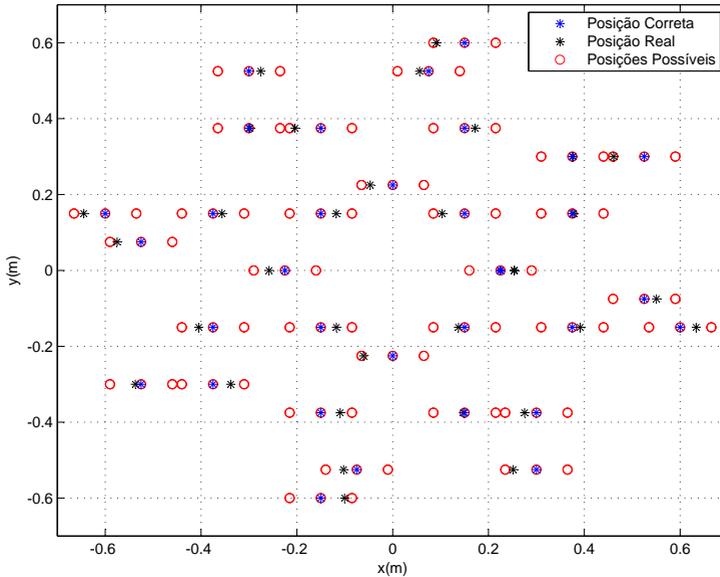


Figura 4.1: Geração de erros no posicionamento dos microfones no *software* criado.

O marcador azul no interior do marcador vermelho indica a posição correta. A posição dos microfones com erros gerados pelo *software*, em preto. Os marcadores vermelhos externos delimitam a área em que os microfones possivelmente possam ser posicionados. Portanto, os microfones podem estar em qualquer lugar entre os marcadores vermelhos, esta posição errada foi gerada por *software*.



Figura 4.2: Detalhes da geração de erros no posicionamento dos microfones no *software* criado.

#### 4.1 Estudo dos erros de posicionamento

Foram realizadas 5 medições para cada erro de posicionamento máximo (1,0 cm; 2,5 cm; 5,0 cm; 6,5 cm). Nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 pode ser observado em detalhe algumas geometrias com erros de posição.



Figura 4.3: Erros de posicionamento dos microfones, perturbação gerada aleatoriamente por *software*. Geometria 1 - Erros de até 1,0 cm.



Figura 4.4: Erros de posicionamento dos microfones, perturbação gerada aleatoriamente por *software*. Geometria 2 - Erros de até 2,5 cm.



Figura 4.5: Erros de posicionamento dos microfones, perturbação gerada aleatoriamente por *software*. Geometria 3 - Erros de até 5,0 cm.



Figura 4.6: Erros de posicionamento dos microfones, perturbação gerada aleatoriamente por *software*. Geometria 4 - Erros de até 6,5 cm.

### 4.1.1 Geometria 1 - 1,0 cm

No Apêndice A estão todas as medições expostas passo a passo. Nesta seção será apresentado um dos casos (erro de 1,0 cm no posicionamento), bem como serão discutidos as mudanças nas respostas, Tabela 4.7 e Figura 4.8.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)	Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	23,0	16	-22,5	-23,1
1	37,5	37,6	17	-37,5	-37,0
2	52,5	53,1	18	-52,5	-51,7
3	60,0	60,7	19	-60,0	-60,9
4	15,0	14,3	20	-15,0	-15,2
5	37,5	37,4	21	-37,5	-37,0
6	37,5	36,8	22	-37,5	-38,1
7	52,5	52,8	23	-52,5	-51,6
8	0,0	0,2	24	0,0	-0,3
9	15,0	15,5	25	-15,0	-15,3
10	7,5	8,1	26	-7,5	-7,6
11	15,0	15,2	27	-15,0	-15,5
12	-15,0	-15,8	28	15,0	14,6
13	-15,0	-15,0	29	15,0	15,3
14	-30,0	-29,7	30	30,0	29,4
15	-30,0	-29,7	31	30,0	29,1

Figura 4.7: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 1 gerada com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone (erros no eixo  $x$ ).

Ao realizar as medições de erros de posicionamento, os cuidados com o posicionamento incorreto dos microfones, a distância e altura entre a fonte e o *array* foram muito grandes.

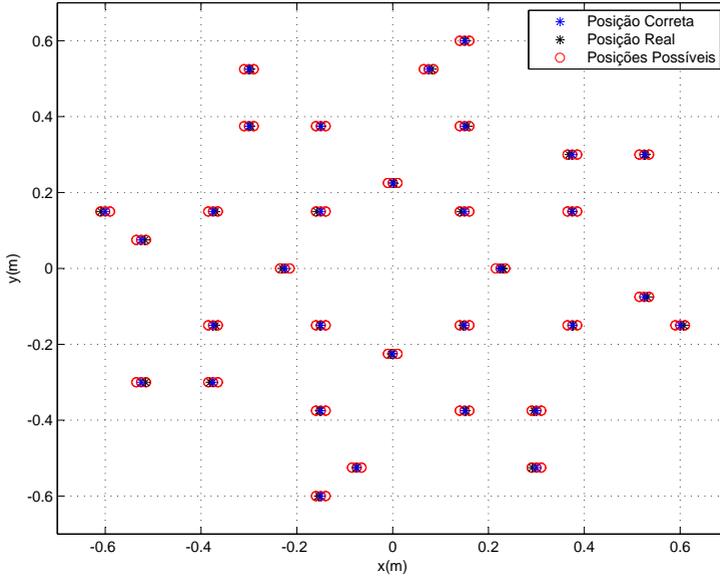
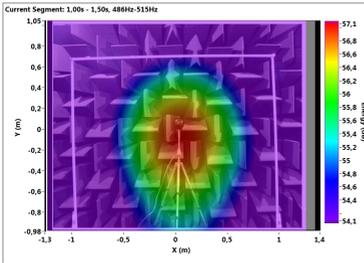
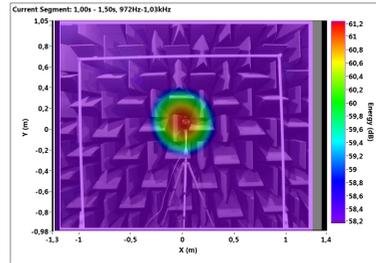


Figura 4.8: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 1,0 cm; Geometria número 1 gerada.

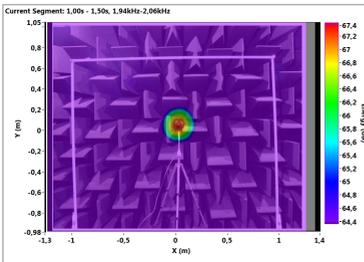
Na Figura 4.9 estão os mapas de *beamforming* para a geometria contendo erros de até 1,0 cm no posicionamento. As figuras apresentam como a fonte se comporta ao se variar a frequência, utilizando faixa dinâmica de 3 dB. Na frequência de 16 kHz pode-se observar a presença de *lóbulos espelhos*, explicado em 2.3.8.



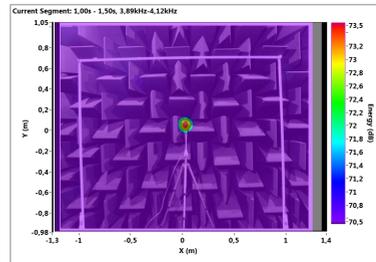
(a) 500 Hz.



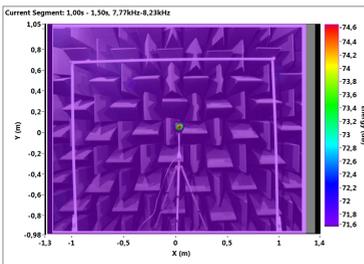
(b) 1 kHz.



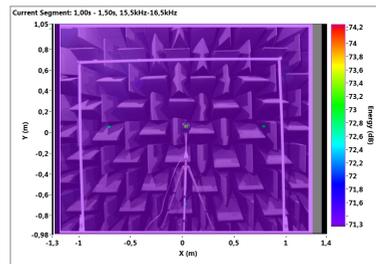
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura 4.9: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 1,0 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 1. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 24,7°C e umidade relativa de 64,4 %.

Nota-se diferenças principalmente na diminuição do nível de pressão sonora, o que pode acarretar em alguns casos a dificuldade da visualização da fonte. A diminuição do nível de pressão sonora pode ser melhor evidenciada ao se observar o mapa de *beamforming* em uma dimensão, Seção 4.1.2.

#### 4.1.2 Mapas de *beamforming* em uma dimensão

Para a comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm, assim como Yardibi [22], obter-se-á a linha central de Energia (dB), ou seja, faz-se uma varredura no eixo  $x$  na linha horizontal  $y=0$  para os mapas de *beamforming* da Figura 4.9.

As Figuras 4.10 a 4.15 mostram as respostas de *beamforming* em uma dimensão para cada frequência de avaliação.

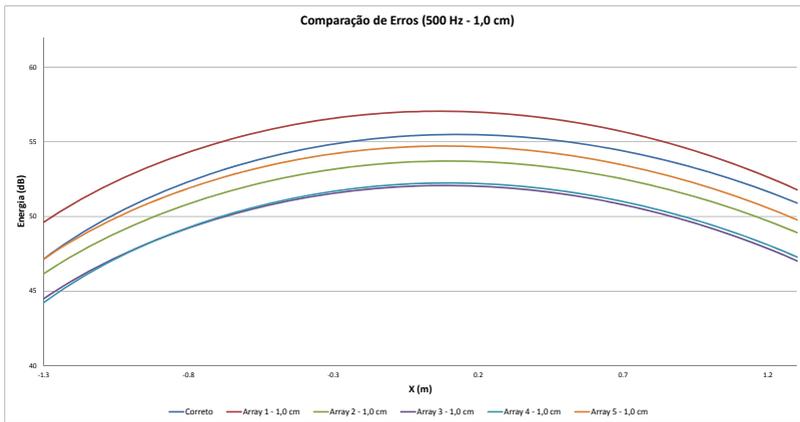


Figura 4.10: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 500 Hz.

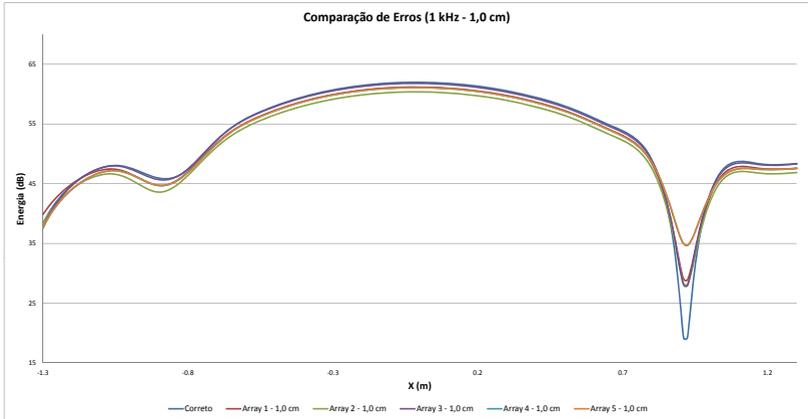


Figura 4.11: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 1 kHz.

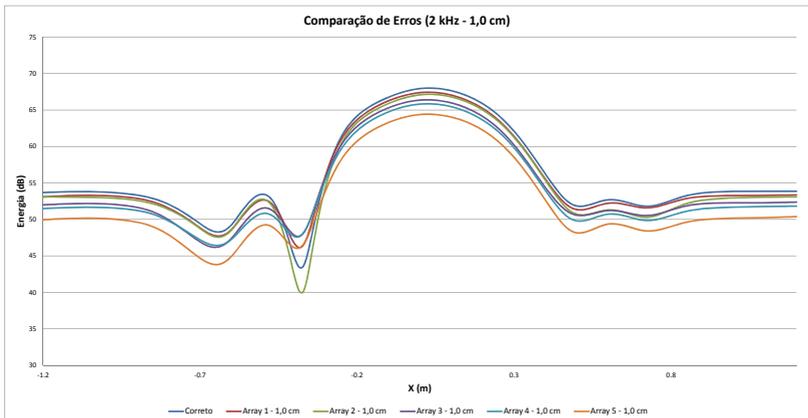


Figura 4.12: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 2 kHz.

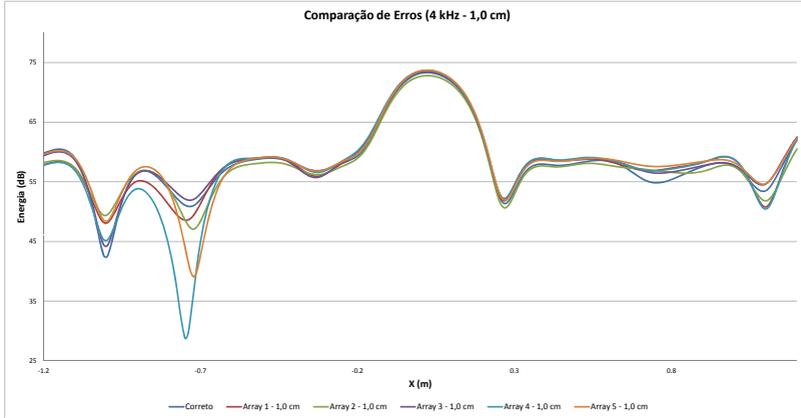


Figura 4.13: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 4 kHz.

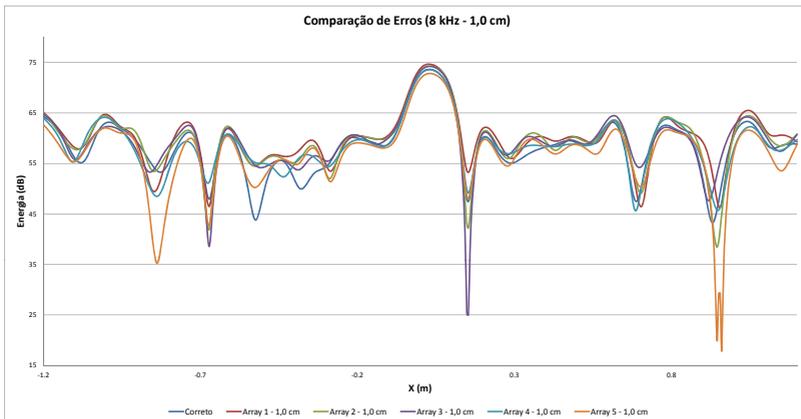


Figura 4.14: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 8 kHz.

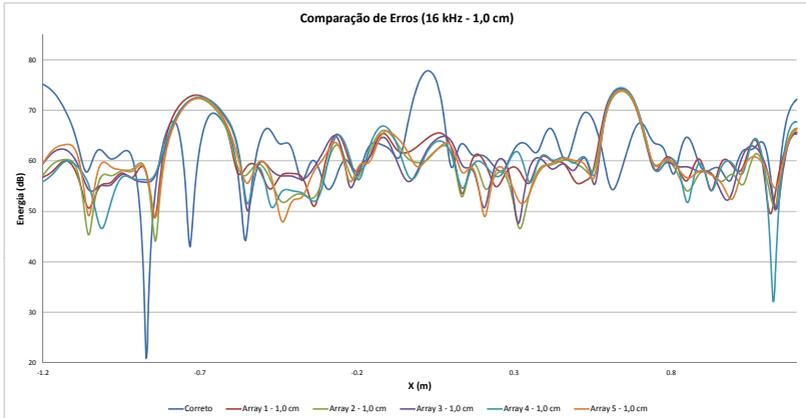


Figura 4.15: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 1,0 cm. Frequência de 16 kHz.

Ao observar o mapa de *beamforming* em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), pode-se concluir que ocorre uma diminuição do nível de pressão sonora e no caso particular de 16 kHz, as geometrias erradas não conseguem identificar a fonte centralizada (note o pico central da Figura 4.15). Esses fatos ficam mais acentuados ao aumentar o erro de posicionamento entre os microfones. As medições com erros de posicionamento de até 2,5 cm, 5,0 cm e 6,5 cm podem ser observadas no Apêndice A. Para verificar se a resposta de *beamforming* é válida para determinado erro de posicionamento, foi utilizada a correlação (Seção 4.1.3).

### 4.1.3 Correlação

Assim como Trapet [39], para a avaliação dos erros de posicionamento de microfones, será utilizada a correlação, que é uma maneira de "quantificação da tendência das respostas".

A correlação indica a força e a direção do relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias. No uso estatístico geral, correlação se refere a medida da relação entre duas variáveis [40].

A partir das respostas em uma dimensão de *beamforming* obtém-se a correlação entre a resposta correta e as respostas com erros no

posicionamento dos microfones.

A Tabela 4.1 apresenta a correlação para erros de até 1,0 cm no posicionamento dos microfones.

Tabela 4.1: Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 1,0 cm.

	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	12kHz	16kHz
Array 1	0,984	0,992	0,996	0,974	0,894	0,755	0,164
Array 2	0,996	0,991	0,998	0,971	0,915	0,872	0,157
Array 3	0,992	0,994	0,986	0,996	0,873	0,766	0,205
Array 4	0,997	0,974	0,985	0,886	0,905	0,817	0,171
Array 5	0,993	0,974	0,983	0,939	0,801	0,862	0,171
<b>Média</b>	<b>0,992</b>	<b>0,985</b>	<b>0,990</b>	<b>0,953</b>	<b>0,878</b>	<b>0,814</b>	<b>0,174</b>

A Tabela 4.2 apresenta a correlação para erros de até 2,5 cm no posicionamento dos microfones.

Tabela 4.2: Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 2,5 cm.

	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	12kHz	16kHz
Array 1	0,965	0,997	0,979	0,974	0,828	0,703	0,696
Array 2	0,948	0,981	0,993	0,907	0,759	0,561	0,762
Array 3	0,978	0,996	0,987	0,971	0,810	0,759	0,820
Array 4	0,985	0,995	0,944	0,910	0,661	0,522	0,629
Array 5	0,977	0,990	0,974	0,891	0,660	0,496	0,630
<b>Média</b>	<b>0,971</b>	<b>0,991</b>	<b>0,975</b>	<b>0,931</b>	<b>0,744</b>	<b>0,608</b>	<b>0,707</b>

A Tabela 4.3 apresenta a correlação para erros de até 5,0 cm no posicionamento dos microfones.

Tabela 4.3: Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 5,0 cm.

	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	12kHz	16kHz
Array 1	0,984	0,993	0,992	0,906	0,461	0,278	0,383
Array 2	0,998	0,992	0,993	0,938	0,503	0,359	0,554
Array 3	0,995	0,974	0,994	0,837	0,482	0,289	0,227
Array 4	0,994	0,987	0,981	0,952	0,575	0,575	0,588
Array 5	0,989	0,997	0,997	0,941	0,668	0,376	0,579
<b>Média</b>	<b>0,992</b>	<b>0,989</b>	<b>0,992</b>	<b>0,915</b>	<b>0,538</b>	<b>0,375</b>	<b>0,466</b>

A Tabela 4.4 apresenta a correlação para erros de até 6,5 cm no posicionamento dos microfones.

Tabela 4.4: Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 6,5 cm.

	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	12kHz	16kHz
Array 1	0,998	0,922	0,977	0,890	0,319	0,337	0,233
Array 2	1,000	0,916	0,993	0,870	0,438	0,222	0,465
Array 3	0,999	0,953	0,980	0,916	0,528	0,312	0,661
Array 4	0,997	0,928	0,946	0,852	0,472	0,596	0,021
Array 5	0,997	0,934	0,991	0,913	0,607	0,500	0,653
<b>Média</b>	<b>0,998</b>	<b>0,931</b>	<b>0,977</b>	<b>0,888</b>	<b>0,473</b>	<b>0,394</b>	<b>0,407</b>

Utilizando os dados das medições (Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4) e construindo um gráfico de correlação (Figura 4.16).

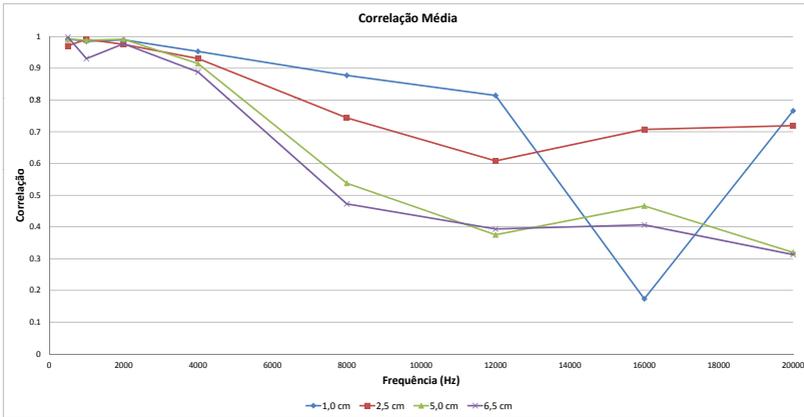


Figura 4.16: Gráfico de correlação para todos os erros de posicionamento dos microfones (1,0 cm; 2,5 cm; 5,0 cm; 6,5 cm), nas frequências de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz.

Como era esperado, nota-se que a correlação diminui na medida que a frequência aumenta e os erros de posicionamento aumentam.

Assim como Trapet [39], avaliando-se a Figura 4.16 e observando onde as curvas cruzam a correlação de 95 %, estimou-se uma relação entre a correlação e o comprimento de onda que pode ser verificado na Tabela 4.5. Por exemplo, para o erro de posicionamento de 6,5 cm: Sabemos que  $\lambda = c/f$ , que substituindo torna-se  $\lambda = 343/750 = 0,457$ . Ao dividir o valor de  $\lambda$  por 7,00 chega-se aproximadamente no valor do erro de 6,5 cm.

Tabela 4.5: Erros de posicionamento e comprimento de onda para a correlação de 95 %.

Erro	Frequência	Comprimento de onda
6,5 cm	750 Hz	$\lambda/7,00$
5,0 cm	3425 Hz	$\lambda/2,00$
2,5 cm	3475 Hz	$\lambda/4,00$
1,0 cm	4175 Hz	$\lambda/8,00$

Nota-se que para o erro máximo de posicionamento de 6,5 cm, a frequência de cruzamento é baixa para a correlação de 95 %.

Apenas para efeitos de comparação, observando onde o gráfico cruza a correlação de 90 %, as respostas de *beamforming* para a frequência e consequentemente comprimento de onda são:

Tabela 4.6: Erros de posicionamento e comprimento de onda para a correlação de 90 %.

Erro	Frequência	Comprimento de onda
6,5 cm	3900 Hz	$\lambda/1,35$
5,0 cm	4200 Hz	$\lambda/1,65$
2,5 cm	4750 Hz	$\lambda/3,00$
1,0 cm	6800 Hz	$\lambda/5,00$

Avaliando a tabela 4.6 em comparação com a tabela 4.5, nota-se mudanças grandes principalmente no erro de posicionamento de 6,5 cm, devido a uma correlação muito baixa na frequência de 1 kHz.

Segundo Trapet [39]: "Como regra geral, pode-se afirmar que os resultados imperfeitos concordam bem com o resultado original, desde que os erros de posicionamento dos microfones correspondam a menos de  $\lambda/5$ , utilizando uma correlação de 95 %".

Neste trabalho chegou-se em resultados diferentes para a correlação dos resultados imperfeitos em comparação com o resultado original. A medida que os erros de posicionamento vão aumentando, a frequência na qual se pode trabalhar vai diminuindo. Por exemplo, para medições em frequências baixas, até 4175 Hz, segundo a Tabela 4.5, o posicionamento dos microfones pode estar errado em até 1,0 cm em relação a posição correta, que ainda assim a localização da fonte não é prejudicada, utilizando correlação de 95 %.

Neste trabalho foi avaliado apenas o erro de posicionamento no eixo  $x$ ,

ou seja, os microfones poderiam variar de posição somente na barra onde estão sustentados. Para frequências altas, por exemplo quando a técnica de *beamforming* é aplicada em túnel de vento com modelos em escala, deve ser considerada a variação do posicionamento devido a vibração da barra, observar o Apêndice E. Também não foi estudado a variação de profundidade (eixo  $z$ ) dos microfones, seguindo como sugestão para trabalhos futuros.

#### 4.1.4 Comportamento da faixa dinâmica ao variar a frequência

Para a avaliação da faixa dinâmica em relação a frequência, foi realizada uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava, Figura 4.17.

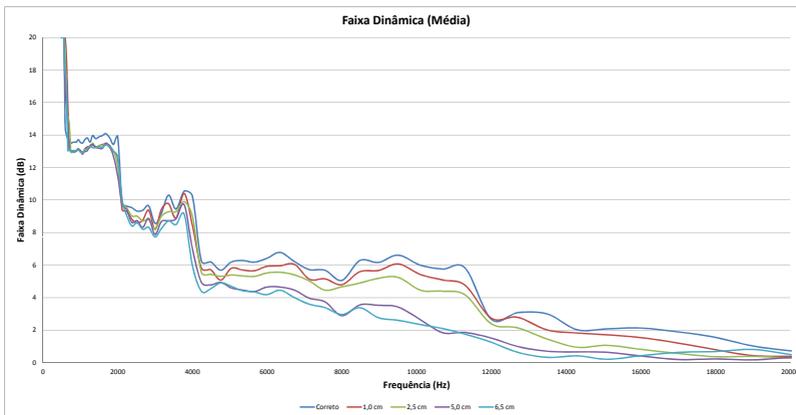


Figura 4.17: Faixa dinâmica média dos *arrays* com erros de posicionamento dos microfones ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

Na medida que os erros na posição dos microfones e a frequência aumentam, a faixa dinâmica diminui. Isso acontece porque os lóbulos laterais, na média, tendem a ser maiores e o lóbulo principal menor quanto a Energia (dB). Diferenças maiores ocorrem principalmente nas frequências acima de 4 kHz.

#### 4.1.5 Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência

Nesta Seção, foi estudado como o lóbulo principal se comporta ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava, Figura 4.18.

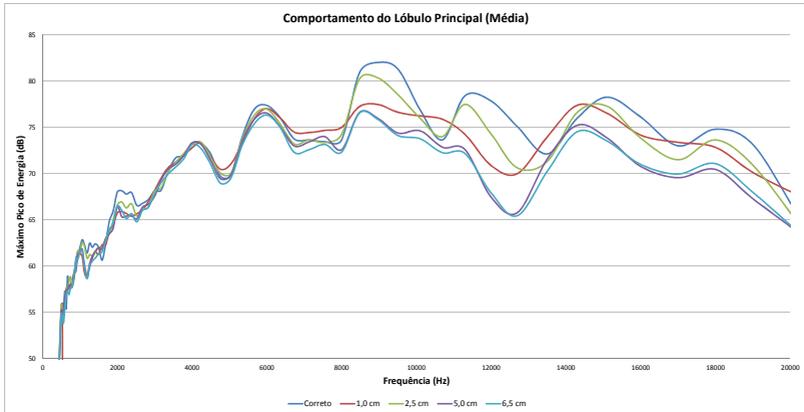


Figura 4.18: Comportamento médio do lóbulo principal dos *arrays* com erros de posicionamento dos microfones ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

Nota-se que até a frequência de 8 kHz, os valores de energia para o lóbulo principal seguem a mesma tendência, porém para frequências além dessa, os desvios de posição produzem tendências de energia diferentes e geralmente inferiores em relação a geometria correta. Ou seja, na medida que os erros aumentam, a fonte fica mais difícil de se observar devido a redução do lóbulo principal e devido a baixa confiabilidade da resposta.

#### 4.1.6 Comportamento da largura de lóbulo ao variar a frequência

Também foi avaliado como a largura de lóbulo se comporta ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava, Figura 4.19.

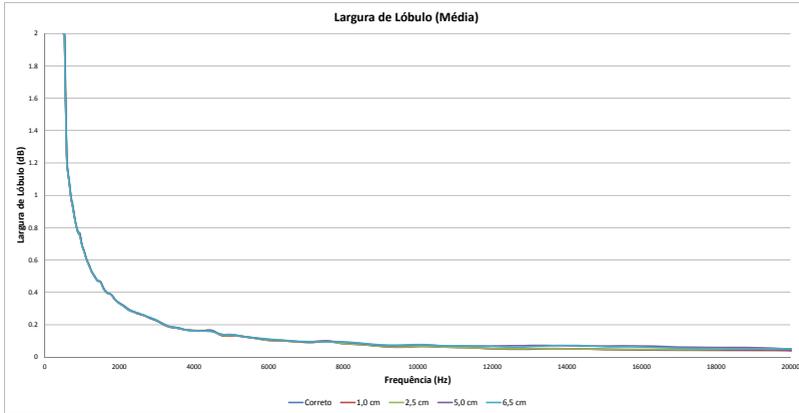


Figura 4.19: Largura de lóbulo média dos *arrays* com erros de posicionamento dos microfones ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

Nota-se que a largura de lóbulo segue a mesma tendência mesmo quando os erros de posicionamento dos microfones aumentam. Apenas nas frequências acima de 12 kHz a largura de lóbulo apresenta um desvio quase que imperceptível.

## 5 EFEITOS DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA

Neste capítulo serão avaliados os efeitos da temperatura e umidade relativa na técnica. Estes efeitos impactam diretamente na absorção atmosférica e velocidade do som na utilização do *beamforming*.

É muito importante esta avaliação quando se trabalha com a técnica de *beamforming* em altas frequências (que é o caso de modelos em escala, Apêndice E) e quando se trabalha em distâncias consideráveis (avião sobrevoando o *array* com a frequência alta de observação).

Será fornecido um exemplo de medição para observar a mudança tanto na quantização de nível de pressão sonora quanto na construção dos mapas.

### 5.1 Absorção Atmosférica

A energia da onda sonora é continuamente reduzida em certos processos dissipativos durante a sua propagação. Conforme a onda viaja através do ar, uma parte da energia sonora é convertida em calor. Este processo é chamado de atenuação ou absorção. A absorção se torna significativa nas altas frequências [44, 45].

O coeficiente de absorção atmosférica ( $\alpha$ ) possui três termos, o primeiro corresponde ao relaxamento dos processos de viscosidade e condução térmica, o segundo termo corresponde ao relaxamento do oxigênio (índice O) e o terceiro termo corresponde ao relaxamento do nitrogênio (índice N). A atenuação depende da temperatura, pressão, frequência e umidade e pode ser calculado da seguinte forma [46]:

$$\begin{aligned} \alpha = & 8,686 * f^2 * \left[ (1,84 * 10^{-11} * \sqrt{T/T_r} * \left(\frac{P_a}{P_r}\right)^{-1} \right. \\ & + \left( 0,01275 * (T/T_r)^{(-5/2)} * \left[ e^{-2239,1/T} \right] * \left( \frac{f_{rO}}{f_{rO}^2 + f^2} \right) \right) \\ & \left. + \left( 0,1068 * (T/T_r)^{(-5/2)} * \left[ e^{-3352/T} \right] * \left( \frac{f_{rN}}{f_{rN}^2 + f^2} \right) \right) \right], \end{aligned} \quad (5.1)$$

onde  $f$  é a frequência,  $P_a$  é a pressão atmosférica local,  $P_r = 101,325$  kPa é a pressão atmosférica de referência,  $T_r = 293,15$  K (20,0°C) é a temperatura de referência e  $T$  é a temperatura local.

As frequências de relaxação  $f_{rN}$  e  $f_{rO}$  são associadas com a vibração das

moléculas de nitrogênio e oxigênio. Elas variam com a pressão, temperatura e umidade relativa.

Foi realizado um estudo de caso para a cidade de Florianópolis, utilizando os dados da estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina, onde a média dos dados são fornecidos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Média dos dados meteorológicos da cidade de Florianópolis.

Temperatura Média	21,08°C
Umidade Relativa	79,17 %
Pressão Atmosférica	101,18 kPa

Utilizando os dados meteorológicos médios da cidade de Florianópolis no ano de 2010, pode-se calcular a absorção atmosférica em função da frequência, Figura 5.1.

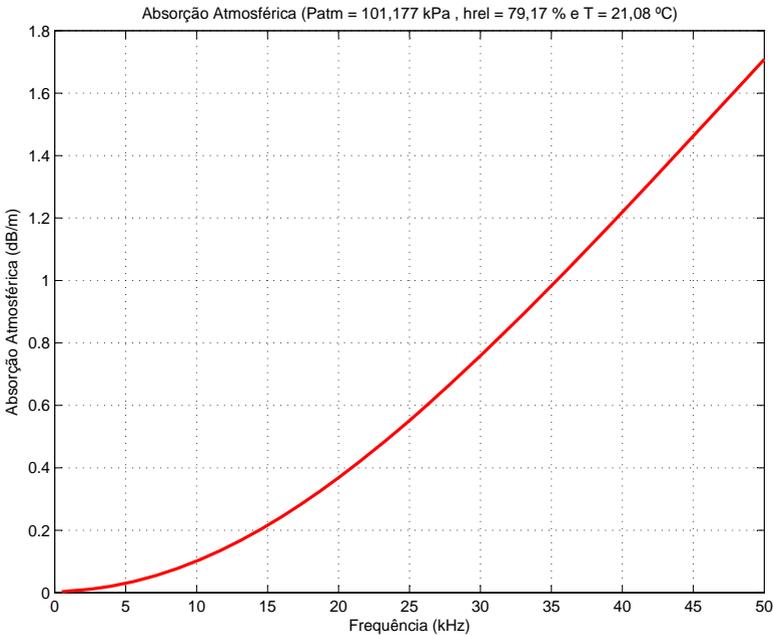


Figura 5.1: Absorção atmosférica  $\times$  frequência para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis.

Utilizando os dados meteorológicos médios da cidade de Florianópolis, é apresentado um modelo genérico dependente da frequência. Pode-se notar o comportamento da absorção atmosférica em função da umidade relativa, mantendo a temperatura fixa em  $21,08^{\circ}\text{C}$ , Figura 5.2.

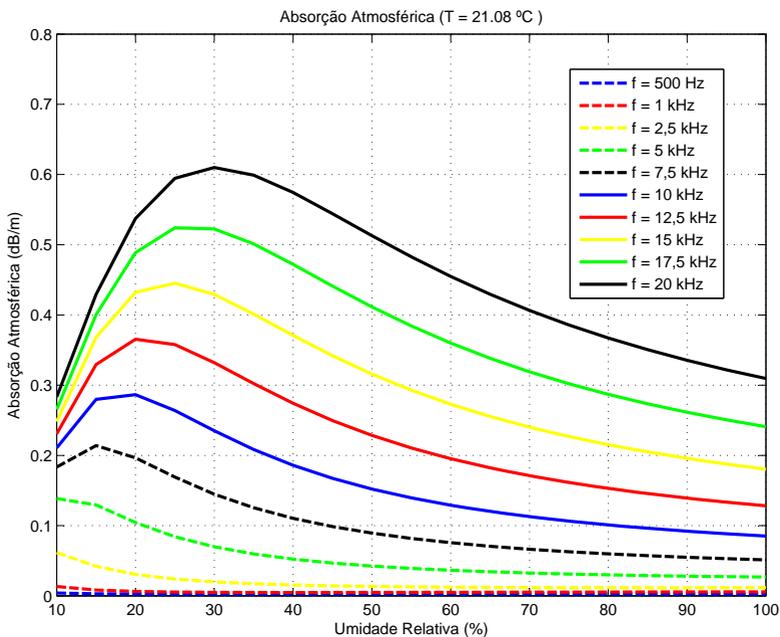


Figura 5.2: Absorção atmosférica  $\times$  frequência para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis. Temperatura fixa em  $21,08^{\circ}\text{C}$ .

Utilizando os dados meteorológicos médios da cidade de Florianópolis, é apresentado um modelo genérico dependente da frequência. Pode-se notar o comportamento da absorção atmosférica em função da temperatura, mantendo a umidade relativa fixa em 79,17 %, Figura 5.3.

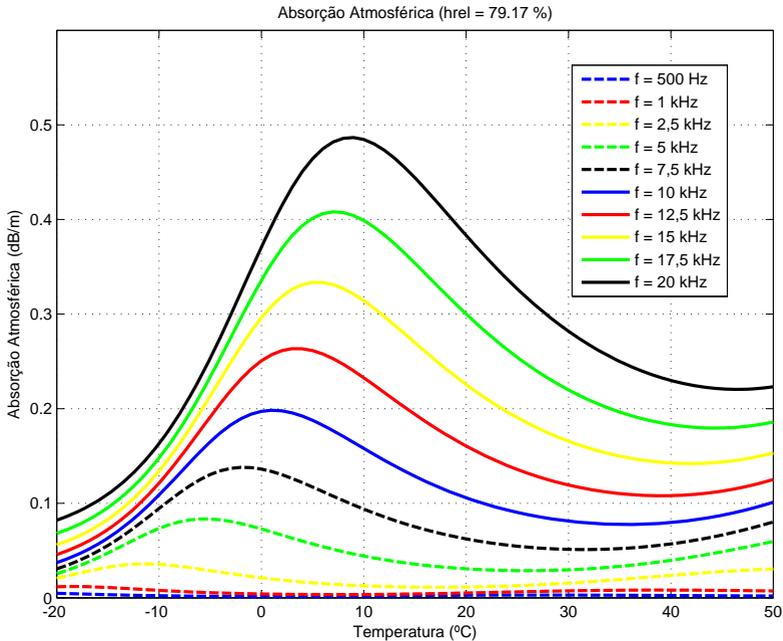


Figura 5.3: Absorção atmosférica  $\times$  frequência para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis. Umidade relativa fixa em 79,17 %.

A formulação completa da absorção atmosférica pode ser melhor entendida observando o Apêndice D.

## 5.2 Velocidade do Som

A velocidade do som é a distância percorrida por uma onda sonora por unidade de tempo. Apesar da velocidade do som variar principalmente com a mudança de temperatura, discute-se o quanto a umidade relativa influencia na velocidade do som. Esta variação será estudada neste capítulo e também será apresentado um estudo de caso para a cidade de Florianópolis.

Considerando o ar com umidade, em condições normais, a quantidade de água no estado gasoso na atmosfera varia de 0% a 5%, dependendo dos componentes da atmosfera. O conteúdo de vapor de água é maior nas latitudes baixas e diminui com a altitude, tornando-se quase insignificante acima de 10 km.

A água contida no ar pode tornar-se líquida em um processo chamado condensação. A condensação ocorre geralmente quando o ar passa por um resfriamento. Exemplos incluem a condensação nas janelas e do orvalho que se forma nas folhas de madrugada.

A Norma ANSI S1.26-1995 [46] contém uma formulação para a velocidade do som, conforme:

$$c = 343,2 * \sqrt{T/T_r}, \quad (5.2)$$

mas a Equação 5.2 negligencia o efeito do vapor de água sobre a velocidade do som.

O efeito do vapor de água sobre a velocidade do som pode ser levado em conta utilizando:

$$c = 343,2 * (1 + 0,0016 * h) * \sqrt{T/T_r}, \quad (5.3)$$

onde  $h$  é a concentração molar de vapor de água,  $T_r = 293,15$  K (20,0°C) é a temperatura de referência e  $T$  é a temperatura local.

Para obter a concentração molar de vapor de água é utilizada a Equação 5.4:

$$h = h_r \frac{P_{sat}/P_r}{P_a/P_r} = P_r \left( \frac{h_r}{P_a} \right) \left( \frac{P_{sat}}{P_r} \right), \quad (5.4)$$

onde  $h_r$  é a umidade relativa (%),  $P_a$  é a pressão atmosférica local,  $P_r = 101,325$  kPa é a pressão atmosférica de referência e  $P_{sat}$  é a pressão de saturação do vapor.

Para obter o valor de  $P_{sat}/P_r$  é utilizado:

$$\frac{P_{sat}}{P_r} = 10^V, \quad (5.5)$$

onde o expoente  $V$  é dado por:

$$\begin{aligned} V = & 10,79586[1 - T_{01}/T] - 5,02808 * \log(T/T_{01}) \\ & + 1,50474 * 10^{-4} * (1 - 10^{-8,29692[(T/T_{01})-1]}) \\ & + 0,42873 * 10^{-3} * (-1 + 10^{4,76955[1-(T_{01}/T)]}) - 2,2195983, \end{aligned} \quad (5.6)$$

onde  $T_{01} = 273,15$  K é o ponto triplo da temperatura isotérmica.

Calculando a velocidade do som para a cidade de Florianópolis (estudo de caso), com a temperatura média anual de  $21,08^\circ\text{C}$  e a pressão atmosférica de  $101,18$  kPa. Substituindo os valores na Equação 5.6:

$$\begin{aligned} V = & 10,79586[1 - \left(\frac{273,15}{294,23}\right)] - 5,02808 * \log\left(\frac{294,23}{273,15}\right) \\ & + 1,50474 * 10^{-4} * (1 - 10^{-8,29692[\left(\frac{294,23}{273,15}\right)-1]}) \\ & + 0,42873 * 10^{-3} * (-1 + 10^{4,76955[1-\left(\frac{273,15}{294,23}\right)]}) - 2,2195983. \end{aligned}$$

Então, com o valor de  $V$  e substituindo na Equação 5.5:

$$\frac{P_{sat}}{P_r} = 10^V = 10^{-1,6081},$$

é possível obter o valor de  $h$  ao substituir na Equação 5.7:

$$h = P_r \left(\frac{h_r}{P_a}\right) \left(\frac{P_{sat}}{P_r}\right), \quad (5.7)$$

que substituindo os valores, a concentração molar de vapor de água ( $h$ ) fica em função da umidade relativa ( $h_r$ ):

$$h = 101,325 * \left(\frac{h_r}{101,18}\right) * 10^{-1,6081}.$$

Ao variar os valores de umidade relativa ( $h_r$ ) obtém-se alguns valores de  $h$

que são utilizados como valores de entrada na Equação 5.3.

A Tabela 5.2 demonstra como a velocidade do som se comporta ao variar a umidade relativa ( $h_r$ ):

Tabela 5.2: Comportamento da velocidade do som ao variar a umidade relativa.

Umidade Relativa (%)	Velocidade do Som (m/s)
0	343,83
10	343,85
20	343,86
30	343,87
40	343,88
50	343,90
60	343,91
70	343,93
80	343,94
90	343,95
100	343,97

Observando os resultados da Tabela 5.2, nota-se uma variação de cerca de 0,15 m/s, se compararmos a velocidade do som com umidade relativa de 0% com a de 100%, o que leva a conclusão que a velocidade do som no ar é diretamente proporcional à temperatura e umidade relativa. Apesar de a umidade relativa praticamente não afetar a velocidade do som, em alguns casos, quando se deseja precisão altíssima, ela deve ser levada em conta.

### 5.3 Efeitos da temperatura

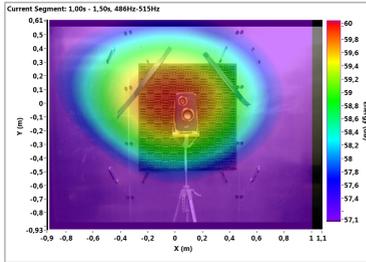
Foram investigados os efeitos da temperatura e umidade relativa nas medições de *beamforming*. Para isto, foi realizada uma série de medições no interior de uma câmara do laboratório POLO (Laboratório de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica) da Universidade Federal de Santa Catarina.

Esta câmara possibilita o controle da temperatura e umidade relativa no seu interior, Figura 5.4. A câmara possui exatidão de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  para a temperatura e  $\pm 0,05\%$  para a umidade relativa.

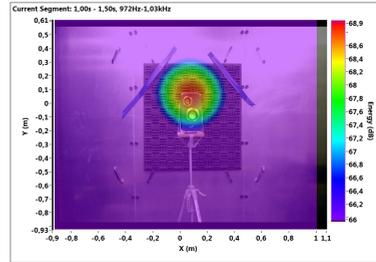


Figura 5.4: Medição de *beamforming* no interior de uma câmara de variação de temperatura e umidade relativa.

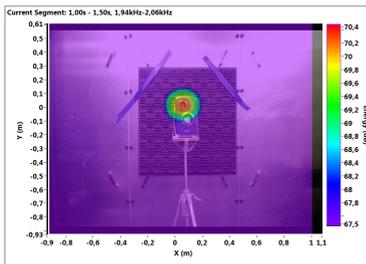
As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os mapas de *beamforming* para as temperaturas de  $15,0^\circ\text{C}$  e  $30,0^\circ\text{C}$ . As figuras apresentam como a fonte se comporta ao se variar a frequência, utilizando faixa dinâmica de 3 dB. Na frequência de 16 kHz, para ambas as temperaturas, pode-se observar a presença de lóbulos espelhos, explicado na Seção 2.3.8.

5.3.1 Temperatura no valor de  $15,0^{\circ}\text{C}$ 

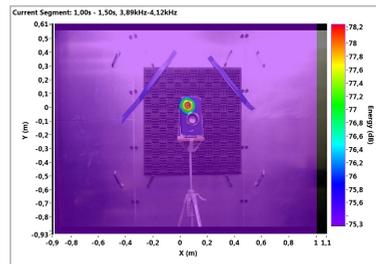
(a) 500 Hz.



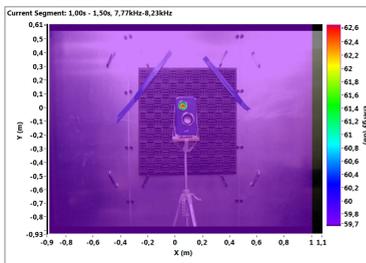
(b) 1 kHz.



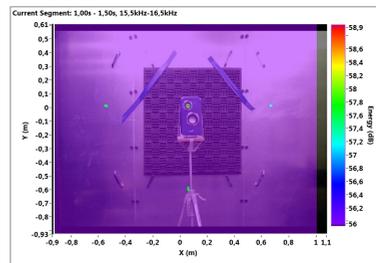
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.

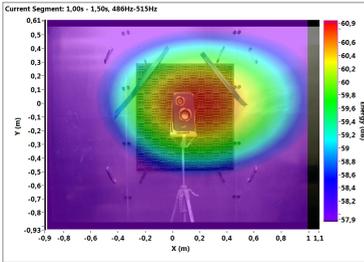


(e) 8 kHz.

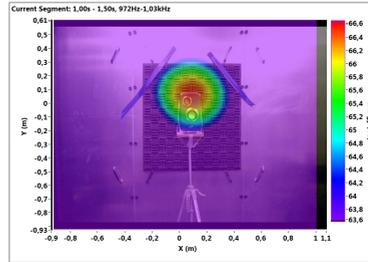


(f) 16 kHz.

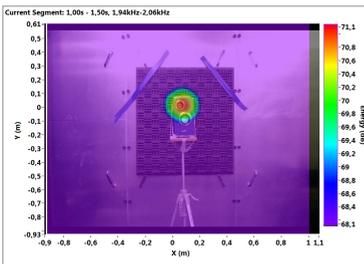
Figura 5.5: Efeitos da temperatura na medição de *beamforming*. Fonte: Ruído branco, posicionada a 1,4m de altura, 2,0m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de  $15,0^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa fixa em 50,0 %.

5.3.2 Temperatura no valor de  $30,0^{\circ}\text{C}$ 

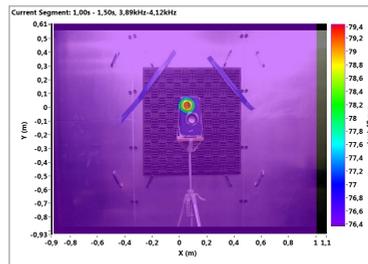
(a) 500 Hz.



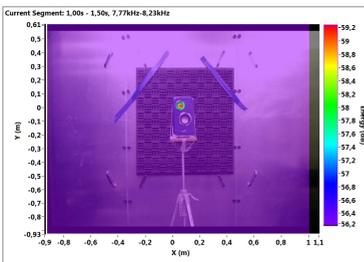
(b) 1 kHz.



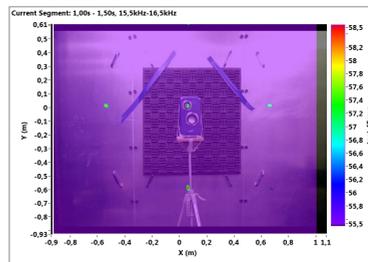
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura 5.6: Efeitos da temperatura na medição de *beamforming*. Fonte: Ruído branco, posicionada a 1,4m de altura, 2,0m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de  $30,0^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa fixa em  $50,0\%$ .

### 5.3.3 Resposta de beamforming em uma dimensão para a comparação de distintas temperaturas

Para avaliar como os mapas de *beamforming* se comportam ao variar a temperatura, assim como na Seção 4.1.2, obter-se-á a linha central de Energia (dB), ou seja, faz-se uma varredura no eixo  $x$  na linha horizontal  $y=0$  para os mapas de *beamforming* das Figuras 5.5 e 5.6 (Nesta Seção foram demonstrados apenas dois exemplos de temperaturas, porém no Apêndice B estão todas as Figuras, bem como todas as medições).

As Figuras 5.7 a 5.12 mostram as respostas de *beamforming* em uma dimensão para cada temperatura de avaliação em determinada frequência.

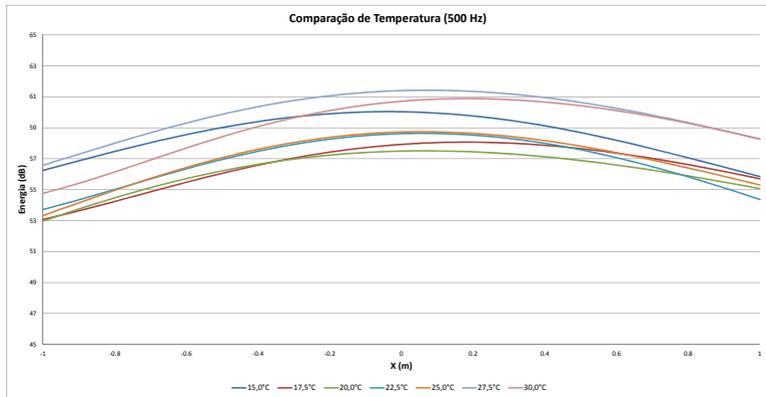


Figura 5.7: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 500 Hz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

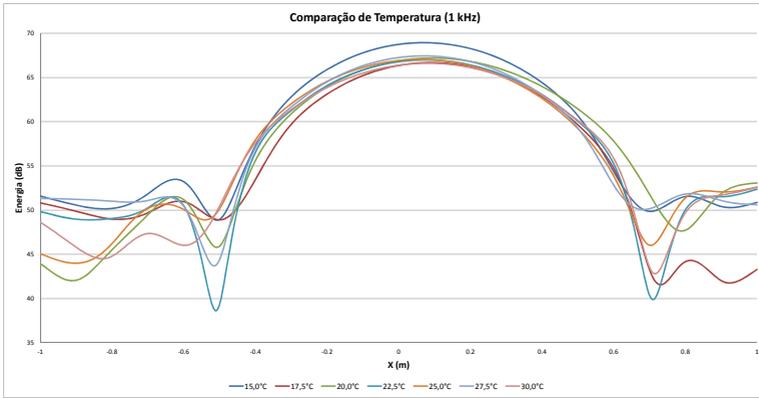


Figura 5.8: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparac o de temperaturas. Freq ncia de 1 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

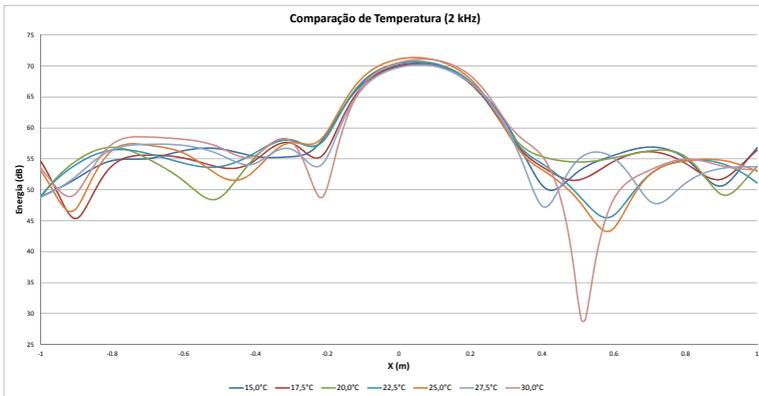


Figura 5.9: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparac o de temperaturas. Freq ncia de 2 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

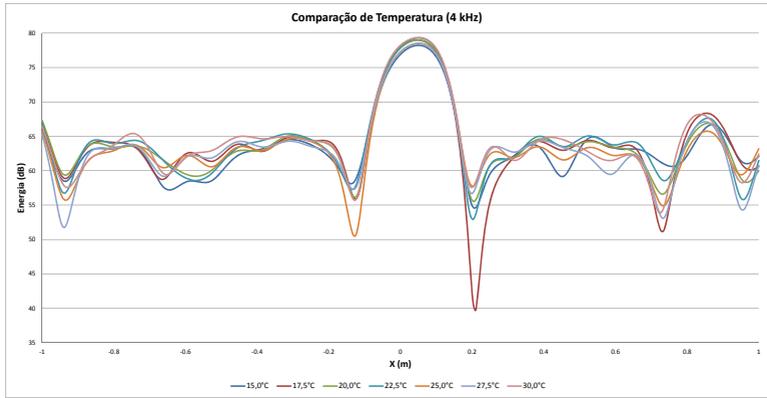


Figura 5.10: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 4 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

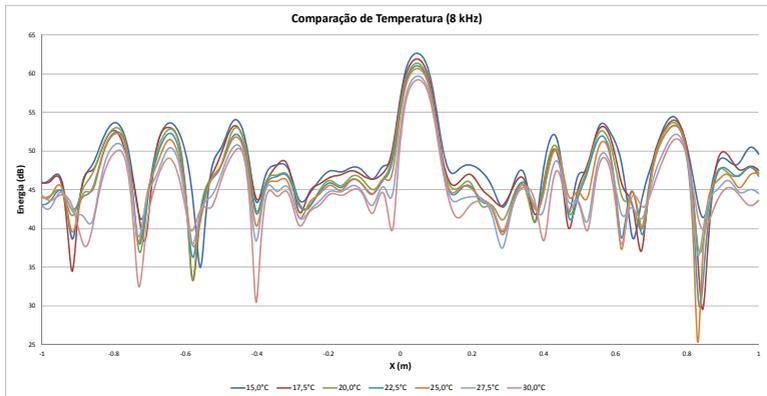


Figura 5.11: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 8 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

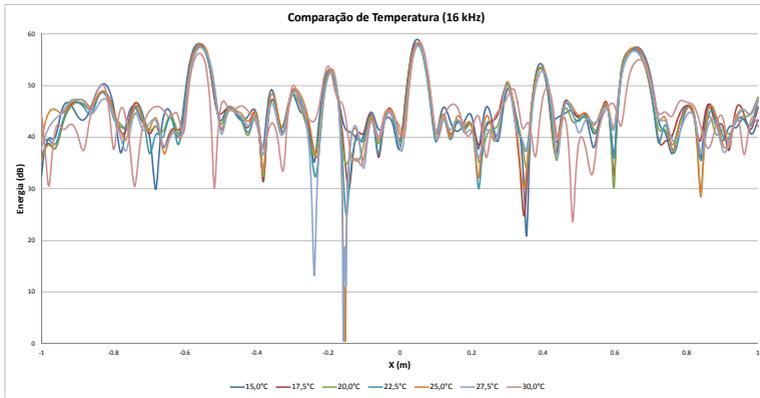


Figura 5.12: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 16 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

Ao se fazer a correlação entre os valores médios de temperatura, todas as avaliações resultaram em correlações acima de 95 %, ou seja, ao variar a temperatura, os mapas de *beamforming* quanto a localização de fontes, não são afetados.

Existe uma pequena diferença de amplitude de energia entre as mais baixas e as mais altas temperaturas. Nas frequências de 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz os mapas apresentam diferenças ínfimas em relação ao nível de energia, por exemplo para a frequência de 1 kHz, a diferença é de 0,4dB.

Já a frequência de 8 kHz apresenta níveis maiores de energia para as baixas temperaturas, onde a diferença chega a 1,6 dB, porém para a frequência de 16 kHz a diferença é de 0,2 dB.

A avaliação de faixa dinâmica, comportamento do lóbulo principal e largura de lóbulo pode ser visto a seguir.

### 5.3.4 Faixa dinâmica - Variação de temperatura

Para a avaliação da faixa dinâmica em relação a frequência, foi realizada uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava, Figura 5.13.

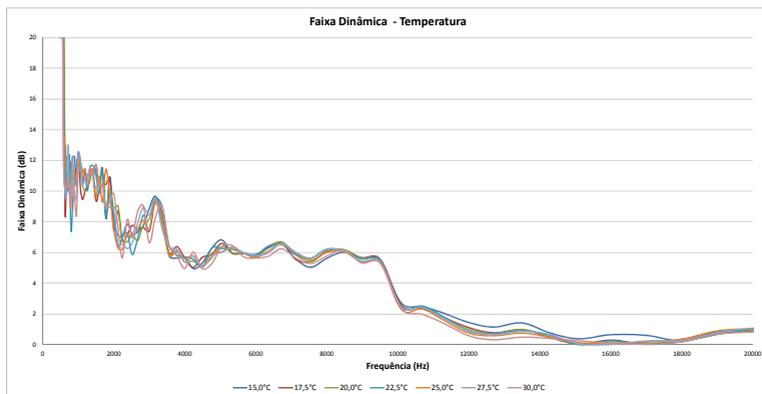


Figura 5.13: Faixa dinâmica ao variar a temperatura, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

Para a faixa de temperatura testada não há discrepâncias de forma expressiva em relação a faixa dinâmica. Apenas nas altas frequências, acima de 10 kHz nota-se que a faixa dinâmica é maior para as menores temperaturas.

### 5.3.5 *Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - Variação de temperatura*

Nesta Seção, foi estudado como o lóbulo principal se comporta ao aplicar uma varredura na frequência, Figura 5.14.

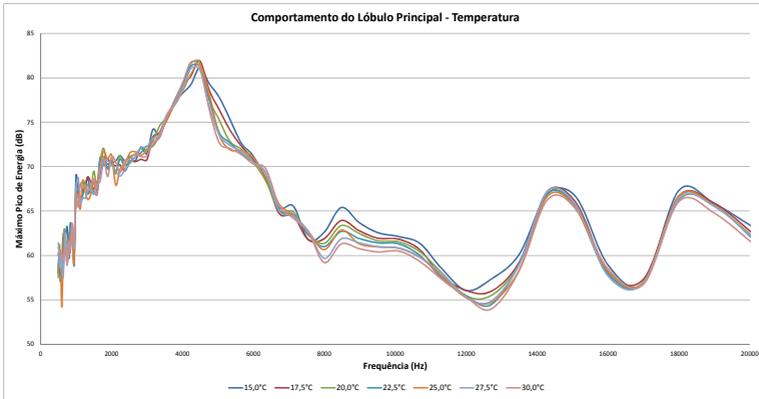


Figura 5.14: Comportamento do lóbulo principal ao variar a temperatura, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

Nota-se que o máximo pico de energia possui tendências de energia levemente diferentes e em algumas frequências (entre 5 kHz e 6 kHz e entre 8 kHz e 12 kHz) geralmente o lóbulo principal é maior para as temperaturas mais baixas. Ou seja, em temperaturas mais baixas o lóbulo principal é mais proeminente.

### 5.3.6 Largura de lóbulo - Variação de temperatura

Também foi avaliado como a largura de lóbulo se comporta em relação a temperatura ao aplicar uma varredura na frequência, Figura 5.15.

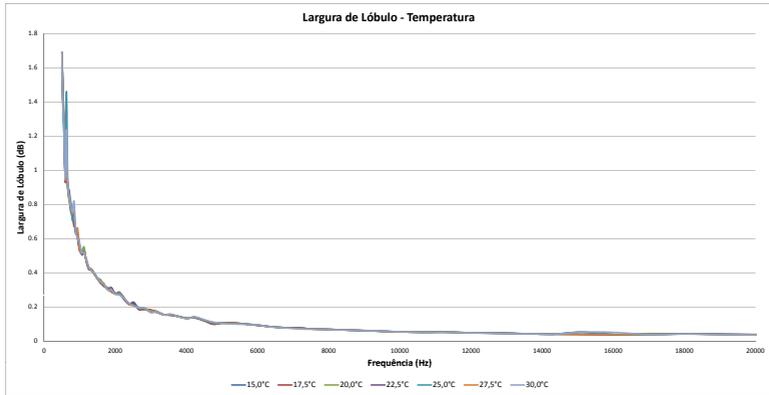


Figura 5.15: Largura de lóbulo ao variar a temperatura, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

Ao avaliar a Figura 5.15 conclui-se que a temperatura praticamente não influencia na largura de lóbulo.

#### 5.4 Efeitos da umidade relativa

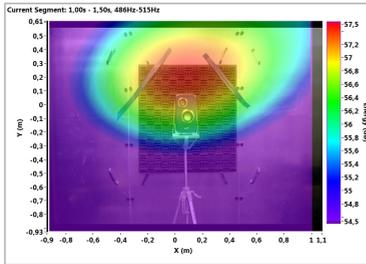
Nesta Seção será investigado o comportamento de *beamforming* ao se variar a umidade relativa. Foi utilizada a mesma câmara descrita na Seção 5.3, Figura 5.16.



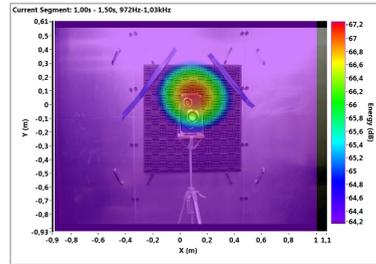
Figura 5.16: Medição de *beamforming* no interior de uma câmara de variação de temperatura e umidade relativa.

As Figuras 5.17 e 5.18 apresentam os mapas de *beamforming* para as umidades relativas de 50,0% e 80,0% respectivamente. As figuras apresentam como a fonte se comporta em relação a umidade relativa ao se variar a frequência, utilizando faixa dinâmica de 3 dB. Na frequência de 16 kHz, para ambas as umidades relativas, pode-se observar a presença de lóbulos espelhos.

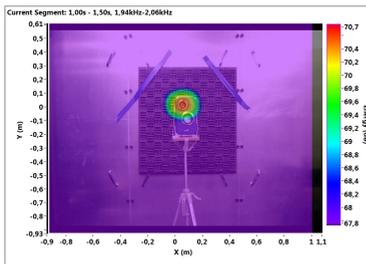
## 5.4.1 Umidade relativa no valor de 50,0 %



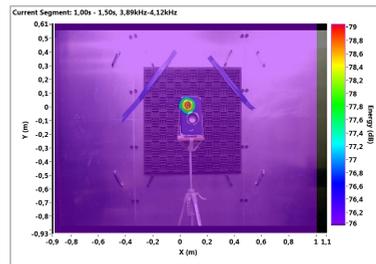
(a) 500 Hz.



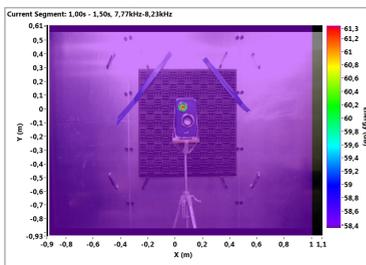
(b) 1 kHz.



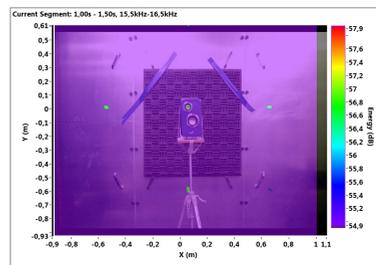
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



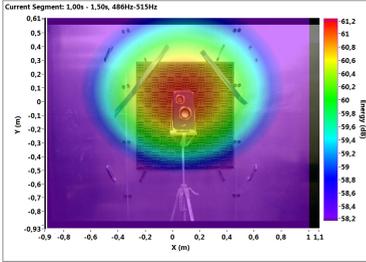
(e) 8 kHz.



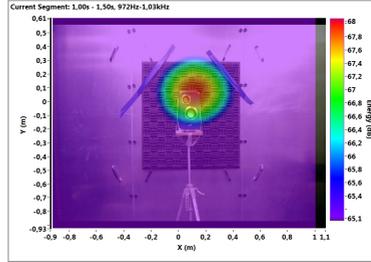
(f) 16 kHz.

Figura 5.17: Efeitos da umidade relativa. Fonte: Ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Umidade relativa de 50,0 % e temperatura fixa em 20,0°C.

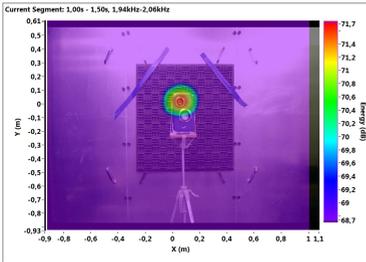
5.4.2 Umidade relativa no valor de 80,0 %



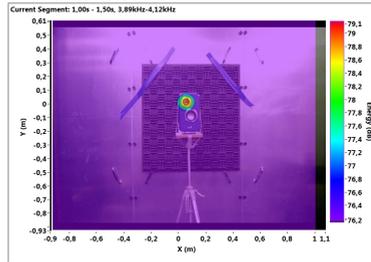
(a) 500 Hz.



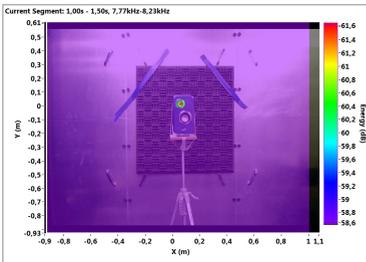
(b) 1 kHz.



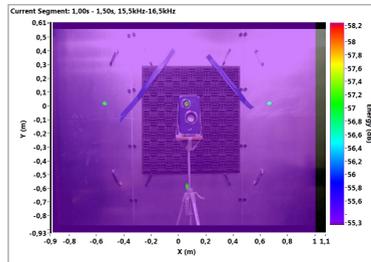
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura 5.18: Efeitos da umidade relativa. Fonte: Ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do array e centralizada. Umidade relativa de 80,0 % e temperatura fixa em 20,0°C.

### 5.4.3 Resposta de *beamforming* em uma dimensão para a comparação de umidades relativas

Utilizando o mesmo método da avaliação da temperatura, ou seja, obtendo a linha central de Energia (dB) das Figuras 5.17 e 5.18 (Nesta Seção foi demonstrada apenas dois exemplos de umidades relativa, porém no Apêndice B estão todas as Figuras, bem como todas as medições ).

As Figuras 5.19 a 5.24 mostram as respostas de *beamforming* em uma dimensão para cada umidade relativa de avaliação em determinada frequência.

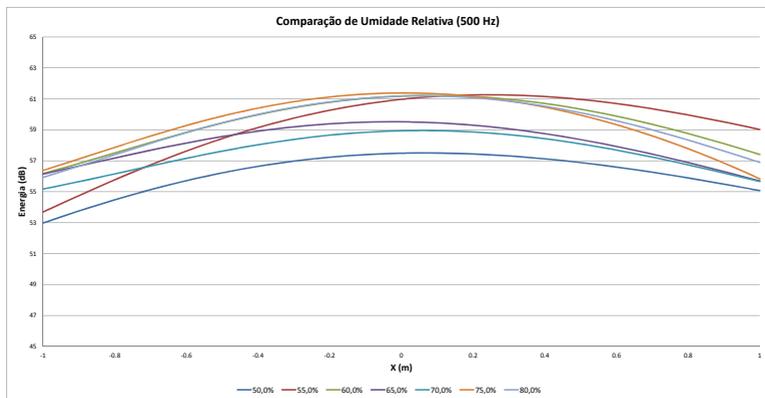


Figura 5.19: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 500 Hz. Temperatura fixa em 20,0°C.

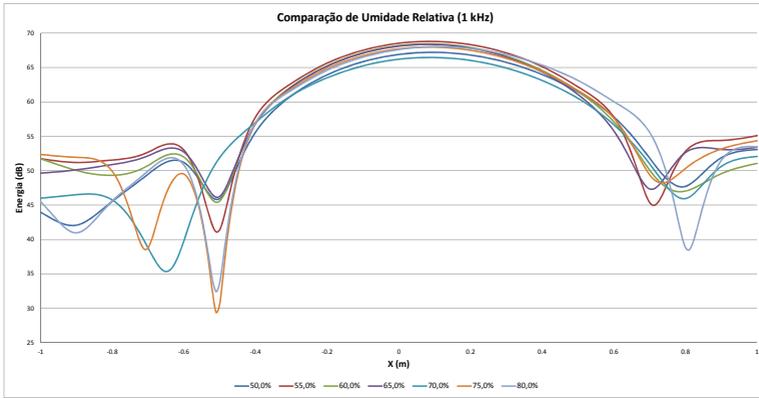


Figura 5.20: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparac o de umidades relativas. Frequência de 1 kHz. Temperatura fixa em 20,0 C.

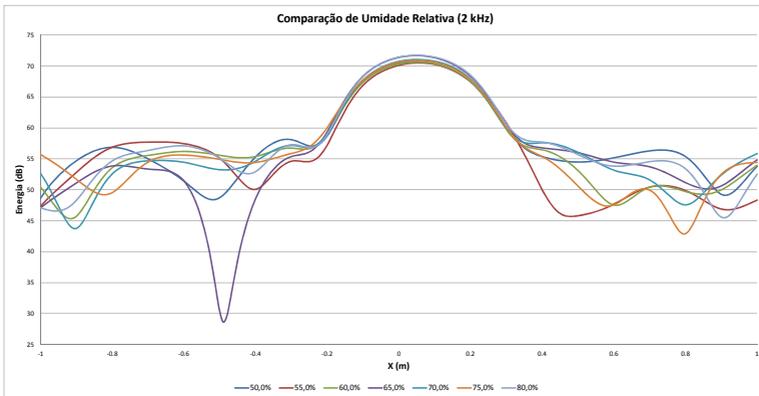


Figura 5.21: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparac o de umidades relativas. Frequência de 2 kHz. Temperatura fixa em 20,0 C.

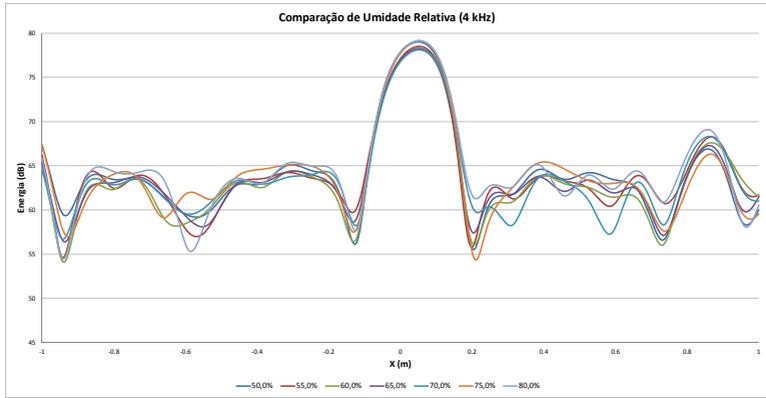


Figura 5.22: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 4 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C.

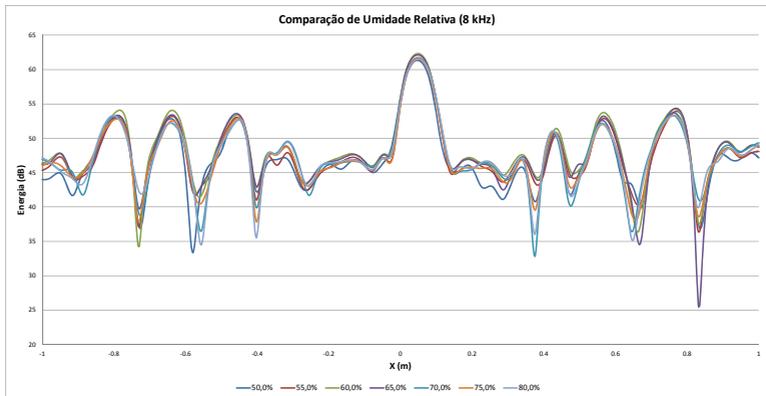


Figura 5.23: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 8 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C.

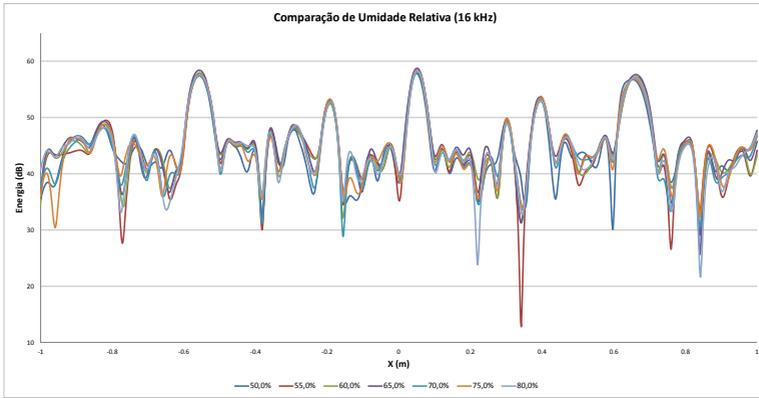


Figura 5.24: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 16 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C.

Ao avaliar as médias de umidades relativas nota-se que existe uma diferença mínima na resposta de *beamforming*, podendo-se concluir que a umidade relativa praticamente não influencia nos mapas de *beamforming*.

#### 5.4.4 Faixa dinâmica - Variação de umidade relativa

Para a avaliação da faixa dinâmica em relação a frequência, foi realizado uma varredura na frequência (de 20 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava, Figura 5.25.

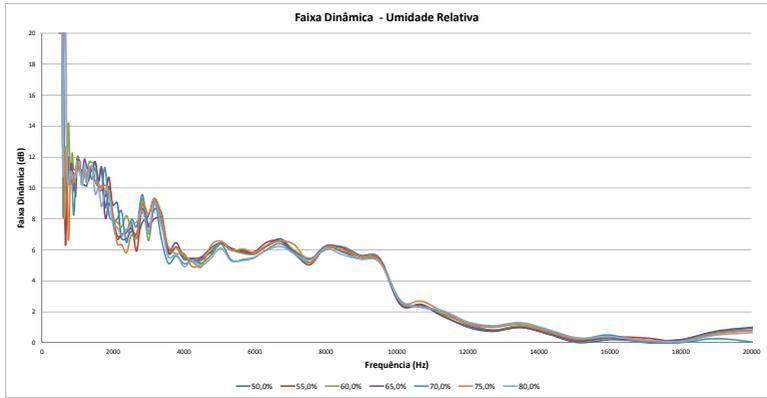


Figura 5.25: Faixa dinâmica ao variar a umidade relativa, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Temperatura fixa em 20,0°C.

Para a faixa de umidade relativa testada não há discrepâncias de forma expressiva. De forma geral a relação entre o lóbulo principal e os lóbulos laterais se mantêm. Ou seja, a umidade relativa não influencia na faixa dinâmica.

#### 5.4.5 *Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - Variação de umidade relativa*

Nesta Seção foi estudado como o lóbulo principal se comporta ao aplicar uma varredura na frequência, com banda de 1/3 de oitava, Figura 5.26.

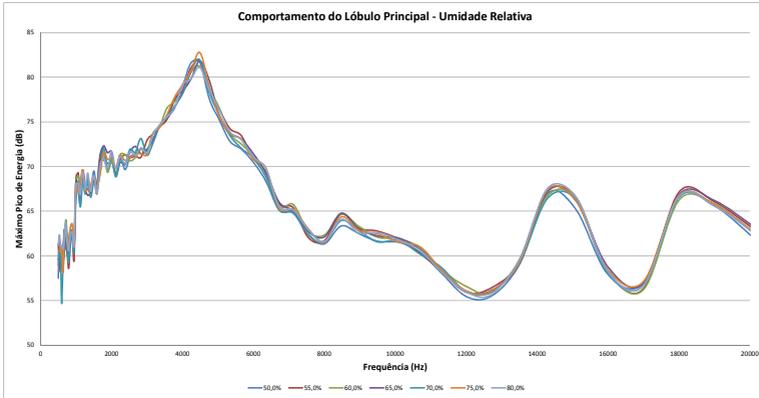


Figura 5.26: Comportamento do lóbulo principal ao variar a umidade relativa, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Temperatura fixa em 20,0°C.

Nota-se que o máximo pico de energia possui tendências de energia quase que idênticas ao variar a umidade relativa. Ou seja, a umidade relativa não influencia na amplitude do lóbulo principal.

#### 5.4.6 Largura de lóbulo - Variação de umidade relativa

Também foi avaliado como a largura de lóbulo ao variar a umidade relativa se comporta ao aplicar uma varredura na frequência, com banda de 1/3 de oitava, Figura 5.27.

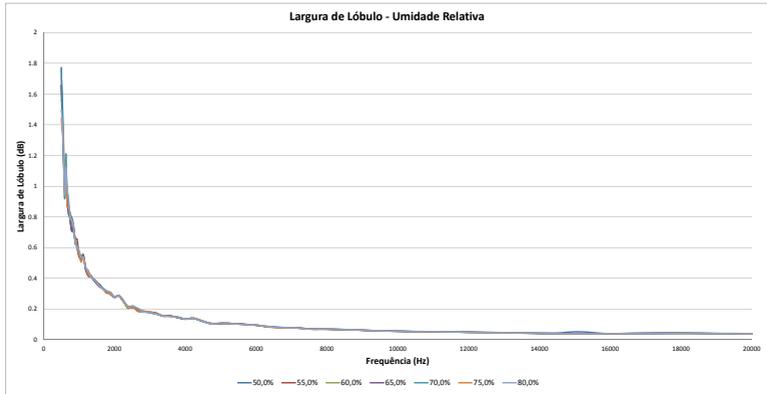


Figura 5.27: Largura de lóbulo ao variar a umidade relativa, aplicando uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco. Temperatura fixa em 20,0°C.

Nota-se que a umidade relativa praticamente não influencia na largura de lóbulo, de forma similar ao efeito da temperatura para a largura de lóbulo.



## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados dois estudos independentes. A primeira investigação concentrou-se nos efeitos dos erros de posicionamento dos microfones dispostos no *array*. O segundo estudo, um dos primeiros na área, colocou-se todo o equipamento (fonte, *array*, plataforma de aquisição) no interior de uma câmara que possibilita o controle da temperatura e umidade relativa para poder avaliar o quê essa variação provoca na resposta de *beamforming*.

O posicionamento correto dos microfones é um ponto crucial na obtenção dos resultados, pois o método de *beamforming* é baseado na relação de fase entre os microfones. Foram investigados os efeitos do mal posicionamento dos microfones nos mapas de *beamforming*, no nível de pressão sonora, na correlação de resposta entre a matriz correta e a matriz com erros de posição, na faixa dinâmica, no comportamento do lóbulo principal e largura de lóbulo para alguns desvios de posição.

Foi realizado uma comparação entre a correlação dos resultados imperfeitos com o resultado original. A medida que os erros de posicionamento vão aumentando, a frequência na qual se pode trabalhar vai diminuindo. Por exemplo, para medições em frequências baixas, até 4175 Hz, o posicionamento dos microfones pode estar errado em até 1,0 cm em relação a posição correta (utilizando correlação de 95 %).

Na medida que os erros na posição dos microfones e a frequência aumentam, a faixa dinâmica diminui. Isso acontece porque os lóbulos laterais, na média tendem a ser maiores e o lóbulo principal menor.

Os valores de energia para o lóbulo principal seguem a mesma tendência até a frequência de 8 kHz, para frequências além dessa produzem tendências de energia diferentes e geralmente inferiores da geometria correta. A largura de lóbulo praticamente não varia, apenas nas frequências acima de 12 kHz ela apresenta um pequeno desvio.

Outro estudo realizado neste trabalho foi a da avaliação do comportamento da absorção atmosférica do som, que é importante em altas frequências ou quando o objeto de estudo encontra-se muito distante ou quando necessita-se de altíssima precisão da técnica.

Muitas vezes na técnica de *beamforming*, a entrada dos dados de velocidade do som leva em conta apenas a temperatura do ar, o quê não é uma verdade absoluta, pois a umidade relativa é diretamente proporcional a velocidade do som, mesmo que ocasionando pouca variação. Em testes que exigem precisão altíssima, a umidade relativa deve ser levada em conta.

A temperatura e a umidade relativa influenciam pouco nas medições de *beamforming*. Ao se fazer a correlação entre os valores médios das respostas de *beamforming* ao variar esses parâmetros, todas as avaliações resultaram em correlações acima de 95 %, ou seja, os mapas de *beamforming* quanto a localização de fontes, não são afetados.

A variação de temperatura apenas influencia no comportamento da faixa dinâmica e lóbulo principal, onde o máximo pico de energia possui tendências diferentes em algumas frequências, podendo-se concluir que geralmente nas temperaturas mais baixas o lóbulo principal é mais proeminente. Já para a umidade relativa testada não há discrepâncias de forma expressiva, ou seja, ela não influencia no comportamento do lóbulo principal e largura de lóbulo.

### 6.1 Trabalhos futuros

Foi avaliado apenas os erros de posicionamento no eixo  $x$ , ou seja, os microfones poderiam variar de posição somente na barra onde estão sustentados. Para frequências altas, por exemplo quando a técnica de *beamforming* é aplicada em túnel de vento com modelos em escala (onde os ensaios ocorrem em ultrassom), deve ser considerada a variação do posicionamento devido a vibração da barra, onde uma pequena vibração do *array* de medição pode causar resultados não confiáveis.

Também não foi estudado a variação de profundidade (eixo  $z$ ) dos microfones, visto que, neste trabalho a peça de encaixe de sustentação dos microfones possui precisão grande.

Em trabalhos futuros, pode-se utilizar um sistema de pós-processamento com a utilização de diferentes metodologias de algoritmos, que visam principalmente a supressão dos lóbulos laterais e melhoria de resolução.

## APÊNDICE A – MEDIÇÕES DE ERROS DE POSICIONAMENTO DE MICROFONES

Nesta seção serão estudados os efeitos dos erros de posicionamento dos microfones na medição de *beamforming*. Resolveu-se dar ênfase nos erros de posicionamento dos microfones no eixo do *array*, ou seja, no plano xy. Os erros de posicionamento na profundidade dos microfones (eixo z) não foram estudados neste trabalho.

Para realizar o estudo dos efeitos do posicionamento incorreto dos microfones, foi necessário a criação de um *software* que foi utilizado na plataforma MATLAB para a geração das perturbações aleatórias.

Detalhes da geração de erros no posicionamento dos microfones no *software* criado na plataforma MATLAB. O marcador azul no interior do marcador vermelho indica a posição correta. A posição dos microfones com erros gerados pelo *software*, em preto, podem estar posicionados em qualquer lugar entre os marcadores vermelhos externos, Figura A.1.



Figura A.1: Detalhes da geração de erros no posicionamento dos microfones no *software* criado.

Foram realizadas 5 medições para cada erro de posicionamento (1,0 cm; 2,5 cm; 5,0 cm; 6,5 cm) e comparadas com a geometria correta.

**A.1 Erros de posicionamento de até 1,0 cm****A.1.1 Geometria 2 - 1,0 cm**

Geometria número 2 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.2 e A.3.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)	Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	22,5	16	-22,5	-23,3
1	37,5	37,6	17	-37,5	-37,4
2	52,5	52,5	18	-52,5	-52,0
3	60,0	59,4	19	-60,0	-60,2
4	15,0	14,7	20	-15,0	-15,2
5	37,5	36,9	21	-37,5	-36,9
6	37,5	37,8	22	-37,5	-37,1
7	52,5	51,8	23	-52,5	-52,4
8	0,0	-0,2	24	0,0	0,8
9	15,0	15,6	25	-15,0	-15,6
10	7,5	7,6	26	-7,5	-8,4
11	15,0	14,3	27	-15,0	-15,0
12	-15,0	-14,5	28	15,0	15,5
13	-15,0	-14,5	29	15,0	14,1
14	-30,0	-29,6	30	30,0	30,0
15	-30,0	-29,9	31	30,0	30,0

Figura A.2: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 2 gerada com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone.

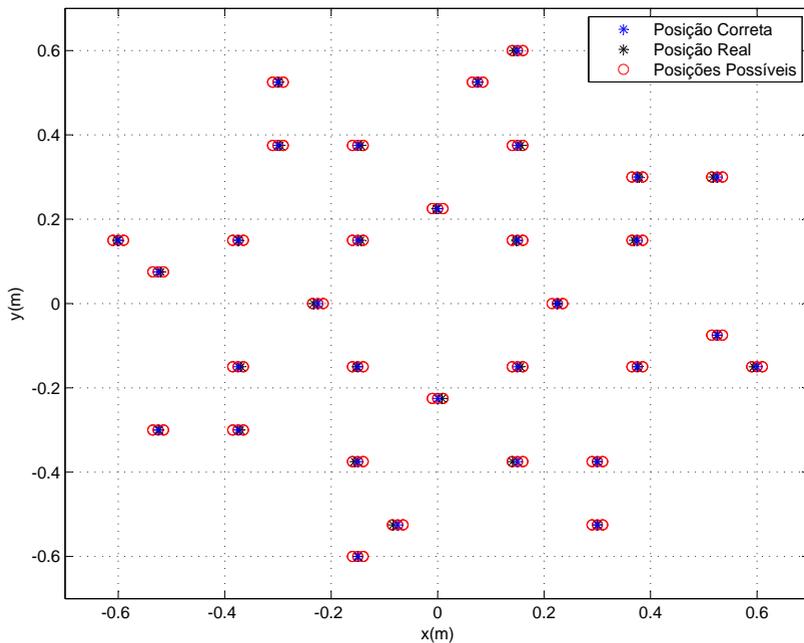
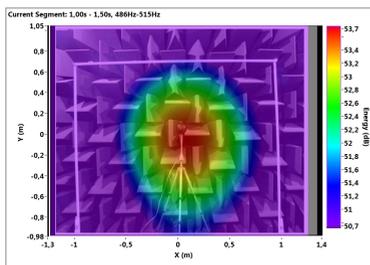
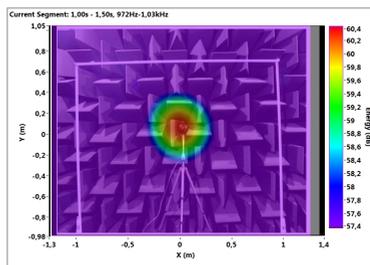


Figura A.3: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 1,0 cm; Geometria número 2 gerada.

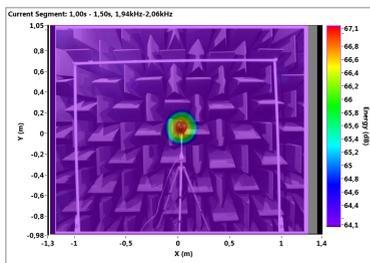
A Figura A.4 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 2 com erros de até 1,0 cm gerada aleatoriamente por *software*.



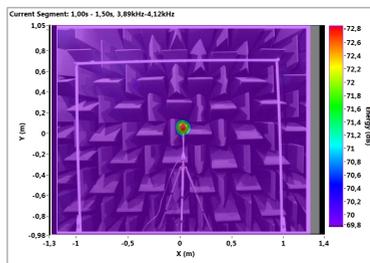
(a) 500Hz.



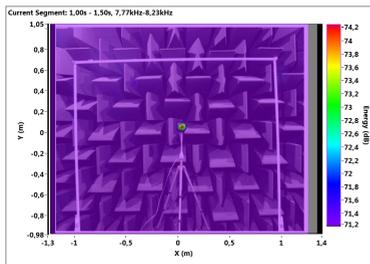
(b) 1kHz.



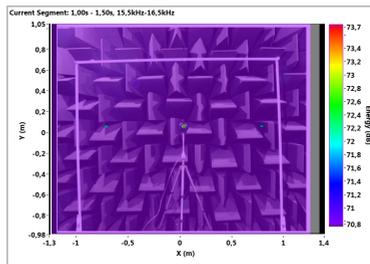
(c) 2kHz.



(d) 4kHz.



(e) 8kHz.



(f) 16kHz.

Figura A.4: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 1,0cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 2. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 24,9°C e umidade relativa de 64,3 %.

### A.1.2 Geometria 3 - 1,0 cm

Geometria número 3 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.5 e A.6.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	22,1
1	37,5	37,8
2	52,5	53,4
3	60,0	59,2
4	15,0	15,8
5	37,5	37,8
6	37,5	38,2
7	52,5	53,3
8	0,0	0,0
9	15,0	14,6
10	7,5	6,7
11	15,0	14,6
12	-15,0	-14,1
13	-15,0	-15,0
14	-30,0	-30,8
15	-30,0	-30,2

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
16	-22,5	-23,1
17	-37,5	-36,9
18	-52,5	-53,3
19	-60,0	-60,0
20	-15,0	-16,0
21	-37,5	-37,5
22	-37,5	-36,6
23	-52,5	-51,6
24	0,0	0,0
25	-15,0	-15,6
26	-7,5	-7,9
27	-15,0	-15,3
28	15,0	14,1
29	15,0	14,4
30	30,0	30,1
31	30,0	30,8

Figura A.5: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 3 gerada com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone.

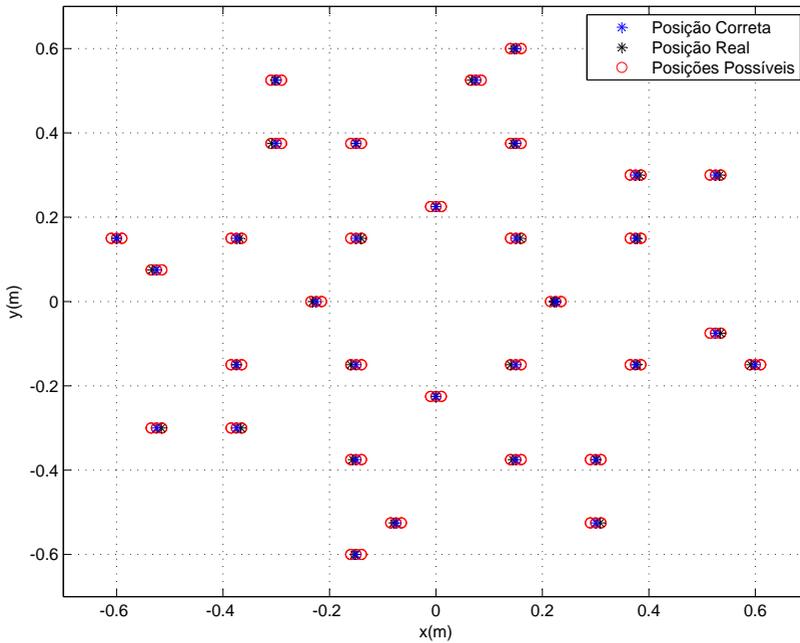
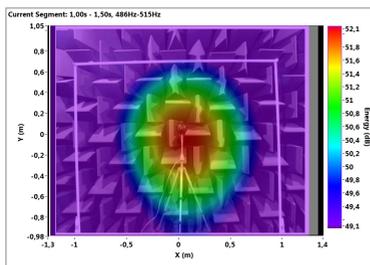
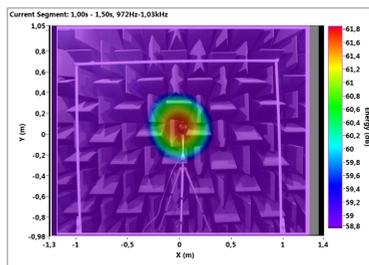


Figura A.6: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 1,0 cm; Geometria número 3 gerada.

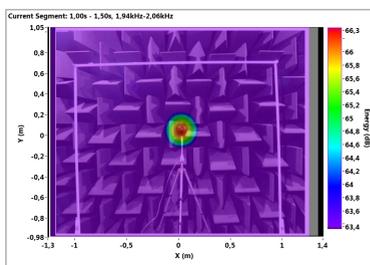
A Figura A.7 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 3 com erros de até 1,0 cm gerada aleatoriamente por *software*.



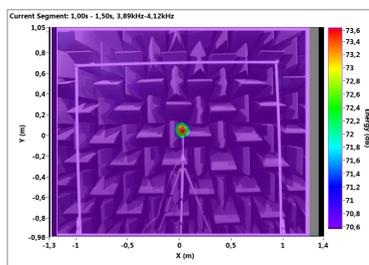
(a) 500 Hz.



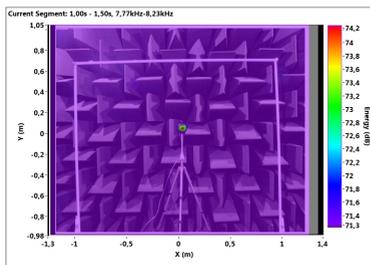
(b) 1 kHz.



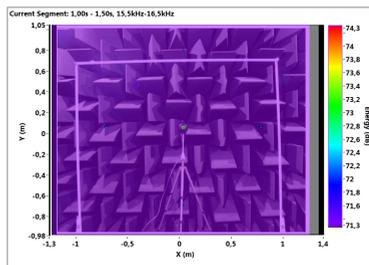
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.7: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 1,0 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 3. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,0°C e umidade relativa de 64,3 %.

**A.1.3 Geometria 4 - 1,0 cm**

Geometria número 4 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.8 e A.9.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)	Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	23,2	16	-22,5	-22,8
1	37,5	36,8	17	-37,5	-37,9
2	52,5	53,4	18	-52,5	-51,9
3	60,0	60,0	19	-60,0	-61,0
4	15,0	14,7	20	-15,0	-14,1
5	37,5	37,9	21	-37,5	-38,3
6	37,5	38,5	22	-37,5	-36,9
7	52,5	53,2	23	-52,5	-52,4
8	0,0	0,3	24	0,0	0,7
9	15,0	15,0	25	-15,0	-15,3
10	7,5	6,6	26	-7,5	-6,9
11	15,0	15,9	27	-15,0	-15,0
12	-15,0	-14,5	28	15,0	14,8
13	-15,0	-15,1	29	15,0	15,2
14	-30,0	-29,8	30	30,0	30,5
15	-30,0	-29,6	31	30,0	29,8

Figura A.8: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 4 gerada com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone.

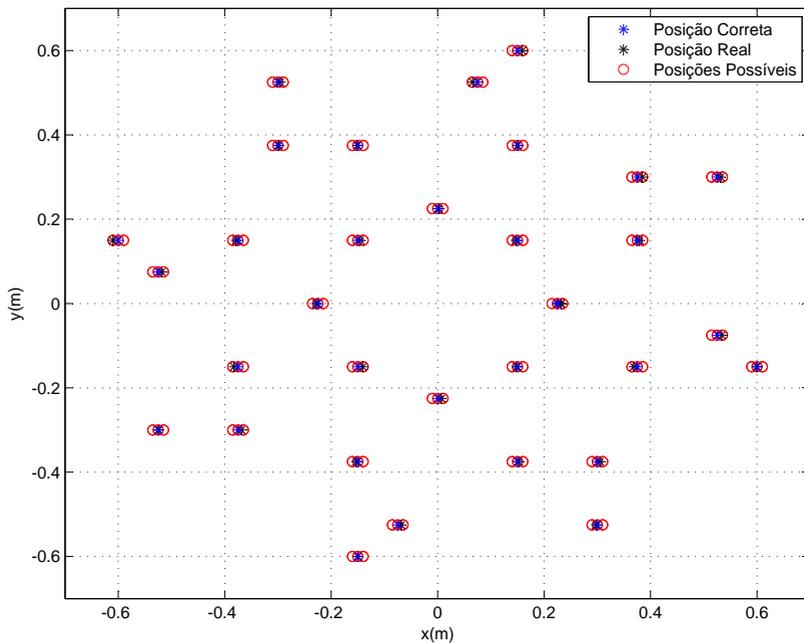
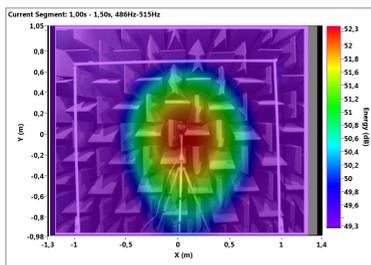
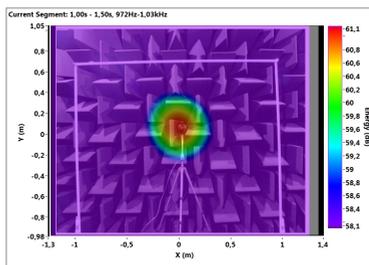


Figura A.9: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 1,0 cm; Geometria número 4 gerada.

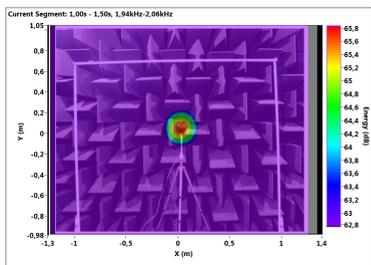
A Figura A.10 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 4 com erros de até 1,0 cm gerada aleatoriamente por *software*.



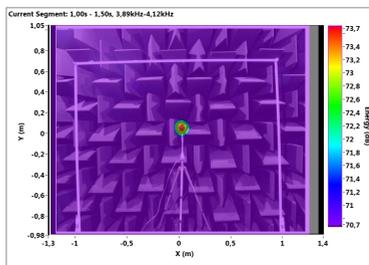
(a) 500 Hz.



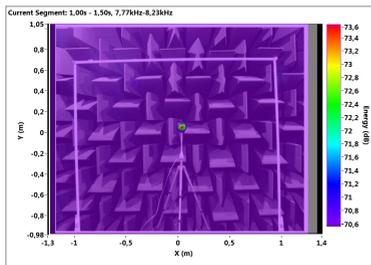
(b) 1 kHz.



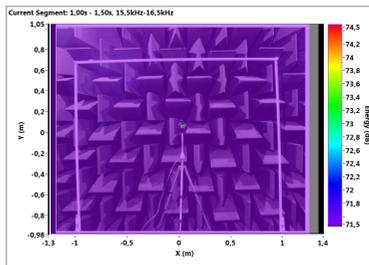
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.10: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 1,0 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 4. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,0°C e umidade relativa de 64,4 %.

### A.1.4 Geometria 5 - 1,0 cm

Geometria número 5 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.11 e A.12.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	21,9
1	37,5	37,0
2	52,5	52,3
3	60,0	59,2
4	15,0	14,4
5	37,5	37,3
6	37,5	37,7
7	52,5	53,2
8	0,0	0,2
9	15,0	14,8
10	7,5	7,1
11	15,0	14,7
12	-15,0	-14,1
13	-15,0	-15,1
14	-30,0	-29,8
15	-30,0	-30,4

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
16	-22,5	-22,6
17	-37,5	-36,7
18	-52,5	-53,1
19	-60,0	-59,2
20	-15,0	-14,3
21	-37,5	-37,4
22	-37,5	-37,4
23	-52,5	-52,5
24	0,0	-0,3
25	-15,0	-14,5
26	-7,5	-7,1
27	-15,0	-15,4
28	15,0	15,5
29	15,0	14,7
30	30,0	30,3
31	30,0	29,7

Figura A.11: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 5 gerada com até 1,0 cm de erro na posição de cada microfone.

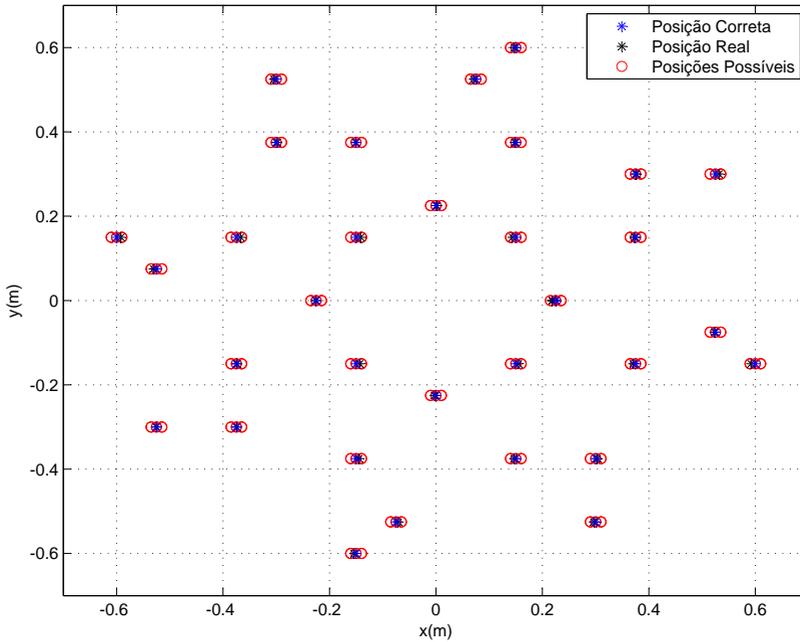
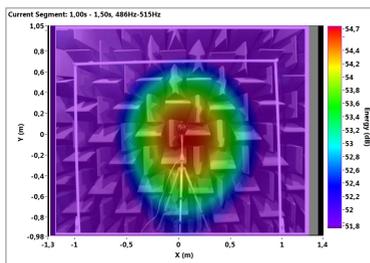
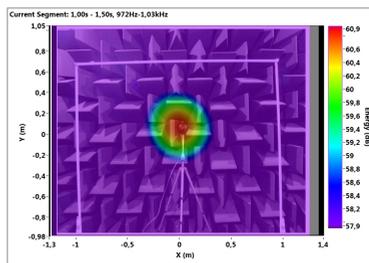


Figura A.12: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 1,0 cm; Geometria número 5 gerada.

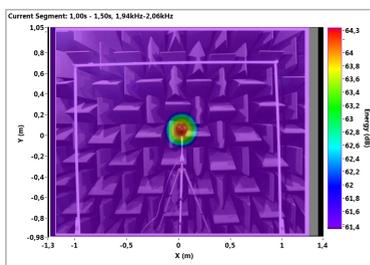
A Figura A.13 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 5 com erros de até 1,0 cm gerada aleatoriamente por *software*.



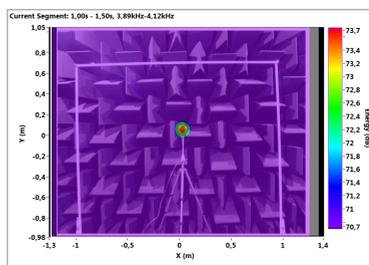
(a) 500 Hz.



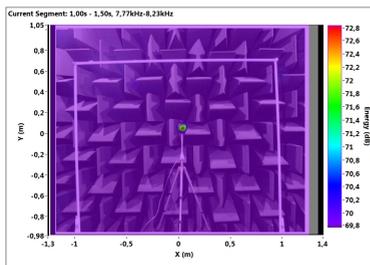
(b) 1 kHz.



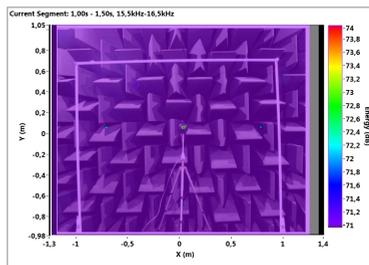
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.13: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 1,0 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 5. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,0°C e umidade relativa de 64,5 %.

**A.1.5 Correlação - 1,0 cm**

A partir das respostas em uma dimensão de *beamforming* obtém-se a correlação entre a resposta correta e as respostas com erros no posicionamento dos microfones.

A tabela A.1 apresenta a correlação para erros de até 1,0 cm no posicionamento dos microfones.

Tabela A.1: Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 1,0 cm.

	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	12kHz	16kHz
Array 1	0,984	0,992	0,996	0,974	0,894	0,755	0,164
Array 2	0,996	0,991	0,998	0,971	0,915	0,872	0,157
Array 3	0,992	0,994	0,986	0,996	0,873	0,766	0,205
Array 4	0,997	0,974	0,985	0,886	0,905	0,817	0,171
Array 5	0,993	0,974	0,983	0,939	0,801	0,862	0,171
<b>Média</b>	<b>0,992</b>	<b>0,985</b>	<b>0,990</b>	<b>0,953</b>	<b>0,878</b>	<b>0,814</b>	<b>0,174</b>

A Figura A.14 mostra o gráfico de correlação para as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 1,0 cm.

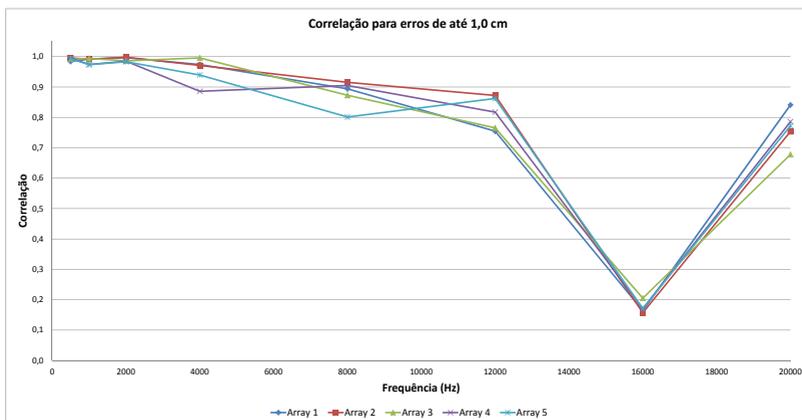


Figura A.14: Gráfico de correlação dos erros de posicionamento dos microfones de até 1,0 cm. Gráfico com interpolação entre os dados de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz.

### A.1.6 Comportamento da faixa dinâmica ao variar a frequência - 1,0 cm

Para a avaliação da faixa dinâmica em relação a frequência, foi realizada uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Pode-se notar que para erros no posicionamento dos microfones de até 1,0 cm o valor da faixa dinâmica é geralmente inferior ao valor nominal, Figura A.15.

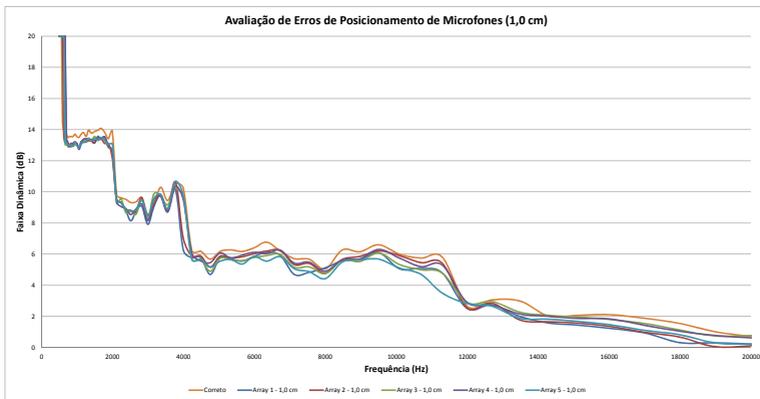


Figura A.15: Faixa dinâmica dos *arrays* com erros de posicionamento de até 1,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

Para observar melhor, juntou-se as geometrias com erros de até 1,0 cm e realizou-se a média para a comparação com a geometria correta, Figura A.16.

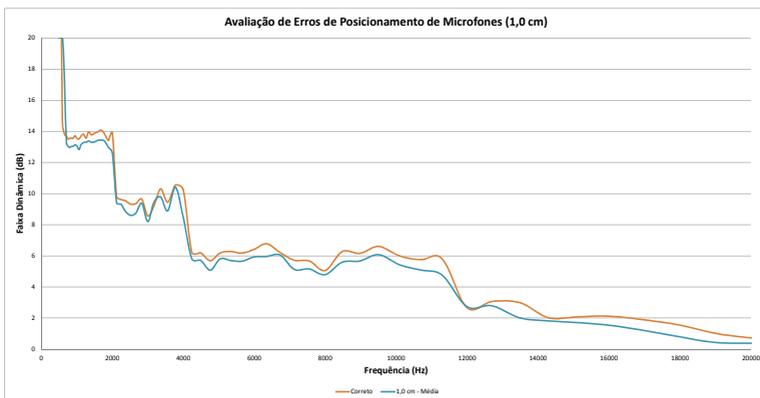


Figura A.16: Faixa dinâmica média dos *arrays* com erros de posicionamento de até 1,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

### A.1.7 Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - 1,0 cm

Nesta Seção, foi estudado como o lóbulo principal se comporta ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava, Figuras A.17 e A.18. Pode-se notar que para erros no posicionamento dos microfones de até 1,0 cm o valor de potência estimada é geralmente inferior ao valor nominal.

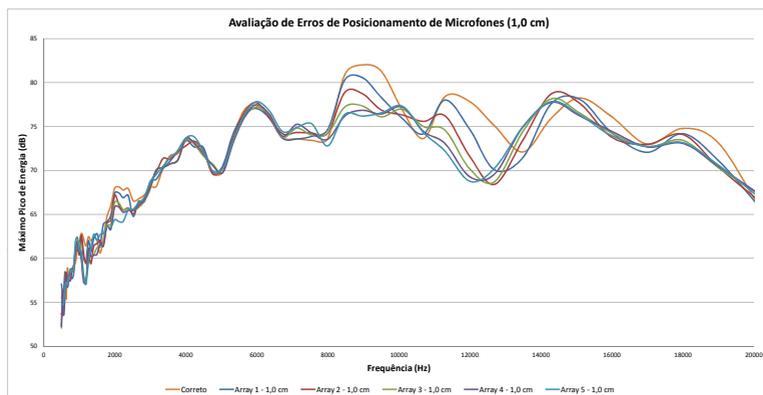


Figura A.17: Comportamento do lóbulo principal dos *arrays* com erros de posicionamento de até 1,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

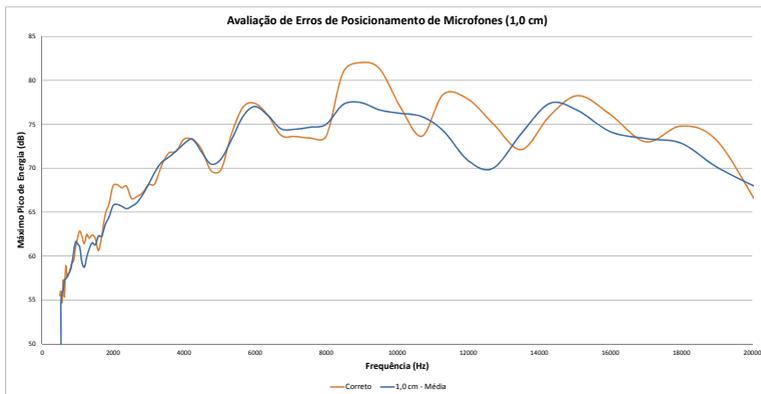


Figura A.18: Comportamento médio do lóbulo principal dos *arrays* com erros de posicionamento de até 1,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

#### ***A.1.8 Comportamento da largura de lóbulo ao variar a frequência - 1,0 cm***

A largura de lóbulo para erros de até 1,0 cm no posicionamento dos microfones é praticamente idêntica à resposta correta, Figura A.19.

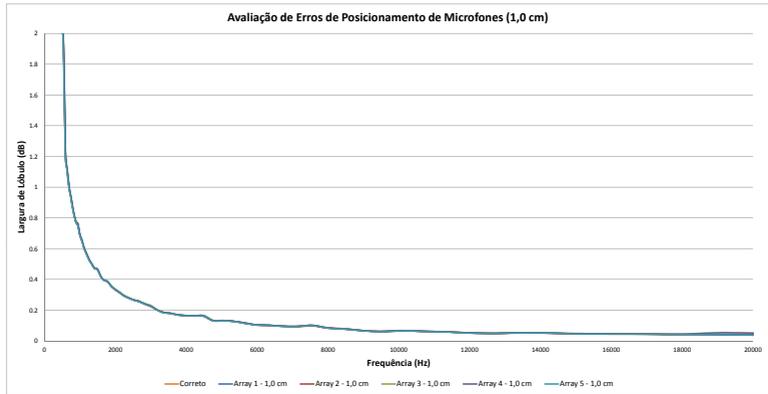


Figura A.19: Largura de lóbulo dos *arrays* com erros de posicionamento dos microfones de até 1,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

**A.2 Erros de posicionamento de até 2,5 cm****A.2.1 Geometria 1 - 2,5 cm**

Geometria número 1 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.20 e A.21.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)	Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	21,9	16	-22,5	-23,4
1	37,5	36,3	17	-37,5	-37,2
2	52,5	50,9	18	-52,5	-50,0
3	60,0	60,4	19	-60,0	-61,5
4	15,0	13,6	20	-15,0	-17,2
5	37,5	36,3	21	-37,5	-39,1
6	37,5	38,8	22	-37,5	-39,0
7	52,5	53,9	23	-52,5	-51,1
8	0,0	1,1	24	0,0	-0,4
9	15,0	17,2	25	-15,0	-14,0
10	7,5	9,2	26	-7,5	-9,3
11	15,0	16,7	27	-15,0	-17,5
12	-15,0	-17,5	28	15,0	13,4
13	-15,0	-12,7	29	15,0	16,3
14	-30,0	-29,5	30	30,0	30,5
15	-30,0	-28,7	31	30,0	28,5

Figura A.20: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 1 gerada com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone.

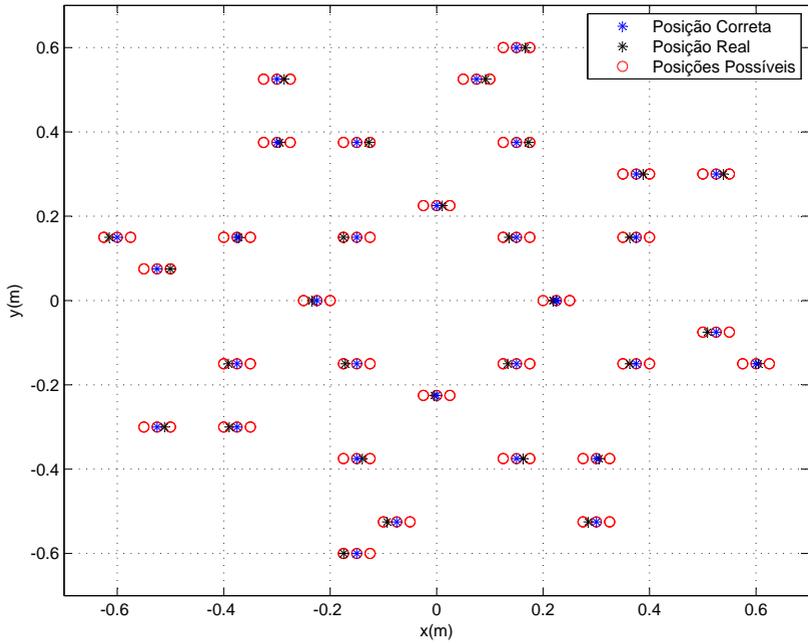
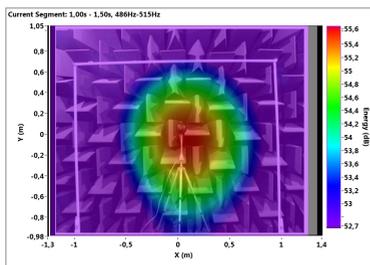
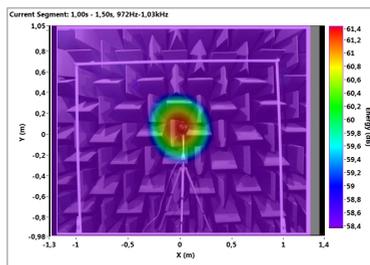


Figura A.21: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 2,5 cm; Geometria número 1 gerada.

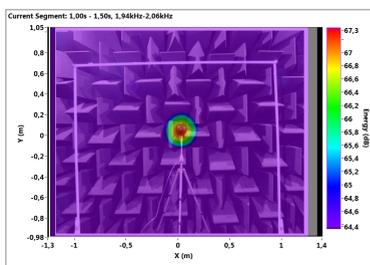
A Figura A.22 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 1 com erros de até 2,5 cm gerada aleatoriamente por *software*.



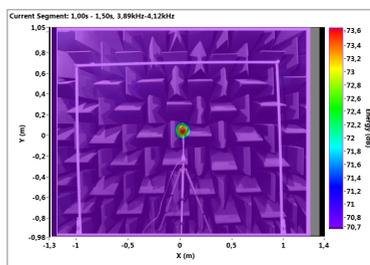
(a) 500 Hz.



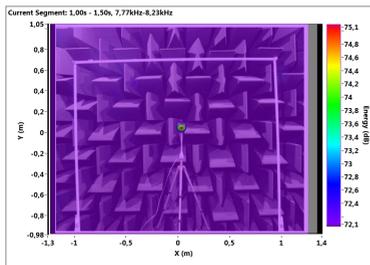
(b) 1 kHz.



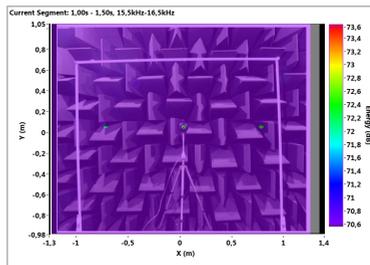
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.22: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 2,5 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 1. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,5°C e umidade relativa de 60,5 %.

### A.2.2 Geometria 2 - 2,5 cm

Geometria número 2 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.23 e A.24.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	20,9
1	37,5	38,2
2	52,5	52,1
3	60,0	58,8
4	15,0	15,6
5	37,5	35,2
6	37,5	35,8
7	52,5	51,9
8	0,0	-2,3
9	15,0	15,0
10	7,5	9,6
11	15,0	13,1
12	-15,0	-16,4
13	-15,0	-15,6
14	-30,0	-29,7
15	-30,0	-28,5

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
16	-22,5	-22,4
17	-37,5	-39,0
18	-52,5	-50,8
19	-60,0	-61,0
20	-15,0	-17,4
21	-37,5	-38,2
22	-37,5	-37,0
23	-52,5	-54,9
24	0,0	-2,2
25	-15,0	-14,9
26	-7,5	-9,4
27	-15,0	-14,5
28	15,0	15,5
29	15,0	13,0
30	30,0	29,2
31	30,0	32,3

Figura A.23: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 2 gerada com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone.

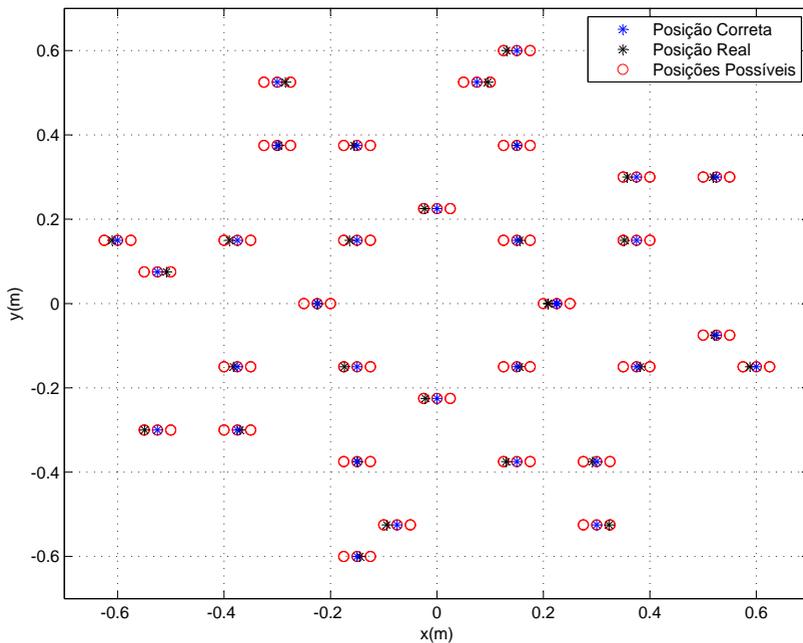
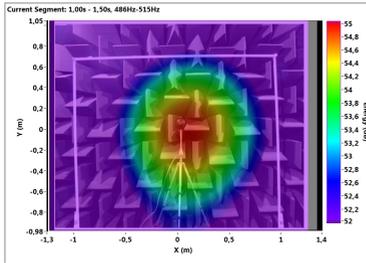
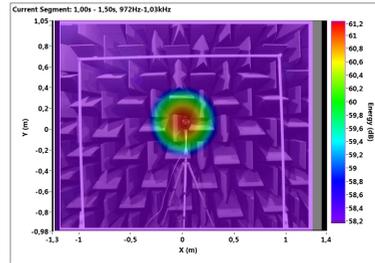


Figura A.24: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 2,5 cm; Geometria número 2 gerada.

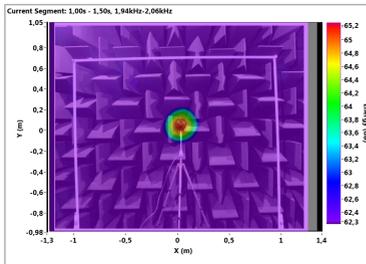
A Figura A.25 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 2 com erros de até 2,5 cm gerada aleatoriamente por *software*.



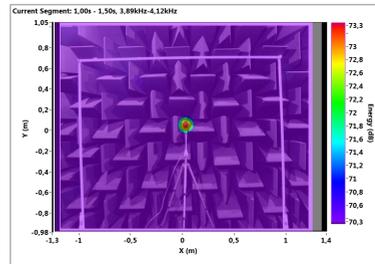
(a) 500 Hz.



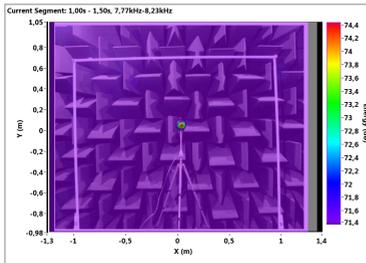
(b) 1 kHz.



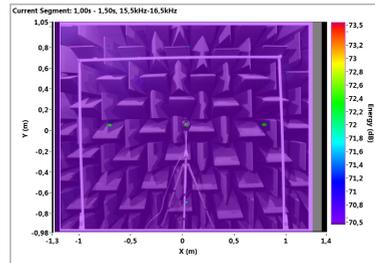
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.25: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 2,5 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 2. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,6°C e umidade relativa de 60,5 %.

**A.2.3 Geometria 3 - 2,5 cm**

Geometria número 3 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.26 e A.27.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)	Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	22,2	16	-22,5	-21,6
1	37,5	36,3	17	-37,5	-36,2
2	52,5	52,4	18	-52,5	-53,0
3	60,0	57,7	19	-60,0	-59,7
4	15,0	17,4	20	-15,0	-15,1
5	37,5	37,4	21	-37,5	-35,5
6	37,5	35,6	22	-37,5	-37,3
7	52,5	53,9	23	-52,5	-54,0
8	0,0	1,0	24	0,0	-1,9
9	15,0	14,2	25	-15,0	-13,6
10	7,5	8,6	26	-7,5	-9,8
11	15,0	13,1	27	-15,0	-14,8
12	-15,0	-16,3	28	15,0	17,2
13	-15,0	-16,4	29	15,0	15,0
14	-30,0	-32,4	30	30,0	30,4
15	-30,0	-27,8	31	30,0	28,7

Figura A.26: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 3 gerada com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone.

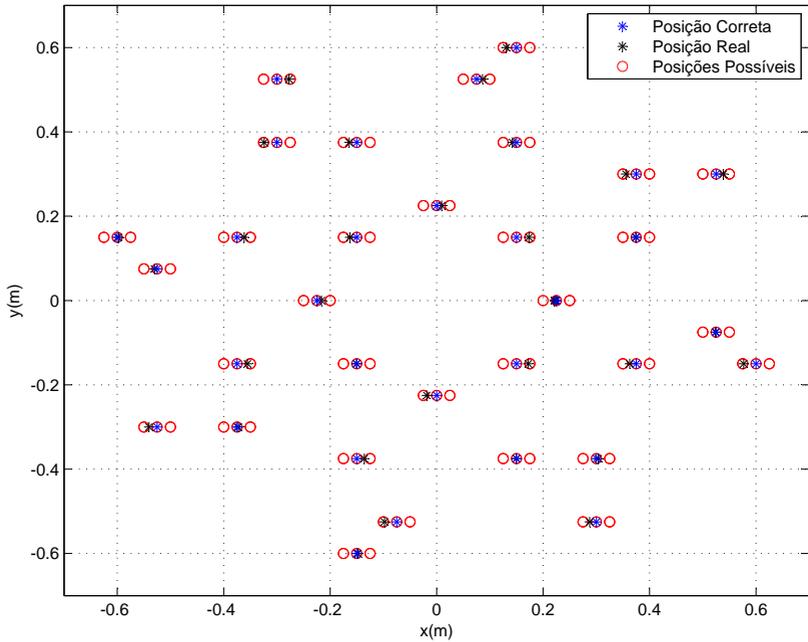


Figura A.27: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 2,5 cm; Geometria número 3 gerada.

A Figura A.27 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 3 com erros de até 2,5 cm gerada aleatoriamente por *software*.

**A.2.4 Geometria 4 - 2,5 cm**

Geometria número 4 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.28 e A.29.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)	Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	24,9	16	-22,5	-23,0
1	37,5	35,2	17	-37,5	-37,6
2	52,5	52,7	18	-52,5	-54,6
3	60,0	61,1	19	-60,0	-58,9
4	15,0	14,7	20	-15,0	-17,1
5	37,5	38,7	21	-37,5	-39,9
6	37,5	35,5	22	-37,5	-35,6
7	52,5	53,0	23	-52,5	-52,0
8	0,0	1,2	24	0,0	0,9
9	15,0	12,7	25	-15,0	-13,0
10	7,5	8,8	26	-7,5	-6,5
11	15,0	17,2	27	-15,0	-13,0
12	-15,0	-15,5	28	15,0	16,1
13	-15,0	-15,7	29	15,0	17,5
14	-30,0	-30,0	30	30,0	29,8
15	-30,0	-31,5	31	30,0	32,3

Figura A.28: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 4 gerada com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone.

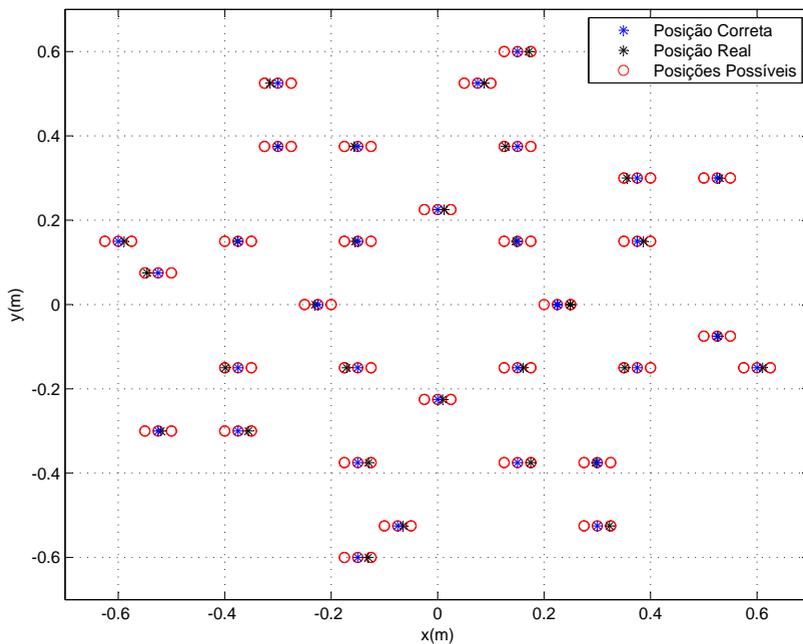
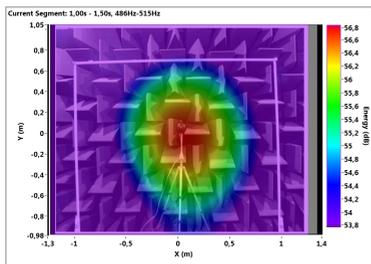
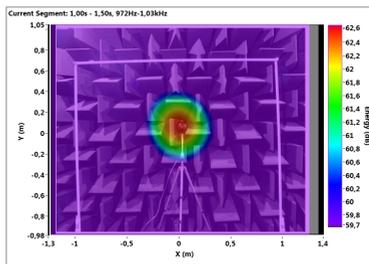


Figura A.29: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 2,5 cm; Geometria número 4 gerada.

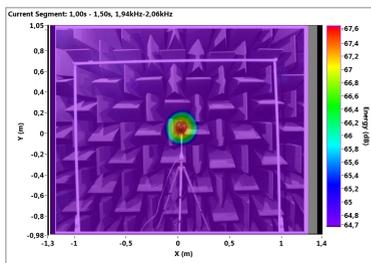
A Figura A.30 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 4 com erros de até 2,5 cm gerada aleatoriamente por *software*.



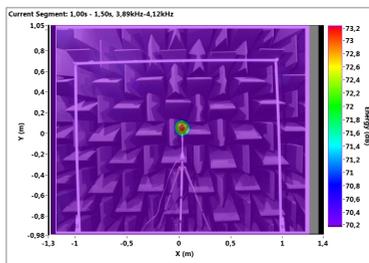
(a) 500 Hz.



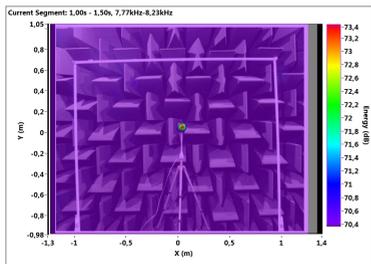
(b) 1 kHz.



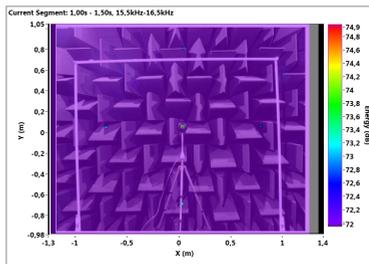
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.30: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 2,5 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 4. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 24,8°C e umidade relativa de 62,4 %.

### A.2.5 Geometria 5 - 2,5 cm

Geometria número 5 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.31 e A.32.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	24,4
1	37,5	36,0
2	52,5	54,3
3	60,0	60,5
4	15,0	14,6
5	37,5	38,9
6	37,5	35,1
7	52,5	51,5
8	0,0	2,3
9	15,0	13,5
10	7,5	9,6
11	15,0	15,7
12	-15,0	-15,1
13	-15,0	-16,6
14	-30,0	-28,1
15	-30,0	-30,7

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
16	-22,5	-24,5
17	-37,5	-37,7
18	-52,5	-53,8
19	-60,0	-59,4
20	-15,0	-16,2
21	-37,5	-39,2
22	-37,5	-39,1
23	-52,5	-50,7
24	0,0	2,3
25	-15,0	-16,2
26	-7,5	-6,9
27	-15,0	-14,5
28	15,0	16,7
29	15,0	15,9
30	30,0	31,3
31	30,0	30,5

Figura A.31: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 5 gerada com até 2,5 cm de erro na posição de cada microfone.

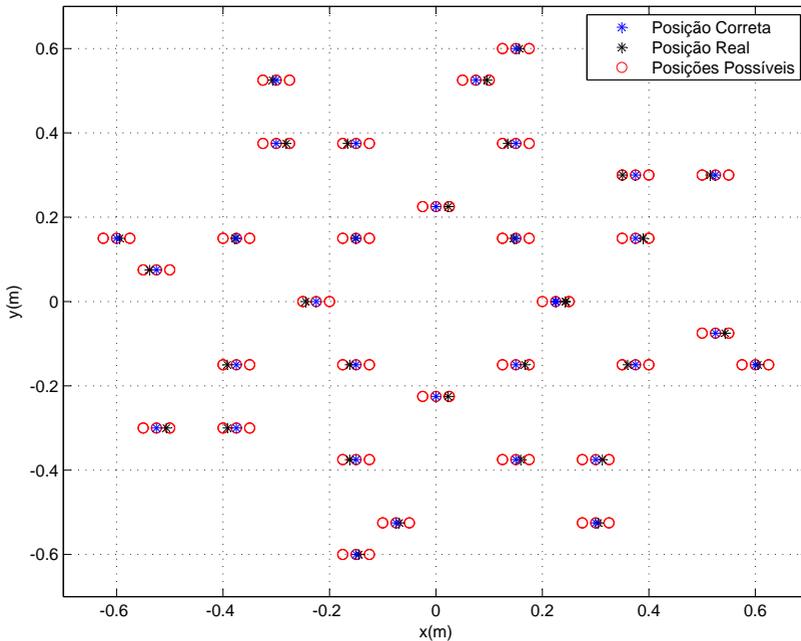
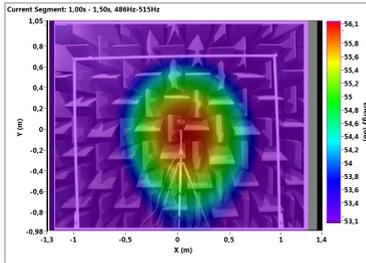
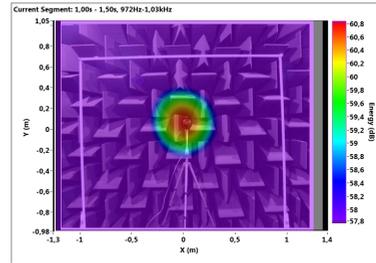


Figura A.32: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 2,5 cm; Geometria número 5 gerada.

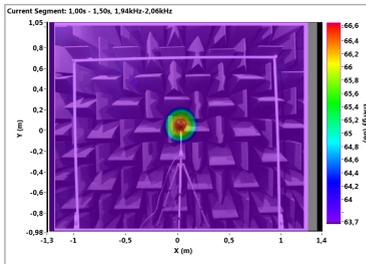
A Figura A.33 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 5 com erros de até 2,5 cm gerada aleatoriamente por *software*.



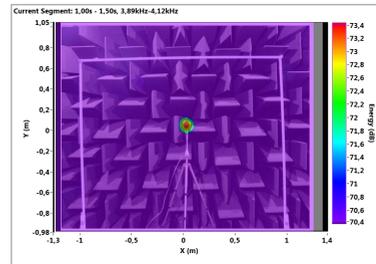
(a) 500 Hz.



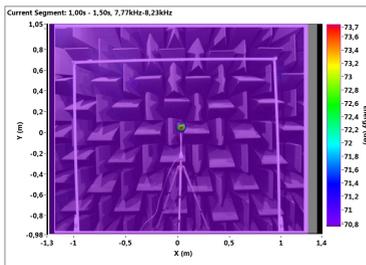
(b) 1 kHz.



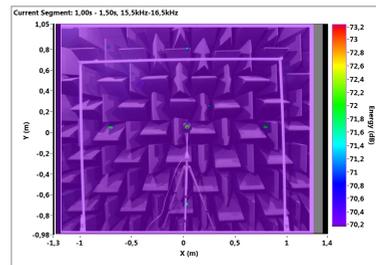
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.33: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 2,5 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 5. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,0°C e umidade relativa de 62,6%.

### A.2.6 *Mapas de beamforming em uma dimensão - 2,5 cm*

As Figuras A.34, A.35, A.36, A.37, A.38, A.39 mostram as respostas de *beamforming* em 2 dimensões para erros no posicionamento de até 2,5 cm.

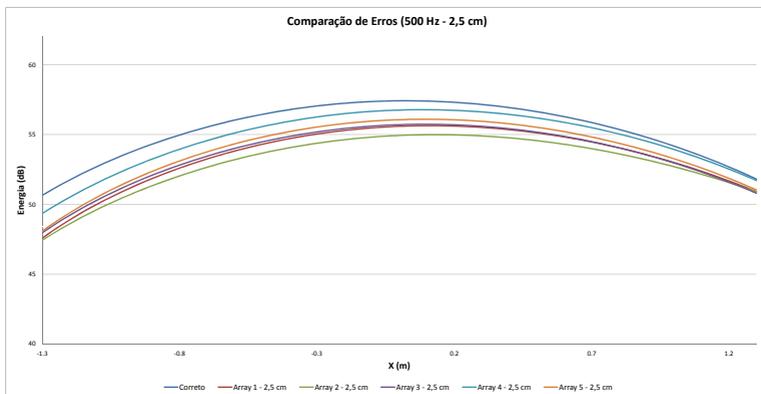


Figura A.34: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 500 Hz.

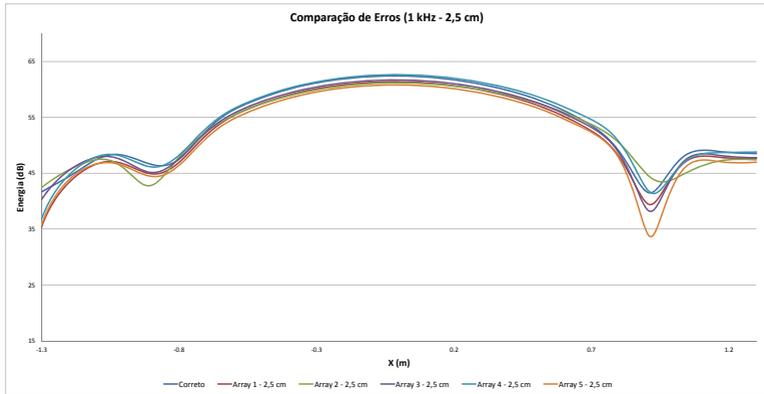


Figura A.35: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 1 kHz.

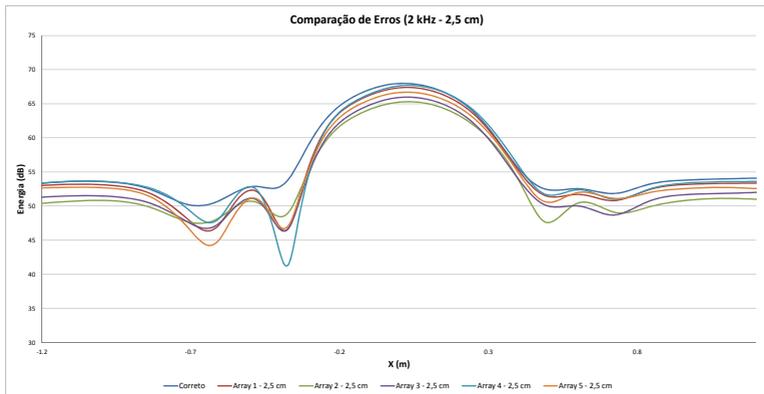


Figura A.36: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 2 kHz.

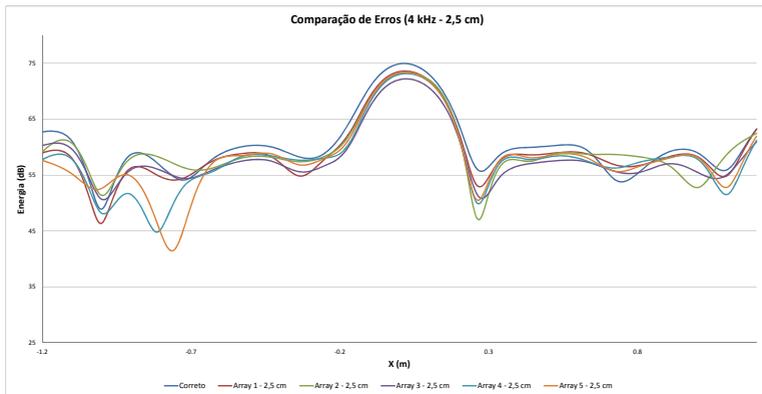


Figura A.37: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 4 kHz.

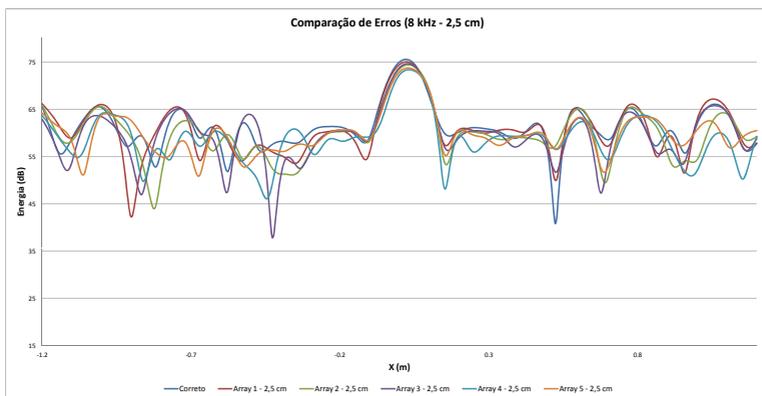


Figura A.38: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 8 kHz.

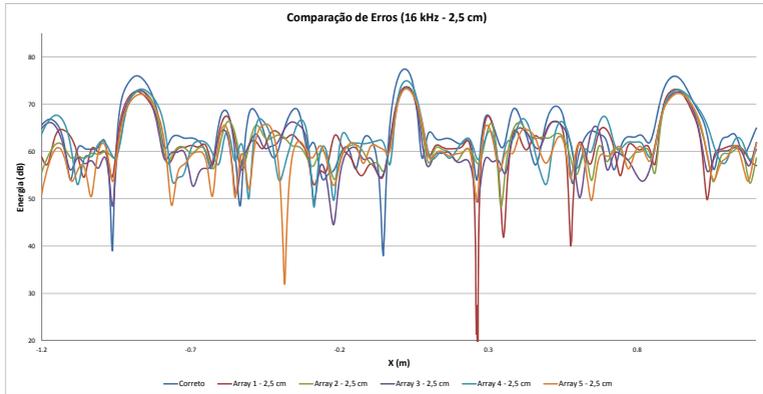


Figura A.39: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 2,5 cm. Frequência de 16 kHz.

### A.2.7 Correlação - 2,5 cm

A partir das respostas em uma dimensão de *beamforming* obtém-se a correlação entre a resposta correta e as respostas com erros no posicionamento dos microfones.

A tabela A.2 apresenta a correlação para erros de até 2,5 cm no posicionamento dos microfones.

Tabela A.2: Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 2,5 cm.

	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	12kHz	16kHz
Array 1	0,965	0,997	0,979	0,974	0,828	0,703	0,696
Array 2	0,948	0,981	0,993	0,907	0,759	0,561	0,762
Array 3	0,978	0,996	0,987	0,971	0,810	0,759	0,820
Array 4	0,985	0,995	0,944	0,910	0,661	0,522	0,629
Array 5	0,977	0,990	0,974	0,891	0,660	0,496	0,630
<b>Média</b>	<b>0,971</b>	<b>0,991</b>	<b>0,975</b>	<b>0,931</b>	<b>0,744</b>	<b>0,608</b>	<b>0,707</b>

A Figura A.40 mostra o gráfico de correlação para as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 2,5 cm.

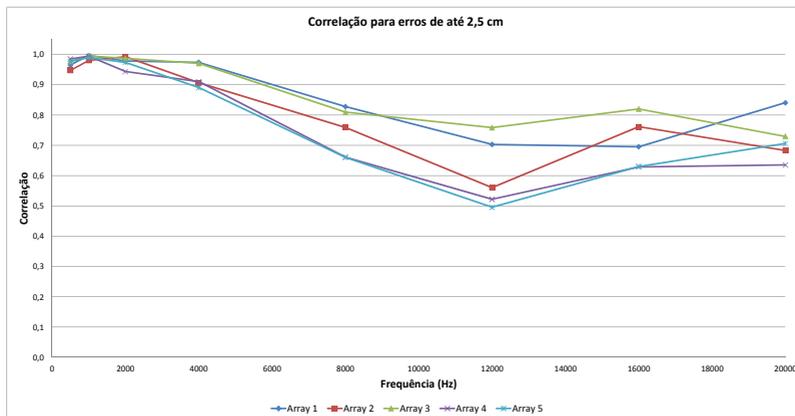


Figura A.40: Gráfico de correlação dos erros de posicionamento dos microfones de até 2,5 cm. Gráfico com interpolação entre os dados de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz.

### A.2.8 *Comportamento da faixa dinâmica ao variar a frequência - 2,5 cm*

Para a avaliação da faixa dinâmica em relação a frequência, foi realizada uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Pode-se notar que para erros no posicionamento dos microfones de até 2,5 cm o valor da faixa dinâmica é geralmente inferior ao valor nominal, Figura A.41.

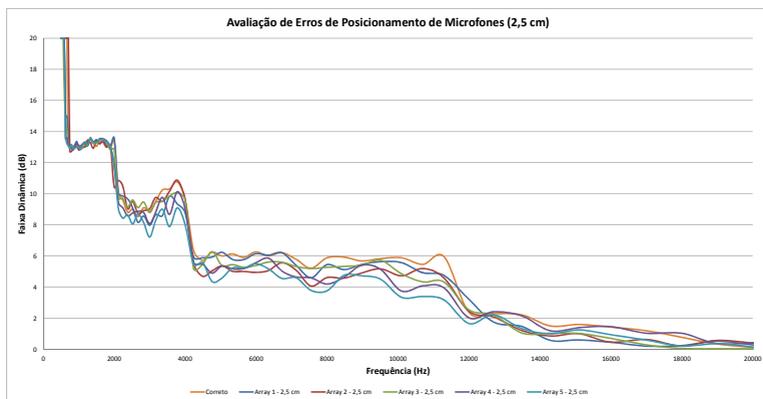


Figura A.41: Faixa dinâmica dos *arrays* com erros de posicionamento de até 2,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

Para observar melhor, juntou-se as geometrias com erros de até 2,5 cm e realizou-se a média para a comparação com a geometria correta, Figura A.42.

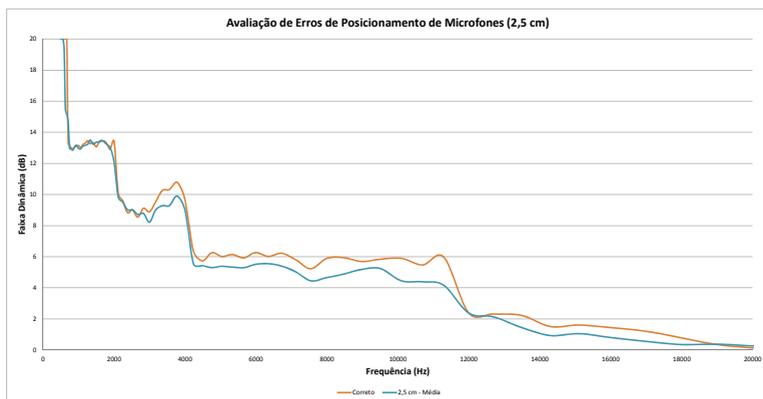


Figura A.42: Faixa dinâmica média dos *arrays* com erros de posicionamento de até 2,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

### A.2.9 *Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - 2,5 cm*

Nesta Seção, foi estudado como o lóbulo principal se comporta ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Pode-se notar que para erros no posicionamento dos microfones de até 2,5 cm o valor de potência estimada é geralmente inferior ao valor nominal, Figuras A.43 e A.44.

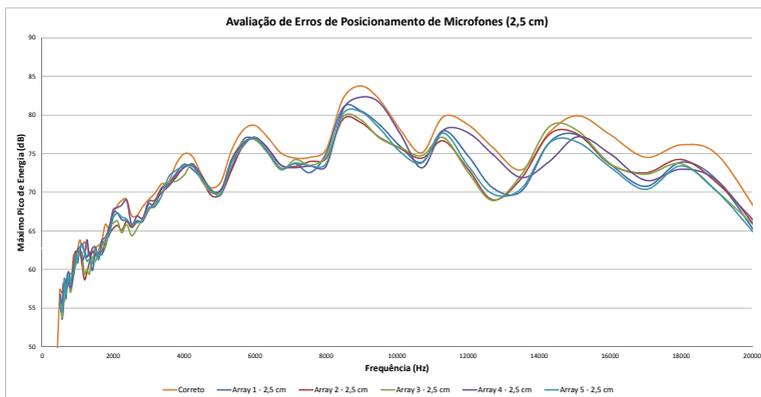


Figura A.43: Comportamento do lóbulo principal dos *arrays* com erros de posicionamento de até 2,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

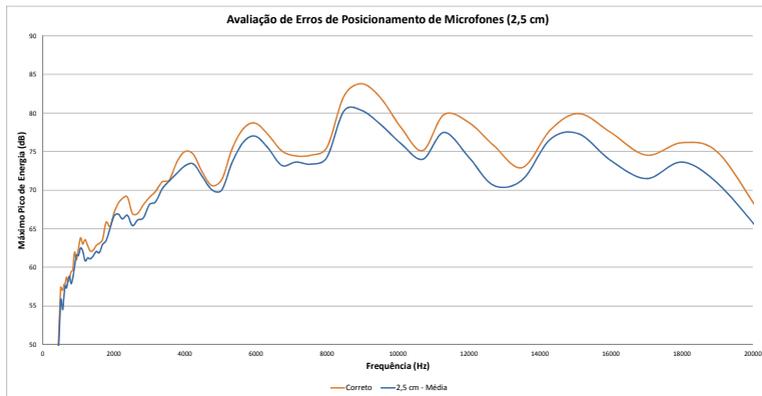


Figura A.44: Comportamento médio do lóbulo principal dos *arrays* com erros de posicionamento de até 2,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

#### A.2.10 *Comportamento da largura de lóbulo ao variar a frequência - 2,5 cm*

A largura de lóbulo para erros de até 2,5 cm no posicionamento dos microfones é praticamente idêntica à resposta correta, Figura A.45.

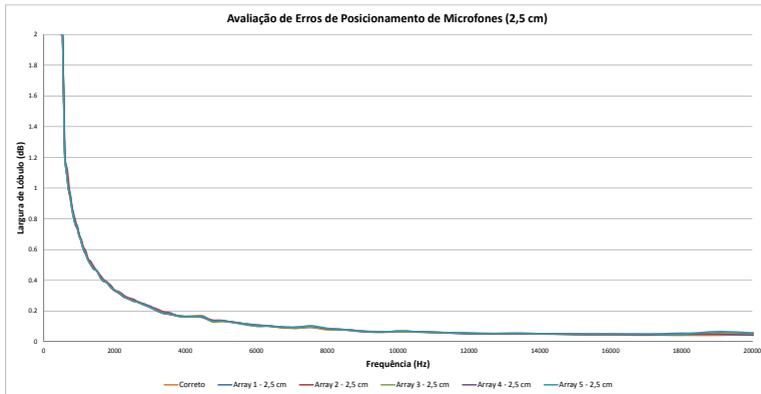


Figura A.45: Largura de lóbulo dos *arrays* com erros de posicionamento dos microfones de até 2,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

### A.3 Erros de posicionamento de até 5,0 cm

#### A.3.1 Geometria 1 - 5,0 cm

Geometria número 1 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.46 e A.47.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)	Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	26,1	16	-22,5	-18,2
1	37,5	41,7	17	-37,5	-39,3
2	52,5	57,2	18	-52,5	-56,1
3	60,0	58,0	19	-60,0	-61,1
4	15,0	13,2	20	-15,0	-11,6
5	37,5	34,0	21	-37,5	-40,2
6	37,5	33,5	22	-37,5	-36,7
7	52,5	53,9	23	-52,5	-53,4
8	0,0	2,4	24	0,0	-2,3
9	15,0	15,3	25	-15,0	-12,5
10	7,5	8,2	26	-7,5	-10,1
11	15,0	16,0	27	-15,0	-10,7
12	-15,0	-18,6	28	15,0	12,6
13	-15,0	-13,7	29	15,0	12,2
14	-30,0	-27,2	30	30,0	30,8
15	-30,0	-29,3	31	30,0	26,4

Figura A.46: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 1 gerada com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone.

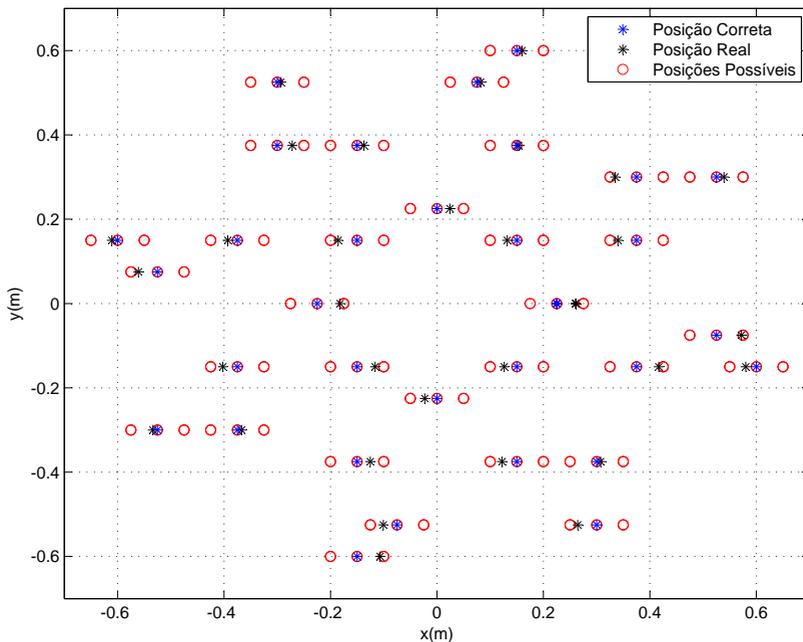
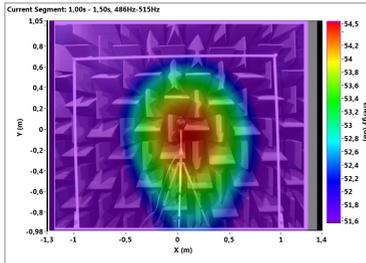
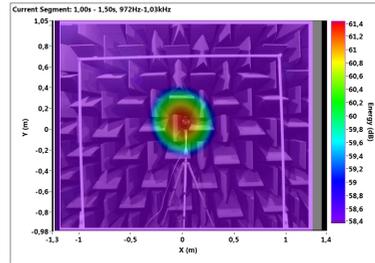


Figura A.47: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 5,0 cm; Geometria número 1 gerada.

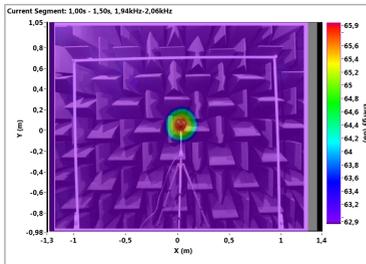
A Figura A.48 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 1 com erros de até 5,0 cm gerada aleatoriamente por *software*.



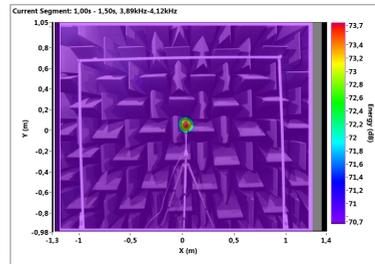
(a) 500 Hz.



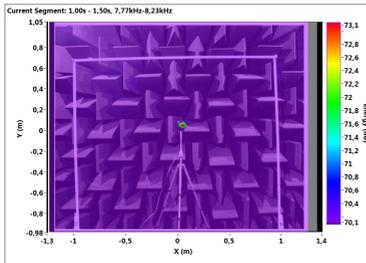
(b) 1 kHz.



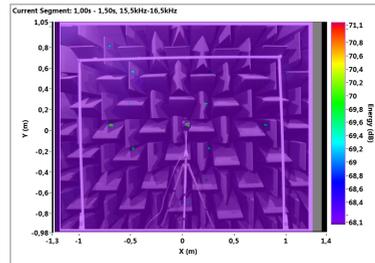
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.48: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 5,0 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 1. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,1°C e umidade relativa de 62,7 %.

**A.3.2 Geometria 2 - 5,0 cm**

Geometria número 2 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.49 e A.50.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)	Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	22,3	16	-22,5	-18,3
1	37,5	35,5	17	-37,5	-37,0
2	52,5	51,8	18	-52,5	-56,3
3	60,0	56,6	19	-60,0	-59,4
4	15,0	10,6	20	-15,0	-14,7
5	37,5	42,5	21	-37,5	-37,2
6	37,5	41,6	22	-37,5	-37,4
7	52,5	57,3	23	-52,5	-48,4
8	0,0	1,6	24	0,0	-3,9
9	15,0	10,7	25	-15,0	-18,6
10	7,5	9,1	26	-7,5	-11,2
11	15,0	16,6	27	-15,0	-11,4
12	-15,0	-15,1	28	15,0	10,2
13	-15,0	-13,8	29	15,0	11,0
14	-30,0	-31,3	30	30,0	34,9
15	-30,0	-29,7	31	30,0	32,7

Figura A.49: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 2 gerada com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone.

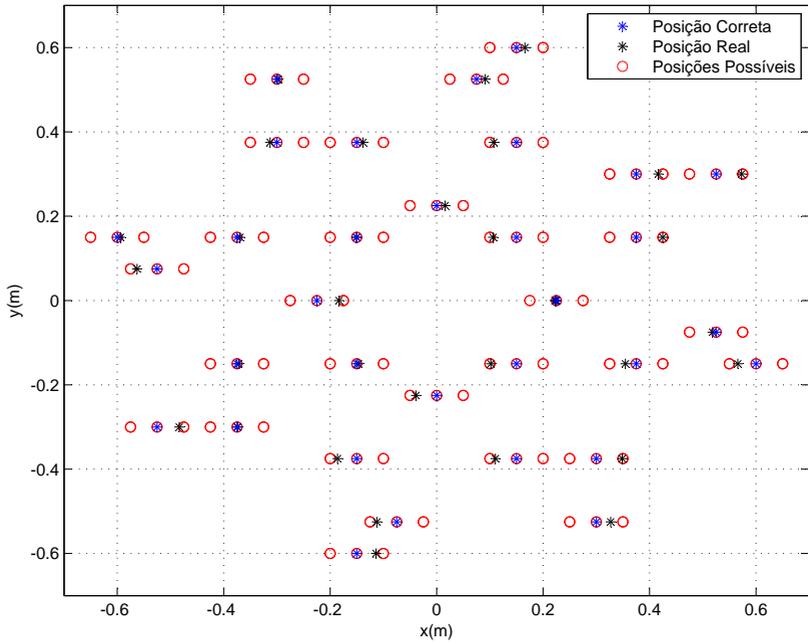
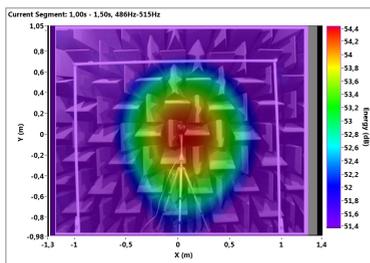
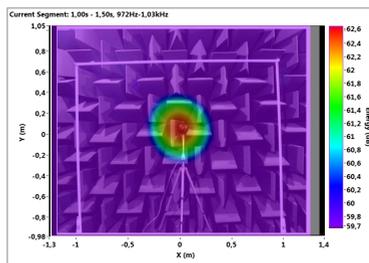


Figura A.50: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 5,0 cm; Geometria número 2 gerada.

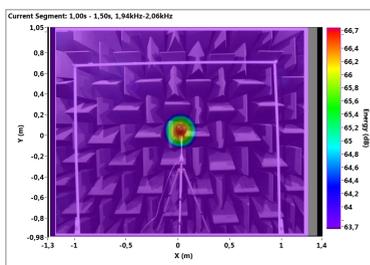
A Figura A.51 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 2 com erros de até 5,0 cm gerada aleatoriamente por *software*.



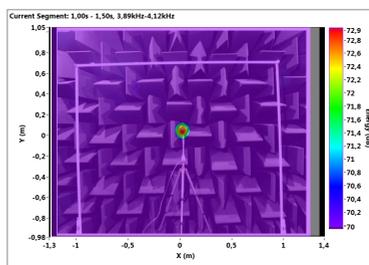
(a) 500 Hz.



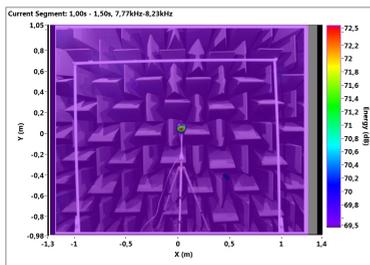
(b) 1 kHz.



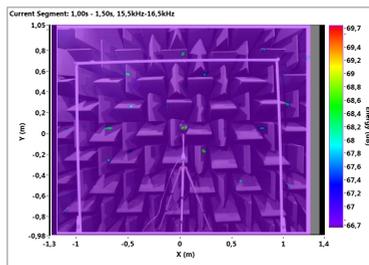
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.51: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 5,0 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 2. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,2°C e umidade relativa de 62,2 %.

### A.3.3 Geometria 3 - 5,0 cm

Geometria número 3 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.52 e A.53.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	20,3
1	37,5	36,6
2	52,5	55,1
3	60,0	64,9
4	15,0	10,4
5	37,5	42,1
6	37,5	40,0
7	52,5	49,4
8	0,0	-3,8
9	15,0	16,5
10	7,5	6,7
11	15,0	13,5
12	-15,0	-11,4
13	-15,0	-12,4
14	-30,0	-33,6
15	-30,0	-34,7

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
16	-22,5	-25,9
17	-37,5	-33,0
18	-52,5	-56,9
19	-60,0	-63,1
20	-15,0	-17,9
21	-37,5	-33,0
22	-37,5	-39,0
23	-52,5	-57,2
24	0,0	-0,7
25	-15,0	-12,6
26	-7,5	-7,0
27	-15,0	-11,0
28	15,0	19,7
29	15,0	11,0
30	30,0	33,8
31	30,0	27,9

Figura A.52: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 3 gerada com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone.

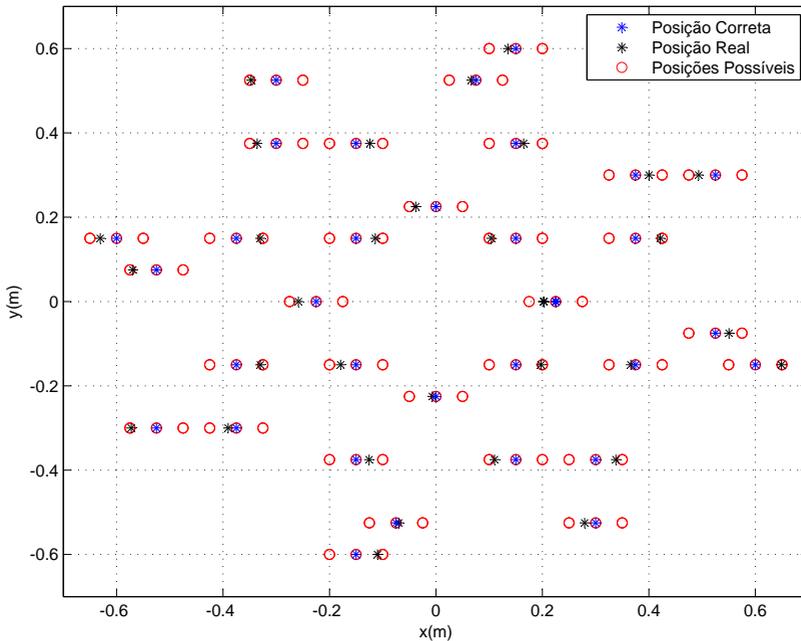
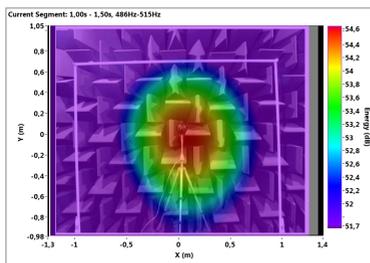
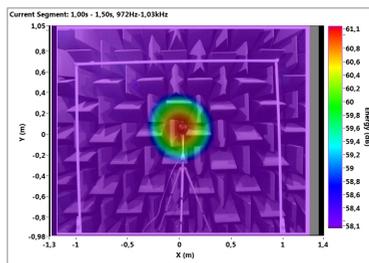


Figura A.53: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 5,0 cm; Geometria número 3 gerada.

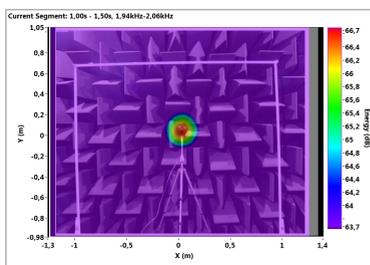
A Figura A.54 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 3 com erros de até 5,0 cm gerada aleatoriamente por *software*.



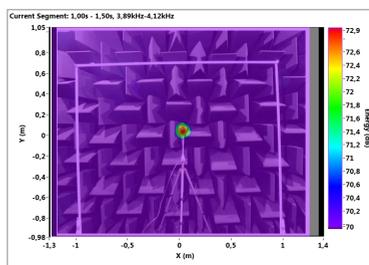
(a) 500 Hz.



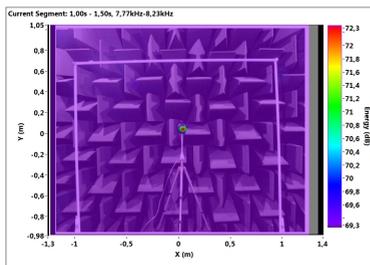
(b) 1 kHz.



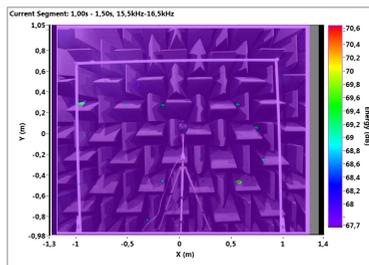
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.54: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 5,0 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 3. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,2°C e umidade relativa de 62,6%.

**A.3.4 Geometria 4 - 5,0 cm**

Geometria número 4 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.55 e A.56.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)	Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	27,2	16	-22,5	-24,3
1	37,5	32,9	17	-37,5	-40,3
2	52,5	51,1	18	-52,5	-57,0
3	60,0	62,8	19	-60,0	-57,7
4	15,0	12,8	20	-15,0	-17,7
5	37,5	36,7	21	-37,5	-39,3
6	37,5	41,6	22	-37,5	-36,3
7	52,5	52,6	23	-52,5	-51,3
8	0,0	1,6	24	0,0	0,3
9	15,0	18,3	25	-15,0	-19,8
10	7,5	5,5	26	-7,5	-11,0
11	15,0	13,3	27	-15,0	-14,6
12	-15,0	-14,3	28	15,0	10,1
13	-15,0	-11,9	29	15,0	10,8
14	-30,0	-27,7	30	30,0	29,3
15	-30,0	-34,5	31	30,0	26,8

Figura A.55: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 4 gerada com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone.

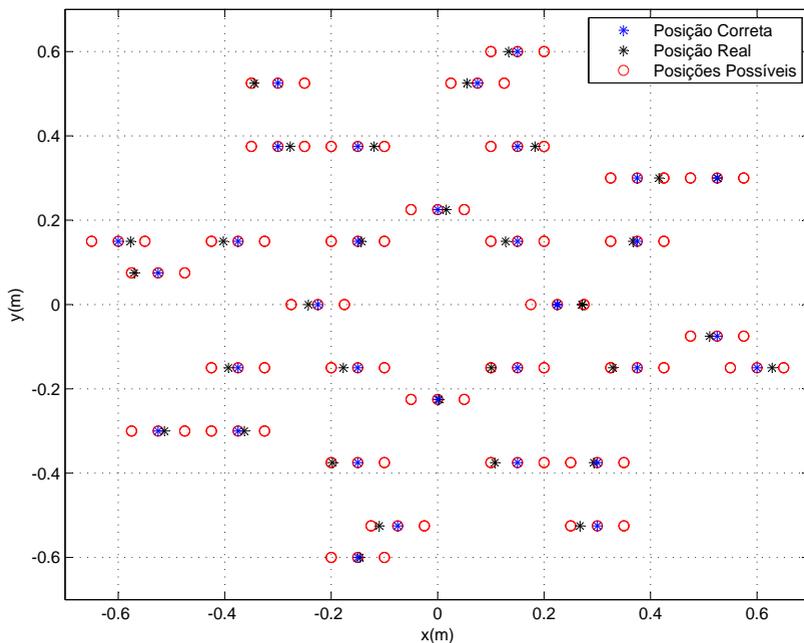
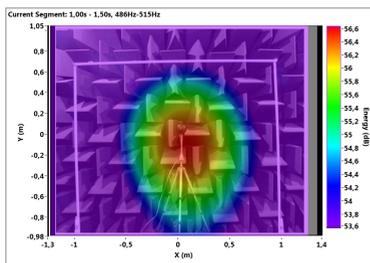
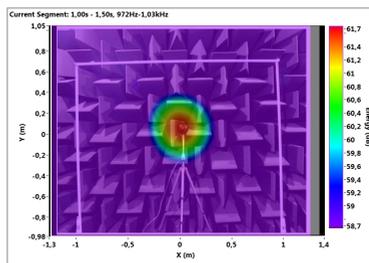


Figura A.56: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 5,0 cm; Geometria número 4 gerada.

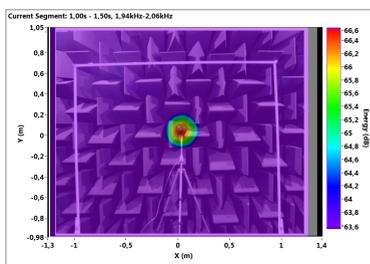
A Figura A.57 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 4 com erros de até 5,0 cm gerada aleatoriamente por *software*.



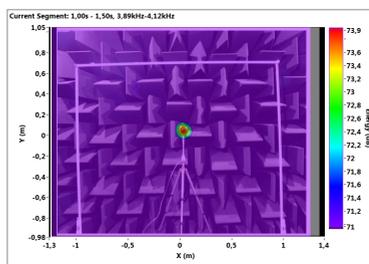
(a) 500 Hz.



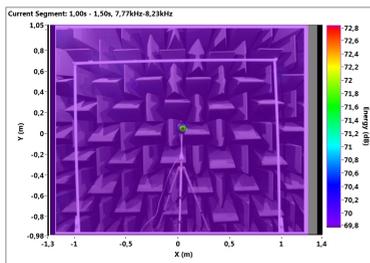
(b) 1 kHz.



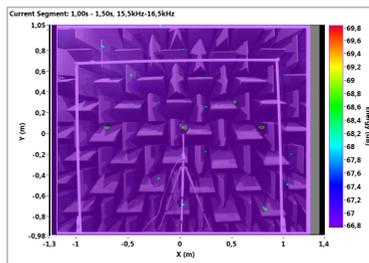
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.57: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 5,0 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 4. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,2°C e umidade relativa de 62,4 %.

### A.3.5 Geometria 5 - 5,0 cm

Geometria número 5 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.58 e A.59.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	21,0
1	37,5	37,7
2	52,5	57,4
3	60,0	60,3
4	15,0	19,4
5	37,5	33,6
6	37,5	38,1
7	52,5	47,7
8	0,0	2,5
9	15,0	14,6
10	7,5	4,1
11	15,0	18,0
12	-15,0	-18,8
13	-15,0	-18,6
14	-30,0	-27,2
15	-30,0	-29,7

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
16	-22,5	-22,2
17	-37,5	-37,5
18	-52,5	-48,8
19	-60,0	-61,0
20	-15,0	-18,7
21	-37,5	-37,1
22	-37,5	-35,9
23	-52,5	-52,8
24	0,0	-2,8
25	-15,0	-12,8
26	-7,5	-11,2
27	-15,0	-12,4
28	15,0	15,2
29	15,0	10,7
30	30,0	27,9
31	30,0	26,0

Figura A.58: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 5 gerada com até 5,0 cm de erro na posição de cada microfone.

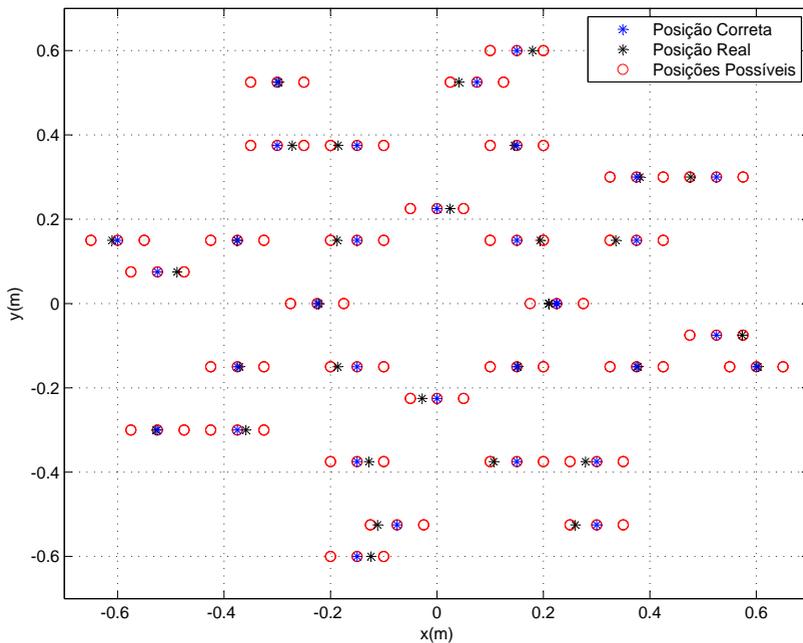
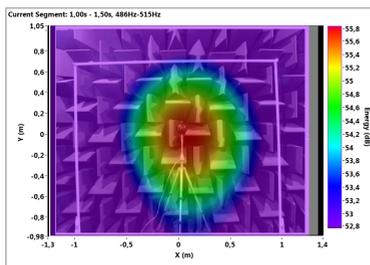
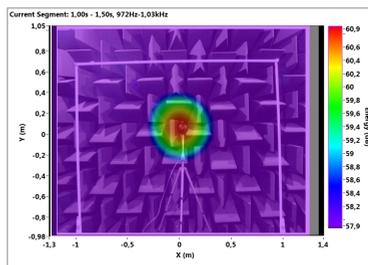


Figura A.59: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 5,0 cm; Geometria número 5 gerada.

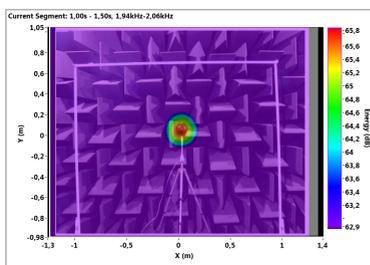
A Figura A.60 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 5 com erros de até 5,0 cm gerada aleatoriamente por *software*.



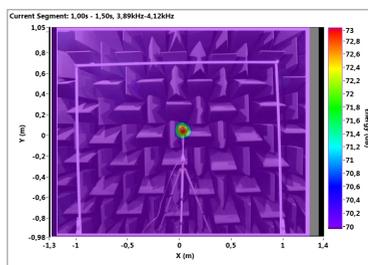
(a) 500 Hz.



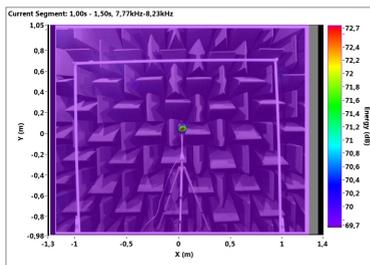
(b) 1 kHz.



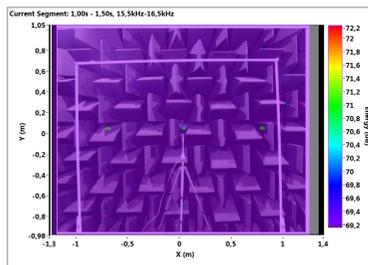
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.60: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 5,0 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 5. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,3°C e umidade relativa de 62,5 %.

**A.3.6 Mapas de beamforming em uma dimensão - 5,0 cm**

As Figuras A.61, A.62, A.63, A.64, A.65 e A.66 mostram as respostas de *beamforming* em 2 dimensões para erros no posicionamento de até 5,0 cm.

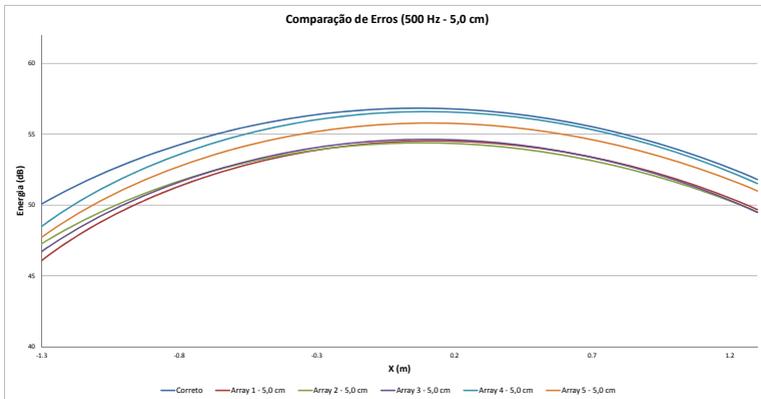


Figura A.61: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 500 Hz.

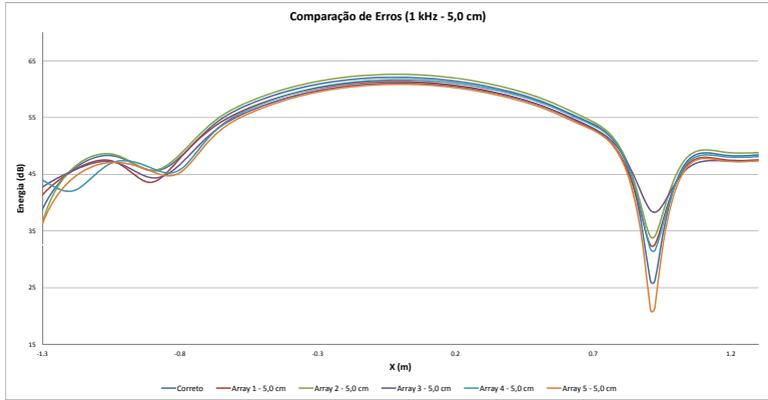


Figura A.62: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 1 kHz.

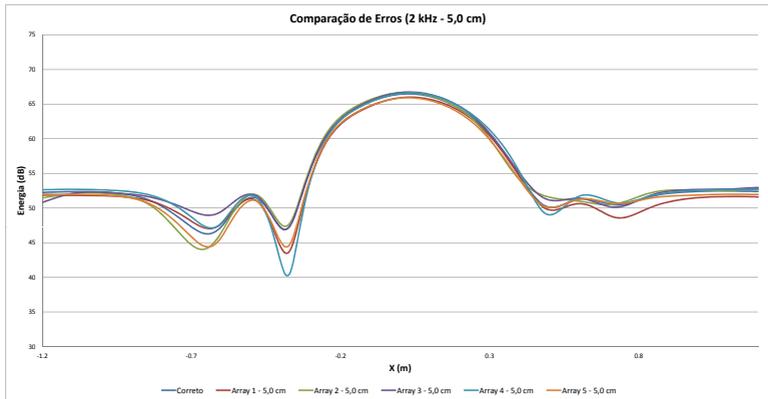


Figura A.63: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 2 kHz.

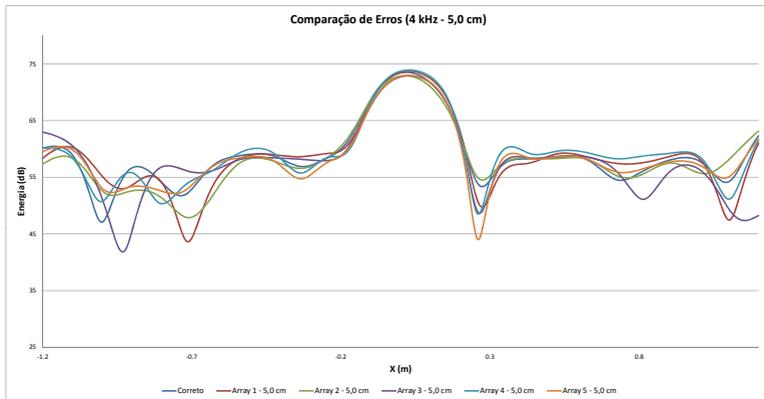


Figura A.64: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 4 kHz.

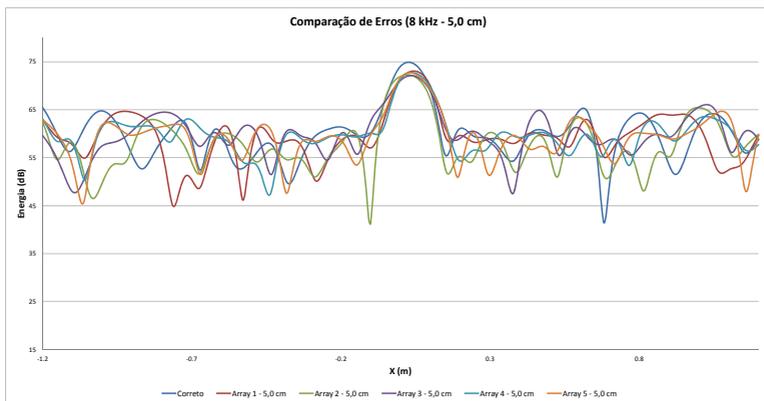


Figura A.65: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 8 kHz.

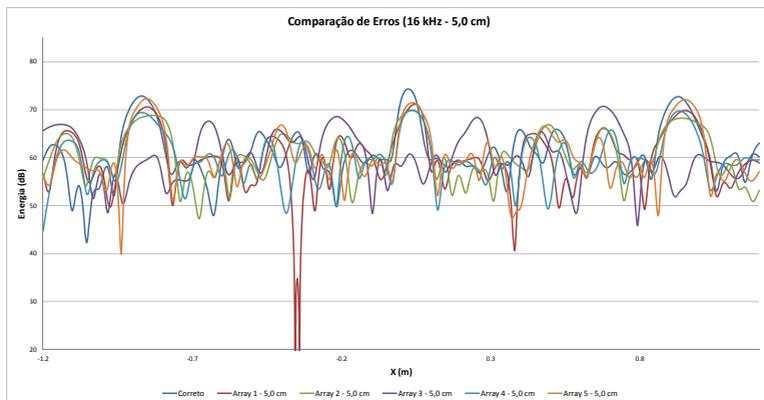


Figura A.66: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 5,0 cm. Frequência de 16 kHz.

### A.3.7 Correlação - 5,0 cm

A partir das respostas em uma dimensão de *beamforming* obtém-se a correlação entre a resposta correta e as respostas com erros no posicionamento dos microfones.

A tabela A.3 apresenta a correlação para erros de até 5,0 cm no posicionamento dos microfones.

Tabela A.3: Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 5,0 cm.

	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	12kHz	16kHz
Array 1	0,984	0,993	0,992	0,906	0,461	0,278	0,383
Array 2	0,998	0,992	0,993	0,938	0,503	0,359	0,554
Array 3	0,995	0,974	0,994	0,837	0,482	0,289	0,227
Array 4	0,994	0,987	0,981	0,952	0,575	0,575	0,588
Array 5	0,989	0,997	0,997	0,941	0,668	0,376	0,579
<b>Média</b>	<b>0,992</b>	<b>0,989</b>	<b>0,992</b>	<b>0,915</b>	<b>0,538</b>	<b>0,375</b>	<b>0,466</b>

A Figura A.67 mostra o gráfico de correlação para as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 5,0 cm.

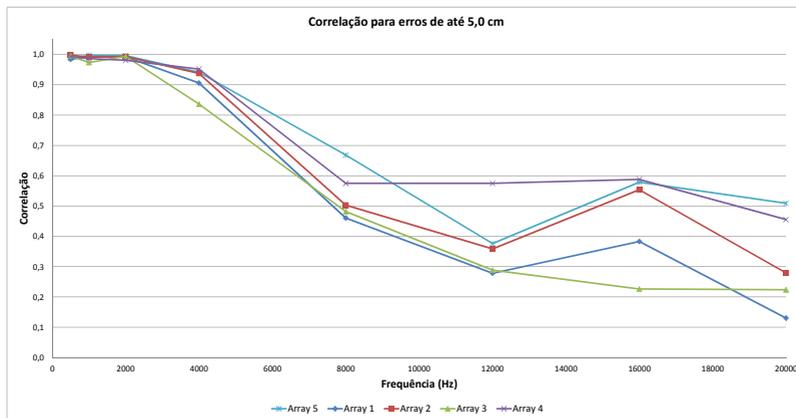


Figura A.67: Gráfico de correlação dos erros de posicionamento dos microfones de até 5,0 cm. Gráfico com interpolação entre os dados de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz.

### A.3.8 *Comportamento da faixa dinâmica ao variar a frequência - 5,0 cm*

Para a avaliação da faixa dinâmica em relação a frequência, foi realizada uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Pode-se notar que para erros no posicionamento dos microfones de até 5,0 cm o valor da faixa dinâmica é geralmente inferior ao valor nominal, Figura A.68.

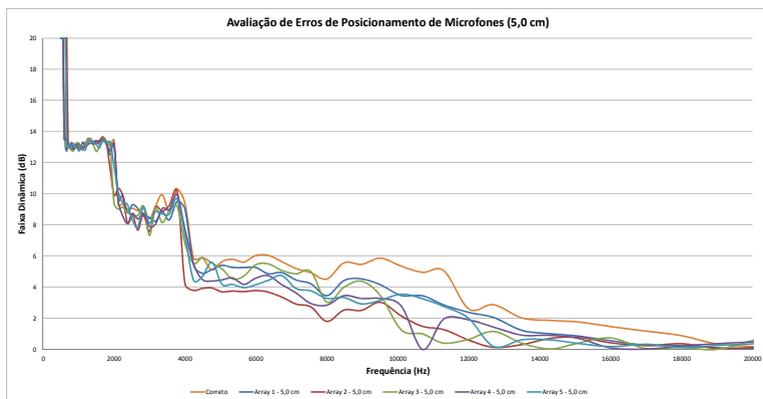


Figura A.68: Faixa dinâmica dos *arrays* com erros de posicionamento de até 5,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

Para observar melhor, juntou-se as geometrias com erros de até 5,0 cm e realizou-se a média para a comparação com a geometria correta, Figura A.69.

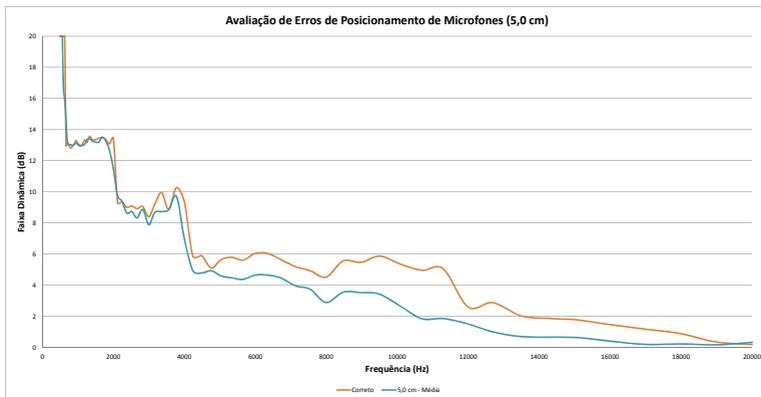


Figura A.69: Faixa dinâmica média dos *arrays* com erros de posicionamento de até 5,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

### ***A.3.9 Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - 5,0 cm***

Nesta Seção, foi estudado como o lóbulo principal se comporta ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Pode-se notar que para erros no posicionamento dos microfones de até 5,0 cm o valor de potência estimada é geralmente inferior ao valor nominal, Figuras [A.70](#) e [A.71](#).

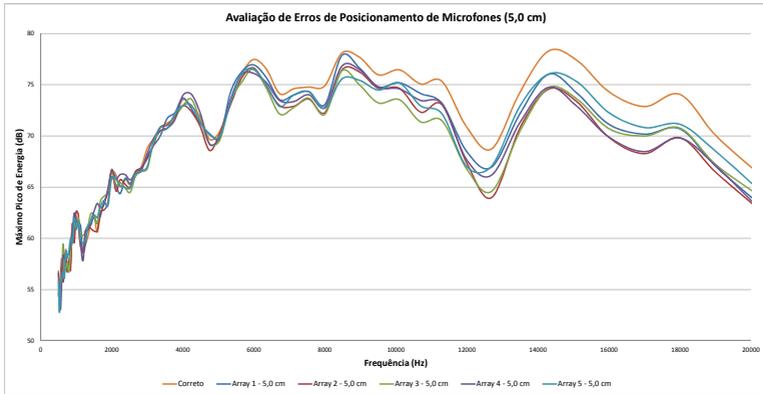


Figura A.70: Comportamento do lóbulo principal dos *arrays* com erros de posicionamento de até 5,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

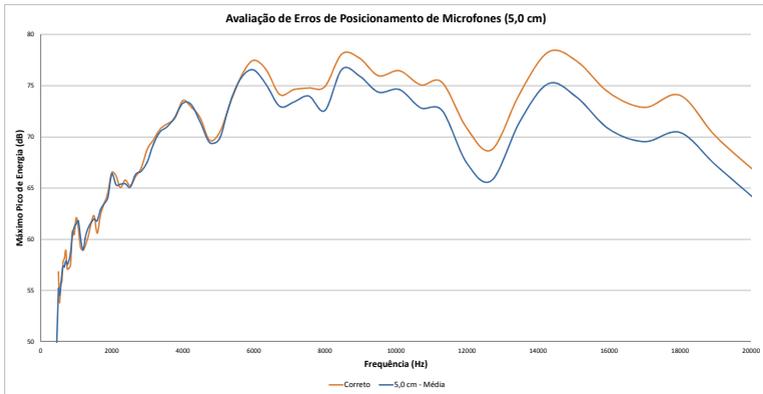


Figura A.71: Comportamento médio do lóbulo principal dos *arrays* com erros de posicionamento de até 5,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

### A.3.10 *Comportamento da largura de lóbulo ao variar a frequência - 5,0 cm*

A largura de lóbulo para erros de até 5,0 cm no posicionamento dos microfones é praticamente idêntica à resposta correta, apenas para as frequências acima de 12 kHz que pode se observar uma pequena mudança, Figura A.72.

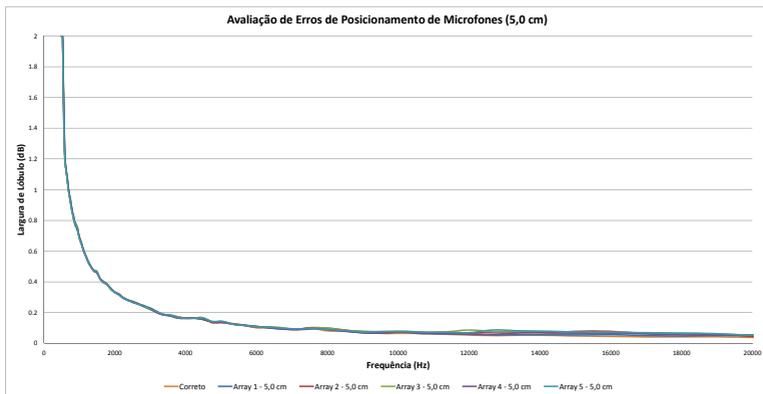


Figura A.72: Largura de lóbulo dos *arrays* com erros de posicionamento dos microfones de até 5,0 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

## A.4 Erros de posicionamento de até 6,5 cm

### A.4.1 Geometria 1 - 6,5 cm

Geometria número 1 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.73 e A.74.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)	Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	26,7	16	-22,5	-18,5
1	37,5	32,2	17	-37,5	-40,5
2	52,5	46,0	18	-52,5	-56,8
3	60,0	66,0	19	-60,0	-60,7
4	15,0	8,5	20	-15,0	-16,1
5	37,5	32,6	21	-37,5	-31,7
6	37,5	31,2	22	-37,5	-38,9
7	52,5	51,7	23	-52,5	-51,3
8	0,0	2,1	24	0,0	-0,7
9	15,0	21,3	25	-15,0	-10,7
10	7,5	2,0	26	-7,5	-6,4
11	15,0	15,3	27	-15,0	-10,6
12	-15,0	-12,5	28	15,0	21,3
13	-15,0	-21,3	29	15,0	9,1
14	-30,0	-36,4	30	30,0	36,1
15	-30,0	-29,0	31	30,0	25,3

Figura A.73: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 1 gerada com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone.

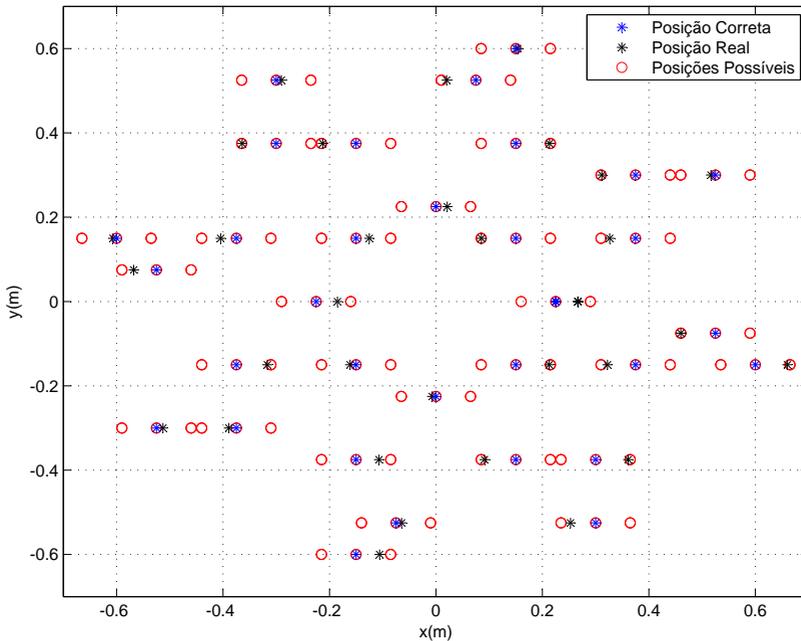
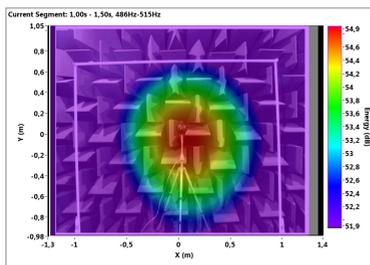
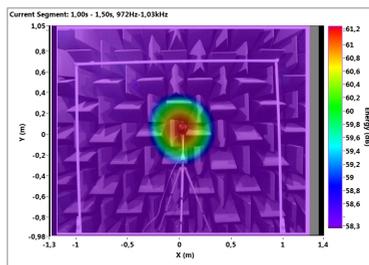


Figura A.74: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 6,5 cm; Geometria número 1 gerada.

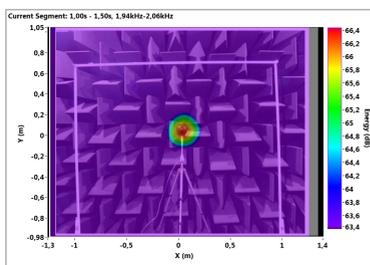
A Figura [A.75](#) mostra as medições de *beamforming* para a geometria 1 com erros de até 6,5 cm gerada aleatoriamente por *software*.



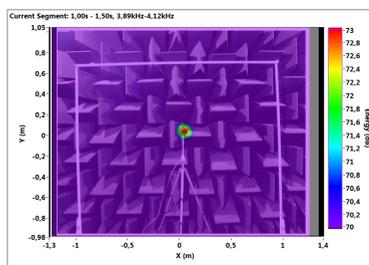
(a) 500 Hz.



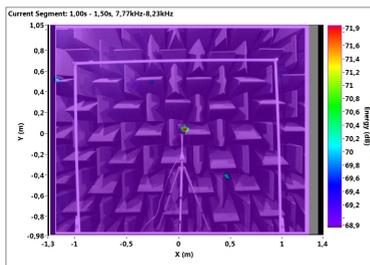
(b) 1 kHz.



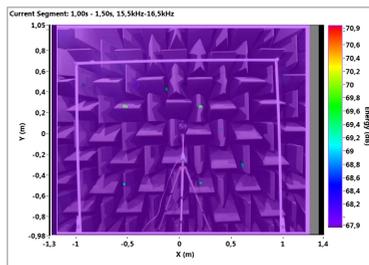
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.75: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 6,5 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 1. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,2°C e umidade relativa de 62,6%.

**A.4.2 Geometria 2 - 6,5 cm**

Geometria número 2 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.76 e A.77.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	18,2
1	37,5	35,8
2	52,5	54,1
3	60,0	57,7
4	15,0	13,3
5	37,5	36,6
6	37,5	33,0
7	52,5	50,1
8	0,0	-6,3
9	15,0	18,3
10	7,5	12,9
11	15,0	11,1
12	-15,0	-10,3
13	-15,0	-13,1
14	-30,0	-31,1
15	-30,0	-35,3

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
16	-22,5	-18,1
17	-37,5	-43,1
18	-52,5	-54,9
19	-60,0	-56,9
20	-15,0	-11,7
21	-37,5	-42,8
22	-37,5	-41,3
23	-52,5	-48,3
24	0,0	-1,7
25	-15,0	-17,1
26	-7,5	-10,6
27	-15,0	-16,3
28	15,0	9,5
29	15,0	14,7
30	30,0	31,6
31	30,0	33,3

Figura A.76: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 2 gerada com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone.

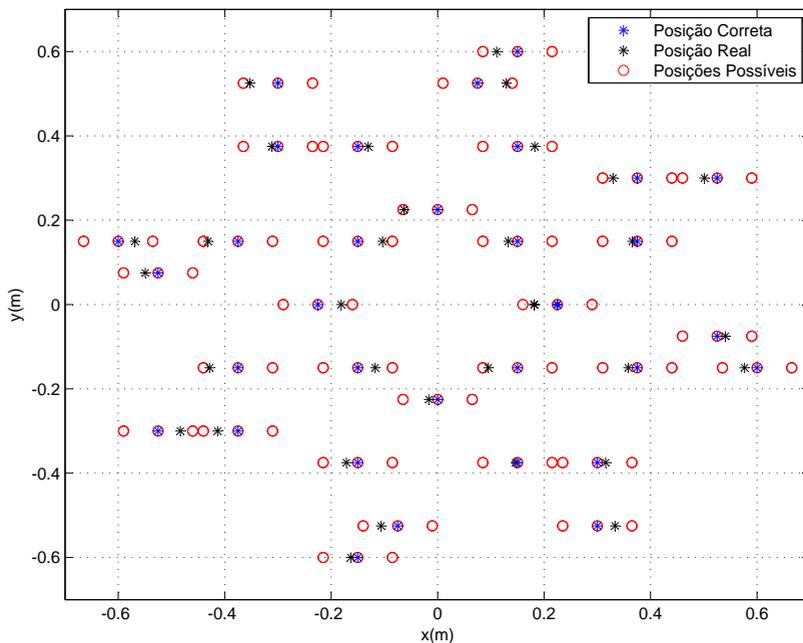
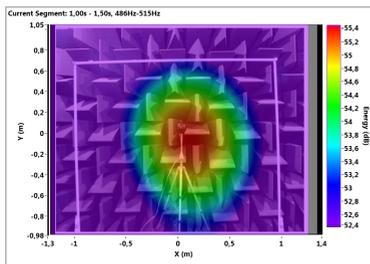
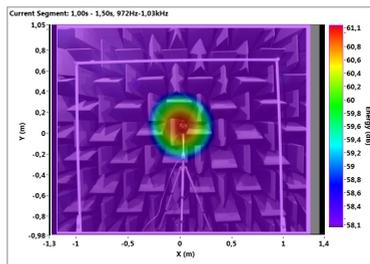


Figura A.77: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 6,5 cm; Geometria número 2 gerada.

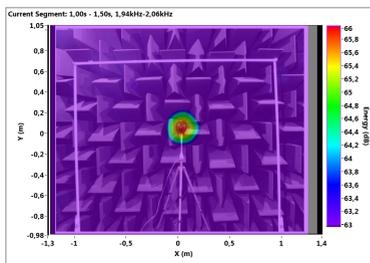
A Figura A.78 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 2 com erros de até 6,5 cm gerada aleatoriamente por *software*.



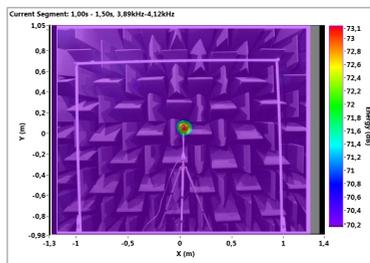
(a) 500 Hz.



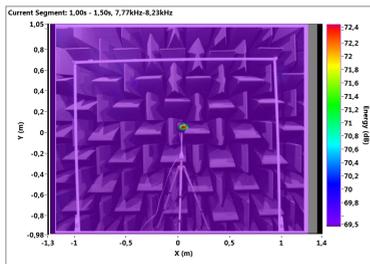
(b) 1 kHz.



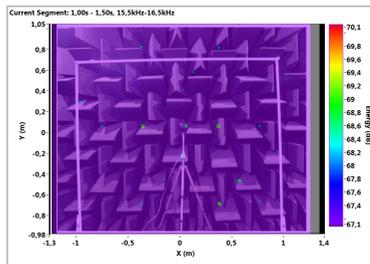
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.78: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 6,5 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 2. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,5°C e umidade relativa de 62,5 %.

### A.4.3 Geometria 3 - 6,5 cm

Geometria número 3 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.79 e A.80.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	19,7
1	37,5	40,8
2	52,5	49,0
3	60,0	57,6
4	15,0	11,8
5	37,5	39,0
6	37,5	32,6
7	52,5	53,0
8	0,0	-0,8
9	15,0	14,6
10	7,5	9,9
11	15,0	14,8
12	-15,0	-11,2
13	-15,0	-9,2
14	-30,0	-32,3
15	-30,0	-24,7

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
16	-22,5	-22,6
17	-37,5	-35,1
18	-52,5	-57,1
19	-60,0	-58,3
20	-15,0	-21,5
21	-37,5	-43,9
22	-37,5	-36,2
23	-52,5	-46,8
24	0,0	1,0
25	-15,0	-13,4
26	-7,5	-13,8
27	-15,0	-13,9
28	15,0	12,0
29	15,0	20,5
30	30,0	23,7
31	30,0	36,2

Figura A.79: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 3 gerada com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone.

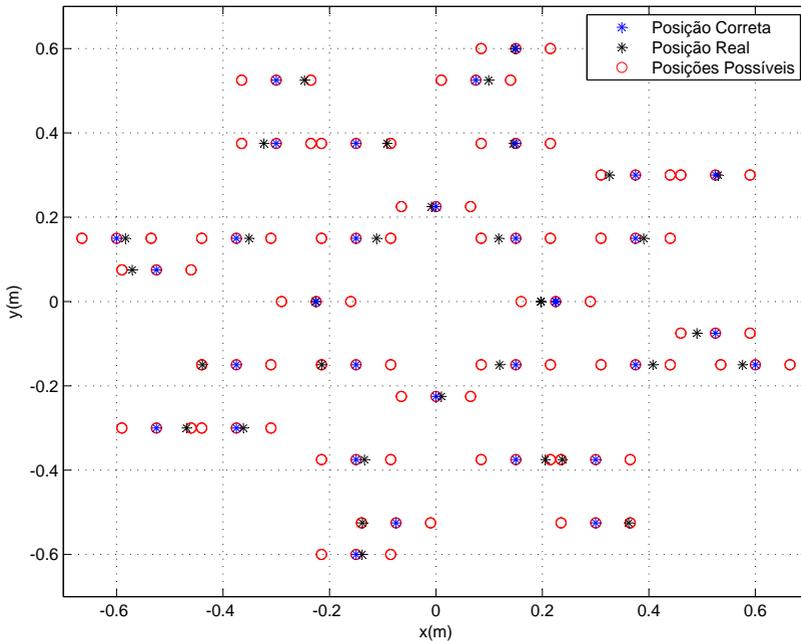
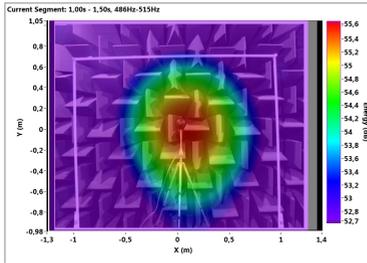
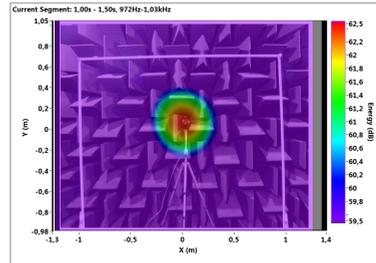


Figura A.80: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 6,5 cm; Geometria número 3 gerada.

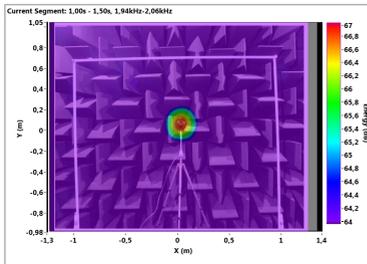
A Figura A.81 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 3 com erros de até 6,5 cm gerada aleatoriamente por *software*.



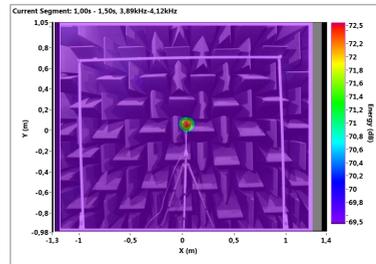
(a) 500 Hz.



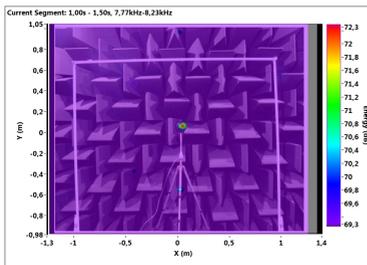
(b) 1 kHz.



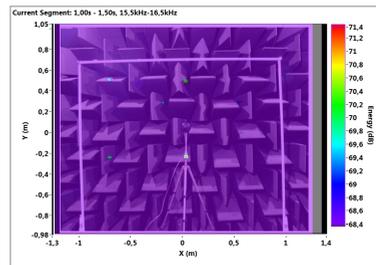
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.81: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 6,5 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 3. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,5°C e umidade relativa de 62,4 %.

**A.4.4 Geometria 4 - 6,5 cm**

Geometria número 4 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.82 e A.83.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	27,2
1	37,5	37,9
2	52,5	52,6
3	60,0	54,8
4	15,0	18,0
5	37,5	37,8
6	37,5	35,5
7	52,5	50,9
8	0,0	3,8
9	15,0	21,2
10	7,5	6,1
11	15,0	14,7
12	-15,0	-19,7
13	-15,0	-15,6
14	-30,0	-32,4
15	-30,0	-24,5

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
16	-22,5	-16,6
17	-37,5	-31,5
18	-52,5	-55,7
19	-60,0	-60,2
20	-15,0	-11,9
21	-37,5	-43,9
22	-37,5	-40,8
23	-52,5	-53,8
24	0,0	-3,0
25	-15,0	-9,7
26	-7,5	-9,3
27	-15,0	-14,4
28	15,0	10,8
29	15,0	16,3
30	30,0	27,4
31	30,0	26,6

Figura A.82: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 4 gerada com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone.

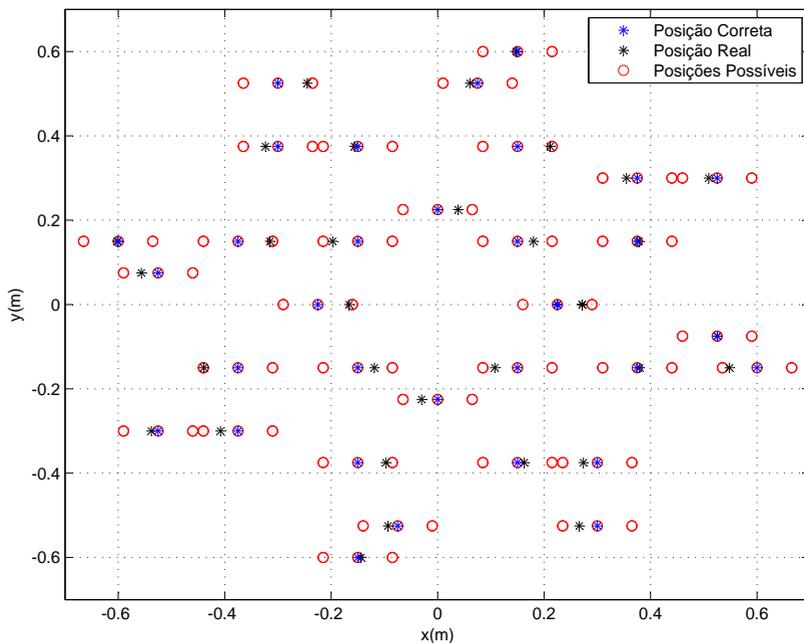
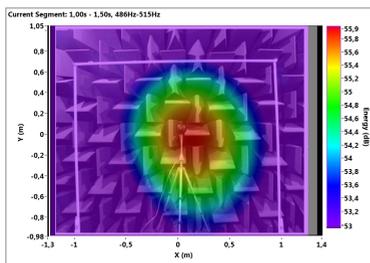
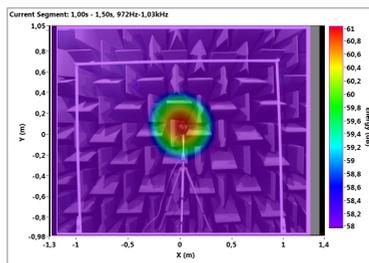


Figura A.83: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 6,5 cm; Geometria número 4 gerada.

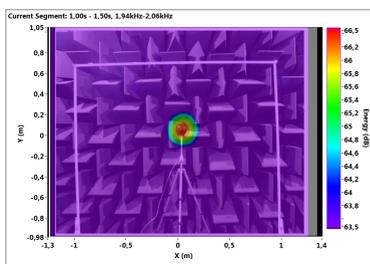
A Figura A.84 mostra as medições de *beamforming* para a geometria 4 com erros de até 6,5 cm gerada aleatoriamente por *software*.



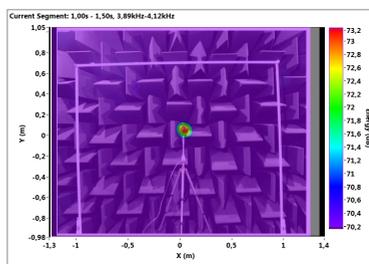
(a) 500 Hz.



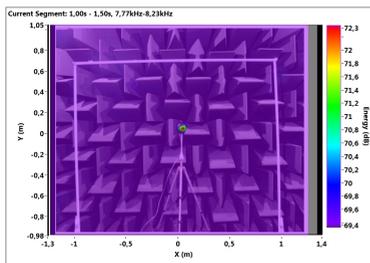
(b) 1 kHz.



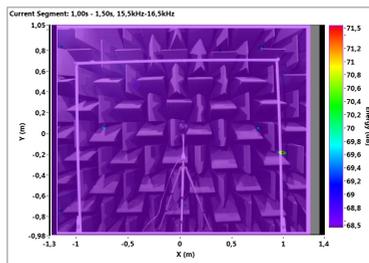
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.84: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 6,5 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 4. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,5°C e umidade relativa de 62,4 %.

### A.4.5 Geometria 5 - 6,5 cm

Geometria número 5 gerada pelo *software* na plataforma MATLAB com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone, Figuras A.85 e A.86.

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
0	22,5	25,4
1	37,5	39,1
2	52,5	55,0
3	60,0	63,4
4	15,0	10,3
5	37,5	37,8
6	37,5	37,6
7	52,5	46,1
8	0,0	-4,7
9	15,0	17,2
10	7,5	5,6
11	15,0	9,1
12	-15,0	-11,8
13	-15,0	-20,4
14	-30,0	-29,8
15	-30,0	-27,6

Microfone	Correto(cm)	Errado(cm)
16	-22,5	-25,8
17	-37,5	-35,6
18	-52,5	-57,5
19	-60,0	-64,5
20	-15,0	-11,8
21	-37,5	-40,5
22	-37,5	-33,8
23	-52,5	-53,7
24	0,0	-6,1
25	-15,0	-11,0
26	-7,5	-10,3
27	-15,0	-10,0
28	15,0	13,7
29	15,0	14,8
30	30,0	27,5
31	30,0	25,1

Figura A.85: Tabela com as posições que foram geradas aleatoriamente pelo *software* criado em MATLAB. Geometria número 5 gerada com até 6,5 cm de erro na posição de cada microfone.

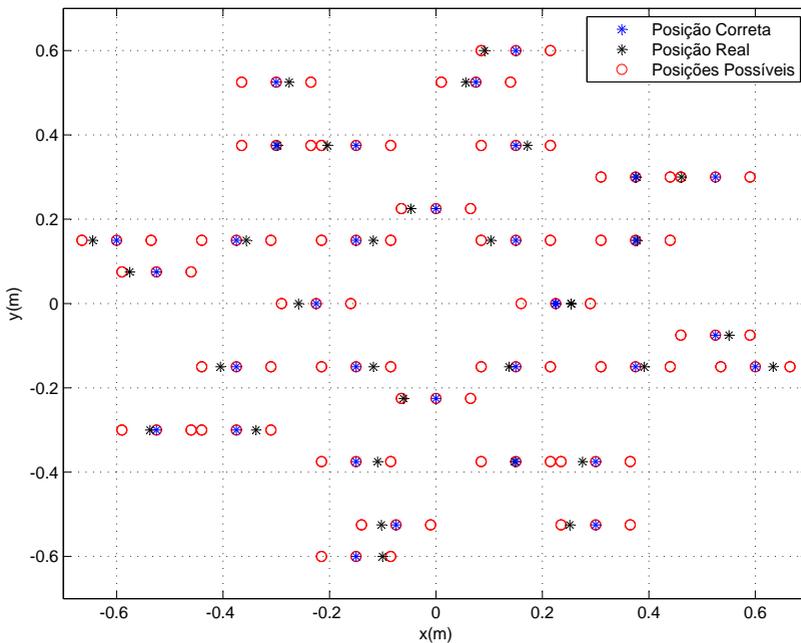
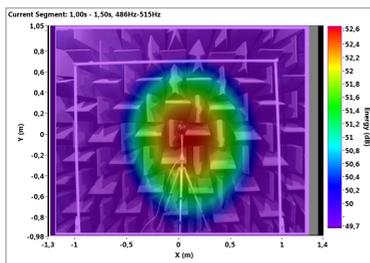
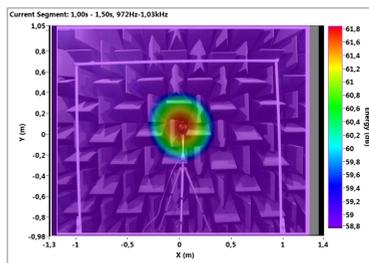


Figura A.86: Erros no posicionamento dos microfones. Erros de até 6,5 cm; Geometria número 5 gerada.

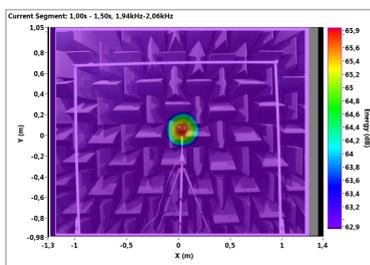
A Figura [A.87](#) mostra as medições de *beamforming* para a geometria 5 com erros de até 6,5 cm gerada aleatoriamente por *software*.



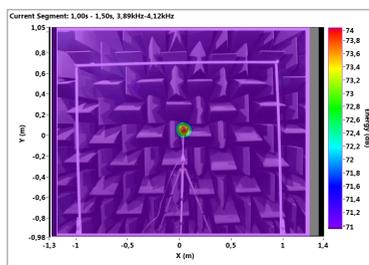
(a) 500 Hz.



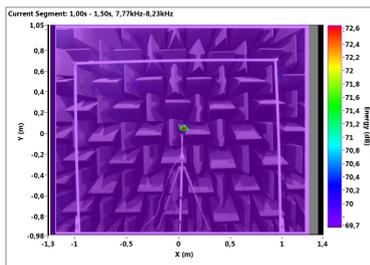
(b) 1 kHz.



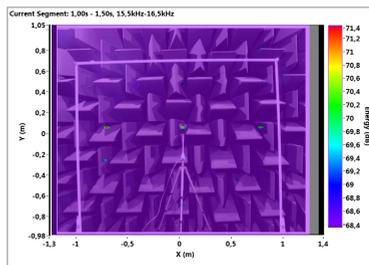
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura A.87: Erros no posicionamento dos microfones ao aplicar ruído branco. Erros de até 6,5 cm gerado aleatoriamente por *software*, geometria número 5. Fonte posicionada a 1,4 m de altura, 2,5 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de 25,5°C e umidade relativa de 62,1 %.

#### A.4.6 *Mapas de beamforming em uma dimensão - 6,5 cm*

As Figuras A.88, A.89, A.90, A.91, A.92, A.93 mostram as respostas de *beamforming* em 2 dimensões para erros no posicionamento de até 6,5 cm.

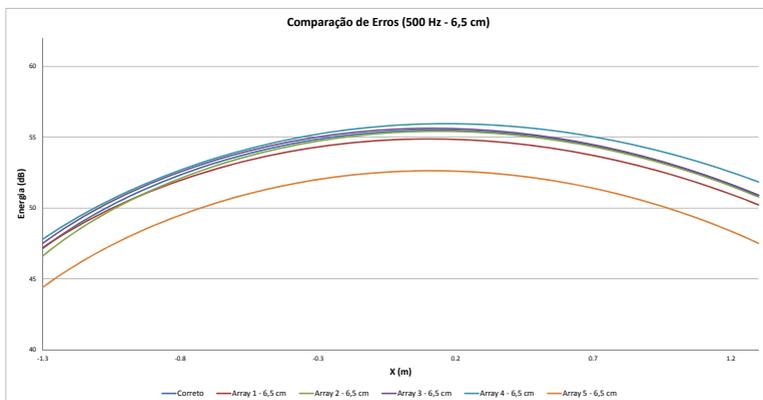


Figura A.88: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 500 Hz.

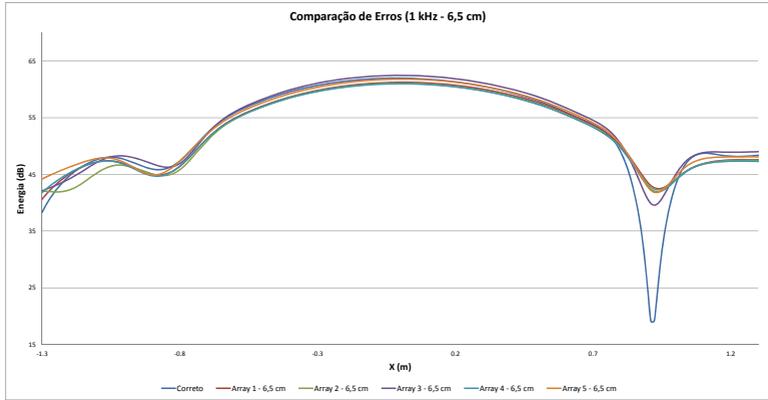


Figura A.89: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 1 kHz.

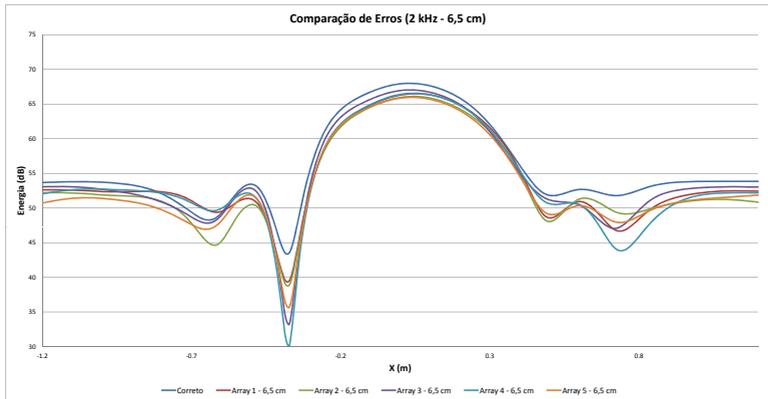


Figura A.90: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 2 kHz.

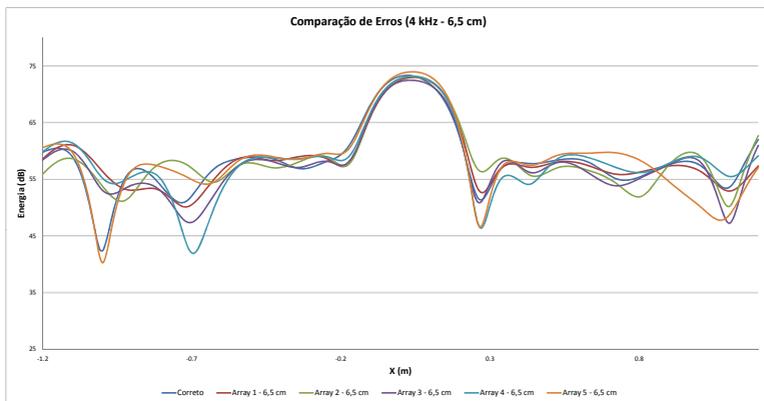


Figura A.91: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 4 kHz.

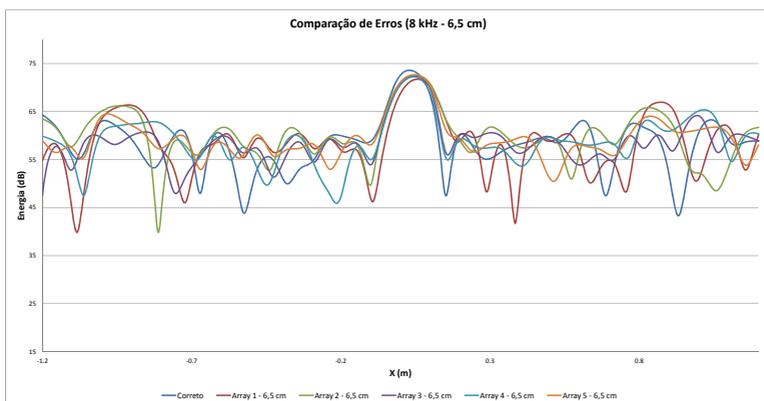


Figura A.92: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 8 kHz.

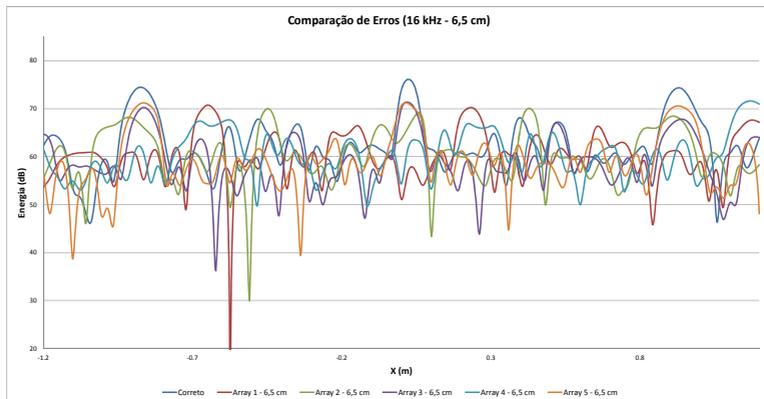


Figura A.93: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação da geometria correta com as 5 geometrias com erros de até 6,5 cm. Frequência de 16 kHz.

#### A.4.7 Correlação - 6,5 cm

A partir das respostas em uma dimensão de *beamforming* obtém-se a correlação entre a resposta correta e as respostas com erros no posicionamento dos microfones.

A tabela A.4 apresenta a correlação para erros de até 6,5 cm no posicionamento dos microfones.

	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	12kHz	16kHz
Array 1	0,998	0,922	0,977	0,890	0,319	0,337	0,233
Array 2	1,000	0,916	0,993	0,870	0,438	0,222	0,465
Array 3	0,999	0,953	0,980	0,916	0,528	0,312	0,661
Array 4	0,997	0,928	0,946	0,852	0,472	0,596	0,021
Array 5	0,997	0,934	0,991	0,913	0,607	0,500	0,653
<b>Média</b>	<b>0,998</b>	<b>0,931</b>	<b>0,977</b>	<b>0,888</b>	<b>0,473</b>	<b>0,394</b>	<b>0,407</b>

Tabela A.4: Correlação da geometria correta com as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 6,5 cm.

A Figura A.94 mostra o gráfico de correlação para as 5 geometrias aleatórias geradas com erros de até 6,5 cm.

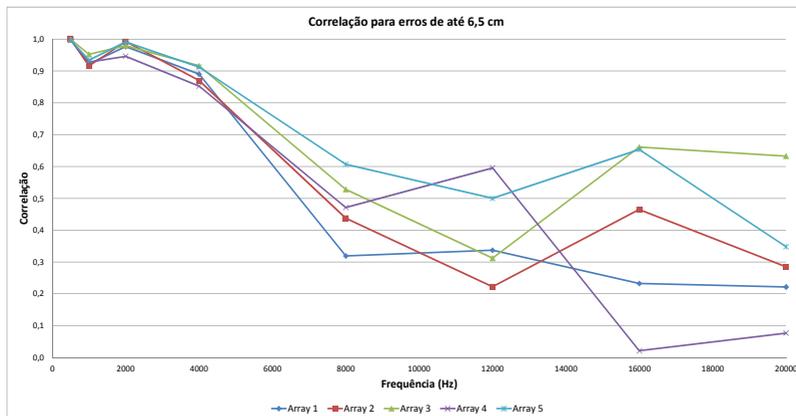


Figura A.94: Gráfico de correlação dos erros de posicionamento dos microfones de até 6,5 cm. Gráfico com interpolação entre os dados de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz, 16 kHz e 20 kHz.

#### A.4.8 *Comportamento da faixa dinâmica ao variar a frequência - 6,5 cm*

Para a avaliação da faixa dinâmica em relação a frequência, foi realizada uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Pode-se notar que para erros no posicionamento dos microfones de até 6,5 cm o valor da faixa dinâmica é geralmente inferior ao valor nominal, Figura A.95.

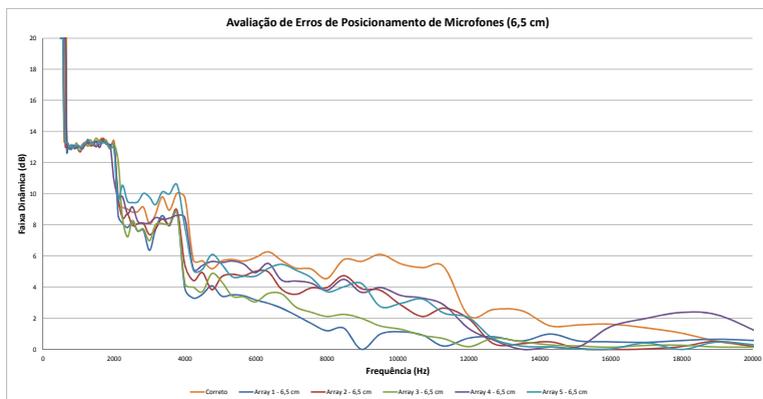


Figura A.95: Faixa dinâmica dos *arrays* com erros de posicionamento de até 6,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

Para observar melhor, juntou-se as geometrias com erros de até 6,5 cm e realizou-se a média para a comparação com a geometria correta, Figura A.96.

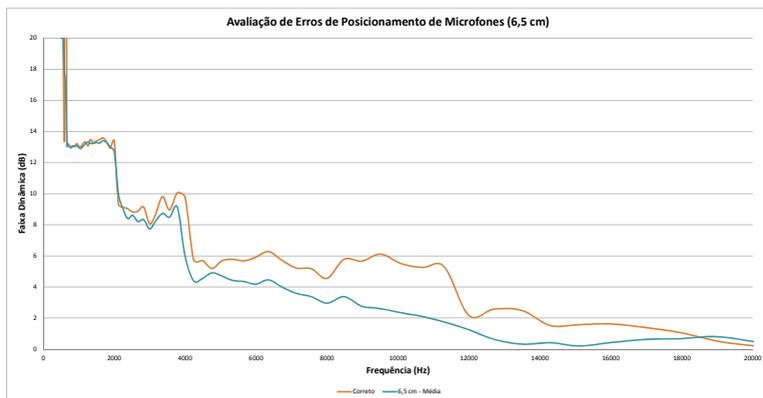


Figura A.96: Faixa dinâmica média dos *arrays* com erros de posicionamento de até 6,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

**A.4.9 Comportamento do lóbulo principal ao variar a frequência - 6,5 cm**

Pode-se notar que para erros no posicionamento dos microfones de até 6,5 cm o valor de potência estimada é geralmente inferior ao valor nominal, Figuras A.97 e A.98.

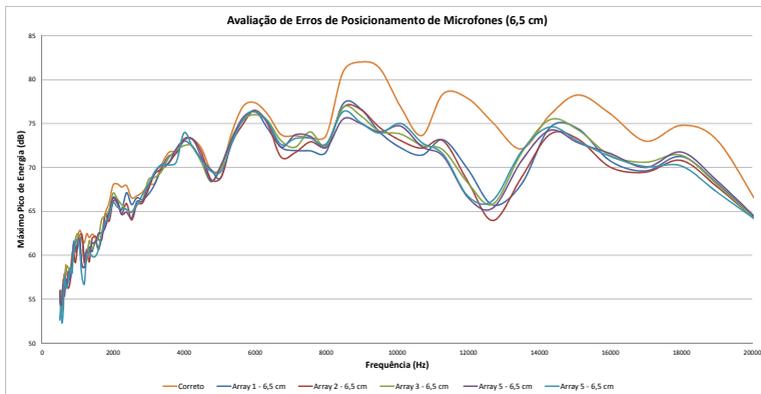


Figura A.97: Comportamento do lóbulo principal dos *arrays* com erros de posicionamento de até 6,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

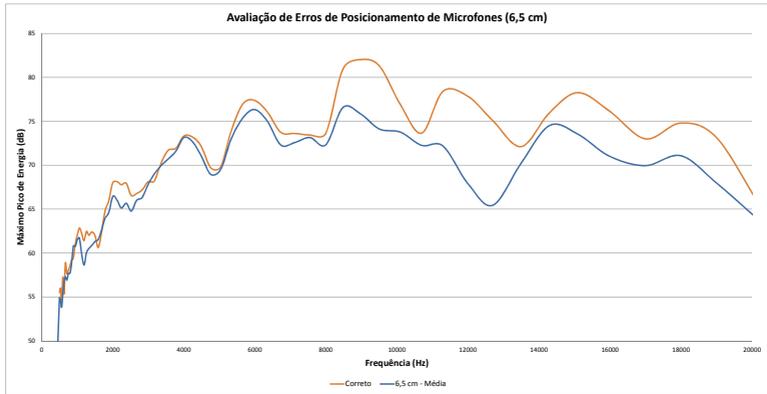


Figura A.98: Comportamento médio do lóbulo principal dos *arrays* com erros de posicionamento de até 6,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

#### A.4.10 *Comportamento da largura de lóbulo ao variar a frequência - 6,5 cm*

A largura de lóbulo para erros de até 6,5 cm no posicionamento dos microfones é quase idêntica nas baixas frequências, apenas nas frequências acima de 12 kHz que começa a piorar a largura de lóbulo, Figura A.99.

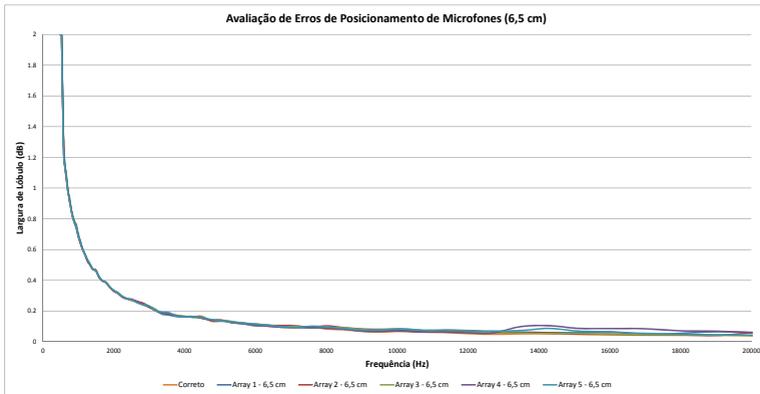


Figura A.99: Largura de lóbulo dos *arrays* com erros de posicionamento dos microfones de até 6,5 cm ao aplicar uma varredura na frequência (de 500 Hz até 20 kHz), com banda de 1/3 de oitava. Fonte: ruído branco.

## APÊNDICE B – MEDIÇÕES DOS EFEITOS DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA

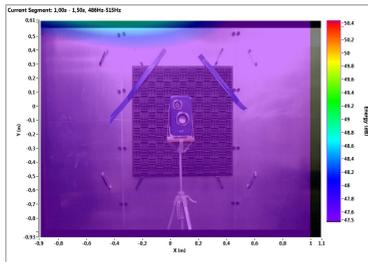
Será investigado os efeitos da temperatura e umidade relativa nas medições de *beamforming*. Para isto, foi realizada uma série de medições no interior de uma câmara do laboratório POLO (Laboratório de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica) da Universidade Federal de Santa Catarina. Esta câmara possibilita o controle da temperatura e umidade relativa no interior da mesma. A câmara possui exatidão de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$  para a temperatura e  $\pm 0,05\%$  de exatidão para a umidade relativa.

### B.1 Efeitos da Temperatura

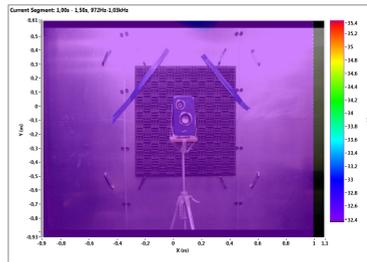
Nesta seção será variada a temperatura no interior da câmara ( $15,0^{\circ}\text{C}$  até  $30,0^{\circ}\text{C}$ ), para isto, a umidade relativa permanecerá constante em  $50\%$ . Foram plotadas as medições de *beamforming* para as frequências de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz e 16 kHz. As medições podem ser observadas nas Figuras [B.2](#), [B.3](#), [B.4](#), [B.5](#), [B.6](#), [B.7](#) e [B.8](#).

### B.1.1 Ruído de Fundo

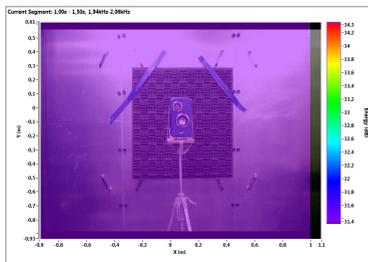
Antes de iniciar o estudo, foi realizado uma medição de ruído de fundo. Nota-se que o ruído de fundo apresenta valores muito abaixo dos níveis de energia das medições de *beamforming*, Figura B.1.



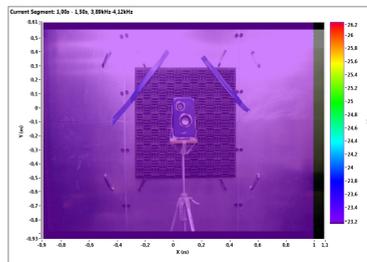
(a) 500 Hz.



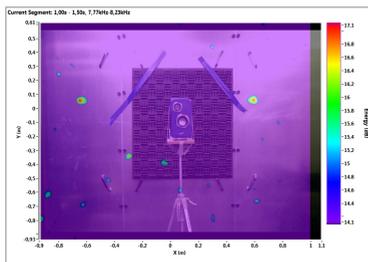
(b) 1 kHz.



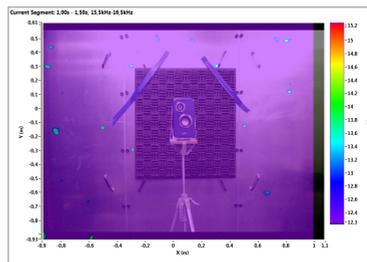
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



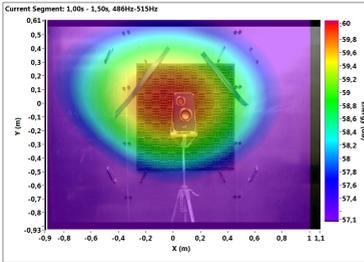
(e) 8 kHz.



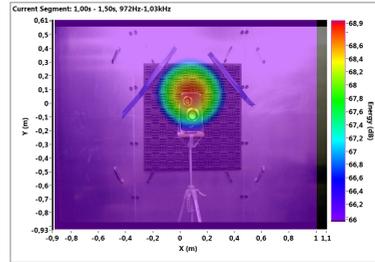
(f) 16 kHz.

Figura B.1: Ruído de fundo no interior da câmara térmica do POLO.

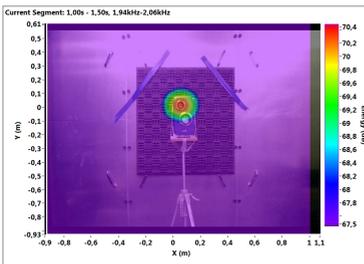
B.1.2 Temperatura no valor de  $15,0^{\circ}\text{C}$



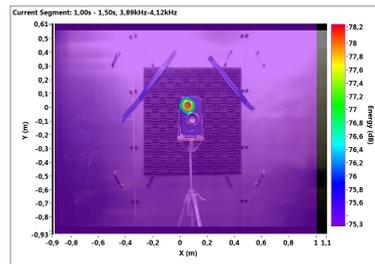
(a) 500 Hz.



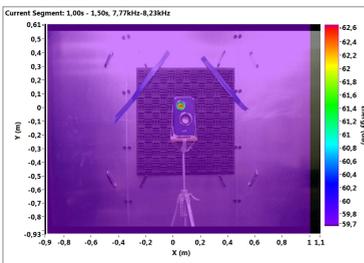
(b) 1 kHz.



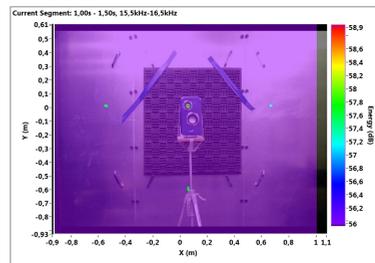
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



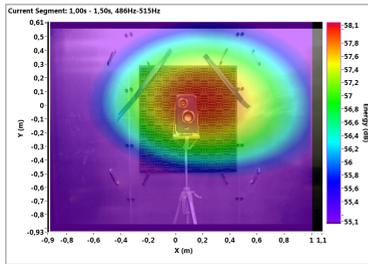
(e) 8 kHz.



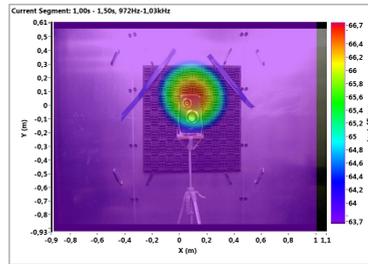
(f) 16 kHz.

Figura B.2: Efeitos da temperatura na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de  $15,0^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa fixa em 50,0 %.

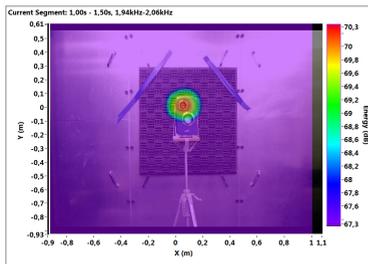
B.1.3 Temperatura no valor de  $17,5^{\circ}\text{C}$



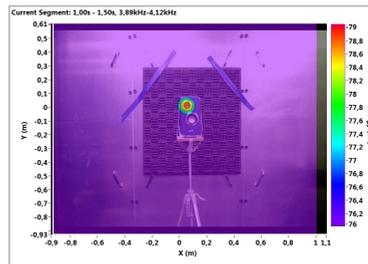
(a) 500 Hz.



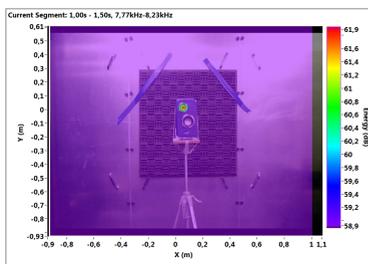
(b) 1 kHz.



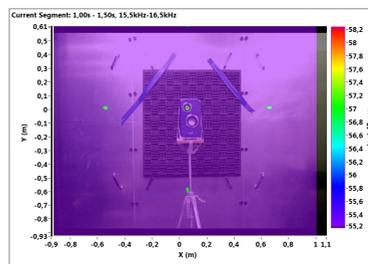
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



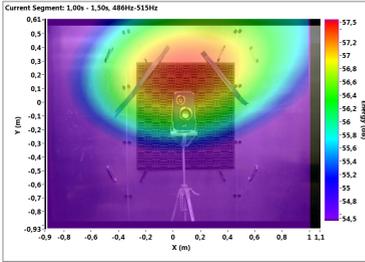
(e) 8 kHz.



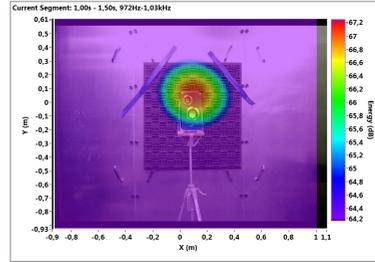
(f) 16 kHz.

Figura B.3: Efeitos da temperatura na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de  $17,5^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa fixa em 50,0 %.

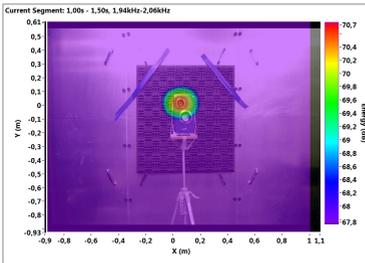
B.1.4 Temperatura no valor de  $20,0^{\circ}\text{C}$



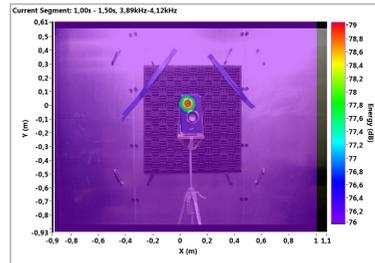
(a) 500 Hz.



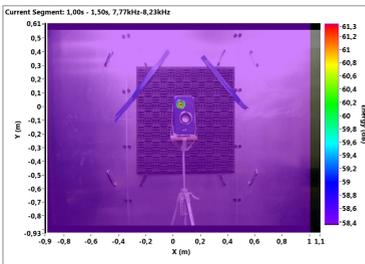
(b) 1 kHz.



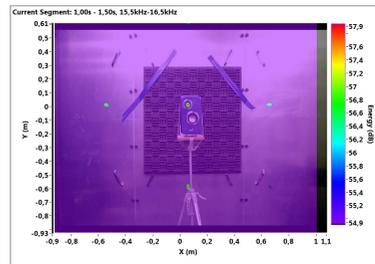
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



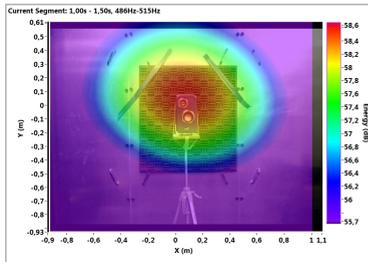
(e) 8 kHz.



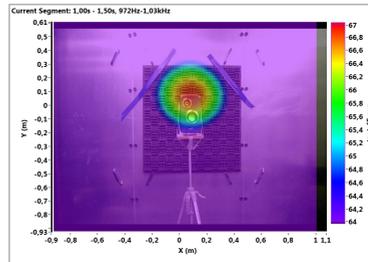
(f) 16 kHz.

Figura B.4: Efeitos da temperatura na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de  $17,5^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa fixa em 50,0 %.

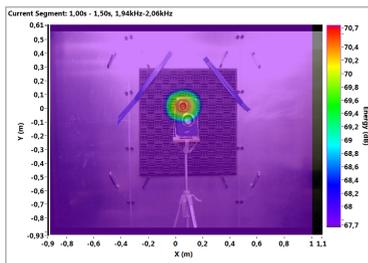
B.1.5 Temperatura no valor de  $22,5^{\circ}\text{C}$



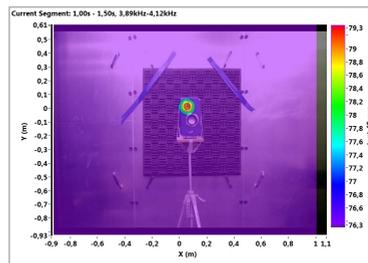
(a) 500 Hz.



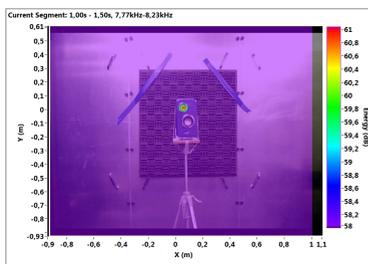
(b) 1 kHz.



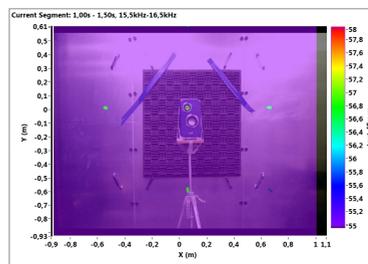
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



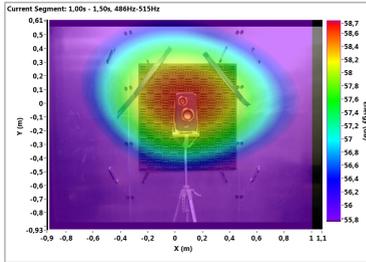
(e) 8 kHz.



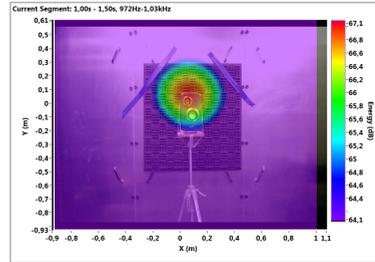
(f) 16 kHz.

Figura B.5: Efeitos da temperatura na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do array e centralizada. Temperatura de  $22,5^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa fixa em 50,0 %.

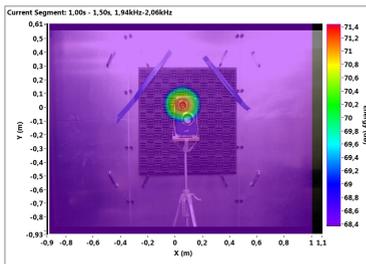
B.1.6 Temperatura no valor de  $25,0^{\circ}\text{C}$



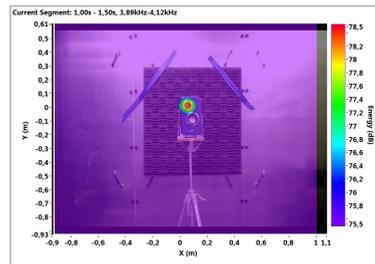
(a) 500 Hz.



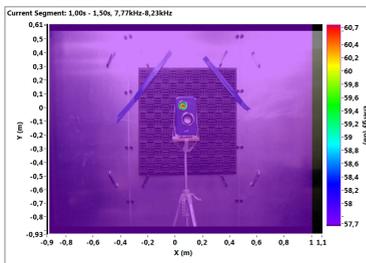
(b) 1 kHz.



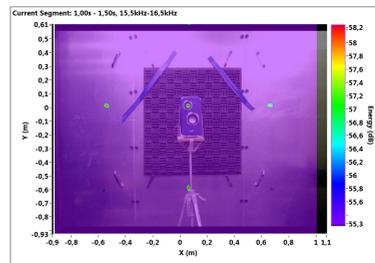
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



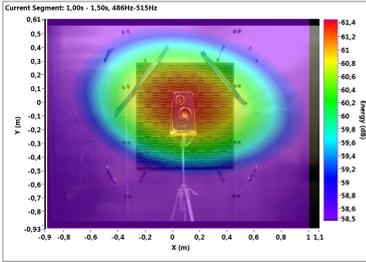
(e) 8 kHz.



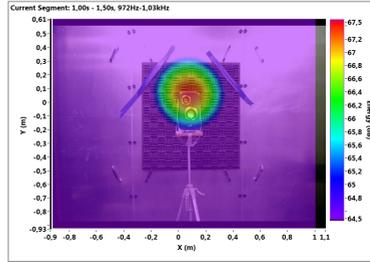
(f) 16 kHz.

Figura B.6: Efeitos da temperatura na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de  $25,0^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa fixa em 50,0 %.

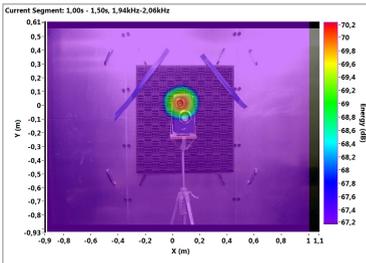
B.1.7 Temperatura no valor de  $27,5^{\circ}\text{C}$



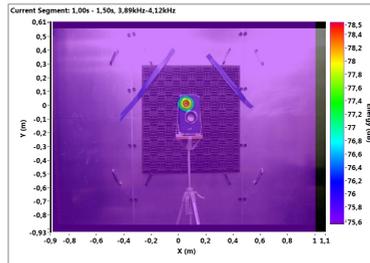
(a) 500 Hz.



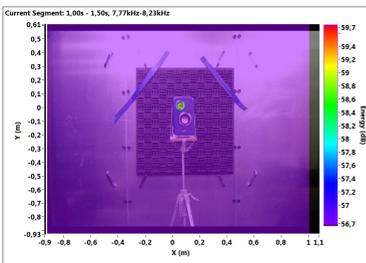
(b) 1 kHz.



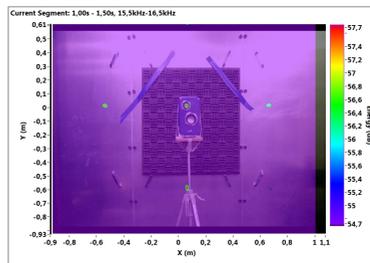
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



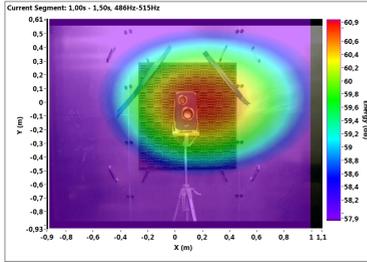
(e) 8 kHz.



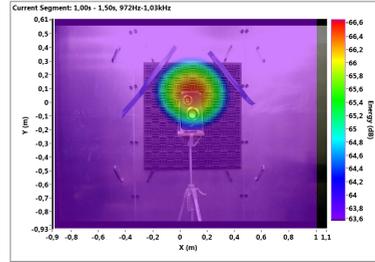
(f) 16 kHz.

Figura B.7: Efeitos da temperatura na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de  $27,5^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa fixa em 50,0 %.

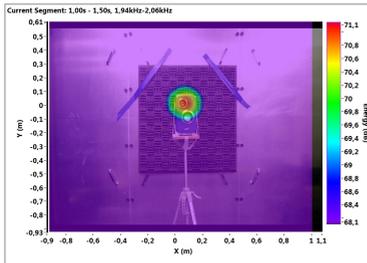
B.1.8 Temperatura no valor de  $30,0^{\circ}\text{C}$



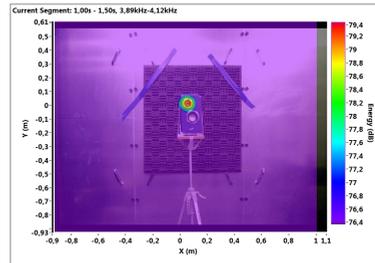
(a) 500 Hz.



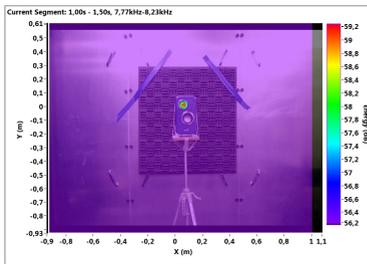
(b) 1 kHz.



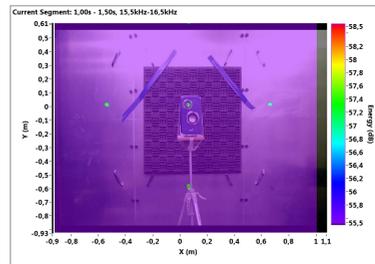
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura B.8: Efeitos da temperatura na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Temperatura de  $30,0^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa fixa em 50,0 %.

### B.1.9 Mapas de beamforming em uma dimensão para a comparação de temperaturas

As Figuras B.9, B.10, B.11, B.12, B.13 e B.14 mostram as respostas de *beamforming* em uma dimensão para cada temperatura de avaliação em determinada frequência.

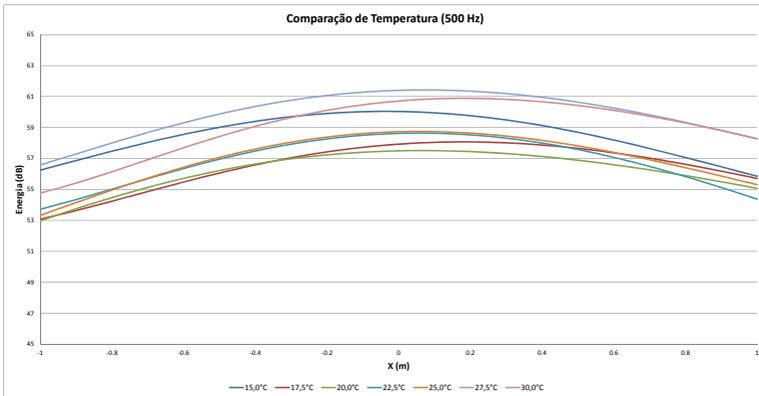


Figura B.9: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 500 Hz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

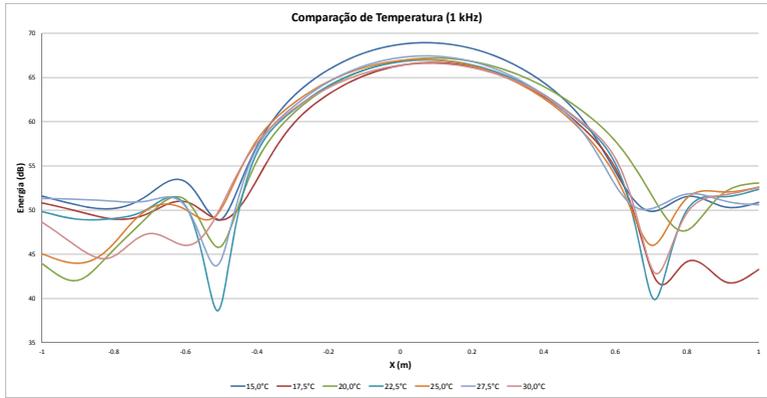


Figura B.10: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 1 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

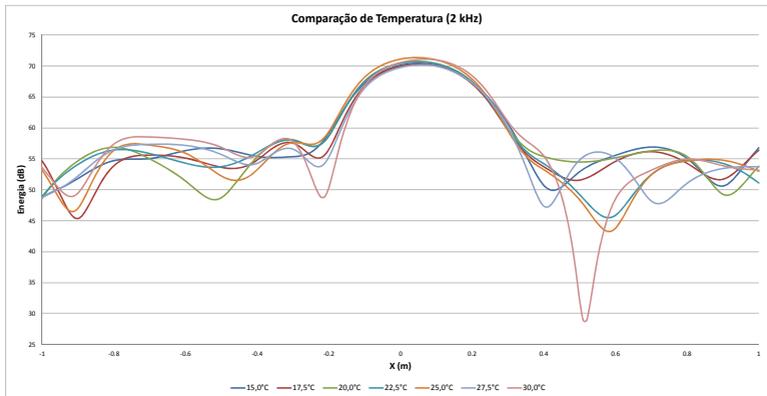


Figura B.11: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 2 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

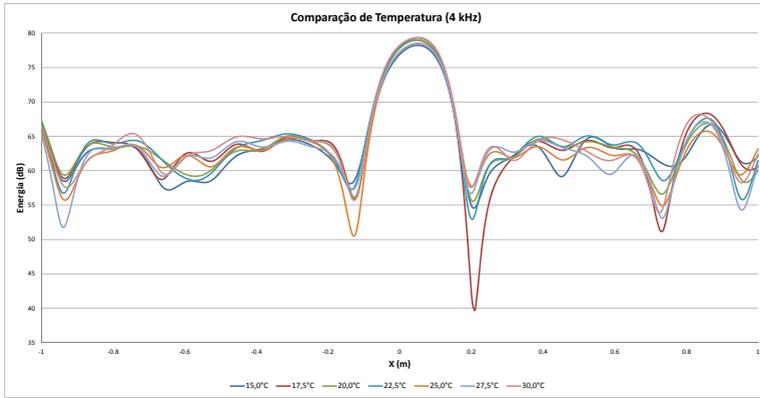


Figura B.12: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 4 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

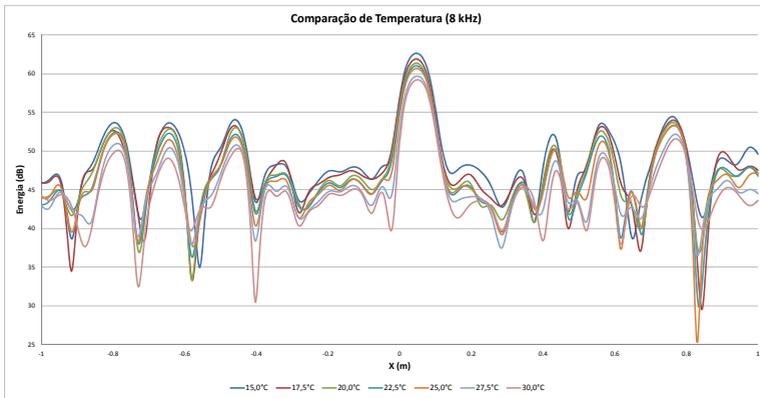


Figura B.13: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 8 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

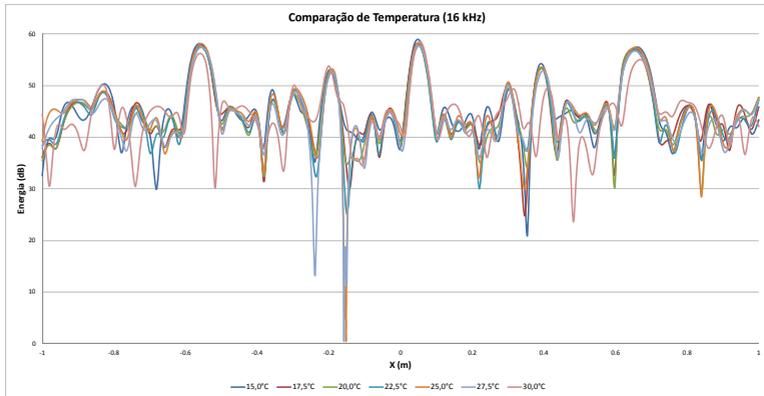


Figura B.14: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de temperaturas. Frequência de 16 kHz. Umidade relativa fixa em 50,0 %.

Nota-se que existe uma diferença pequena entre as mais baixas e as mais altas temperaturas. Nas frequências de 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz apresenta praticamente o mesmo nível de energia, já a frequência de 8 kHz apresenta níveis maiores de energia para as baixas temperaturas.

#### **B.1.10 Faixa dinâmica - Variação de temperatura**

A avaliação da faixa dinâmica em relação a frequência pode ser observada na Figura B.15. Nada se pode concluir ao variar a temperatura em relação a faixa dinâmica.

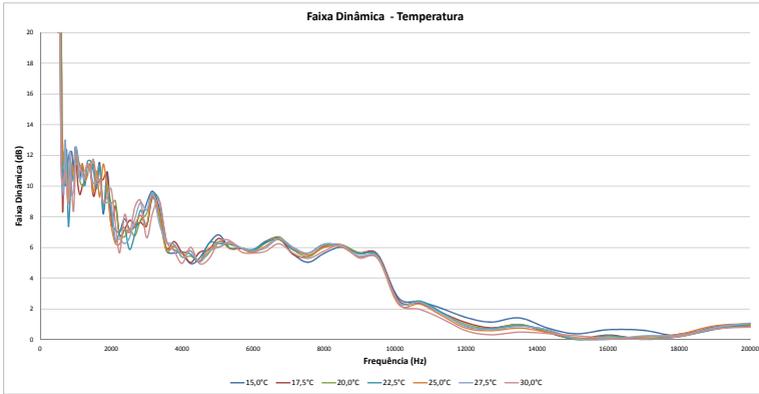


Figura B.15: Efeitos da temperatura na faixa dinâmica x frequência, com a umidade relativa fixa em 50,0 %.

### ***B.1.11 Máximo pico de energia - Variação de temperatura***

A avaliação do máximo pico de energia em relação a frequência pode ser observada na Figura B.16. Nota-se que o máximo pico de energia é maior para as temperaturas mais baixas.

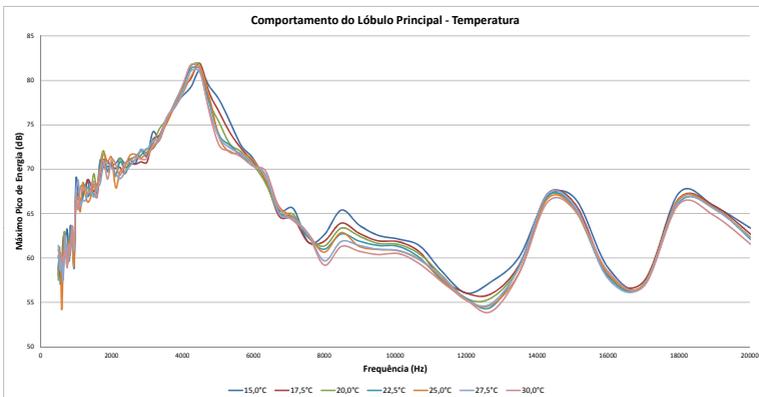


Figura B.16: Efeitos da temperatura no máximo pico de energia x frequência, com a umidade relativa fixa em 50,0 %.

**B.1.12 Largura de lóbulo - Variação de temperatura**

A avaliação da largura de lóbulo ao variar a temperatura em relação a frequência pode ser observada na Figura B.17. Nota-se que a largura de lóbulo praticamente não varia com a mudança de temperatura.

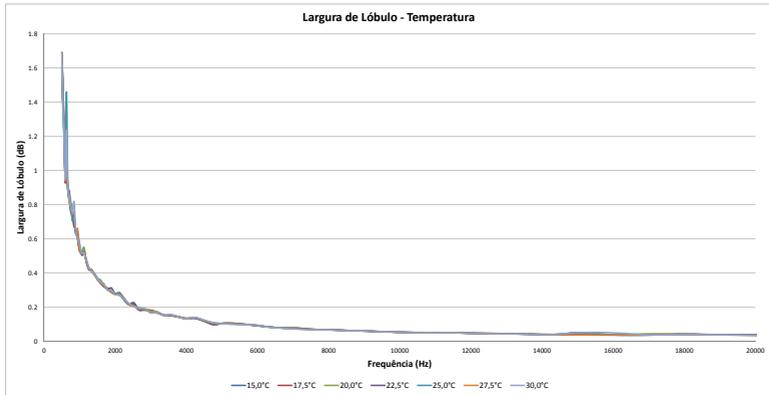
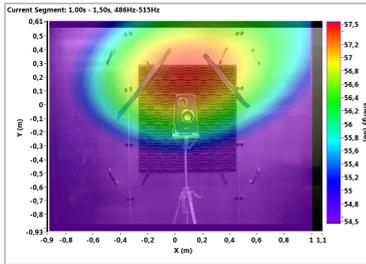


Figura B.17: Efeitos da temperatura na largura de lóbulo x frequência, com a umidade relativa fixa em 50,0 %.

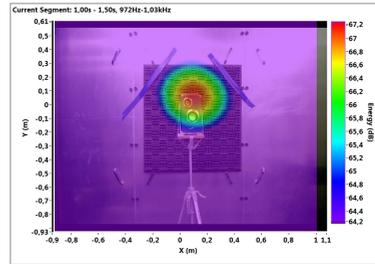
## **B.2 Efeitos da umidade relativa**

Nesta seção será variada a umidade relativa no interior da câmara (50,0 % até 80,0 %, para isto, a temperatura permanecerá constante em 20,0°C. Foram plotadas as medições de *beamforming* para as frequências de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz e 16 kHz. As medições podem ser observadas nas Figuras [B.18](#), [B.19](#), [B.20](#), [B.21](#), [B.22](#), [B.23](#) e [B.24](#).

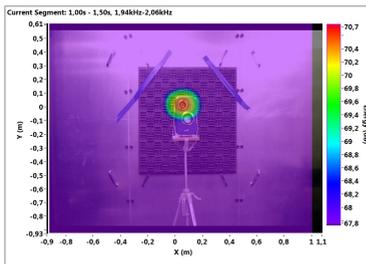
B.2.1 Umidade relativa no valor de 50,0%



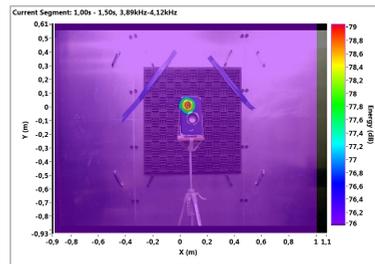
(a) 500 Hz.



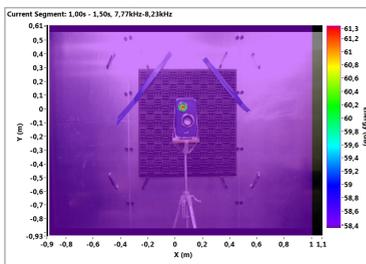
(b) 1 kHz.



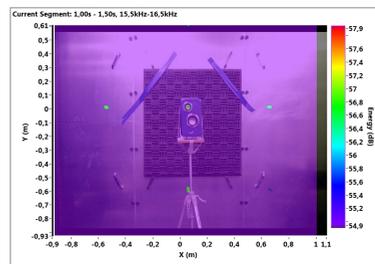
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



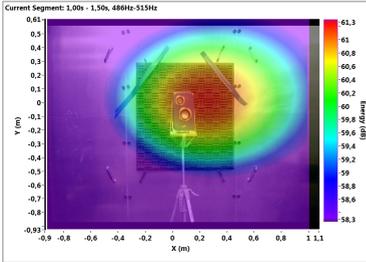
(e) 8 kHz.



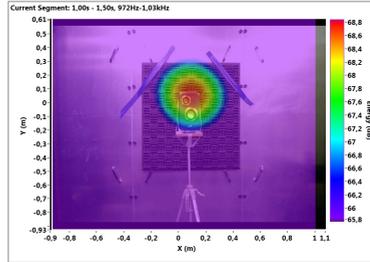
(f) 16 kHz.

Figura B.18: Efeitos da umidade relativa na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Umidade relativa de 50,0% e temperatura fixa em 20,0°C.

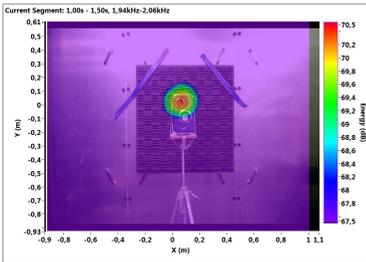
B.2.2 Umidade relativa no valor de 55,0%



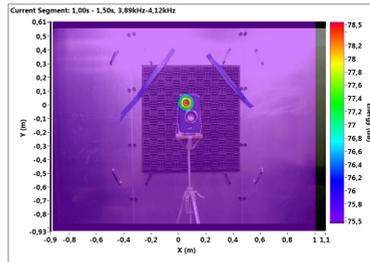
(a) 500 Hz.



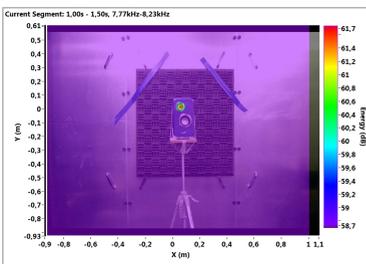
(b) 1 kHz.



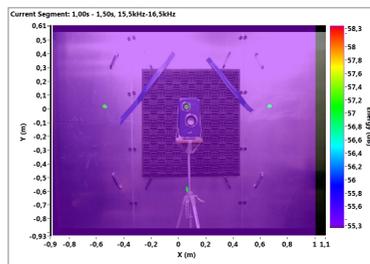
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



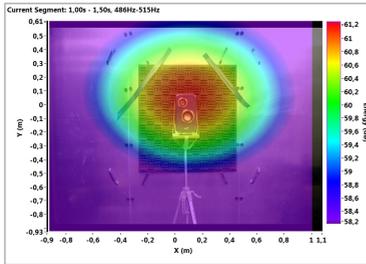
(e) 8 kHz.



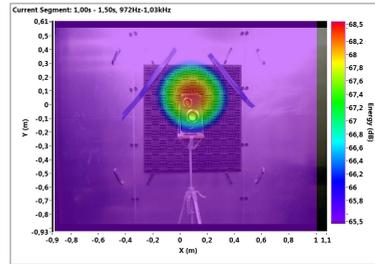
(f) 16 kHz.

Figura B.19: Efeitos da umidade relativa na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Umidade relativa de 55,0 % e temperatura fixa em 20,0°C.

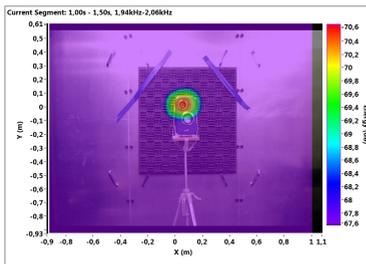
B.2.3 Umidade relativa no valor de 60,0%



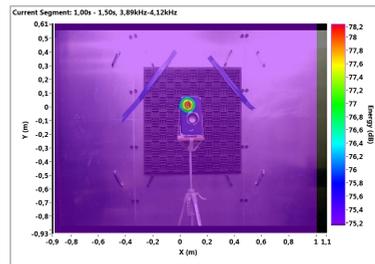
(a) 500 Hz.



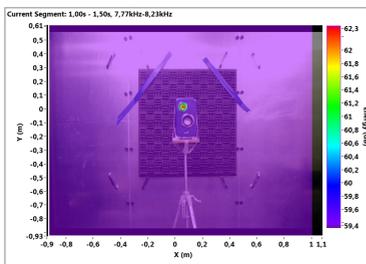
(b) 1 kHz.



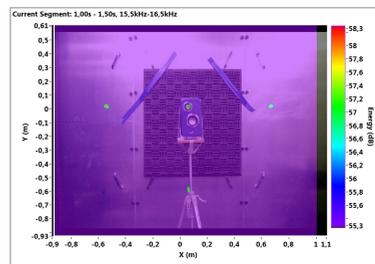
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



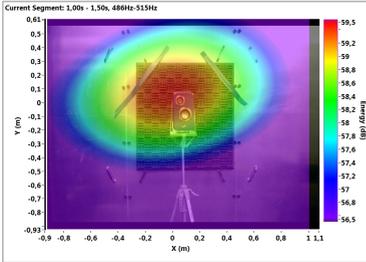
(e) 8 kHz.



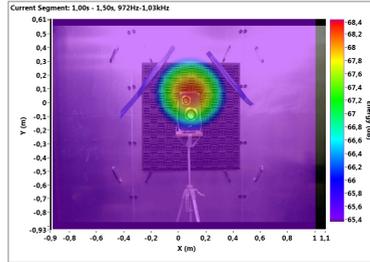
(f) 16 kHz.

Figura B.20: Efeitos da umidade relativa na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Umidade relativa de 60,0% e temperatura fixa em 20,0°C.

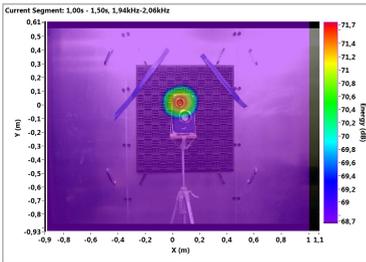
B.2.4 Umidade relativa no valor de 65,0%



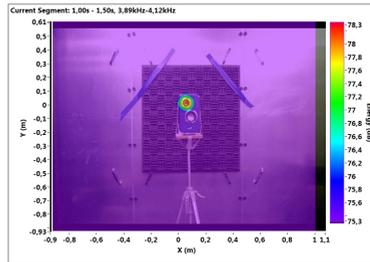
(a) 500 Hz.



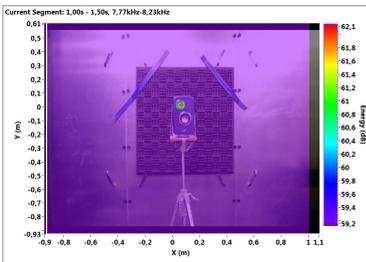
(b) 1 kHz.



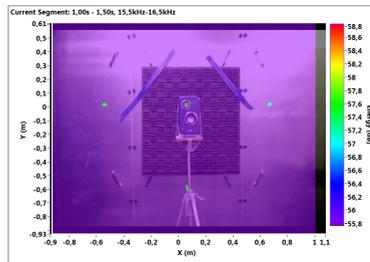
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



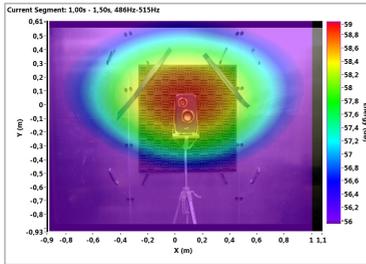
(e) 8 kHz.



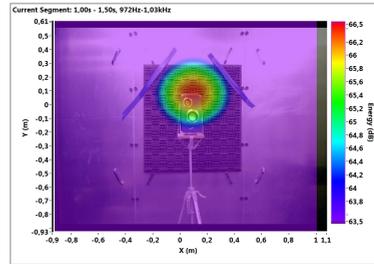
(f) 16 kHz.

Figura B.21: Efeitos da umidade relativa na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Umidade relativa de 65,0 % e temperatura fixa em 20,0°C.

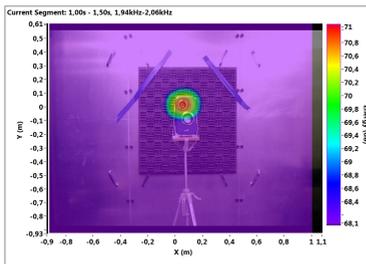
## B.2.5 Umidade relativa no valor de 70,0%



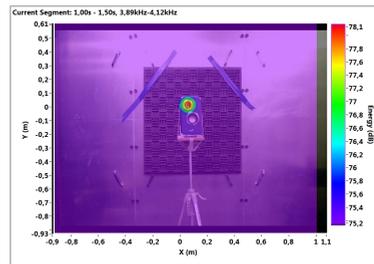
(a) 500 Hz.



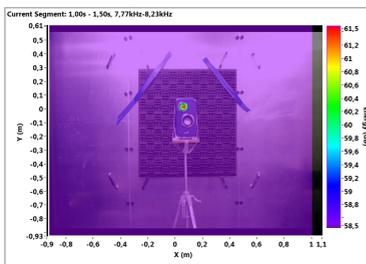
(b) 1 kHz.



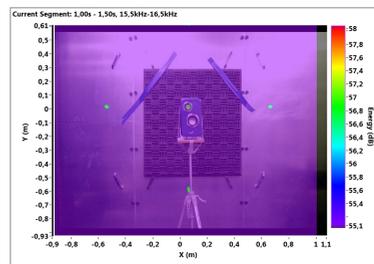
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



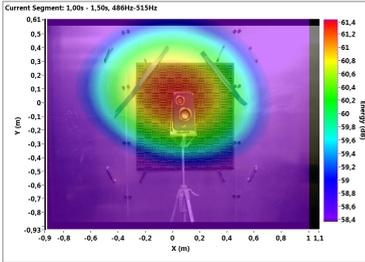
(e) 8 kHz.



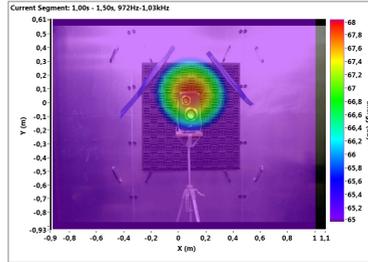
(f) 16 kHz.

Figura B.22: Efeitos da umidade relativa na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Umidade relativa de 70,0% e temperatura fixa em 20,0°C.

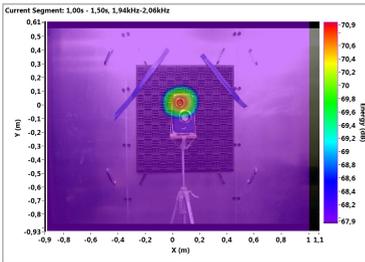
B.2.6 Umidade relativa no valor de 75,0%



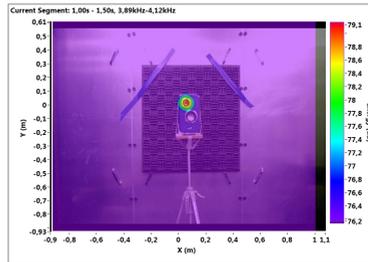
(a) 500 Hz.



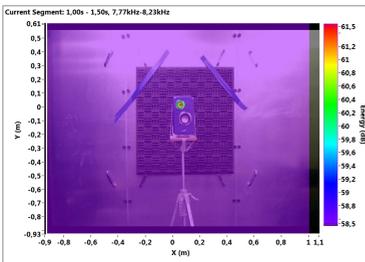
(b) 1 kHz.



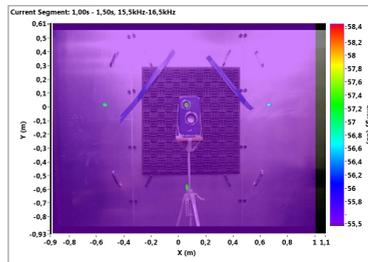
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



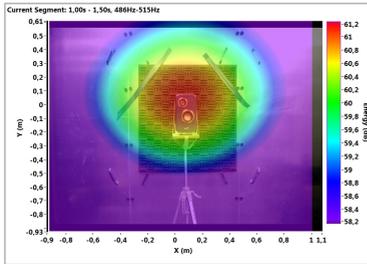
(e) 8 kHz.



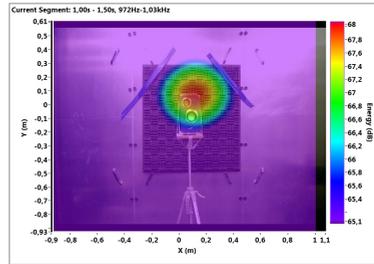
(f) 16 kHz.

Figura B.23: Efeitos da umidade relativa na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Umidade relativa de 75,0% e temperatura fixa em 20,0°C.

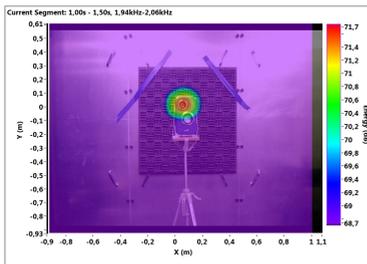
B.2.7 Umidade relativa no valor de 80,0 %



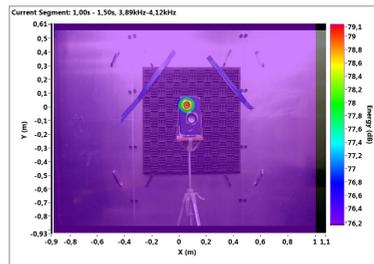
(a) 500 Hz.



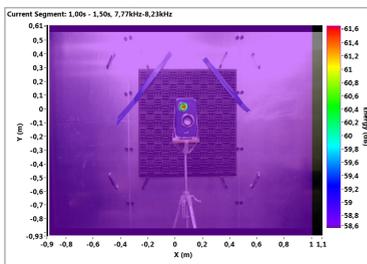
(b) 1 kHz.



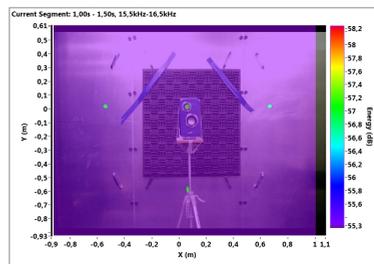
(c) 2 kHz.



(d) 4 kHz.



(e) 8 kHz.



(f) 16 kHz.

Figura B.24: Efeitos da umidade relativa na medição de *beamforming*. Fonte: ruído branco, posicionada a 1,4 m de altura, 2,0 m de distância do *array* e centralizada. Umidade relativa de 80,0 % e temperatura fixa em 20,0°C.

### B.2.8 Mapas de beamforming em uma dimensão para a comparação de umidades relativas

As Figuras B.25, B.26, B.27, B.28, B.29 e B.30 mostram as respostas de *beamforming* em uma dimensão para cada umidade relativa de avaliação em determinada frequência.

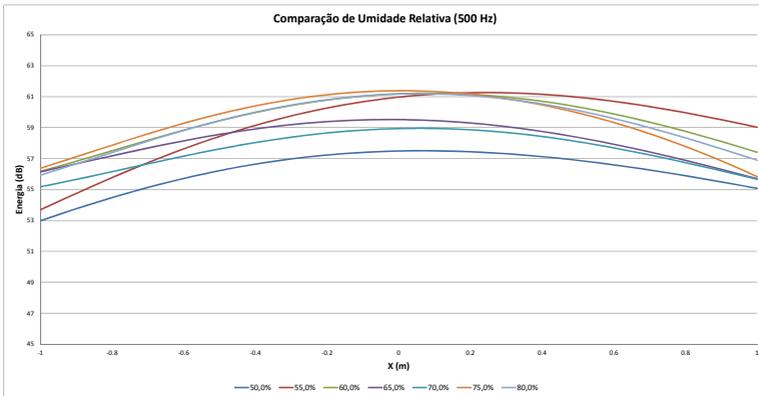


Figura B.25: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 500 Hz. Temperatura fixa em 20,0°C.

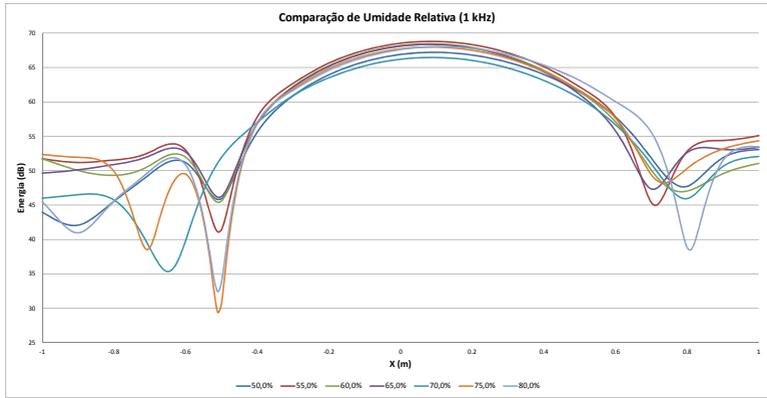


Figura B.26: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 1 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C.

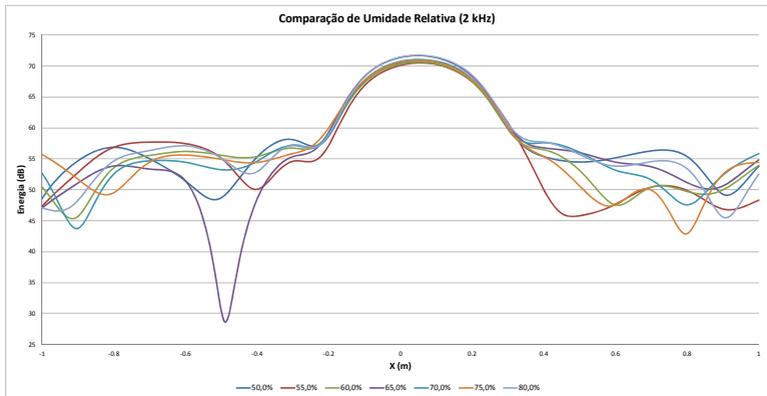


Figura B.27: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 2 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C.

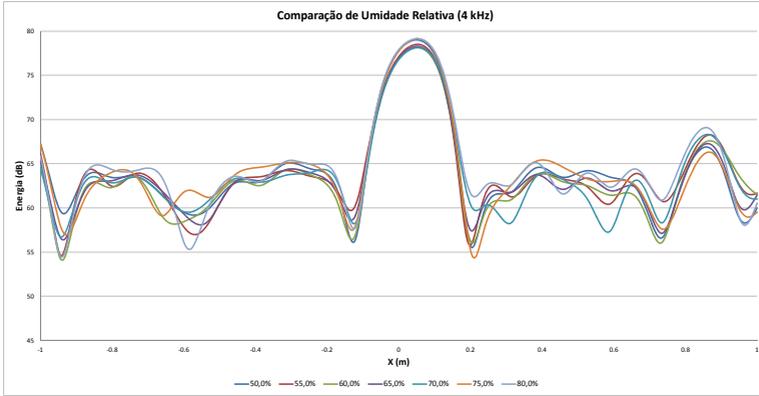


Figura B.28: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 4 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C.

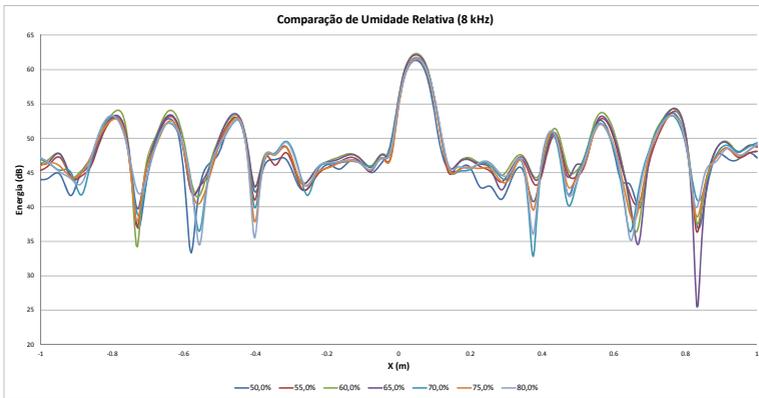


Figura B.29: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 8 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C.

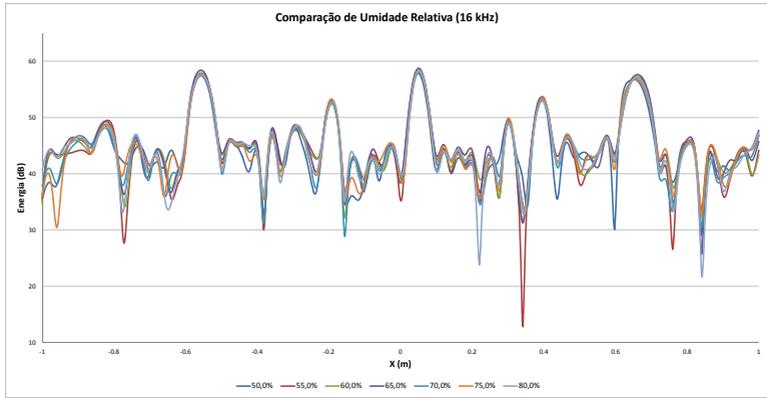


Figura B.30: Mapa de *beamforming* observado em uma dimensão, na linha central de Energia (dB), ao aplicar ruído branco. Comparação de umidades relativas. Frequência de 16 kHz. Temperatura fixa em 20,0°C.

### Faixa dinâmica - Variação de umidade relativa

A avaliação da faixa dinâmica em relação a frequência pode ser observada na Figura B.31. Ao variar a umidade relativa em relação a faixa dinâmica, nota-se que praticamente não existe variação entre as mais altas e as mais baixas umidades relativas.

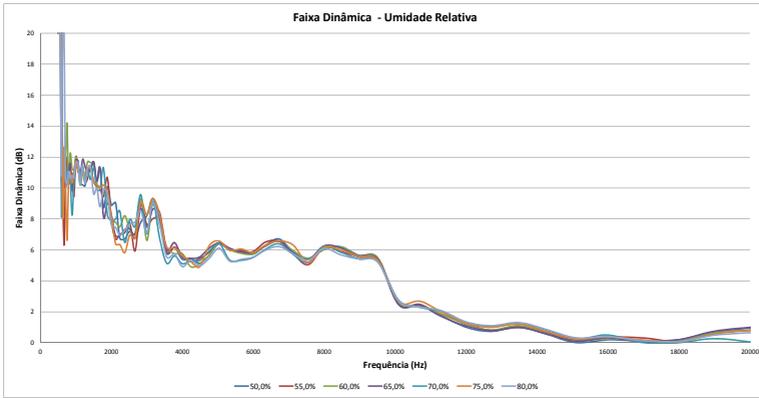


Figura B.31: Efeitos da umidade relativa na faixa dinâmica x frequência. Temperatura fixa em 20,0°C.

### **Máximo pico de energia - Variação de umidade relativa**

A avaliação do máximo pico de energia em relação a frequência pode ser observada na Figura B.32. Ao variar a umidade relativa em relação ao máximo pico de energia, nota-se que praticamente não existe variação entre as mais altas e as mais baixas umidades relativas.

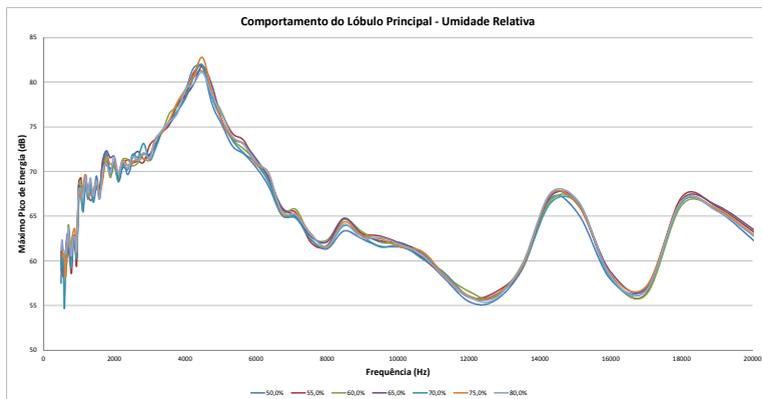


Figura B.32: Efeitos da umidade relativa no máximo pico de energia x frequência. Temperatura fixa em 20,0°C.

### B.2.9 Largura de lóbulo - Variação de umidade relativa

A avaliação da largura de lóbulo ao variar a umidade relativa em relação a frequência pode ser observada na Figura B.33. Nota-se que a largura de lóbulo praticamente não varia com a mudança de umidade relativa.

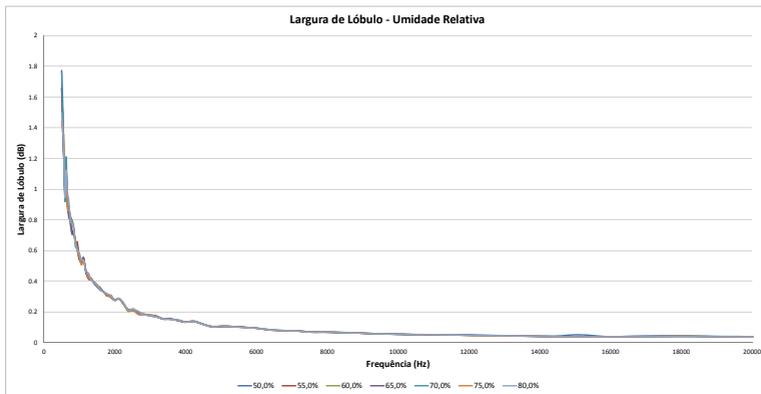


Figura B.33: Efeitos da umidade relativa na largura de lóbulo x frequência, com a temperatura fixa em 20,0°C.

## APÊNDICE C – DEFINIÇÃO DE NOVA GEOMETRIA DE *ARRAY*

Para este trabalho foi construído um novo *array* com as seguintes características:

- Dimensão maior;
- Barras de sustentação dos microfones com maior rigidez para evitar a flexão;
- Maior precisão na fabricação das peças de encaixe dos microfones.

Conforme estudado em [42], será utilizada a geometria em formato espiral. Este tipo de geometria foi escolhido pois apresenta um posicionamento quase randômico dos microfones, porém ainda tem-se um controle sobre o posicionamento dos mesmos.

Para este estudo, foi criado um programa que simula e compara as faixas dinâmicas de diversas geometrias. Foram simuladas diversas formas de *array* com geometria espiral, variando a distância entre barras, a angulação entre microfones, o formato do centro da geometria e o giro do *array* em torno do próprio eixo.

O principal parâmetro a ser observado é a faixa dinâmica, ou seja, a diferença entre o lóbulo principal e os lóbulos laterais. As frequências abaixo de 10 kHz foram priorizadas pois abrangem a maioria das aplicações de *beamforming*. Abaixo pode ser observado o estudo passo a passo da definição da nova geometria em formato espiral que foi utilizada neste trabalho.

### C.1 Passo 1 - Definição do grid de raio

O novo *array* pode ser construído com até 1,5 m de diâmetro devido ao tamanho das barras de sustentação. O distanciamento entre barras é limitado devido ao encaixe das barras horizontais com as barras verticais, que no caso deste trabalho a distância mínima é de 2,5 cm. Como a peça de suporte do microfone possui altura de 4,5 cm, fez-se a variação de encaixe entre barras verticais de 5,0 cm, 7,5 cm e 10,0 cm.

Após a avaliação das melhores respostas obteve-se as duas melhores, Figura C.1, sendo a geometria com distância entre barras de 7,5 cm com raio de 0,6 m a melhor, Figura C.2.

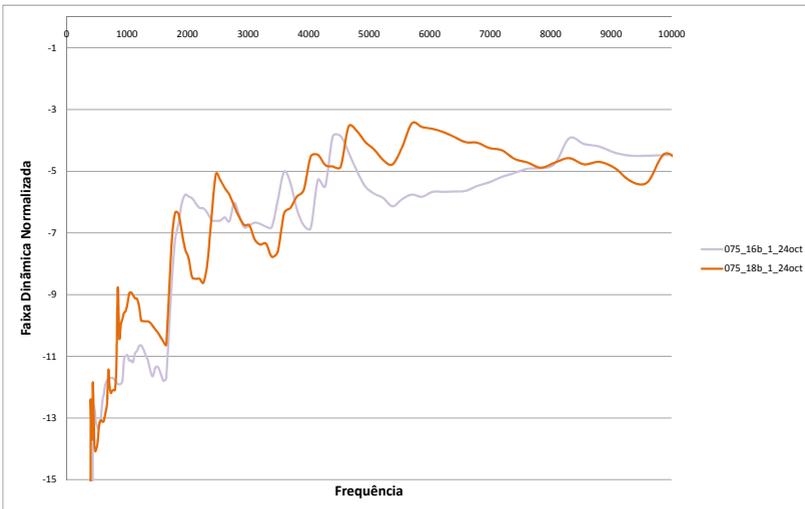


Figura C.1: Simulação de faixa dinâmica. Passo 1 - Definição do grid de raio.

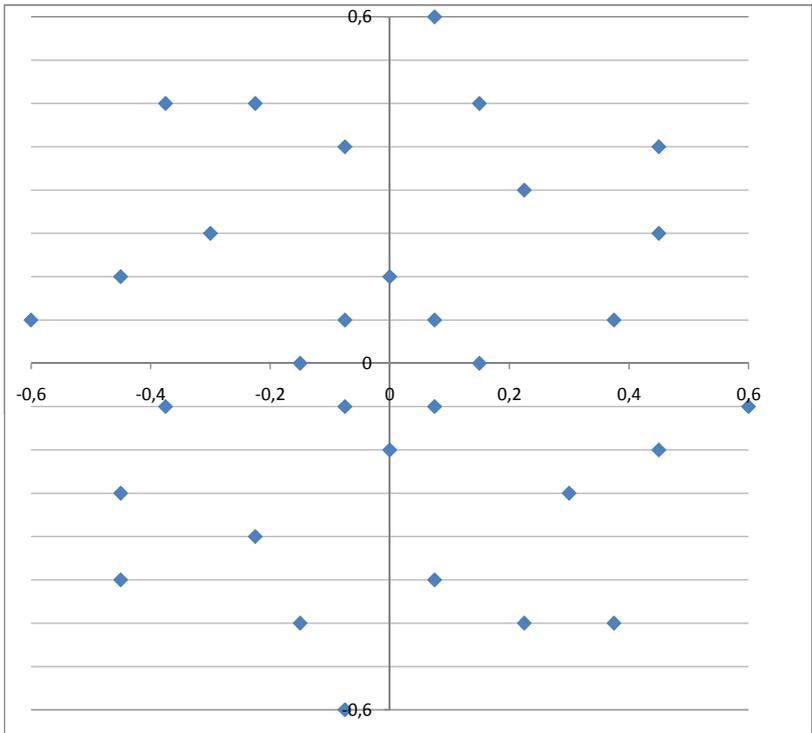
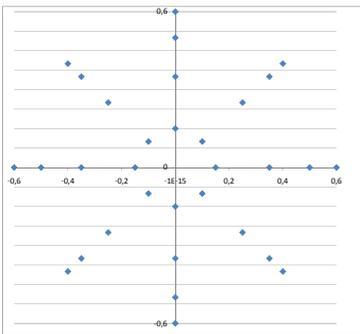


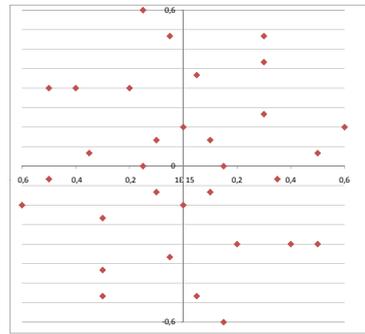
Figura C.2: Melhor geometria do passo 1 - Definição do grid de raio.

## C.2 Passo 2 - Definição da angulação entre os microfones

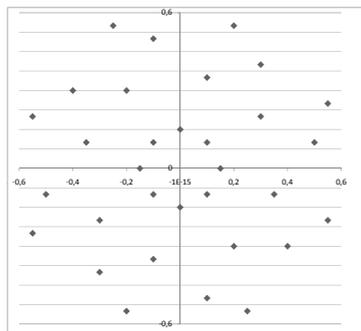
Com o espaçamento entre barras já definido, o próximo passo é a definição da angulação entre os microfones externos. Conforme vai se aumentando o parâmetro, o ângulo entre os microfones dos “braços externos” aumenta. Para explicar melhor este parâmetro será utilizada a Figura C.3. Nota-se que ao aumentar esta angulação aumenta-se a aleatoriedade e também o preenchimento dos “espaços vazios”.



(a) Angulação de 0 rad.



(b) Angulação de 1 rad.



(c) Angulação de 2 rad.

Figura C.3: Angulação entre os microfones externos.

Após diversas simulações, chegou-se em duas melhores angulações, Figura C.4, foi escolhida a geometria com angulação de 4,5 rad, Figura C.5.

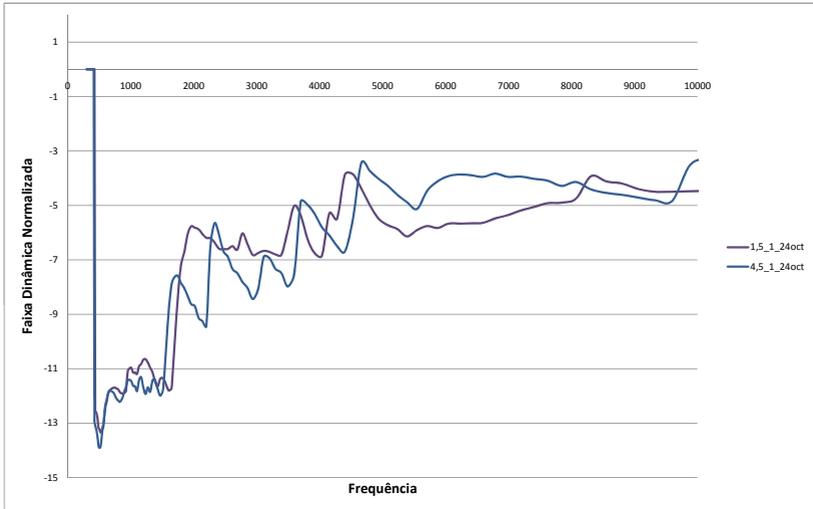


Figura C.4: Simulação de faixa dinâmica. Passo 2 - Definição da angulação entre os microfones.

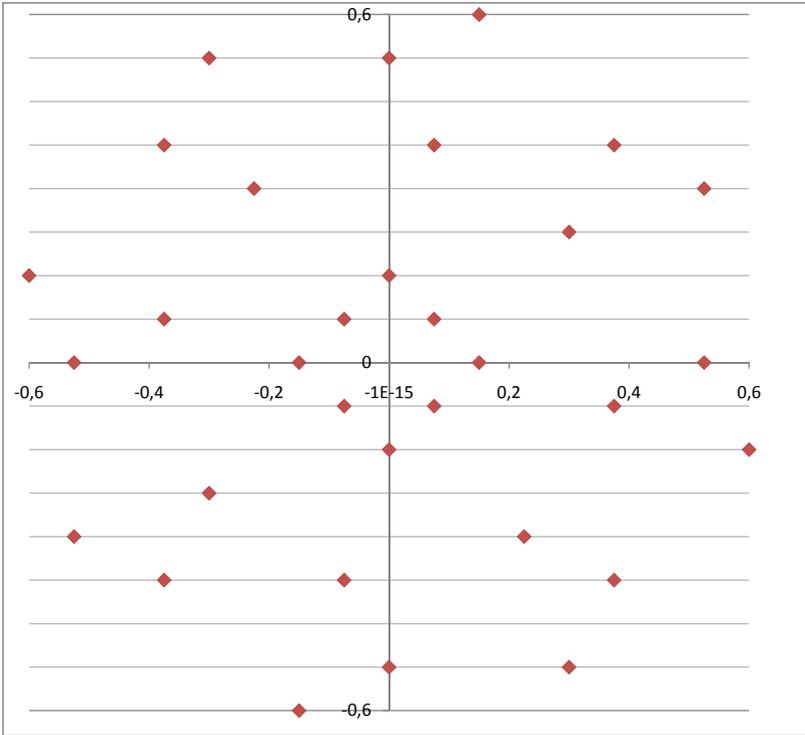


Figura C.5: Melhor geometria do passo 2 - Definição da angulação entre os microfones.

### C.3 Passo 3 - Evitando redundâncias

Neste passo, tentou-se evitar redundâncias principalmente no centro do *array* passando de uma geometria com o centro em losango para um centro circular. Ao fazer essa mudança de centro, o programa faz uma pequena alteração nos microfones externos. Nota-se que a resposta melhorou consideravelmente, especialmente ao retirar os valores de pico das frequências de 1,6 kHz, 2,2 kHz, 3,6 kHz e 4,6 kHz, Figuras C.6 e C.7.

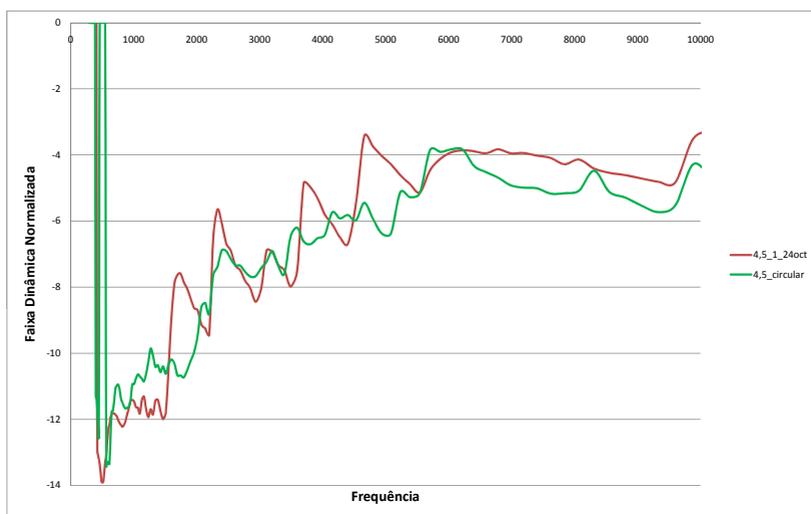


Figura C.6: Simulação de faixa dinâmica. Passo 3 - Evitando redundâncias.

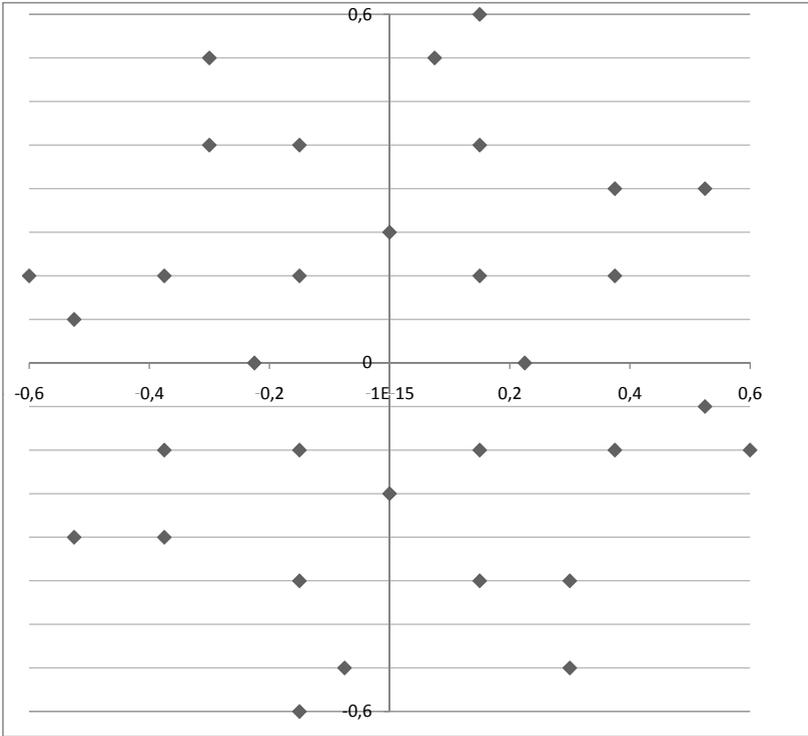


Figura C.7: Melhor geometria do passo 3 - Evitando redundâncias.

#### C.4 Rotação do array em torno do seu próprio eixo

O último passo é o de rotacionar a geometria em torno do seu próprio eixo para observar se existe diferença entre as respostas.

As duas melhores respostas são as com ângulo de giro no valor de  $-21^\circ$  e  $0^\circ$  (o melhor do último passo), Figura C.8.

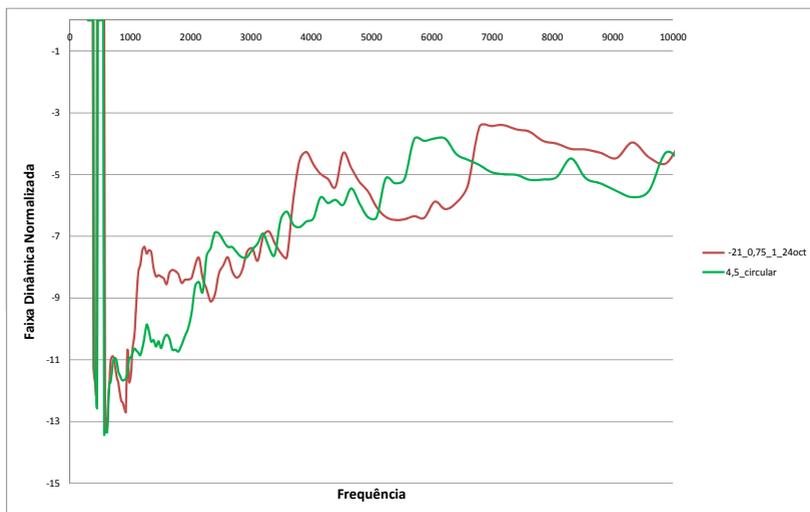


Figura C.8: Simulação de faixa dinâmica. Passo 4 - Rotação do array em torno do seu próprio eixo.

Após a última análise pode-se concluir que o melhor array de diâmetro de 1,5 m, é o que possui espaçamento de 7,5 cm entre barras, 4,5 rad de angulação entre os microfones, centro circular e ângulo de giro em torno do próprio eixo de  $0^\circ$ .

Geralmente este ângulo de giro melhora a resposta do array, neste caso não melhorou, porém foi uma casualidade. Portanto, a nova geometria que será utilizada neste trabalho é a da Figura C.9, Tabela C.1.

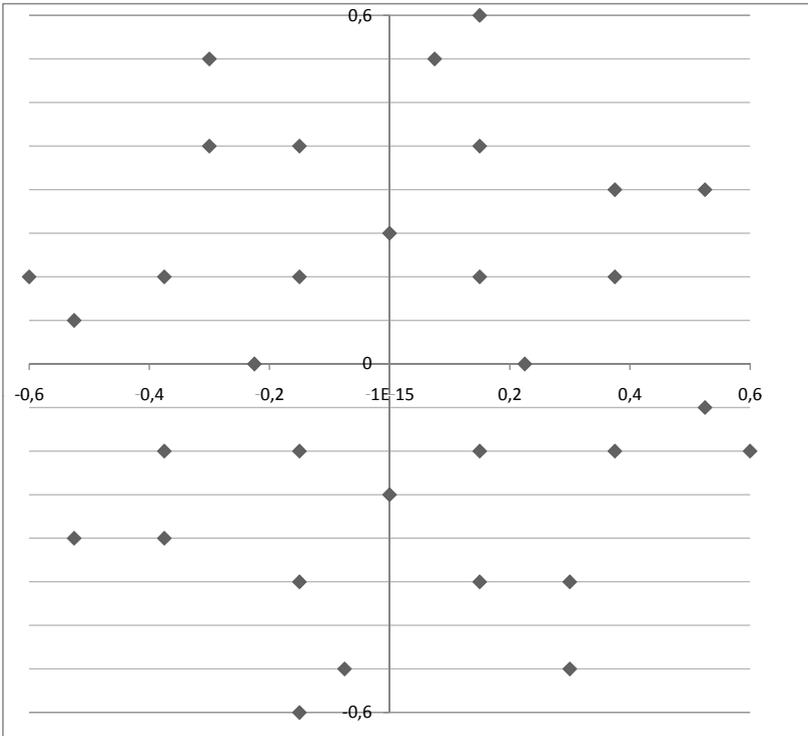


Figura C.9: Melhor geometria simulada.

Tabela C.1: Posição dos microfones do novo *array* em formato espiral simulado.

Microfones	Eixo x (m)	Eixo y (m)
1	0,225	0,000
2	0,150	0,150
3	0,000	0,225
4	-0,150	0,150
5	-0,225	0,000
6	-0,150	-0,150
7	0,000	-0,225
8	0,150	-0,150
9	-0,375	0,150
10	-0,375	-0,150
11	-0,150	-0,375
12	0,150	-0,375
13	0,375	-0,150
14	0,375	0,150
15	0,150	0,375
16	-0,150	0,375
17	-0,375	-0,300
18	-0,075	0,375
19	0,300	-0,375
20	0,525	-0,075
21	0,375	0,300
22	0,075	0,525
23	-0,300	0,375
24	-0,525	0,075
25	-0,150	-0,600
26	0,300	-0,525
27	0,600	-0,150
28	0,525	0,300
29	0,150	0,600
30	-0,300	0,525
31	-0,600	0,150
32	-0,525	-0,300



## APÊNDICE D – ABSORÇÃO ATMOSFÉRICA

### D.1 Método da Norma SAE

A norma *SAE*<sup>1</sup> ARP 866A [47] utiliza valores computados para cada um terço de banda de oitava de 50 Hz a 10 kHz para determinar a absorção atmosférica. O método da norma SAE considera apenas os efeitos da temperatura e umidade relativa do ar, ao contrário de novos métodos de avaliação que também levam em conta os efeitos da pressão atmosférica ambiente.

Duas normas publicadas recentemente, a *ANSI*<sup>2</sup> S1.26 - “Metodologia para Cálculo da absorção do som pela atmosfera” [46], e a *ISO*<sup>3</sup> 9613-1 - “Acústica - Atenuação do som durante a propagação ao ar livre - Parte 1: Cálculo da absorção do som pela atmosfera” [48], apresentam a teoria fundamentada e experimentalmente validada para o cálculo da absorção atmosférica. Elas são algebricamente iguais e especificam o equacionamento em função da temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica.

Da mesma forma, o método SAE é uma tentativa empírica de adaptar as equações para uso em uma análise de banda de oitava. Especificamente, ele afirma que para as frequências de um terço de oitava abaixo da banda igual ou inferior a 4 kHz, as taxas de atenuação do som deve ser calculado com a frequência nominal média da banda, e para frequências acima deste valor, deve ser utilizado o limite inferior da banda de frequência.

$$\alpha = \left( \frac{f_0}{1000} \right)^{2,05} * 10^{(-1,916984+1,1394*10^{-3}*T)} + f_0 * \eta(\delta) * 10^{(-2,755624+8,42994*10^{-3}*T)}, \quad (D.1)$$

onde  $\alpha$  é a absorção atmosférica (dB/m),  $f_0$  é a frequência central da banda [Hz],  $T$  é a temperatura [°C] e  $\eta(\delta)$  é obtido através de:

$$\eta(\delta) = \begin{cases} = 0,013 + 0,60168 * \delta + 3,7901 * \delta^2 \\ -5,2366 * \delta^3 + 1,8396 * \delta^4 & \text{para } \delta \leq 1,1 \\ = e^{(0,8*(0,8-\delta))} + 0,2 & \text{para } \delta > 1,1 \end{cases}$$

<sup>1</sup>SAE - Society of Automotive Engineers Aerospace

<sup>2</sup>ANSI - American National Standard

<sup>3</sup>ISO - International Standard

onde  $\delta$  é obtido através de:

$$\delta = h_{rel} * \sqrt{\frac{1010}{f_0}} * 10^{(-1,328924+3,179768*10^{-2}*T-2,173716*10^{-4}*T^2+1,7496*10^{-6}*T^3)} \quad (D.2)$$

A norma SAE [47] é uma norma mais antiga, atualmente é mais utilizada a norma ANSI [46]. Uma comparação entre a norma SAE e a norma ANSI pode ser melhor explicado observando a Tabela D.1 e os resultados comparativos na Figura D.1, utilizando os dados meteorológicos da cidade de Florianópolis.

	SAE ARP 866A	ANSI S1.26
método	empírico	analítico
pressão atmosférica ambiente	independente	dependente
banda de frequência	1/3 de oitava	estreita
frequência	50 Hz a 10 kHz	ultrassom

Tabela D.1: Absorção Atmosférica Norma SAE x ISO.

## D.2 Método da Norma ANSI

### D.2.1 Formulação

A energia da onda sonora é continuamente reduzida em certos processos dissipativos durante a sua propagação. Conforme a onda viaja através do ar, uma parte da energia sonora é convertida em calor. Este processo é chamado de atenuação ou absorção. A absorção se torna significativa nas altas frequências [44, 45].

Para uma onda plana, a pressão  $P$  a uma distância  $x$  de uma posição onde a pressão local é  $P_a$  é dada por:

$$P(x, t) = P_a e^{-\frac{\alpha x}{2}} e^{i(\omega t - kx)}. \quad (D.3)$$

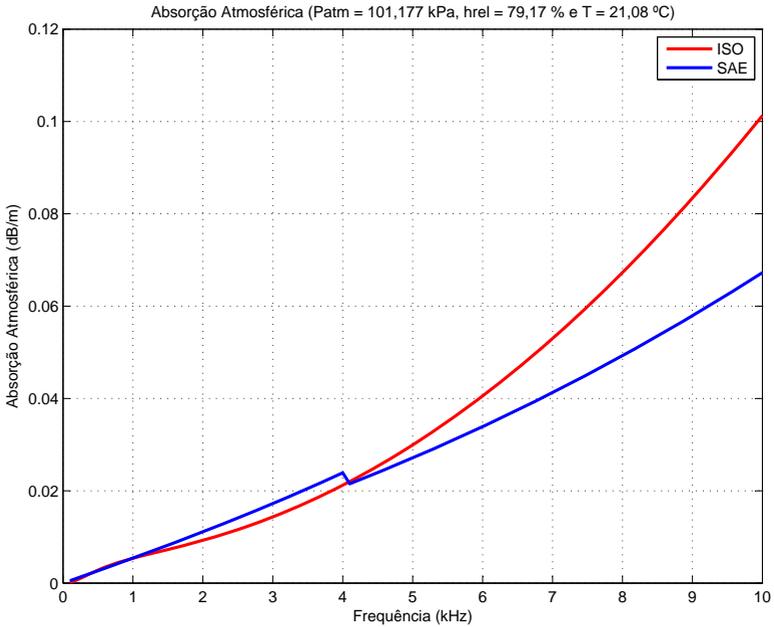


Figura D.1: Absorção Atmosférica Norma SAE x ISO.

O coeficiente de absorção atmosférica ( $\alpha$ ) possui três termos, o primeiro corresponde ao relaxamento dos processos de viscosidade e condução térmica, o segundo termo corresponde ao relaxamento do oxigênio (índice O) e o terceiro termo corresponde ao relaxamento do nitrogênio (índice N). A atenuação depende da temperatura, pressão, frequência e umidade e pode ser calculado da seguinte forma [46]:

$$\begin{aligned}
 \alpha = & 8,686 * f^2 * \left[ (1,84 * 10^{-11} * \sqrt{T/T_r} * \left(\frac{P_a}{P_r}\right)^{-1} \right) \right. \\
 & + \left( 0,01275 * (T/T_r)^{(-5/2)} * \left[ e^{-2239,1/T} \right] * \left( \frac{f_{rO}}{f_{rO}^2 + f^2} \right) \right) \\
 & \left. + \left( 0,1068 * (T/T_r)^{(-5/2)} * \left[ e^{-3352/T} \right] * \left( \frac{f_{rN}}{f_{rN}^2 + f^2} \right) \right) \right], \quad (D.4)
 \end{aligned}$$

onde  $f$  é a frequência,  $P_a$  é a pressão atmosférica local,  $P_r = 101,325$  kPa é a pressão atmosférica de referência,  $T_r = 293,15$  K (20,0°C) é a temperatura de referência e  $T$  é a temperatura local.

As frequências de relaxação  $f_{r,N}$  e  $f_{r,O}$  são associadas com a vibração das moléculas de nitrogênio e oxigênio, respectivamente:

$$f_{r,N} = \left( \frac{P_a}{P_r} \right) * \sqrt{T_r/T} * \left( 9 + 280 h e^{-4,17 \left[ \frac{T_r}{T} \left( \frac{1}{3} \right) - 1 \right]} \right), \quad (D.5)$$

$$f_{r,O} = \left( \frac{P_a}{P_r} \right) * \left( 24 + 4,04 * 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right). \quad (D.6)$$

A concentração molar de vapor de água dado pela letra  $h$  é um fator importante, que varia muito ao longo do dia, as variações são geralmente maiores no verão. Ela está relacionada à umidade relativa  $h_r$ , dada em porcentagem, pela relação:

$$h = h_r \frac{P_{sat}/P_r}{P_a/P_r} = P_r \left( \frac{h_r}{P_a} \right) \left( \frac{P_{sat}}{P_r} \right). \quad (D.7)$$

A pressão de saturação do vapor é uma função exclusivamente da temperatura. Para obter o valor de  $P_{sat}/P_r$  é usado:

$$\frac{P_{sat}}{P_r} = 10^V, \quad (D.8)$$

onde o expoente  $V$  é dado por:

$$\begin{aligned} V = & 10,79586[1 - T_{01}/T] - 5,02808 * \log(T/T_{01}) \\ & + 1,50474 * 10^{-4} * (1 - 10^{-8,29692[(T/T_{01})-1]}) \\ & + 0,42873 * 10^{-3} * (-1 + 10^{4,76955[1-(T_{01}/T)]) - 2,2195983. \end{aligned} \quad (D.9)$$

Existe também uma maneira simplificada de calcular  $V$ :

$$V = -6,8346(T_{01}/T)^{1,261} + 4,6151, \quad (D.10)$$

onde  $T$  é a temperatura absoluta dada em Kelvins,  $T_r=293,15$  K (20,0°C) é o valor de referência. O termo  $T_{01}= 273,15$  K, que corresponde ao ponto triplo

da água, Figura D.2.

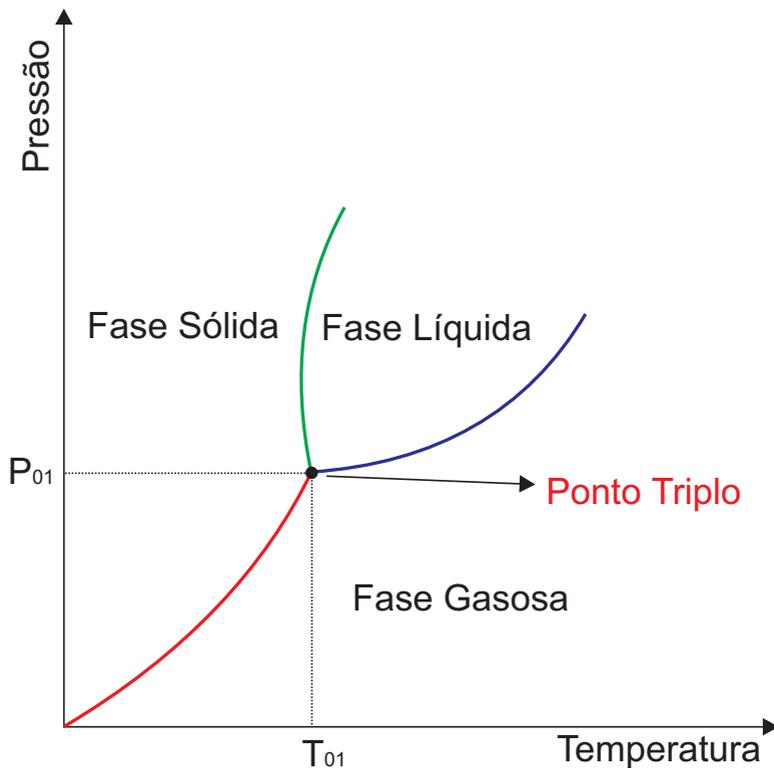


Figura D.2: Ponto triplo da água.

Para os cálculos deste trabalho foi utilizada a forma geral de V, Equação D.9, embora a forma simplificada, Equação D.10, cause um erro pequeno.

### D.2.2 Exatidão dos Resultados

#### Exatidão de $\pm 5\%$

A exatidão utilizando a norma é  $\pm 5\%$  quando a temperatura e a pressão atmosférica local são respectivamente 293,15 K (20,0°C) e 101,325 kPa; a concentração molar de vapor de água ( $h$ ) varia de 0,2% a 2%; e a frequência

do som varia entre 2 kHz e 15 kHz.

### **Exatidão de $\pm 10 \%$**

A exatidão utilizando a norma é  $\pm 10 \%$  quando a temperatura local varia de 253,15 K a 323,15 K (-20,0°C a 50,0°C); a concentração molar de vapor de água ( $h$ ) varia de 0,05 % a 5 %; e a pressão atmosférica local possui valores abaixo de 200 kPa.

Geralmente esta é a exatidão para a maioria dos problemas.

### **Exatidão de $\pm 20 \%$**

A exatidão utilizando a norma é  $\pm 20 \%$  quando a temperatura local varia de 253,15 K a 323,15 K (-20,0°C a 50,0°C); a concentração molar de vapor de água ( $h$ ) varia de 0,005 % a 0,05 %, ou maior que 5 %; e a pressão atmosférica local possui valores abaixo de 200 kPa.

### **Exatidão de $\pm 50 \%$**

A exatidão utilizando a norma é  $\pm 50 \%$  quando a temperatura local é maior que 200 K; a concentração molar de vapor de água ( $h$ ) é menor que 0,005 %; e a pressão atmosférica local possui valores abaixo de 200 kPa.

### ***D.2.3 Estudo de Caso para a Cidade de Florianópolis***

Nesta seção será feito um estudo de caso para a cidade de Florianópolis. Os dados foram coletados na estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina no ano de 2010. A estação possui precisão de umidade relativa de 3 % e de temperatura de 0,5°C, Figura [D.3](#).



Figura D.3: Estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina. Estação utilizada para coletar dados para o estudo de caso.

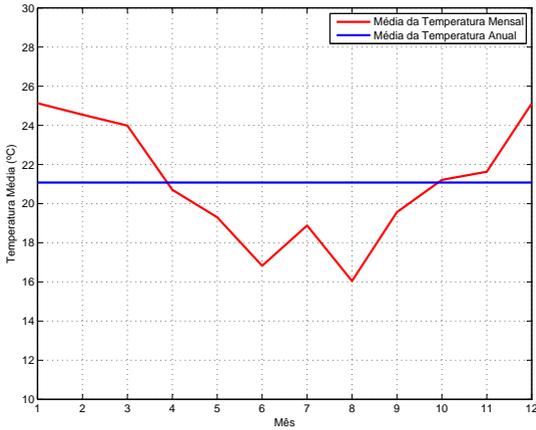


Figura D.4: Dados obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis (dados de temperatura).

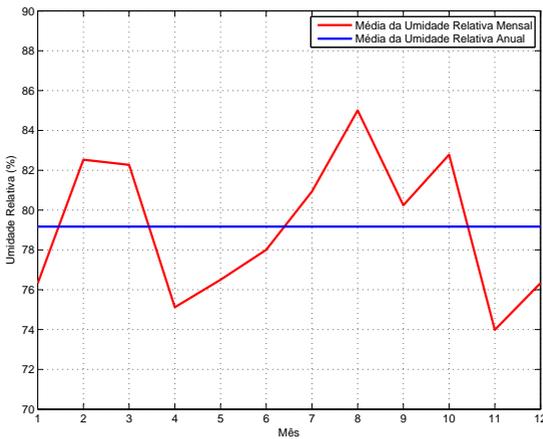


Figura D.5: Dados obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis (dados de umidade relativa).

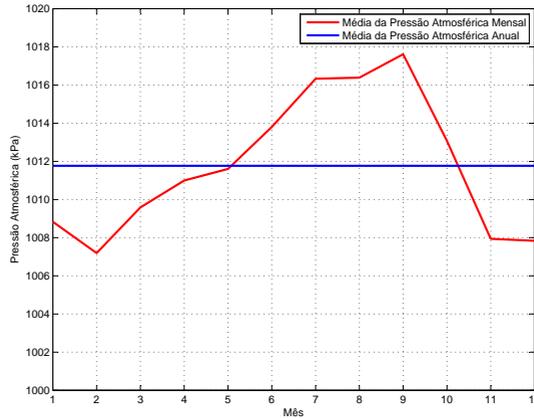


Figura D.6: Dados obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina para o estudo de caso para a cidade de Florianópolis (dados de pressão atmosférica).

A média dos dados foram os seguintes:

Temperatura Média	21,08°C
Umidade Relativa	79,17 %
Pressão Atmosférica	101,18 kPa

Tabela D.2: Média dos dados obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Catarina da cidade de Florianópolis.

Utilizando os dados meteorológicos médios da cidade de Florianópolis, pode-se calcular a absorção atmosférica em função da frequência, Figura D.7, Tabela D.3.

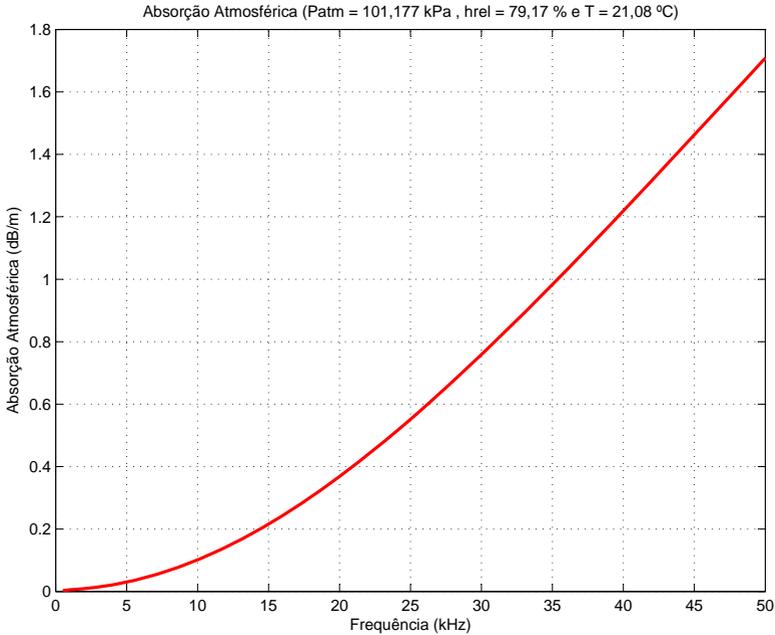


Figura D.7: Gráfico de absorção atmosférica  $\times$  frequência do estudo de caso da cidade de Florianópolis.

Tabela D.3: Tabela de absorção atmosférica  $\alpha$  x frequência do estudo de caso da cidade de Florianópolis.

f (kHz)	$\alpha$ (dB/m)
1	0,005388
2	0,009275
3	0,014382
4	0,021286
5	0,030069
6	0,040737
7	0,053276
8	0,067662
9	0,083866
10	0,101853
11	0,121587
12	0,143026
13	0,166126
14	0,190840
15	0,217121
16	0,244916
17	0,274174
18	0,304839
19	0,336857
20	0,370171
25	0,554179
30	0,762051
35	0,987107
40	1,223544
45	1,466663
50	1,712912

Fixando a frequência, pode-se notar o comportamento da absorção atmosférica em função da umidade relativa em relação à temperatura, Figura D.8.

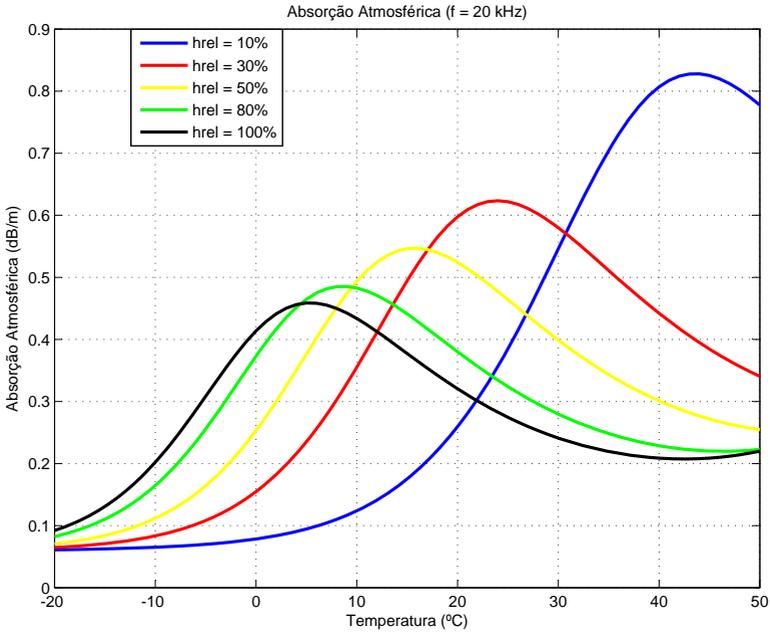


Figura D.8: Gráfico de absorção atmosférica  $\times$  temperatura para a frequência de 20 kHz do estudo de caso da cidade de Florianópolis.

Fixando a frequência, pode-se notar o comportamento da absorção atmosférica em função da temperatura em relação à umidade relativa, Figura D.9.

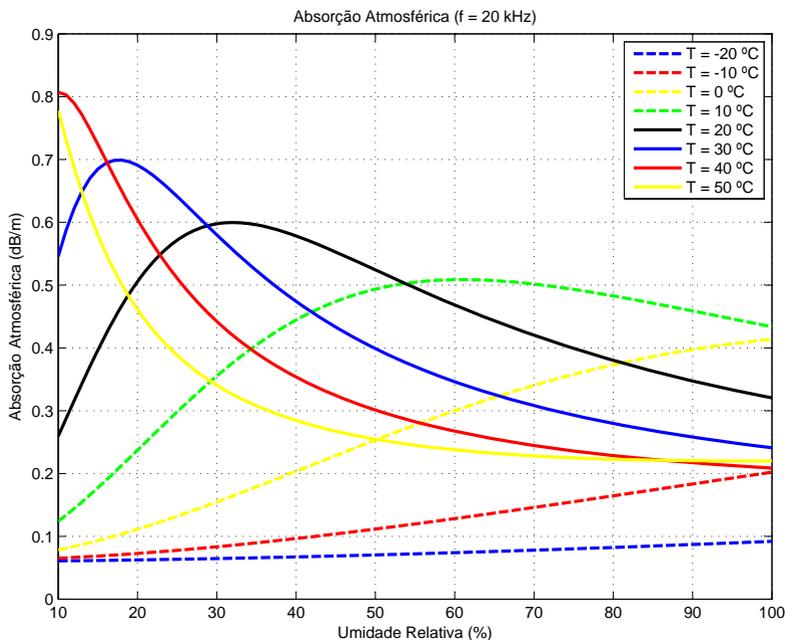


Figura D.9: Gráfico de absorção atmosférica  $\times$  umidade relativa para a frequência de 20 kHz do estudo de caso da cidade de Florianópolis.

Variando a frequência, pode-se notar o comportamento da absorção atmosférica em função da temperatura, Figura D.10.

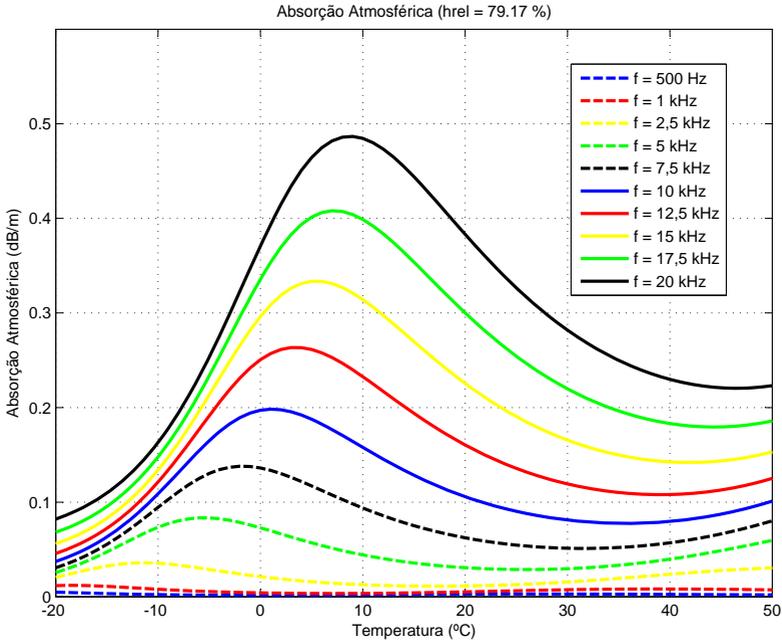


Figura D.10: Gráfico de absorção atmosférica  $\times$  temperatura para diversas frequências do estudo de caso da cidade de Florianópolis.

Comportamento da absorção atmosférica em função da temperatura para frequências mais altas, Figura D.11.

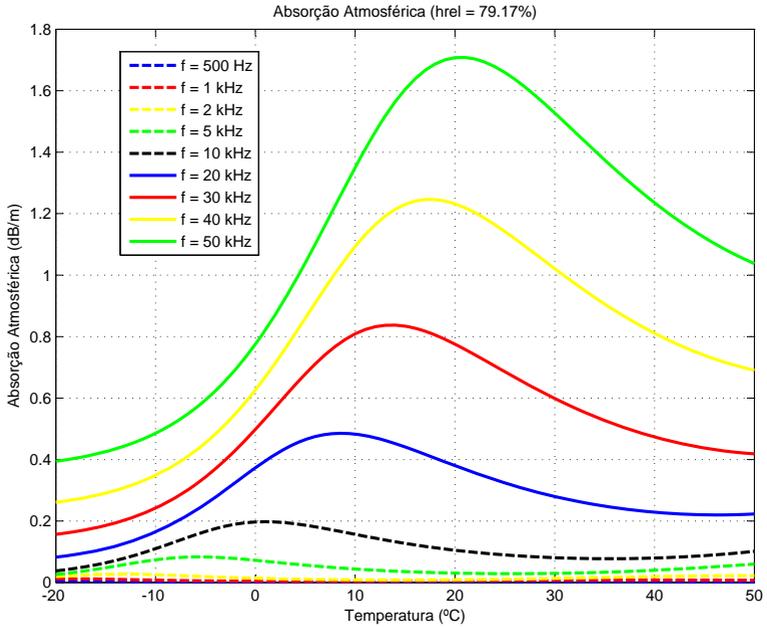


Figura D.11: Gráfico de absorção atmosférica  $\times$  temperatura para diversas frequências do estudo de caso da cidade de Florianópolis.

Variando a frequência, pode-se notar o comportamento da absorção atmosférica em função da umidade relativa, Figura D.12.

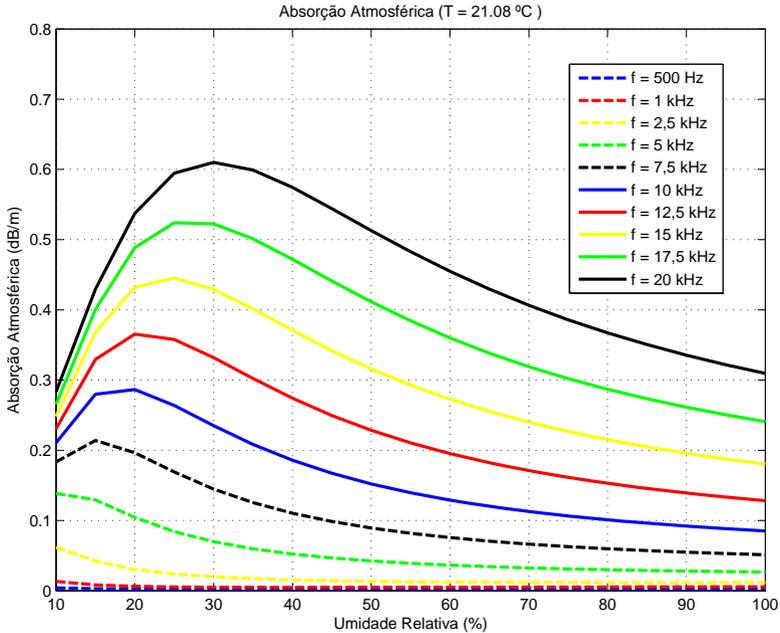


Figura D.12: Gráfico de absorção atmosférica  $\times$  umidade relativa para diversas frequências do estudo de caso da cidade de Florianópolis.

Comportamento da absorção atmosférica em função da umidade relativa para frequências mais altas, Figura D.13.

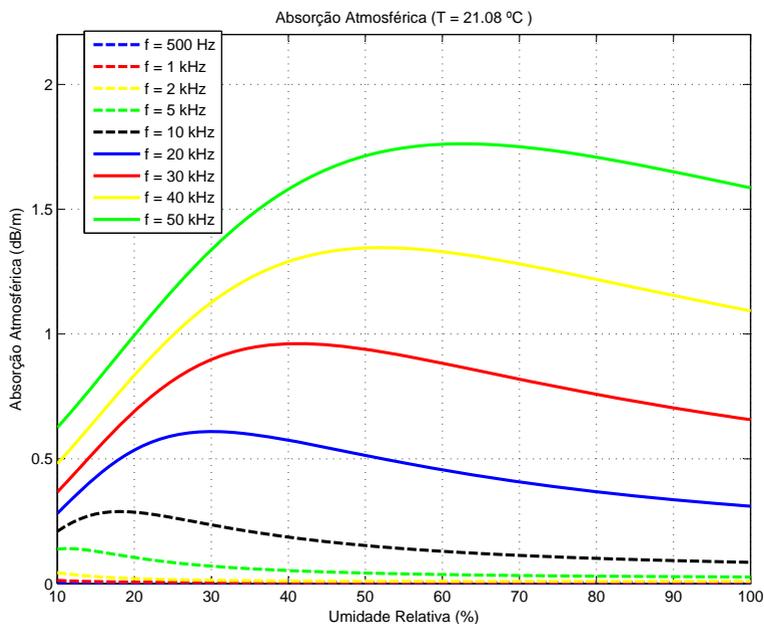


Figura D.13: Gráfico de absorção atmosférica  $\times$  umidade relativa para diversas frequências do estudo de caso da cidade de Florianópolis.

### D.3 Método de BLACKSTOCK

**\*\* Um contato com o professor D.T. Blackstock, Professor da Universidade de Austin (Texas) nos Estados Unidos, no qual ele revelou que as diferenças apresentadas nesta seção são descendentes de erros de digitação de seu livro Fundamentos de Física Acústica [49].**

Utilizando o método apresentado no livro de Blackstock [49]:

A formulação é semelhante ao da norma ANSI, divergindo em alguns índices de Pressão e Temperatura:  $P_{s0} = 101,325$  kPa é a pressão de referência;  $P_s$  é a pressão atmosférica local;  $T_0 = 293,15$ K (20,0°C) é a temperatura de referência; e  $T$  é a temperatura local.

A atenuação  $\alpha$  depende da temperatura, umidade, pressão e frequência. Neste método, o autor procurou juntar os coeficientes para cada relaxamento.

Assim, essa relação pode ser calculada como segue:

$$\alpha = f^2 * \left[ \frac{B_1 * f_{r,N}}{f^2 + f_{r,N}^2} + \frac{B_2 * f_{r,O}}{f^2 + f_{r,O}^2} + B_3 * \frac{P_s}{P_{s0}} \right] \left[ \frac{\text{nepers}}{m} \right], \quad (D.11)$$

onde  $f$  é a frequência dada em Hz;  $f_{r,N}$  e  $f_{r,O}$  são respectivamente a frequência de relaxação do nitrogênio e oxigênio dado em Hz;  $B_1, B_2$  e  $B_3$  são funções da temperatura.

As expressões das frequências de relaxação são:

$$f_{r,N} = \left( \frac{P_s}{P_{s0}} \right) * \sqrt{T_0/T} * (9 + 280h) e^{-4,17 \left[ \frac{T_0}{T} \left( \frac{1}{3} \right) - 1 \right]}, \quad (D.12)$$

$$f_{r,O} = \left( \frac{P_s}{P_{s0}} \right) * \left( 24 + 4,04 * 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right), \quad (D.13)$$

onde  $T$  é a temperatura absoluta dada em Kelvins,  $T_0 = 293,15$  K (20,0°C) é a temperatura de referência,  $h$  é a umidade absoluta (concentração molar de vapor de água), que é relacionada com  $h_r$  (umidade relativa) dada em % através de:

$$h = h_r \frac{P_{sat}/P_{s0}}{P_s/P_{s0}} = P_{s0} \left( \frac{h_r}{P_s} \right) \left( \frac{P_{sat}}{P_{s0}} \right) [\%], \quad (D.14)$$

Utilizando uma abordagem aproximada (se comparado com a formulação da norma ANSI - D.9) para obter o valor de  $P_{sat}/P_{s0}$ , notou-se que os valores para

a abordagem aproximada são muito próximos dos valores para a expressão completa:

$$\log \left( \frac{P_{sat}}{P_{s0}} \right) = -6,8346 * \left( \frac{T_{01}}{T} \right)^{1,261} + 4,6151, \quad (D.15)$$

onde  $T_{01} = 273,15K$  corresponde ao ponto triplo da temperatura isotérmica.

$B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$  são funções da temperatura e possuem a unidade dada em  $\left[ \frac{Nepers}{(m*Hz)} \right]$ .

$$B_1 = 1,068 \frac{T^{(-\frac{5}{2})}}{T_0} e^{\left( \frac{-3352}{T} \right)}, \quad (D.16)$$

$$B_2 = 0,01275 \frac{T^{(-\frac{5}{2})}}{T_0} e^{\left( \frac{-2239,1}{T} \right)}, \quad (D.17)$$

$$B_3 = 1,84 * 10^{-11} \sqrt{\frac{T}{T_0}} * \left( \frac{P_{s0}}{P_s} \right), \quad (D.18)$$

Substituindo os termos  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$  na Equação D.11:

$$\begin{aligned} \alpha = f^2 * & \left[ (1,84 * 10^{-11} * \sqrt{T/T_0} * \left( \frac{P_s}{P_{s0}} \right)^{-1} * \left( \frac{P_{s0}}{P_s} \right)) \right. \\ & \left( + 0,01275 * (T/T_0)^{(-5/2)} * \left[ e^{-2239,1/T} \right] * \left( \frac{f_{rO}}{f_{rO}^2 + f^2} \right) \right) \\ & \left. \left( + 1,068 * (T/T_0)^{(-5/2)} * \left[ e^{-3352/T} \right] * \left( \frac{f_{rN}}{f_{rN}^2 + f^2} \right) \right) \right] \left[ \frac{nepers}{m} \right]. \quad (D.19) \end{aligned}$$

Transformando a Equação D.19 de Nepers para dB [50]:

$$1Np = 20 * \log(e) = 8,686 [dB]. \quad (D.20)$$

Após as substituições e transformação chega-se na expressão de absorção atmosférica dada por Blackstock [49], nota-se algumas diferenças entre sua formulação e a norma ANSI que são destacadas a seguir:

$$\alpha = 8,686 * f^2 * \left[ (1,84 * 10^{-11} * \sqrt{T/T_0} * \left(\frac{P_{s0}}{P_s}\right) * \left(\frac{P_{s0}}{P_s}\right)) \right. \\ \left. \left( + 0,01275 * (T/T_0)^{(-5/2)} * \left[ e^{-2239.1/T} \right] * \left(\frac{f_{rO}}{f_{rO}^2 + f^2}\right) \right) \right. \\ \left. \left( + 1,068 * (T/T_0)^{(-5/2)} * \left[ e^{-3352/T} \right] * \left(\frac{f_{rN}}{f_{rN}^2 + f^2}\right) \right) \right] \left[ \frac{dB}{m} \right]. \quad (D.21)$$

A formulação da norma ANSI-S1.26-1995 [46] para a absorção atmosférica, dada na Equação D.4 é:

$$\alpha = 8,686 * f^2 * \left[ (1,84 * 10^{-11} * \sqrt{T/T_0} * \left(\frac{P_{s0}}{P_s}\right)) \right. \\ \left. \left( + 0,01275 * (T/T_0)^{(-5/2)} * \left[ e^{-2239.1/T} \right] * \left(\frac{f_{rO}}{f_{rO}^2 + f^2}\right) \right) \right. \\ \left. \left( + 0,1068 * (T/T_0)^{(-5/2)} * \left[ e^{-3352/T} \right] * \left(\frac{f_{rN}}{f_{rN}^2 + f^2}\right) \right) \right] \left[ \frac{dB}{m} \right]. \quad (D.22)$$

Utilizando o exemplo da cidade de Florianópolis, Tabela D.2, para a comparação dos resultados. Foi utilizada para a comparação dos resultados a frequência de 20 kHz.

- ANSI:

$$\alpha = 0,370171 \text{ dB/m.}$$

- Blackstock:

$$\alpha = 0,422227 \text{ dB/m.}$$

É notado uma pequena diferença entre os métodos. Conforme descrito neste trabalho, após contato com o professor D.T. Blackstock, ele confirmou os erros de digitação na sua formulação.

## APÊNDICE E – ULTRASSOM

A utilização da absorção atmosférica é muito importante para a medição de *beamforming* em modelos em escala. Neste tipo de medição, a frequência real é obtida através de um fator de escala aplicado à frequência medida [51, 52]:

$$f_{real} = FE * f_{medida} \quad (E.1)$$

onde  $FE$  é o fator de escala,  $f_{real}$  é a frequência real obtida a partir da  $f_{medida}$ , frequência medida em escala.

Assim, uma frequência muito alta se transforma em uma frequência mais baixa. Por exemplo, para um modelo em escala reduzida de 26 % de um *Boeing 777* instalado no túnel de vento de 12 x 24 m da NASA, a frequência de 30 kHz é  $f_{real} = 0,26 * 30 \text{ kHz} = 7,8 \text{ kHz}$ .



Figura E.1: Escala de 26 % de um *Boeing 777* instalado no túnel de vento da NASA [51].



## APÊNDICE F – ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO ARRAY

Foram desenvolvidas novas peças de sustentação dos microfones com maior precisão. As peças foram desenvolvidas no *software* Solid Works e fabricadas no laboratório USICON (Laboratório de Usinagem e Comando Numérico) da Universidade Federal de Santa Catarina, Figuras F.1, F.2, F.3 e F.4.



Figura F.1: Projeto da construção das peças de encaixe dos microfones.

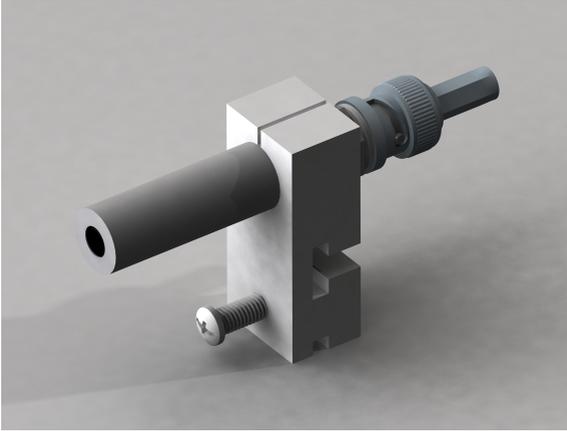


Figura F.2: Microfone no interior da peça de encaixe projetada em *software*.

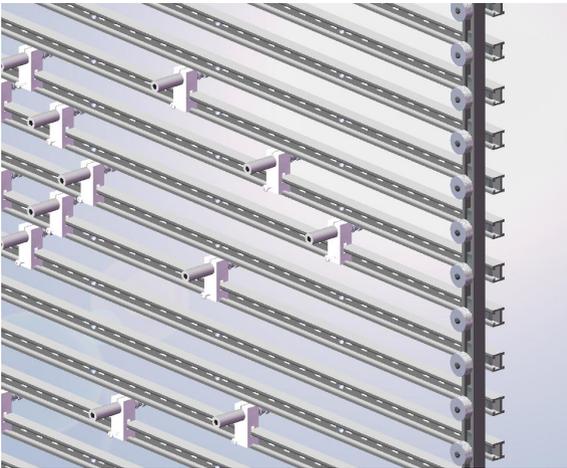
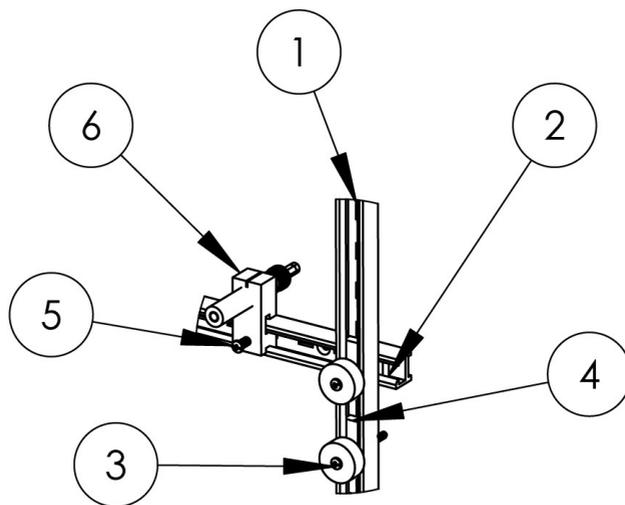


Figura F.3: Projeto da construção das peças de encaixe dos microfones na barras de sustentação.



ITEM NO.	PART NUMBER
1	Barra Vertical
2	Cubo com rosca
3	Manopla
4	Cubo sem rosca
5	Parafuso M5 Nylon
6	Suporte Microfone

Figura F.4: Detalhe das peças fabricadas no laboratório USICON.

Após a fabricação foram realizadas 10 medições em cada posição para cada peça de nylon, a fim de verificar a precisão das mesmas, totalizando 2500 medições utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,03 mm. Utilizando uma precisão do nylon de 0,50 mm acima e 0,50 mm abaixo da medida de projeto, apenas 2 peças não apresentaram valores fora dessa precisão e conseqüentemente não foram utilizadas na medição, Figura F.5.

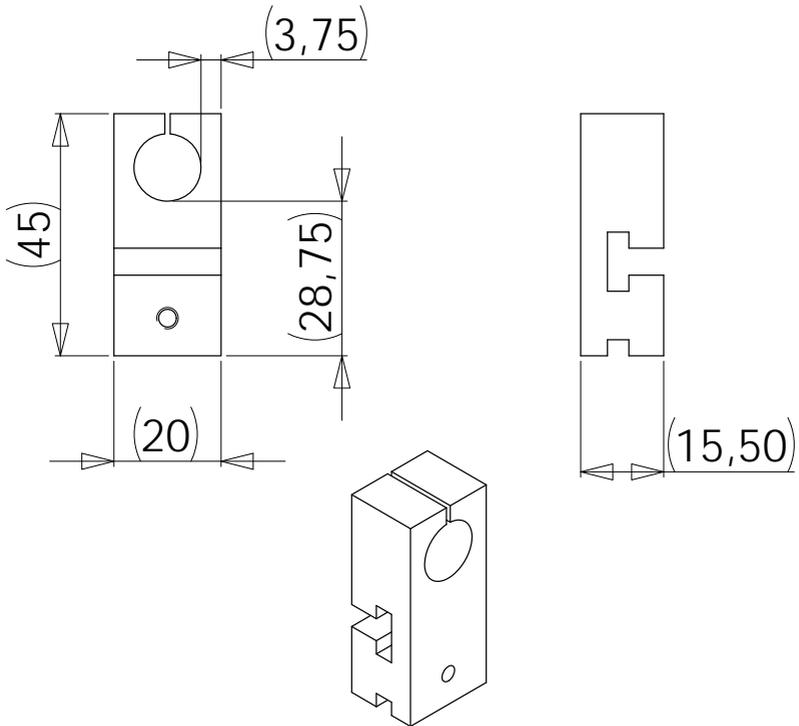


Figura F.5: Medidas das peças de sustentação dos microfones (*mm*). As peças foram desenvolvidas em *software* e construídas no laboratório USICON da Universidade Federal de Santa Catarina.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]  
(Citado nas páginas )
- [2] E. G. Williams. *Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*. Academic Press, 6 1999.  
(Citado na página 1)
- [3] F. Fahy. *Sound Intensity*. Taylor & Francis, 1 edition, Oct. 1995.  
(Citado na página 1)
- [4] D. H. Johnson and D. E. Dudgeon. *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*. Prentice Hall PTR, facsimile edition, Feb. 1993.  
(Citado nas páginas 2, 13, 17, 23, 26 e 29)
- [5] P. Sijtsma and R. Stoker. Determination of absolute contributions of aircraft noise components using fly-over array measurements. In *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, number AIAA-2004-2958, Manchester, United Kingdom, May 2004.  
(Citado nas páginas *xxi*, 2 e 3)
- [6] B. Kaushik; D. Nance and K. Ahuja. A review of the role of acoustic sensors in the modern battlefield. In *11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (26th AIAA Aeroacoustics Conference)*, number AIAA-2005-2997, Monterey, California, USA, May 2008.  
(Citado nas páginas *xxi* e 6)
- [7] J. Billingsley and R. Kinns. The acoustic telescope. *Journal of Sound and Vibration*, 1976.  
(Citado na página 6)
- [8] P. T. Soderman and S. C. Noble. A directional microphone array for acoustic studies of wind tunnel models. In *8th Aerodynamic Testing Conference*, number AIAA-1974-640, Bethesda, Md., USA, Jul. 1974.  
(Citado na página 7)
- [9] Bechert D. King III. On the sources of wayside noise generated by high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 66, page 311-332, 1979.  
(Citado na página 7)

- [10] Barsikow B.; and King III; W.F. On removing the doppler frequency shift from array measurements of railway noise. *Journal of Sound and Vibration*, 120:190–196, 1988.  
(Citado na página 7)
- [11] 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*, pages 1175–1178, 1992.  
(Citado na página 7)
- [12] Luís L. Henrique. *Acústica Musical*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 1 edition, 2002.  
(Citado na página 7)
- [13] Michael Vorländer. *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Springer, Berlin, Germany, 1 edition, 2007.  
(Citado na página 7)
- [14] G.P. Howell, A.J. Bradley, M.A. McCormick, and J.D. Brown. De-dopplerization and acoustic imaging of aircraft flyover noise measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 105(1):151 – 167, 1986.  
(Citado na página 7)
- [15] D.S. Brooks; T. F.; Marcolini, M.A.; Pope. A directional array approach for the measurement of rotor noise source distribution with controlled spatial resolution. *Journal of Sound and Vibration*, 112:192–197, 1987.  
(Citado na página 7)
- [16] Michel; U.; Barsikow; B.; Helbig; J.; Hellmig; M.; and M. Schüttpelz. Flyover noise measurements on landing aircraft with a microphone array. AIAA Paper 98-2336, 1998.  
(Citado na página 7)
- [17] M. Mosher; M. E. Watts; S. Jovic and S. M. Jaeger. Calibration of microphone arrays for phased array processing. In *3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, number AIAA-1997-1678, Atlanta, GA,

- USA, May 1997.  
(Citado na página 7)
- [18] Zoltowsk M. D. Kautz G. M. Performance analysis of music employing conjugate symmetric beamformers. *IEEE Transactions of Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 43:737–748, 1995.  
(Citado na página 7)
- [19] R. P Dougherty. Advanced time-domain beamforming techniques. In *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, number AIAA-2004-2955, Manchester, United Kingdom, May 2004.  
(Citado nas páginas 8 e 11)
- [20] T.J. Mueller. *Aeroacoustic Measurements*. Springer, 2002.  
(Citado na página 8)
- [21] N. Yamazaki; K. Nagakura; M. Ikeda and A. Sagawa. Methods to measure acoustic sources in a closed wind tunnel test section. In *11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (26th AIAA Aeroacoustics Conference)*, number AIAA-2005-3003, Monterey, California, USA, May 2005.  
(Citado na página 8)
- [22] YARDIBI T. *Source Localization and Power Estimation In Aeroacoustic Noise Measurements*. A Dissertation Presented to the Graduate School of the University of Florida A DISSERTATION PRESENTED TO THE GRADUATE SCHOOL OF THE UNIVERSITY OF FLORIDA, 2009.  
(Citado nas páginas xxi, xxii, 8, 29, 30, 31, 32, 33 e 62)
- [23] S. N. Y. Gerges. *Ruído: Fundamentos e Controle*. NR Editora, Florianópolis, Brasil, 2 edition, 2000.  
(Citado na página 9)
- [24] W. M. Hartmann. *Signals, Sound, and Sensation*. American Institute of Physics, Aug. 2004.  
(Citado na página 9)
- [25] A. R. Frey; A. B. Coppins; J. V. Sanders and L. E. Kinsler. *Fundamentals of Acoustics*. Wiley, 4 edition, Dec. 1999.  
(Citado nas páginas 9 e 11)

- [26] R. P. Dougherty; C. S. Allen; W. K. Blake; D. Lynch; P. T. Soderman; T. J. Mueller; J. R. Underbrink and T. J. Mueller(ed.). *Aeroacoustic Measurements*. Springer Verlag, 1 edition, Sep. 2002.  
(Citado nas páginas 11 e 16)
- [27] D. P. Arnold; T. Nishida; L. N. Cattafesta III and M. Sheplak. Mems-based acoustic array technology. In *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, number AIAA-2002-253, Reno, NV, USA, Jan. 2002.  
(Citado na página 14)
- [28] D.E. Dudgeon. Fundamentals of digital array processing. *Proceedings of the IEEE*, 65(6):898–904, Jun. 1977.  
(Citado nas páginas 14 e 15)
- [29] P. A. Ravetta. *LORE Approach for Phased Array Measurements and Noise Control of Landing Gears*. PhD thesis, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, USA, Nov. 2005.  
(Citado nas páginas 14 e 15)
- [30] M. Mosher. Phased arrays for aeroacoustic testing - theoretical development. In *2nd AIAA and CEAS, Aeroacoustics Conference*, number AIAA-1996-1713, State College, PA, USA, May 1996.  
(Citado na página 14)
- [31] J. B. J. Fourier. *Théorie analytique de la chaleur*. Didot, Paris, France, 1822.  
(Citado na página 14)
- [32] K. Shin; J. K. Hammond. *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*. John, 2008.  
(Citado na página 14)
- [33] B. D. Steinberg. *Principles of Aperture and Array System Design: Including Random and Adaptive Arrays*. John Wiley & Sons, 1 1976.  
(Citado na página 21)
- [34] Hald J. Christensen J.J. Technical review. Technical report, Denmark, Jul. 2004.  
(Citado nas páginas xxi, 22, 23 e 24)
- [35] J. R. Underbrink. Practical considerations in focused array design for passive broad-band source mapping applications. Master's thesis,

- Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA, May 1995.  
(Citado na página 28)
- [36] H. Cox. Resolving power and sensitivity to mismatch of optimum array processors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 54(3):771–785, 1973.  
(Citado nas páginas 28 e 29)
- [37] D. G. Manolakis; D. Manolakis; V. K. Ingle and S. M. Kogon. *Statistical and Adaptive Signal Processing: Spectral Estimation, Signal Modeling, Adaptive Filtering and Array Processing*. Artech House Publishers, Apr. 2005.  
(Citado na página 29)
- [38] H. D’Assumpção and D. Gray. *Beamforming and Array Processing*. Lecture notes of Master of Sciences Program, University of Adelaide, Australia, Dec. 2008.  
(Citado na página 29)
- [39] TRAPET M.M. *Comparison of Sound-Source Localization Methods for Vibrating Structures*. Diploma Thesis, 2009.  
(Citado nas páginas xxii, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 55, 65, 68 e 69)
- [40] Wikipédia - A Enciclopédia Livre. Disponível em: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), Acessado em 20/02/2012.  
(Citado nas páginas 38 e 65)
- [41] Trapet M.M.; Dietrich P. *Influence of various uncertainty factors on the result of beamforming measurements*. NOISE-CON 2010, Baltimore, Maryland, 2010 April 19-21.  
(Citado nas páginas xxii, 40 e 41)
- [42] W. D. Fonseca. Desenvolvimento e aplicação de sistema para obtenção de imagens acústicas pelo método do beamforming para fontes em movimento. Master’s thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, Fev. 2009.  
(Citado nas páginas xxiv, 43, 47, 53, 54 e 223)
- [43] Y. A. R. Silva. Um sistema de identificação de fontes de ruído utilizando a técnica de beamforming. Master’s thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, Dez. 2008.  
(Citado nas páginas 43 e 53)

- [44] M. Schroeder; T. Rossing; F. Dunn; W.M. Hartmann; D.M. Campbell and N.H. Fletcher. *Springer Handbook of Acoustics*. Springer, 1 edition, Jun. 2007.  
(Citado nas páginas 73 e 236)
- [45] H. Kuttruff. *Acoustics, an introduction*. Taylor & Francis, London, 2007. GBA679976 bnb Heinrich Kuttruff. 24 cm. Formerly CIP. Uk Includes bibliographical references and index.  
(Citado nas páginas 73 e 236)
- [46] *ANSI Standard - S1.26-1995. Method for calculation of the absorption of sound by the atmosphere*,. New York, 1995.  
(Citado nas páginas 73, 77, 235, 236, 237 e 254)
- [47] *SAE ARP 866A. Standard Values of Atmospheric Absorption as a Function of Temperature and Humidity*. Jan 1, 1975.  
(Citado nas páginas 235 e 236)
- [48] *ISO 9613-1:1993, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. Jan 1, 1993.  
(Citado na página 235)
- [49] David T. Blackstock. *Fundamentals of Physical Acoustics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000.  
(Citado nas páginas 252 e 253)
- [50] Clay C. S. Medwin H. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, 1998.  
(Citado na página 253)
- [51] Y. Guo; C. Streett R. W. Stoker and N. Burnside. Airframe noise source locations of a 777 aircraft in flight and comparisons with past model scale tests. In *9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit*, number AIAA-2003-3232, Hilton Head, South Carolina, USA, May 2003.  
(Citado nas páginas xlii e 255)
- [52] S. Oerlemans; P. Sijtsma and B. M. López. Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of Sound and Vibration*, 299(4-5):869 – 883, 2007.  
(Citado na página 255)