

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

AUGUSTO CESAR FANTINELLI DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA MEDIÇÕES
DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA ENTRE MICROFONE E FONTE SONORA**

CURITIBA

2021

AUGUSTO CESAR FANTINELLI DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA MEDIÇÕES
DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA ENTRE MICROFONE E FONTE SONORA**

**DESIGN OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR ROOM TRANSFER FUNCTION
MEASUREMENT**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica
da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Márcio Henrique de
Avelar Gomes

Coorientador: Prof. Dr. Luis Paulo Laus

CURITIBA

2021

AUGUSTO CESAR FANTINELLI DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA MEDIÇÕES
DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA ENTRE MICROFONE E FONTE SONORA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecatrônica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23/agosto/2021

Márcio Henrique de Avelar Gomes
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luís Paulo Laus
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

William D'Andrea Fonseca
Doutorado
Universidade Federal de Santa Maria

Marcelo de Oliveira Rosa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

Dedico este trabalho a minha mãe Edna, meu
pai Eder e minha irmã Maria.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, eu gostaria de ressaltar que, por mais que eu queira, eu jamais conseguiria colocar todos que foram parte dessa jornada (direta ou indiretamente) em uma página com alguns parágrafos. Dessa maneira, deixo aqui meu sincero agradecimento a todos aqueles que estiveram ao meu lado (seja em Curitiba, Santa Mariana, São Paulo ou Tóquio) e me apoiaram, confortaram e propeliram por essa etapa da minha vida e que porventura estiveram diretamente envolvidos no desenvolvimento do trabalho.

Eu gostaria de agradecer a meus pais, Eder Roberto de Carvalho e Edna Aparecida Fantinelli de Carvalho por sempre ter, acima de tudo, me apoiado e sempre incentivado meu desejo por conhecimento e pela excelência. Sem eles eu (literalmente) não estaria aqui hoje escrevendo essas palavras, muito menos essa monografia. Eu também gostaria de agradecer a minha irmã, Maria Cecília Fantinelli de Carvalho, por não somente ter me incentivado, mas sempre ter me “acordado pra vida” quando eu precisei, além de ser uma excelente cozinheira e, acima de tudo, uma excelente irmã.

Gostaria de agradecer ao orientador, Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes pelo apoio técnico nos tópicos relacionados a acústica, por ter me apresentado esse mundo extremamente rico e pelas dicas musicais. Agradeço ao coorientador Prof. Dr. Luis Paulo Laus pelo apoio técnico nos tópicos relacionados a robótica e programação de robôs, e pela oportunidade de trabalhar no projeto de produção de Recursos Educacionais Abertos. Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Carlos de Abreu Rodrigues pela oportunidade de estágio no laboratório de FMS da UTFPR e pelos anos de trabalho em conjunto. Agradeço ao Prof. Dr. Eric Brandão por produzir os gráficos do espectro do número de onda. Agradeço a empresa Relacus pela doação do material de absorção acústica. Agradeço ao amigo Felipe Hermenegildo de Souza por ter despendido esforços para produzir as peças que eu precisei para esse trabalho, e pelos anos de parceria e consumo excessivo de café. Agradeço ao amigo Luis Henrique Sant’ana pelo apoio em assuntos relacionados a acústica.

Agradeço ao jogador de hóquei no gelo Nikita Kucherov por sua atuação absurda na pós-temporada da NHL, e também à equipe do *Tampa Bay Lightning* pela segunda conquista seguida da Stanley Cup, e por terem me dado algo pelo qual aguardar e torcer durante esse período da história humana em que nada de muito interessante tem acontecido. Agradeço às bandas Rush, Phish, Primus, Engenheiros do Hawaii, Novos Baianos outras mais, por proverem uma trilha sonora para essa etapa, para essa vida, e, por que não, para esse trabalho.

Som é o vocabulário da natureza.
(Pierre Schaeffer, 1948).

RESUMO

Com os avanços na tecnologia de processamento de sinais e na capacidade computacional de equipamentos, pode-se implementar novas tecnologias na análise da acústica de recintos. Utilizando-se de um braço robótico para posicionar um microfone, pode-se formar um arranjo virtual de microfones automatizado de maneira mais flexível do que um arranjo fixo. A utilização desse arranjo para realizar medições da resposta ao impulso da sala possibilita a medição e análise de características do recinto, que por sua vez fornecem um maior entendimento sobre seu comportamento e sobre os fatores que o influenciam. Dadas as características de linearidade e invariância no tempo de sistemas acústicos e lançando mão de métodos e ferramentas já conhecidos e estabelecidos, objetivou-se o desenvolvimento de um sistema capaz de reproduzir um arranjo automatizado de medição. O posicionamento do microfone é feito utilizando o braço robótico e a medição de resposta ao impulso se dá pelo método da deconvolução. Inicialmente, a principal aplicação do sistema seria no cálculo e análise do espectro do número de onda do campo acústico da sala. Devido às características construtivas do robô, o sistema também deve informar a possibilidade da reprodução completa do arranjo, por meio da verificação da cinemática inversa do robô. A arquitetura proposta é a de um sistema controlado via MATLAB que comanda o robô por meio de comunicação serial e realiza as medições de funções de transferência por meio de uma interface de som. As medições utilizam um microfone apropriado para medição que é fixado ao robô por um suporte fabricado por impressão 3-D. Desenvolveu-se uma biblioteca de suporte a comunicação entre o MATLAB e o robô e verificação da possibilidade da formação de arranjos esféricos unidirecionais e direcionados a fonte, e arranjos aleatórios unidirecionais. Testes foram conduzidos em um recinto comum (um laboratório da UTFPR Câmpus Ecoville), nos quais se verificou o funcionamento das peças mecânicas e a integração entre computador e máquina. Dessa maneira, o sistema foi capaz de extrair dados para análise de tempo de reverberação, frequência de Schroeder e distância crítica do campo sonoro assumindo a sala como levemente amortecida. As análises revelaram concordância com a teoria de acústica estatística. O sistema foi utilizado para a coleta de respostas ao impulso da sala em seu estado normal de amortecimento e para a sala com uma amostra de 10,8 m² de lã de vidro. O espectro do número de onda e a absorção da superfície do caso com amostra de lã de vidro foram calculados. Verifica-se entre 500 Hz e 2 kHz que existem reflexões de origens espúrias em decorrência da natureza irregular das superfícies da sala. A absorção da lã de vidro calculada pelo espectro do número de onda apresentou um comportamento errático mas, de modo geral, se comporta como um absorvedor de material poroso. A comparação entre uma função de transferência da sala reconstruída pelo arranjo em um ponto e a função de transferência diretamente medida nesse mesmo ponto revela que a decomposição em ondas planas foi bem sucedida.

Palavras-chave: Acústica de salas. Resposta ao impulso de sala. Decomposição em ondas planas. Arranjos de microfone. Reconstrução de campo sonoro.

ABSTRACT

With advancements in signal processing technology and in the computational capabilities of equipment, new technologies can be implemented in the analysis of room acoustics. Using a robotic arm to position a microphone in the space, a virtual automated microphone array can be formed more flexibly than a rigid array. The application of this type of array to perform room impulse response measurements allows for the measurement and analysis of characteristics of the room, which in turn produce a better understanding of its behaviour and the factors that influence it. Given the linearity and time-invariance characteristics of acoustic systems and using already established tools and methods, the objective is to develop a system capable of reproducing an automated microphone array. The transducer's positioning is done using a robotic arm and the room impulse response is measured using the deconvolution method. Initially, the main application of this system is to calculate and analyse the wavenumber spectrum of the room's sound field. Due to the robot's specifications, the system also could inform about positions that may not be achieved by the robot, by calculating and verifying its inverse kinematics. The proposed architecture is of a MATLAB controlled system that sends commands to the robot through serial communication and performed transfer function measurements through a sound interface. The measurements use an appropriate transducer that is held by the robot using a 3-D printed holder. A support library for the communication and inverse kinematics has been developed. The designed arrays were unidirectional and source-pointing spherical arrays and unidirectional random position arrays. Tests were conducted in a common room, in which the parts and integration were verified. Thus, the achieved system has been able to acquire data for reverberation time, Schroeder's frequency and critical distance analysis, assuming a lightly damped environment. The analysis reveal coherence with statistic acoustics theory. The system was used to measure the room impulse responses for its normal (light) damping condition and with a 10,8 m² glass wool absorbing sample. The wavenumber spectrum and the surface absorption for the damped environment were calculated. It can be verified between 500 Hz and 2 kHz that there are spurious reflections, possibly due to the irregular nature of the room's surfaces. The absorption of the glass wool calculated using the wavenumber domain showed an erratic behaviour but tending towards the behaviour of a porous material absorber. The comparison between a reconstructed RTF for a certain microphone position and a measured RTF in the same position reveals that the plane wave decomposition was successful.

Keywords: Room acoustics. Room impulse response. Plane wave decomposition. Microphone array. Sound field reconstruction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linearidade em um sistema genérico.....	21
Figura 2 - Sistema invariante no tempo.....	22
Figura 3 - Processo de medição por deconvolução circular.....	26
Figura 4 - Sinal de varredura exponencial no domínio do tempo.....	26
Figura 5 - Sistema automatizado de medição por arranjo virtual.....	36
Figura 6 - Cadeia de equipamentos para medição sonora.....	37
Figura 7 - Frente da Roland Quad-Capture.....	38
Figura 8 - Parte posterior da Roland Quad-Capture.....	38
Figura 9 - Microfone GRAS 40AE e pré-amplificador GRAS 26CA.....	39
Figura 10 - Módulo de potência GRAS 12AL.....	40
Figura 11 - Robô Mitsubishi RV-M1.....	41
Figura 12 - Exemplos de geração de arranjos esféricos.....	48
Figura 13 - Vista explodida das peças do suporte.....	50
Figura 14 - Suporte montado no robô.....	50
Figura 15 - Nomenclatura das juntas do robô e variáveis de junta associadas.....	51
Figura 16 - Fluxograma do processo de medição.....	53
Figura 17 - Esquema de um arranjo de 10 posições.....	56
Figura 18 - Tempo de reverberação médio por banda de terço de oitava.....	58
Figura 19 - RTFs para a posição 1 da fonte de 112,5 Hz a 9000 Hz.....	59
Figura 20 - RTFs para a posição 2 da fonte de 112,5 Hz a 9000 Hz.....	59
Figura 21 - RTFs para a posição 3 da fonte de 112,5 Hz a 9000 Hz.....	60
Figura 22 - Frequência de Schroeder calculada por banda de terço de oitava.....	60
Figura 23 - Superfície de interesse sem revestimento.....	61
Figura 24 - Superfície de interesse com revestimento.....	62
Figura 25 - Arranjo virtual aleatório de microfones.....	63
Figura 26 - Arranjo virtual esférico de microfone.....	63
Figura 27 - Esquema da distribuição dos componentes do experimento com o arranjo aleatório.....	65
Figura 28 - Esquema da distribuição dos componentes do experimento com o arranjo aleatório após a aplicação da Transformação Homogênea.....	65
Figura 29 - Distribuição energética na região do arranjo a 1 kHz.....	66

Figura 30 - Distribuição energética na região do arranjo a 1 kHz em termos de θ e ϕ	67
Figura 31 - Absorção da superfície revestida em lã de vidro calculada pelo domínio do número de onda e pelos valores p e u reconstruídos.....	68
Figura 32 - Distribuição energética na região do arranjo a 500 Hz em termos de θ e ϕ	68
Figura 33 - Distribuição energética na região do arranjo a 800 Hz em termos de θ e ϕ	69
Figura 34 - Distribuição energética na região do arranjo a 1 kHz em termos de θ e ϕ	69
Figura 35 - Distribuição energética na região do arranjo a 1,6 kHz em termos de θ e ϕ	69
Figura 36 - Distribuição energética na região do arranjo a 2 kHz em termos de θ e ϕ	70
Figura 37 - Comparação entre RTF reconstruída no ponto 150 e medida no ponto 150 do arranjo aleatório.....	70
Figura 38 - Resposta em frequência do microfone GRAS 40AE.....	97
Figura 39 - Correções de campo livre para o microfone GRAS 40AE.....	97
Figura 40 - Resposta em frequência do microfone GRAS 46AQ.....	98
Figura 41 - Correções de campo livre para o microfone GRAS 46AQ.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões dos arranjos da Figura 13.....	47
Tabela 2 - Limites das variáveis de junta do <i>Mitsubishi</i> RV-M1.....	51
Tabela 3 - Parâmetros selecionados para a medição da distância crítica da sala.....	55
Tabela 4 - Posições da fonte sonora.....	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Lista de funções do robô <i>Mitsubishi RV-M1</i>	43
Quadro 2 - Lista de funções criadas para controle e integração dos sistemas.....	47
Quadro 3 - Função <i>setupMSTF</i>	81
Quadro 4 - Função <i>ntRobot</i>	81
Quadro 5 - Função <i>errorRead</i>	82
Quadro 6 - Função <i>moveCoor</i>	82
Quadro 7 - Função <i>moveto</i>	83
Quadro 8 - Função <i>toolLenght</i>	83
Quadro 9 - Função <i>readPosition</i>	83
Quadro 10 - Função <i>rsRobot</i>	84
Quadro 11 - Função <i>verifyPos</i> (parte 1).....	84
Quadro 12 - Função <i>verifyPos</i> (parte 2).....	85
Quadro 13 - Script de controle do sistema (parte 1).....	87
Quadro 14- Script de controle do sistema (parte 2).....	88
Quadro 15 - Script de geração do arranjo esférico unidirecional (parte 1).....	90
Quadro 16 - Script de geração do arranjo esférico unidirecional (parte 2).....	91
Quadro 17 - Script de geração do arranjo aleatório unidirecional (parte 1).....	92
Quadro 18 - Script de geração do arranjo aleatório unidirecional (parte 2).....	93
Quadro 19 - Script de geração do arranjo esférico apontando para a fonte (parte 1).....	94
Quadro 20 - Script de geração do arranjo esférico apontando para a fonte (parte 2).....	95

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DAMEC	Departamento Acadêmico de Mecânica
DACOC	Departamento Acadêmico de Construção Civil
DFT	<i>Discrete Fourier transform</i>
FFT	<i>Fast Fourier transform</i>
GASIM	Grupo de Automação de Sistemas de Manufatura
IDFT	<i>Inverse discrete Fourier transform</i>
IFFT	<i>Inverse fast Fourier transform</i>
ITA	<i>Institute of Technical Acoustics</i>
LIT	Linear invariante no tempo
PC	<i>Personal computer</i>
RIR	<i>Room impulse response</i>
RTF	<i>Room transfer function</i>
S-ESM	<i>Spherical equivalent source method</i>
SPL	<i>Sound pressure level</i>
TH	Transformação homogênea
USB	<i>Universal serial bus</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WAV	<i>Waveform audio format</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$() \approx ()$	“Aproximadamente igual a”
$()^*$	Conjugado complexo de um número complexo
$() * ()$	Convolução entre duas funções
$\tilde{P}(\mathbf{k})$	Espectro bidimensional do número de onda (expresso em função de \mathbf{k})
$\tilde{P}(\theta, \phi)$	Espectro bidimensional do número de onda (expresso em função de θ e ϕ)
$P(\mathbf{k})$	Espectro tridimensional do número de onda
ω	Frequência angular contínua
Ω	Frequência angular discreta
f_{Sch}	Frequência de Schroeder
$\nabla()$	Gradiente de um vetor
\mathbf{M}	Matriz “M” (maíusculo e em negrito)
s_{abc}	Notação para $\text{sen}(\theta_a + \theta_b + \theta_c)$
c_{abc}	Notação para $\text{cos}(\theta_a + \theta_b + \theta_c)$
$\Re()$	Parte real de um número complexo
$\Im()$	Parte imaginária de um número complexo
$p(\mathbf{r}_m)$	Pressão sonora no ponto de coordenada \mathbf{r}_m
$x(t)$	Sinal genérico de tempo contínuo
$x[t]$	Sinal genérico de tempo discreto
t	Tempo
T_{20}	Tempo de reverberação (-5 dB a -25 dB)
j	Unidade imaginária, igual a $\sqrt{(-1)}$
\mathbf{k}	Vetor do número de onda
\mathbf{r}_m	Vetor de posição de um ponto m
\mathbf{v}	Vetor “v” (em negrito)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 PROBLEMA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo Geral.....	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 JUSTIFICATIVA.....	19
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 SISTEMAS LINEARES INVARIANTES NO TEMPO.....	20
2.1.1 Sistemas Lineares.....	20
2.1.2 Sistemas Invariantes no Tempo.....	21
2.2 A TRANSFORMADA DE FOURIER E SUAS VARIAÇÕES.....	23
2.3 MEDIÇÃO DE RESPOSTAS AO IMPULSO DE UMA SALA.....	24
2.4 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE O ESPECTRO DO NÚMERO DE ONDA.....	28
2.5 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DEPENDENTE DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA.....	30
2.6 RECONSTRUÇÃO DE UM CAMPO SONORO POR MEIO DE ARRANJOS.....	31
2.7 NOÇÕES BÁSICAS DE CINEMÁTICA DE ROBÔS.....	32
2.7.1 Transformações Homogêneas.....	32
2.7.2 Cinemática Direta.....	33
2.7.3 Cinemática Inversa.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA.....	36
3.2 MATERIAIS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE RIR.....	37
3.3 MATERIAIS DO SISTEMA DE POSICIONAMENTO.....	40
3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PARÂMETROS DE AMOSTRAGEM DA RESPOSTA AO IMPULSO DA SALA.....	41
3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A CALIBRAÇÃO E COMPENSAÇÃO DA LATÊNCIA NA AQUISIÇÃO DE SINAL SONORO.....	42
3.6 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DE RIR.....	42
3.7 COMUNICAÇÃO ENTRE O COMPUTADOR E O ROBÔ.....	43
4 DESENVOLVIMENTO.....	44
4.1 LIMITAÇÕES DO SISTEMA.....	44

4.2	ESCOLHA DE PARÂMETROS E DO ARRANJO PELO USUÁRIO.....	45
4.3	BIBLIOTECA DE FUNÇÕES.....	45
4.4	PLANEJAMENTO DOS TESTES.....	48
4.5	ACOPLAMENTO ENTRE O MICROFONE E O BRAÇO ROBÓTICO.....	49
4.6	VERIFICAÇÃO DAS POSIÇÕES DE MEDIÇÃO POR CINEMÁTICA INVERSA.....	51
4.7	CÓDIGO DE CONTROLE DO SISTEMA.....	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1	DETERMINAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DA SALA.....	55
5.2	MEDIÇÕES PARA CÁLCULO DO ESPECTRO DO NÚMERO DE ONDA.....	61
5.2.1	Preparação da Sala.....	61
5.2.2	Geração dos Arranjos.....	62
5.2.3	Preparação dos Dados para o Cálculo do Espectro do Número de Onda.....	63
5.2.4	Análise do Espectro do Número de Onda para o Caso com Absorção.....	66
5.2.5	Cálculo da Absorção da Superfície.....	67
5.2.6	Reconstrução da Função de Transferência.....	70
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
6.1	CONCLUSÕES.....	72
6.2	DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	73
6.3	TRABALHOS FUTUROS.....	74
	APÊNDICE A – TRANSCRIÇÃO DOS CÓDIGOS EM MATLAB.....	80
	APÊNDICE B – CÓDIGO DE CONTROLE DO ROBÔ.....	86
	APÊNDICE C – CÓDIGOS DE GERAÇÃO DOS ARRANJOS.....	89
	ANEXO A – RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA DOS MICROFONES.....	96

1 INTRODUÇÃO

Na acústica, diversos processos e análises dependem de medições de características de um recinto. Características como a curtose da distribuição de pressão sonora (JEONG, 2016), isotropia do fluxo de energia acústica em um ponto (NOLAN *et al.* 2018), coeficiente de absorção de uma amostra (NOLAN *et al.* 2019), entre outras propriedades, podem ser extraídas ou derivadas a partir de medições da função de transferência entre um sinal sonoro, fornecido por um alto-falante, e o sinal resultante da interação do sinal emitido com a sala, captado por um microfone.

As medições de função de transferência de recintos podem ser consideradas sob a alçada dos sistemas lineares invariantes no tempo (LIT), contanto que as condições apropriadas sejam mantidas. Uma medição simples da função de transferência do recinto, apresenta esta informação especificamente para o par de pontos de emissão e de captação, podendo-se realizar múltiplas medições em múltiplos pontos. Contudo, estudos como as análises de isotropia de campo propostas por Nolan *et al.* (2018; 2019), de propriedades das curvas de decaimento de energia proposta por Berzborn *et al.* (2019), e cálculos para reconstrução de campos acústicos complexos propostos por Fernandez-Grande (2016) necessitam de amostras colhidas de diversos pontos dentro do volume da sala. Nestes trabalhos recentes esse tipo de aquisição se faz utilizando arranjos esféricos de microfone (FERNANDEZ-GRANDE, 2016), pois estes permitem uma decomposição do campo acústico que é interessante a estes estudos. Arranjos esféricos de microfones é o nome dado para a montagem de microfones dispostos tridimensionalmente em uma superfície esférica. (RAFAELY, 2015). Evidentemente, pode-se dispor os microfones no espaço de diversas formas, sendo que o termo arranjo de microfones é o termo genérico para esse tipo de equipamento.

Apesar de práticos de um ponto de vista operacional, pois realizam a captação em múltiplas direções simultaneamente, arranjos esféricos rígidos de microfones podem se tornar caros conforme a quantidade de canais desejada. Além disso, a operação simultânea de centenas de microfones pode potencializar problemas causados pelo posicionamento imperfeito no espaço (NOLAN *et al.* 2019), incompatibilidade de transdutores (do inglês, *transducer mismatch*) (NOLAN *et al.* 2019; RAO, 2014) ou por falhas e subsequente troca destes.

Dessa forma, justifica-se a aplicação de uma medição sequenciada de diversas posições e direções que pode ser implementada utilizando apenas um único microfone e um

braço robótico que vai posicioná-lo automaticamente nas posições desejadas, de maneira sincronizada com a realização das medições. A este tipo de sistema se dá o nome de arranjo virtual de microfones – virtual no sentido que não há um arranjo físico, mas sim um microfone que percorre diversas posições do arranjo.

Este trabalho apresenta a implementação de um sistema automatizado de medição de função de transferência envolvendo a geração dos arranjos virtuais, a programação do robô para acessar as posições dos arranjos e a validação do sistema implementado por meio de experimentos para definição de características de comportamento acústico da sala e experimentos envolvendo decomposição em ondas planas.

Assim, obtém-se um arranjo virtual de microfones que é funcional, flexível e que pode ser aplicado em estudos análogos aos de Jeong (2016), Nolan *et al.* (2018; 2019) e Berzborn *et al.* (2019). Vale ressaltar que o braço robótico pode formar não somente um arranjo esférico, mas também outros formatos de interesse do usuário (FERNANDEZ-GRANDE; 2016), além de mitigar os potenciais problemas que possam surgir de defeitos, incompatibilidade de transdutores ou da má qualidade dos microfones quando se trata de arranjos, pois só se utiliza um microfone.

1.1 PROBLEMA

Apesar da acústica ser um tema estudado a milênios, tendo sua origem atribuída a Pitágoras na Grécia Antiga, atualmente a ciência do som é uma área do conhecimento cujos avanços têm sido dependentes dos avanços nas tecnologias de processamento e computação de dados. Dessa forma, diversas análises têm sido fruto de pesquisas realizadas no século XX e XXI, acompanhando os avanços na tecnologia de *software* e *hardware* de processamento. Temas como a difusividade do campo acústico (JEONG, 2016), a estimação do tempo de transição em um campo sonoro (DEFRANCE, POLACK; 2015), a validação das condições para a medição de coeficientes de absorção (SCROSATI *et al.*; 2019) ainda são assuntos de discussão e discordância até mesmo entre as referências da área. Tomando como exemplo a característica da difusividade de campo acústico, Jeong (2016) explicita que este conceito ainda é carregado de “confusões e equívocos” (tradução nossa) e o caminho afim de se atingir um consenso sobre esse tema envolve “desafios” (tradução nossa) de natureza experimental, sendo alguns deles dependentes de medições multidirecionais.

Nesse contexto, o desenvolvimento de um sistema automatizado de medição acústica multidirecional proporciona uma ferramenta fundamental para desenvolver pesquisas no

âmbito da acústica de salas, em especial para investigar características como difusividade de campo sonoro em uma câmara reverberante, isotropia de fluxo de energia acústica, métricas que dependam do tempo de reverberação e utilização de técnicas de reconstrução de campo acústico. Além disso, a utilização desse sistema de medição pode ser importante para se obter e comparar resultados com os obtidos por Nolan *et al.* (2018; 2019), Berzborn *et al.* (2019), Fernandez-Grande (2016) e Jeong, Nolan e Balint (2018).

A aplicação de braços robóticos em medições acústicas multidirecionais já vem sendo aplicada, sendo usualmente vinculada às medições de características espaciais dos recintos (NOLAN, 2019; NOLAN; BERZBORN; FERNANDEZ-GRANDE, 2019; BERZBORN *et al.* 2019). Contudo, ainda não há relatos da aplicação desse sistema em nosso país até o presente momento. Assim, a implementação desse tipo de tecnologia possibilita o desenvolvimento de pesquisas de temas que, atualmente, estão na fronteira do conhecimento na acústica.

1.2 OBJETIVOS

Nesta Seção são definidos o objetivo geral deste trabalho e sua subsequente divisão em objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema automatizado de medição de função de transferência e resposta ao impulso de salas utilizando um braço robótico.

1.1.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral subdivide-se em certos objetivos específicos, que são:

- Implementar um subsistema de posicionamento para o robô;
- Projetar um subsistema de medição acústica baseado em MATLAB;
- Integrar as subrotinas de posicionamento e medição; e
- Realizar testes medindo a função de transferência da sala.

1.3 JUSTIFICATIVA

O sistema proposto é interessante, numa primeira análise, pois permite a implementação e teste de técnicas de decomposição em ondas planas. Uma das principais aplicações desta técnica é a avaliação da isotropia de um campo sonoro, que indiretamente é um quantificador da difusividade. É importante avaliar a difusividade de um campo sonoro em câmaras reverberantes, pois técnicas de medição de potência (ISO; 2010), absorção (ISO; 2010; ASTM; 2017) e espalhamento sonoros são usualmente vinculados a condições ideais de difusividade nas câmaras. A superestimação desta característica pode levar a erros nas medições e dificuldades no compartilhamento dos dados resultantes das pesquisas (JEONG, NOLAN, BALINT; 2018). Indo além, o desenvolvimento deste equipamento pode auxiliar no desenvolvimento e validação de novas métricas para absorção e espalhamento sonoro, e de novas técnicas de caracterização da qualidade do campo sonoro.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento é dividido em 6 capítulos: Introdução (1), Revisão Bibliográfica (2), Materiais e Métodos (3), Desenvolvimento (4), Resultados e Discussões (5) e Considerações Finais (6).

O Capítulo 1 (Introdução) apresentou o problema de pesquisa, suas justificativas e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) comenta sobre alguns fundamentos teóricos de acústica, processamento de sinais e sistemas, e robótica, afim de facilitar o entendimento da monografia e embasar algumas escolhas e limitações do projeto e dos testes.

O Capítulo 3 (Materiais e Métodos) trata dos componentes que fazem parte do sistema e suas especificações.

O Capítulo 4 (Desenvolvimento) discorre sobre o desenvolvimento do sistema, tanto da parte de *hardware* projetado quanto da parte de *software* e algoritmos.

O Capítulo 5 (Resultados e Discussões) apresenta algumas análises realizadas utilizando as medições realizadas utilizando os arranjos virtuais gerados via computador.

O Capítulo 6 (Considerações Finais) é reservado para apresentar conclusões acerca do sistema e dos resultados obtidos, dificuldades no desenvolvimento, e também propor trabalhos futuros que estejam relacionados ao assunto da monografia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dedicado a uma revisão de conceitos e áreas úteis para o entendimento completo desta monografia.

2.1 SISTEMAS LINEARES INVARIANTES NO TEMPO

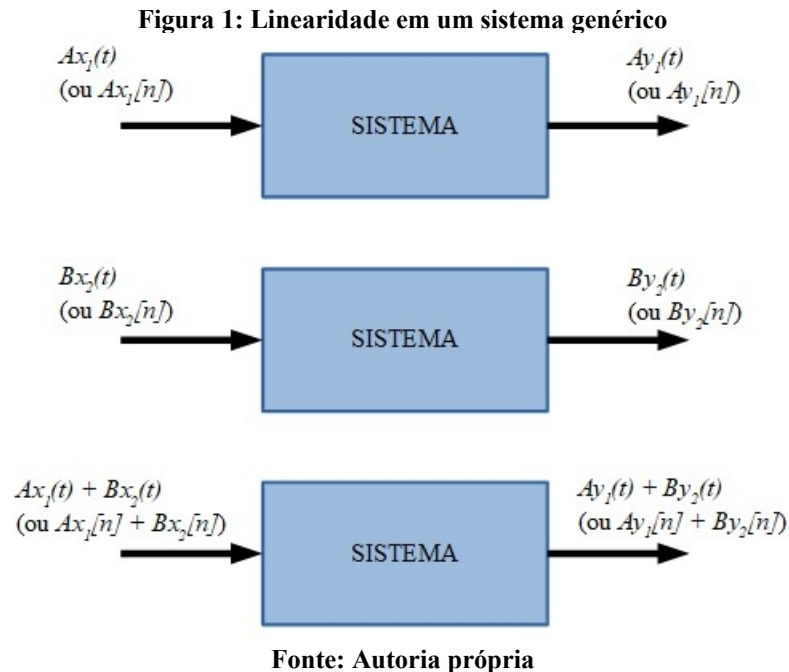
A análise de fenômenos físicos por meio de sistemas é uma abordagem muito comum no campo das engenharias. Essa maneira de observar e descrever fenômenos se baseia em considerar a ação das interconexões de diversos componentes sobre um sinal de entrada (usualmente conhecido e controlado) e observar um sinal de saída (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010). Dessa forma, pode-se observar um recinto excitado por um som como um sistema, cuja ação se dá pelos efeitos combinados das reflexões, absorções e espalhamento do som em suas paredes, difusores e essencialmente qualquer objeto que se demonstre um obstáculo para a propagação sonora.

Dessa maneira, um sistema linear invariante no tempo (LIT) é o sistema que possui as duas características - linearidade e invariância no tempo - em sua ação sobre um sinal de entrada (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

2.1.1 Sistemas Lineares

Segundo Oppenheim e Willsky (2010), um sistema é considerado linear se ele possui a propriedade de sobreposição, isto é, para uma entrada correspondente a uma soma ponderada de sinais de natureza elementar (e.g. senos e cossenos), a saída é igual a um sinal representado pela soma (com a mesma ponderação do sinal de entrada) das ações do sistema sobre os sinais “mais simples”. A Figura 1 representa essa propriedade.

Na Figura 1, A e B são os coeficientes das somas ponderadas, $x_1(t)$ e $x_2(t)$ são os sinais de entrada em tempo contínuo (analogamente $x_1[n]$, $x_2[n]$ e representam os sinais de entrada em tempo discreto) e $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são seus respectivos sinais de saída (da mesma forma, $y_1[n]$ e $y_2[n]$ são os respectivos sinais de saída para tempo discreto). Jacobsen e Juhl (2013) afirmam que para níveis de pressão sonora (em inglês *Sound Pressure Level*, que dá origem à sigla mais comum, SPL) de até 140 dB (avaliado com referência a 20 μ Pa), a aproximação de qualquer sistema acústico como um sistema linear é válida e aplicável.



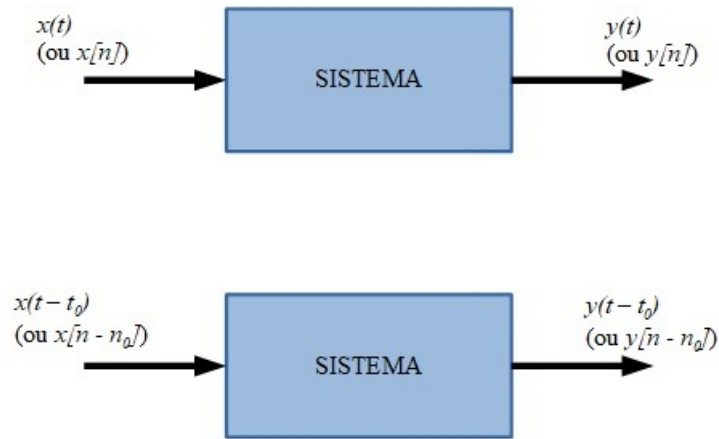
Dessa forma, como os sistemas acústicos que são objeto de estudo deste trabalho estão abaixo do limite de 140 dB (acima do qual são considerados casos extremos com ocorrência de ondas de choque e distorções de forma de onda), assumiu-se que os sistemas tratados neste trabalho são lineares.

2.1.2 Sistemas Invariantes no Tempo

Oppenheim e Willsky (2010) definem invariância no tempo como a qualidade de um sistema que preserva suas características ao longo do tempo. Dessa forma, o sistema dessa natureza sempre apresentaria a mesma resposta independentemente do instante de tempo em que sua medição começa.

A Figura 2 ilustra o conceito de invariância no tempo, podendo ser interpretada como: se uma entrada $x(t)$ em tempo contínuo (ou $x[n]$ em tempo discreto) causa uma saída $y(t)$ (ou $y[n]$, respectivamente), então, em um sistema invariante no tempo, uma entrada que apresenta um deslocamento de forma que $x(t-t_0)$ (em tempo discreto: $x[n-n_0]$) causa uma saída igualmente deslocada no tempo $y(t-t_0)$ (em tempo discreto: $y[n-n_0]$).

Figura 2: Sistema invariante no tempo



Fonte: Autoria própria

A invariância no tempo se obtém na prática pela manutenção das características da câmara entre ensaios (de uma maneira geral, se as configurações do sistema não forem alteradas com a passagem do tempo) (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010). A colocação de aparato difusor, mobília ou amostras de absorção durante as medições deverá ser evitada afim de preservar as características de resposta ao impulso da sala (isso pode ser encarado como outro sistema, desde que ele comece e termine as medições desta maneira). Fatores que não podem ser facilmente controlados como a temperatura do ambiente da câmara podem ser monitorados afim de verificar se flutuações nos resultados das medições podem estar relacionadas com flutuações de temperatura.

Dessa forma, um sistema LIT é o que apresenta as duas qualidades simultaneamente. Uma consequência interessante dos sistemas LIT é que seu efeito sobre uma entrada pode ser representado por uma operação de convolução entre uma função do sinal de entrada e uma função que representa o sistema (MANOLAKIS; INGLE, 2011), sendo uma soma de convolução em caso de tempo discreto – representada na Equação (1) – ou uma integral de convolução no caso de tempo contínuo – representada na Equação (2) – de forma que

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k]h[n-k] = x[n]*h[n] \quad (1)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t-\tau) d\tau = x(t)*h(t) \quad (2)$$

nas quais $x(t)$ e $x[n]$ são as entradas em tempo contínuo e discreto, respectivamente, e $y(t)$ e $y[n]$ são as respectivas saídas relacionadas às entradas, $h(t)$ e $h[n]$ são as respostas ao impulso em tempo contínuo e tempo discreto, respectivamente. Operações de convolução geralmente adotam a notação $(*)$.

2.2 A TRANSFORMADA DE FOURIER E SUAS VARIAÇÕES

A Transformada de Fourier¹ é uma das ferramentas mais elementares na análise de sinais e sistemas. Esta operação consiste de uma transformação que leva uma função do domínio do tempo a uma função no domínio da frequência. As Transformadas de Fourier são definidas, segundo Oppenheim e Willsky (2010), para tempo contínuo – Equação (3) – como

$$H(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

e para tempo discreto – Equação (4) – como

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h[n] e^{-j\omega n} \quad (4)$$

nas quais ω é a frequência, $H(\omega)$ e $H(e^{j\omega})$ são as funções no domínio da frequência (em tempo contínuo e discreto, respectivamente), $h(t)$ e $h[n]$ são as funções no domínio do tempo representadas em tempo contínuo e discreto, respectivamente, j é a unidade imaginária (raiz quadrada de -1), e t obviamente é o tempo. A transformada de Fourier transforma sinais e funções representados em função do tempo para sinais e funções em função da frequência ω .

A Transformada de Fourier possui propriedades conhecidas que serão citadas conforme a necessidade. Associada a uma transformada existe a transformada inversa de Fourier, que retorna um sinal função da frequência para um sinal em função do tempo. As Transformadas Inversas de Fourier estão escritas nas Equações (5) e (6) para tempo contínuo e tempo discreto, respectivamente

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (5)$$

$$h[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} H(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (6)$$

nas quais ω é a frequência, $H(\omega)$ e $H(e^{j\omega})$ são as funções no domínio da frequência (em tempo contínuo e discreto, respectivamente), $h(t)$ e $h[n]$ são as funções no domínio do tempo representadas em tempo contínuo e discreto, respectivamente, j é a unidade imaginária (raiz quadrada de -1), e t novamente é o tempo (OPPENHEIM; WILLISKY, 2010).

A Transformada de Fourier possui diversas aplicações, variações e desdobramentos que podem ser mais apropriadas dependendo do contexto e da eficiência computacional desejada. Vale destacar dentre essas a Transformada Discreta de Fourier (do inglês *Discrete*

¹ Desenvolvida a partir dos trabalhos de Jean Baptiste Joseph Fourier (21 março 1768 – 16 maio 1830), durante o século XVIII, a transformada se soma a seu vasto e impactante legado nas áreas da matemática, física e engenharia.

Fourier Transform, DFT) e a Transformada Rápida de Fourier (do inglês *Fast Fourier Transform*, FFT), bem como suas inversas (do inglês *Inverse Discrete Fourier Transform*, IDFT, e *Inverse Fast Fourier Transform*, IFFT). Ambas são ferramentas fundamentais para processamento de sinais devido ao seu desempenho computacional (MANOLAKIS; INGLE, 2011). A DFT e a IDFT são apresentadas nas Equações (7) e (8), respectivamente, de forma que

$$H[k] = \sum_{n=0}^{N-1} h[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (7)$$

$$h[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H[k] e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (8)$$

nas quais N é a quantidade de amostras, n é o índice que percorre as amostras e k é o número de onda (MANOLAKIS; INGLE, 2011). A FFT, ao contrário do que o nome indica, não é exatamente uma transformada em sua natureza, mas sim uma categoria de algoritmos para cálculos de DFT de maneira eficiente, se aproveitando de certas simetrias resultantes da abordagem matricial das DFTs e certos parâmetros convenientemente selecionados (MANOLAKIS; INGLE, 2011).

2.3 MEDIÇÃO DE RESPOSTAS AO IMPULSO DE UMA SALA

A resposta ao impulso da sala (do inglês *Room Impulse Response*, RIR) é possivelmente a característica mensurável mais elementar de uma sala do ponto de vista da acústica. As RIR informam como a sala reage a um estímulo de entrada (matematicamente, um delta de Dirac) e seu comportamento no domínio do tempo. Associada à resposta ao impulso da sala, sempre existe uma função de transferência (do inglês *Room Transfer Function*, RTF), que mostra o comportamento da sala do ponto de vista da frequência.

O conceito de função de transferência é, naturalmente, a relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada no domínio da frequência, conforme a Equação (9). Assim, define-se função de transferência como

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (9)$$

na qual $Y(\omega)$ e $X(\omega)$ são as transformadas de Fourier dos sinais de saída e de entrada, respectivamente.

Uma maneira de exemplificar a relação entre uma resposta ao impulso de uma sala de forma simples e um sinal de excitação seria estourando uma bexiga cheia de ar (um

equivalente improvisado de um delta de Dirac) e medindo a pressão sonora na sala durante o tempo seguinte. Um impulso unitário de pressão sonora, quando interage com o ambiente do recinto, ocasiona reflexões, absorções e espalhamento sonoro nas entidades que compõem a sala (como os difusores, mobília, cortina, entre outros). O que é percebido por seres humanos, no entanto, é a reverberação do som da bexiga estourando na sala (análogo a um sinal de saída). Dessa forma, pode-se dizer que o impulso de entrada, ao ser processado pela resposta ao impulso da sala, resulta em um sinal de saída. Naturalmente, esse exemplo didático não é um método de medição robusto do ponto de vista científico (por diversos fatores que não convêm ser enumerados nesse trabalho).

Métodos confiáveis e robustos de medir RIRs e funções de transferência existem (MÜLLER; MASSARANI, 2001) e já são comumente implementados para medir a RIR de uma sala. Dá-se destaque ao método da deconvolução (em inglês, *Deconvolution*) por ser o método implementado em MATLAB na *ITA Toolbox* (BERZBORN *et al.* 2017), que foi utilizado para realizar as medições de resposta ao impulso.

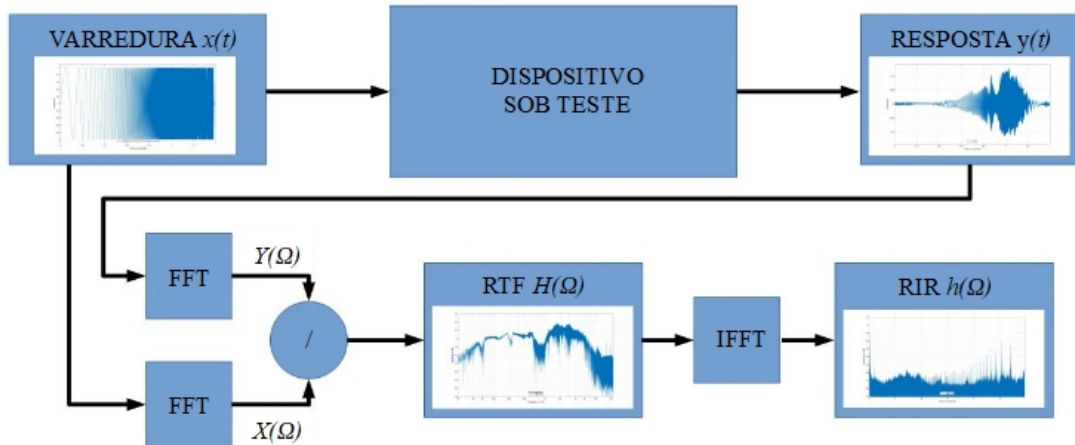
A deconvolução nada mais é do que uma aplicação prática da Equação (5) (MÜLLER; MASSARANI, 2001). Utilizando um sinal do tipo varredura (em inglês *sweep*) como sinal de entrada para o sistema, se realiza a aquisição do som resultante da interação com a sala. Subsequentemente, realizam-se as FFTs dos dois sinais e se divide a da saída pela da entrada, resultando na função de transferência da sala. Feito isso, realiza-se a IFFT, obtendo assim a resposta ao impulso da sala. A Figura 3 apresenta um diagrama de blocos representando o processo de deconvolução circular segundo Müller e Massarani (2001).

Um sinal do tipo *sweep* é um sinal que varre crescentemente uma faixa de frequências em um intervalo de tempo. A Figura 4 mostra um sinal de varredura (de 4,45 Hz a 22.050 Hz) no domínio do tempo. Os sinais podem executar varreduras exponenciais ou lineares (relativo à taxa de aumento da frequência).

O procedimento de deconvolução pode ser realizado de duas maneiras diferentes, conforme o tipo de convolução que for empregado. A deconvolução circular usa a convolução circular, que é a operação natural para DFTs (MANOLAKIS; INGLE, 2011). Esta operação considera que ambos os sinais são periódicos e amostrados em N pontos. O efeito prático da aplicação de uma deconvolução circular é que os produtos de distorção podem ser “camuflados” no ruído de fundo (em inglês, *noise floor*), que, na deconvolução circular é constante (MÜLLER; MASSARANI, 2001). Dependendo do tempo de duração do *sweep*, tais distorções podem inclusive ser sobrepostas à região de decaimento da RIR (MÜLLER; MASSARANI, 2001). Müller e Massarani (2001) apontam que a utilização da deconvolução

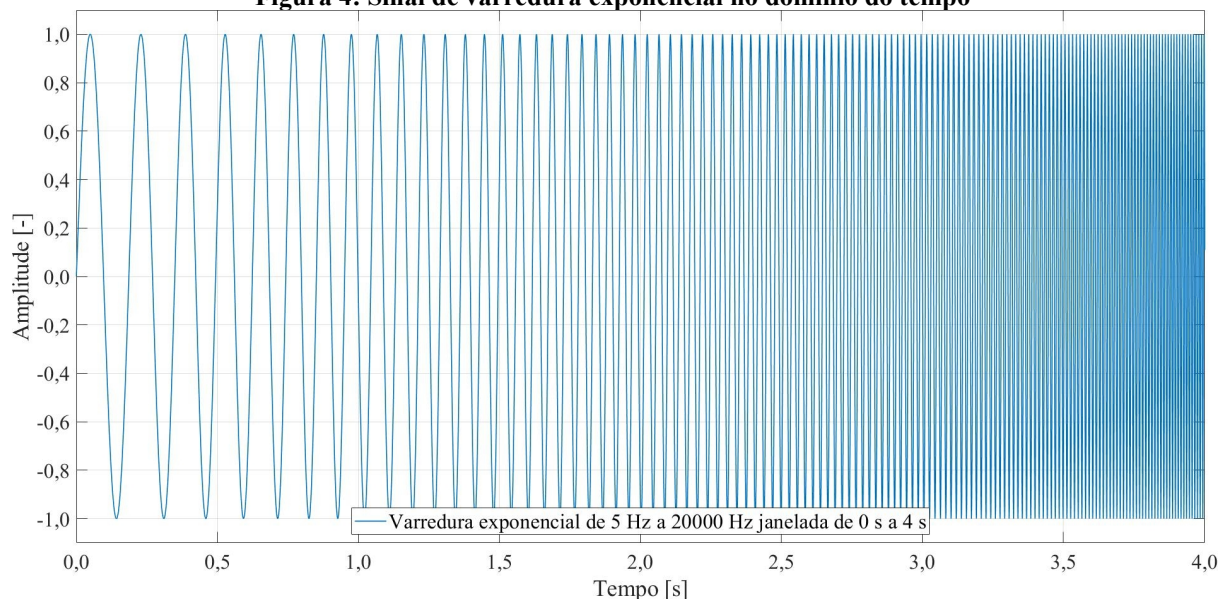
circular exige que a escolha do tempo de varredura deve ser “...suficientemente mais longa que o tempo de decaimento” (MÜLLER; MASSARANI, 2001) afim de mitigar essa sobreposição.

Figura 3: Processo de medição por deconvolução circular



Fonte: Autoria própria

Figura 4: Sinal de varredura exponencial no domínio do tempo



Fonte: Autoria própria

No caso da convolução linear, esta é uma extrapolação da mesma convolução definida para sinais de ω contínuo (resultantes da transformada de Fourier convencional) para sinais com um Ω discreto (resultantes de uma DFT). Esta operação é obtida na prática preenchendo os sinais de entrada e de saída com zeros (em inglês, *zero padding*) até que os sinais estendidos tenham no mínimo o dobro do comprimento ($2N$) (MÜLLER; MASSARANI, 2001; SHIN; HAMMOND, 2008) e realizando a deconvolução circular. A

extensão dos sinais convoluídos mitiga os efeitos da não periodicidade dos sinais e possibilita que a convolução convencional possa ser aplicada (SHIN; HAMMOND, 2008; MANOLAKIS; INGLE, 2011). Os efeitos decorrentes da utilização da deconvolução linear são a filtragem passa-baixa do ruído de fundo (o que evidencia as distorções harmônicas na RIR) e a criação de uma região que não contém informações de natureza causal ao final da RIR devido ao preenchimento com zeros (MÜLLER; MASSARANI, 2001).

A utilização de *sweeps* não periódicos possui inúmeras vantagens quando comparada a outros procedimentos como aplicação de impulso, sinais ruído ou sequências binárias (MÜLLER; MASSARANI, 2001). Dentre elas, pode-se citar o conteúdo espectral de uma varredura não periódica, cuja diferença para com sua contraparte periódica é insignificante. Outra vantagem é que RIRs adquiridas via *sweep* isolam componentes de distorção ao final do gráfico da RIR² (que, devido à natureza periódica da DFT, também representam tempos negativos), ao contrário de medições via ruído ou sequências binárias que distribuem as mesmas ao longo da curva. Isso permite que, com uma operação de janelamento apropriada, se obtenha uma RIR fiel à realidade de forma eficiente ou, se assim for desejado, analisar apenas as distorções (MÜLLER; MASSARANI, 2001).

Com relação às medições de resposta ao impulso utilizando um impulso propriamente dito, *sweeps* levam a vantagem de não necessitarem de uma amplitude muito alta para concentrarem a mesma energia (MÜLLER; MASSARANI, 2001), visto que um impulso unitário é matematicamente uma entidade de amplitude tendendo a infinito sobre um espaço de tempo tendendo a zero.

No que se refere à robustez relacionada aos efeitos de distorções, ruído e variações em decorrência do tempo, *sweeps* são mais robustos que medições utilizando sequências binárias, com a contrapartida de serem ligeiramente menos eficientes computacionalmente (MÜLLER; MASSARANI, 2001). Com a capacidade de processamento disponível nos dias de hoje, essa diferença se tornou tão pequena que, devido à simplicidade e fidelidade das medições por varredura, prefere-se a utilização dos *sweeps* a suas alternativas.

Vale ressaltar que cada par de pontos emissor-receptor (fonte-microfone) é representado por apenas uma RTF e uma RIR.

² Segundo Müller e Massarani (2001), as distorções aparecem em tempos de chegada negativos, que na prática, devido a periodicidade da DFT, também são o final do gráfico de um período. Isso, por sua vez, facilita o descarte ou o isolamento das distorções, bastando cortar a parcela indesejada do gráfico da RIR.

2.4 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE O ESPECTRO DO NÚMERO DE ONDA

Um dos interesses na realização de medições utilizando arranjos de microfones é a análise do campo acústico utilizando uma abordagem por meio da representação desse campo em relação ao seu número de onda (NOLAN *et al.* 2018). Essa é a base teórica para diversos estudos atuais como a caracterização experimental do campo sonoro em uma câmara reverberante conduzida por Nolan *et al.* (2019), avaliação do decaimento de energia conduzidas por Berzborn *et al.* (2019) e Nolan, Berzborn e Fernandez-Grande (2019), dentre outros.

O espectro do número de onda é proveniente da premissa de que o campo sonoro nos arredores de um certo ponto com posição $\mathbf{r}_m = (x_m, y_m, z_m)$ pode ser representado pela sobreposição de ondas planas com direção indicada por $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$, que é conhecido como vetor do número de onda (NOLAN *et al.* 2018). Assim, aplicando uma Transformada Inversa Tridimensional de Fourier à representação do campo por ondas planas, obtém-se a Equação (10) (NOLAN *et al.* 2018), escrita como

$$p(\mathbf{r}_m) = \iiint_{-\infty}^{+\infty} P(\mathbf{k}) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} d\mathbf{k} \quad (10)$$

na qual $p(\mathbf{r}_m)$ é a pressão sonora em função da posição \mathbf{r}_m , e $P(\mathbf{k})$ é o espectro do número de onda (também conhecido por *wavenumber spectrum* ou *angular spectrum*) (NOLAN *et al.* 2018).

O espectro do número de onda pode ser representado por meio da notação escrita na Equação (11), tal que

$$P(\mathbf{k}) = |P(\mathbf{k})| e^{j\phi(\mathbf{k})} \quad (11)$$

na qual $|P(\mathbf{k})|$ é o valor absoluto do espectro e $\phi(\mathbf{k})$ é sua fase (NOLAN *et al.* 2018). A dependência no tempo foi omitida, como é comum na representação de ondas por números complexos. Esse tipo de abordagem também é conhecido como decomposição em ondas planas (*plane wave decomposition*) (NOLAN; BERZBORN; FERNANDEZ-GRANDE, 2019).

Outra relação importante é a aproximação discreta da relação entre a pressão avaliada em um ponto e o espectro bidimensional do número de onda. Nolan *et al.* (2019) descrevem essa relação por meio da Equação (12), que é

$$p(\mathbf{r}_m) \approx \sum_{l=1}^L \tilde{P}(\mathbf{k}_l) e^{-j\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r}_m} \quad (12)$$

na qual $\tilde{P}(\mathbf{k}_l)$ é o espectro do número de onda \mathbf{k}_l , l é o índice que identifica cada onda plana que compõe o campo acústico, e L é a quantidade dessas ondas (que pode ser interpretado como uma resolução da representação de um campo real pelas ondas planas).

Dessa forma, pode-se expressar a relação exposta na Equação (12) em forma de matrizes, como na Equação (13) (NOLAN *et al.* 2019), escrita como

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} e^{-j\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1} & e^{-j\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_1} & \dots & e^{-j\mathbf{k}_L \cdot \mathbf{r}_1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ e^{-j\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_M} & e^{-j\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_M} & \dots & e^{-j\mathbf{k}_L \cdot \mathbf{r}_M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P}(\mathbf{k}_1) \\ \tilde{P}(\mathbf{k}_2) \\ \vdots \\ \tilde{P}(\mathbf{k}_L) \end{bmatrix} \quad (13)$$

que é a expansão matricial da Equação (12), sendo \mathbf{p} um vetor de pressões (expressas no domínio dos números complexos) com comprimento M , que corresponde à quantidade de posições discretas onde \mathbf{p} é medido.

A Equação (13) pode ser escrita de forma simples, conforme a Equação (14) (NOLAN *et al.* 2019), que é

$$\mathbf{p} = \mathbf{H} \mathbf{x} \quad (14)$$

na qual \mathbf{H} é a matrix $M \times L$ contendo as funções de onda plana $e^{-j\mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r}_m}$, conhecida como *transfer matrix* ou *sensing matrix*, e \mathbf{x} é o vetor contendo $\tilde{P}(\mathbf{k}_l)$.

Na prática, a Equação (13) é utilizada para obter o espectro do número de onda $\tilde{P}(\mathbf{k}_l)$ a partir de amostras de pressão em M pontos distintos (NOLAN *et al.* 2019). Vale ressaltar que não há restrição matemática alguma para a escolha da disposição espacial dos M pontos de amostragem (NOLAN *et al.* 2019). Isso propicia que as medições possam ser feitas de uma maneira mais conveniente ou apropriada com relação ao estudo onde há a aplicação da decomposição em ondas planas, tais como, medições realizadas em pontos aleatórios de um volume (NOLAN *et al.* 2019), arranjo esférico de duas camadas (NOLAN; BERZBORN; FERNANDEZ-GRANDE, 2019; BERZBORN *et al.* 2019), arranjo de duas camadas planas etc.

Outro ponto que vale destaque é que a Equação (13) representa um problema “mal posto” (em inglês, *ill posed problem*) para a obtenção do espectro do número de onda. Problemas desse tipo usualmente são resolvidos por método dos mínimos quadrados, lançando mão de matrizes pseudo-inversas regularizadas (regularização Tikhonov sendo o método mais utilizado) (FERNANDEZ-GRANDE, 2016). A aplicação desses métodos estão além do escopo deste trabalho, porém é devido a eles que se obtém uma estimativa apropriada

de \mathbf{x} , denotada por $\hat{\mathbf{x}}$, de importância prática para os procedimentos descritos nas seções 2.5 e 2.6.

A abordagem pelo espectro do número de onda possui limitações, sendo a maior delas o fato de que para que a hipótese do campo sonoro ser composto pela sobreposição de ondas planas, a região avaliada deve estar longe da fonte sonora e de quaisquer elementos difratores (NOLAN; BERZBORN; FERNANDEZ-GRANDE, 2019). Isso se deve ao fato de que perto de fontes primárias (fonte sonora) e secundárias (superfícies) a frente de onda é acentuadamente esférica, diferente de pontos distantes, onde a curvatura da frente de onda é desprezível (JACOBSEN; JUHL, 2013).

2.5 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DEPENDENTE DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

A solução do problema inverso da Equação (14) para \mathbf{x} é indicada por $\hat{\mathbf{x}}$, sendo que $\hat{\mathbf{x}}$ fornece um vetor com estimativas para os coeficientes complexos $\tilde{P}(\mathbf{k})$, que é chamado de espectro do número de onda (NOLAN *et al.*, 2019). O vetor do número de onda \mathbf{k} é um indicador da direção de propagação das ondas individuais que compõem o campo sonoro. Sendo assim, pode-se desenhar um gráfico do módulo de $\tilde{P}(\mathbf{k})$ em função das componentes de \mathbf{k} (k_x , k_y e k_z). Dessa forma, pode-se separar o gráfico, que tem formato esférico, em dois hemisférios: o hemisfério inferior contém as direções incidentes na amostra e o hemisfério superior contém as direções refletidas na amostra (NOLAN *et al.* 2019). Assim, pode-se escrever as componentes que originalmente seriam funções de \mathbf{k} como funções de dois ângulos, ou seja, converter de coordenadas cartesianas para coordenadas esféricas, com θ sendo o ângulo de incidência da frente de onda e ϕ como o azimute.

O coeficiente de absorção em função do ângulo de incidência é dado na Equação (15) (NOLAN *et al.*, 2019) pela razão entre as potências absorvida e incidente, de forma que

$$\alpha(\theta) = \frac{W_{\text{abs}}(\theta)}{W_{\text{inc}}(\theta)} \quad (15)$$

na qual $\alpha(\theta)$ é o coeficiente de absorção, $W_{\text{abs}}(\theta)$ é a potência média³ absorvida pela superfície, $W_{\text{inc}}(\theta)$ é a potência média incidente. Tendo em mente que a potência absorvida

³ Segundo Nolan *et al.* (2019) é importante utilizar as potências médias avaliadas em ϕ (azimute, de 0 a 2π) para evitar a ocorrência de resultados enviesados devido a ângulos sem incidência. A fundamentação que embasa essa ideia foi desenvolvida por Schroeder (1959), mas foge ao escopo desta monografia.

corresponde à diferença entre a potência média incidente e a potência média refletida, a Equação (15) pode ser reescrita conforme a Equação (16) (NOLAN *et al.*, 2019), de forma que

$$\alpha(\theta) = \frac{W_{\text{inc}}(\theta) - W_{\text{ref}}(\theta)}{W_{\text{inc}}(\theta)} = 1 - \frac{W_{\text{ref}}(\theta)}{W_{\text{inc}}(\theta)} \quad (16)$$

na qual $W_{\text{ref}}(\theta)$ é a potência média refletida.

2.6 RECONSTRUÇÃO DE UM CAMPO SONORO POR MEIO DE ARRANJOS

Uma aplicação derivada do procedimento descrito na Seção 2.5 é a reconstrução do campo sonoro em uma região desejada a partir da solução estimada $\hat{\mathbf{x}}$ (NOLAN *et al.* 2019). Isso significa que se pode obter um mapeamento da pressão sonora, velocidade das partículas incidentes e intensidade sonora na vizinhança da região onde se realizaram as medições (NOLAN *et al.* 2019). Esse processo é chamado de *spherical equivalent source method* (S-ESM) (FERNANDEZ-GRANDE, 2016).

A reconstrução da pressão sonora se dá por meio da Equação (17) (NOLAN *et al.* 2019), denotada por

$$\mathbf{p}_r = \mathbf{H}_r \hat{\mathbf{x}} \quad (17)$$

na qual \mathbf{p}_r é o vetor de dimensão K com as pressões sonoras complexas reconstruídas em K posições, \mathbf{H}_r é a matrix $K \times L$ de reconstrução, cujas entradas são as funções de onda plana avaliadas nos pontos r onde se deseja reconstruir a pressão sonora (NOLAN *et al.* 2019).

Tendo a pressão sonora, pode-se derivar as equações para a reconstrução da velocidade de partícula (pela equação de movimento de Euler) e intensidade sonora (ativa e reativa) conforme apresentadas nas Equações (18), (19) e (20), segundo Nolan *et al.* (2019), respectivamente

$$\mathbf{u}_r = \frac{-1}{j \omega \rho} \nabla \mathbf{H}_r \hat{\mathbf{x}} \quad (18)$$

$$\mathbf{I}_r = \frac{1}{2} \Re[\mathbf{p}_r \mathbf{u}_r^*] \quad (19)$$

$$\mathbf{J}_r = \frac{1}{2} \Im[\mathbf{p}_r \mathbf{u}_r^*] \quad (20)$$

nas quais \mathbf{u}_r é a velocidade de partícula, $\nabla \mathbf{H}_r$ é o gradiente da matriz de reconstrução, ω é a velocidade angular, ρ é a massa específica do ar, \mathbf{I}_r é a intensidade sonora ativa, \mathbf{J}_r é a

intensidade sonora reativa, e os operadores $()^*$, \Re , e \Im são o conjugado complexo, a parte real e a parte imaginária, respectivamente (NOLAN *et al.* 2019).

2.7 NOÇÕES BÁSICAS DE CINEMÁTICA DE ROBÔS

Esta Seção é dedicada a apresentar noções clássicas de cinemática direta e inversa de robôs e das notações matemáticas necessárias para entendê-las.

2.7.1 Transformações Homogêneas

Uma transformação homogênea (TH) é uma operação vital para a análise da cinemática de robôs, sendo representada por uma matriz 4×4 , na forma descrita na Equação (21),

$${}^A_B \mathbf{T}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} {}^A_B \mathbf{R}_{3 \times 3} & {}^A \mathbf{o}_{B_{3 \times 1}} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1_{1 \times 1} \end{bmatrix} \quad (21)$$

na qual ${}^A_B \mathbf{R}_{3 \times 3}$ é uma matriz de rotação, ${}^A \mathbf{o}_{B_{3 \times 1}}$ é um vetor indicando um ponto. A última linha de uma TH é sempre $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$ (CRAIG, 2005). Os índices A e B são o sistema de referência e o sistema descrito, respectivamente (CRAIG, 2005).

Uma transformação homogênea pode ser interpretada como:

- Um operador de mudança de coordenadas de um ponto ou vetor descrito em $\{B\}$ para seus respectivos em um sistema $\{A\}$;
- Uma descrição de um sistema de coordenadas $\{B\}$ do ponto de vista de outro sistema de coordenadas $\{A\}$;
- Uma transformação (essencialmente um movimento em termos de rotação sobre eixo e/ou translação) de um ponto, vetor ou de um sistema de coordenadas (CRAIG, 2005).

De maneira natural, existem transformações homogêneas inversas, representadas pela inversa da matriz, que invertem os papéis de sistema descrito e sistema de referência. Essas transformações podem ser concatenadas e, dessa forma, serem usadas para descrever sistemas complexos com referências em lugares convenientes – por exemplo, descrever a ponta de uma ferramenta acoplada a um manipulador robótico com relação à base do robô.

2.7.2 Cinemática Direta

A cinemática direta de um robô é a descrição da posição e orientação de uma ferramenta (no segmento final do robô) em função das variáveis de junta. As variáveis de junta dependem do tipo de junta empregada, sendo ângulos para juntas rotativas e distâncias para juntas prismáticas. Esses tipos de juntas são interessantes pois apresentam apenas um grau de liberdade, têm representação relativamente simples (de forma que juntas mais complexas podem ser analisadas como associações dessas juntas simples) e, por serem construtivamente simples, são as mais frequentemente encontradas em robôs reais.

Dessa maneira, a descrição do movimento do segmento final se dá por meio da multiplicação das transformações homogêneas que descrevem as posições e direções das juntas i com relação às juntas anteriores $i-1$, isto é, as transformações ao longo dos segmentos do robô em função das variáveis de junta. As TH de cada segmento (exceto o do efetuador, é apresentada na Seção 4.5) foram obtidas utilizando a notação de Denavit-Hartenberg Modificada (LAUS, 2017) e estão nas equações (22) a (26).

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\theta_1) & \text{cos}(\theta_1) & 0 & 0 \\ \text{cos}(\theta_1) & -\text{sen}(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \text{cos}(\theta_2) & -\text{sen}(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\theta_2) & -\text{cos}(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \text{cos}(\theta_3) & -\text{sen}(\theta_3) & 0 & a_2 \\ \text{sen}(\theta_3) & \text{cos}(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$${}^3_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\theta_4) & \text{cos}(\theta_4) & 0 & a_3 \\ -\text{cos}(\theta_4) & \text{sen}(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$${}^4_5\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \text{cos}(\theta_5) & -\text{sen}(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \text{sen}(\theta_4) & \text{cos}(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

nas quais $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4,$ e θ_5 são as variáveis de junta do robô, d_1, a_2 e a_3 são as dimensões dos respectivos segmentos. Estas equações são importantes pois são a partir delas que se pode obter a cinemática inversa do robô (Seção 2.6.3). A TH da referência do robô $\{0\}$ até o sistema de coordenadas do pulso $\{5\}$ corresponde à Equação (27)

$${}^0_5\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T}{}^1_2\mathbf{T}{}^2_3\mathbf{T}{}^3_4\mathbf{T}{}^4_5\mathbf{T} \quad (27)$$

cujos resultados em forma matricial serão omitidos em favor da brevidade do corpo do texto.

2.7.3 Cinemática Inversa

A cinemática inversa de um robô consiste em encontrar os valores das variáveis de junta de um robô para uma posição e orientação da ferramenta. De certa forma, é o procedimento que o robô faz internamente quando o usuário informa uma meta a ser atingida, cujo resultado são os valores das variáveis de junta correspondentes. Existem algumas considerações que podem ser feitas (LAUS, 2017):

- a meta (posição e orientação) possui mais de uma solução possível, ou seja, diferentes poses podem fornecer a mesma posição e orientação;
- a meta é inatingível ou “parcialmente atingível”, ou seja, o robô não tem alcance o suficiente ou não tem destreza para direcionar o efetuador corretamente;
- cada meta possui uma limitação na combinação de posições e direções, ou seja, o robô não possui regiões onde se pode posicionar a ferramenta em qualquer direção.

Robôs com menos de 6 graus de liberdade (como por exemplo, o *Mitsubishi RV-M1* utilizado neste trabalho que possui cinco graus de liberdade) implicam em casos como os do terceiro item. Sendo assim, é importante verificar, por meio da cinemática inversa, se as posições dos arrays gerados são atingíveis. O procedimento se dá por um algoritmo que calcula os ângulos de junta (o *Mitsubishi RV-M1* é composto de cinco juntas rotativas) e verifica se os valores calculados estão dentro dos limites de trabalho destes ângulos (detalhados na Seção 4.5).

As equações de cinemática inversa têm como entradas as três coordenadas do centro da placa no espaço, dadas por p_x, p_y e p_z , e a orientação dada por dois ângulos, β (arfagem ou *pitch*) e γ (rolamento ou *roll*). Dessa forma, as equações da cinemática inversa estão definidas nas equações (28) a (32) nas quais as notações $s_{123} = \text{sen}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ e $c_{123} = \text{cos}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ (CRAIG, 2005) são utilizadas afim de facilitar a compreensão das fórmulas.

$$\theta_1 = \begin{cases} \text{atan2}(p_x, p_y), & \text{se } p_y \neq 0 \\ \arccos\left(\frac{{}^0r_{11}}{\cos(\beta)}\right), & \text{se } p_y = 0 \end{cases} \quad (28)$$

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{(p_z - d_1 - d_6 s_\beta)^2 + (p_x s_1 + p_y c_1 - d_6 c_\beta)^2 - a_3^2 - a_2^2}{2a_2 a_3}\right) \quad (29)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\frac{(p_z - d_1 - d_6 s_\beta)(a_2 + a_3 c_3) - (p_x s_1 + p_y c_1 - d_6 c_\beta)a_3 s_3}{(p_x s_1 + p_y c_1 - d_6 c_\beta)(a_2 + a_3 c_3) + (p_z - d_1 - d_6 s_\beta)a_3 s_3}\right), \quad (30)$$

$$\text{tal que } w = (\theta_1 - d_6 \cos(\beta))^2 + (p_z - d_1 - d_6 \sin(\beta))^2, \quad c_3 = \frac{(w - a_2^2 - a_3^2)}{2a_2 a_3},$$

$$s_3 = -\sqrt{1 - c_3^2}$$

$$\theta_4 = \beta - \theta_2 - \theta_3 \quad (31)$$

$$\theta_5 = \begin{cases} -\gamma + \theta_1, & \text{se } \beta = 90^\circ, p_y = 0 \text{ e } p_x = 0 \\ -\gamma - \theta_1, & \text{se } \beta \neq 90^\circ, p_y = 0 \text{ e } p_x = 0 \\ -\gamma, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (32)$$

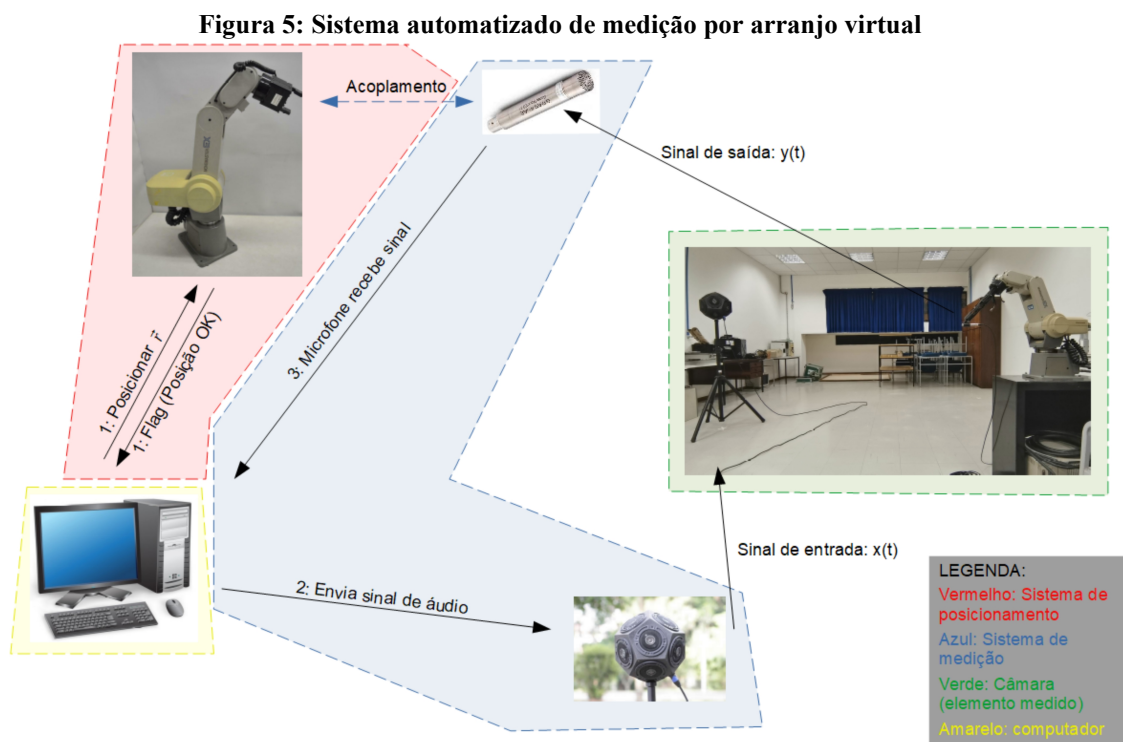
nas quais $d_1 = 300 \text{ mm}$, $a_2 = 250 \text{ mm}$ e $a_3 = 160 \text{ mm}$ (MITSUBISHI ELECTRICAL CORPORATION, 1989), e θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 , e θ_5 são os valores das variáveis de junta necessários para atingir p_x , p_y e p_z com orientação dada por β e γ .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta Seção se discorre sobre os materiais que foram utilizados para a realização do desenvolvimento do sistema, bem como considerações relacionadas a *software*, cálculos e ao sistema como um todo.

3.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA

O sistema pode ser dividido em dois grandes subsistemas distintos atuando em conjunto: o sistema de medição de RIR e o sistema de posicionamento do microfone. A Figura 5 mostra os componentes básicos que compõem o sistema, já subdividido, omitindo componentes de interfaceamento ou condicionamento de sinal (apresentados na Seção 3.2). As imagens dos equipamentos e da câmara são meramente ilustrativas.



Fonte: Autoria própria

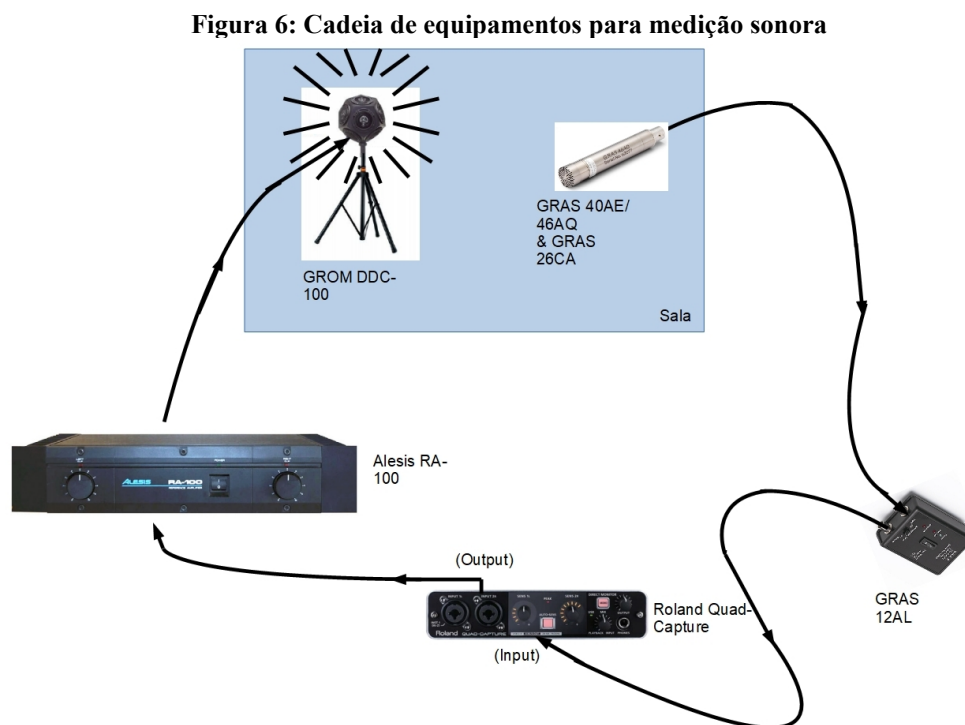
O fluxo do sinal de varredura e o fluxo da comunicação com o robô são apresentados na Seção 3.2 e Seção 3.7, respectivamente.

O sistema de medição foi considerado como composto por equipamentos necessários para a emissão e captação do sinal de varredura e da pressão sonora da sala, respectivamente, bem como equipamentos intermediários de interfaceamento, condicionamento de sinal e

alimentação. Este sistema e seus componentes serão apresentados na Seção 3.2. O sistema de posicionamento foi definido como equipamentos responsáveis pela movimentação e estabilidade do microfone em uma posição especificada do espaço, sendo apresentado na Seção 3.3. Como o computador é responsável pelo controle e operação das duas partes, foi considerado como um módulo a parte. A sala medida também não foi incluída em nenhum dos sistemas por ser o objeto de medição ao qual o sistema é aplicado.

3.2 MATERIAIS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE RIR

Para realização da medição da resposta ao impulso da sala, é necessária a medição da pressão sonora. Para tal, uma cadeia de equipamentos é utilizada tanto para excitação da sala quanto para a captação da pressão sonora do som resultante. A Figura 6 ilustra a disposição dos equipamentos.



Fonte: Autoria própria

A cadeia de medição da resposta ao impulso da sala começa com a interface de áudio. Este dispositivo é responsável por conectar, via *universal serial bus* (USB), o computador e os demais dispositivos da cadeia de medição. O *hardware* utilizado neste projeto é uma interface de áudio Roland *Quad-Capture*. Dos controles da interface, *a priori* só se utiliza o controle de sensibilidade do *input*, para realizar um ajuste fino e evitar que o

sinal captado sature devido a uma possível alta amplitude do sinal de varredura nos alto-falantes. As Figuras 7 e 8 mostram a parte frontal e posterior da placa Roland *Quad-Capture*.

Figura 7: Frente da Roland *Quad-Capture*



Fonte: Autoria própria

Figura 8: Parte posterior da Roland *Quad-Capture*



Fonte: Autoria própria

A partir da interface de áudio, a cadeia de medição é composta por duas ramificações distintas, o lado responsável por excitar a sala (ligado à saída da interface) e o lado responsável pela captação do som resultante da excitação da sala (ligado à entrada da interface). O sinal de varredura é enviado pela saída da interface de áudio e passa primeiramente por um amplificador de potência. Este tem a função de aumentar a amplitude do sinal para um nível apropriado para o processo de varredura. O amplificador utilizado nesse sistema é um Alesis RA-100. O único controle utilizado nesse equipamento é o controle de ganho do sinal de saída, para realizar um ajuste da amplitude do sinal afim de não saturar a entrada da interface de áudio.

Após o amplificador de potência, o sinal de varredura chega nos alto-falantes. O conjunto de alto-falantes utilizado para as medições de RIR é uma fonte sonora omnidirecional GROM DDC-100. A fonte omnidirecional é uma maneira de emular uma fonte sonora pontual que emite som de maneira esférica por meio da forma de um dodecaedro com alto-falantes nas faces.

Da emissão simultânea do *sweep* pelos *speakers* nas faces do dodecaedro, o som interage com o ambiente da sala medida. O som resultante referente a esse par de posições de emissor e receptor é captado em um determinado ponto por um microfone. Os microfones a serem utilizados são um microfone de alta precisão GRAS 46AQ de incidência aleatória e um microfone de alta precisão GRAS 40AE de campo livre. Ambos são do tipo *electret condenser microphone*, com ½” de diâmetro e foram selecionados por possuir características apropriadas de microfones de medição como alta relação sinal-ruído e resposta em frequência aproximadamente plana. As respostas em frequência dos microfones estão no Anexo A. Os microfones operam acoplados a um pré-amplificador GRAS 26CA que eleva o sinal captado a um nível detectável pela placa de captura. A Figura 9 mostra o microfone GRAS 40AE e o pré-amplificador GRAS 26CA montados (a aparência de ambos GRAS 40AE e GRAS 46AQ é praticamente igual). A utilização de um ou outro microfone foi dependente da disponibilidade no momento dos experimentos (Seções 5.1 e 5.2).

Após o sinal ser captado, ele passa por um módulo condicionador de sinal que alimenta o conjunto do microfone e pré-amplificador. Nesse projeto, o módulo utilizado é um GRAS 12AL, mostrado na Figura 10. Por fim, o sinal chega na entrada da placa de captura Roland *Quad-Capture*.

Além do hardware citado, entre os diversos componentes há o cabeamento por onde os sinais passam. Vários tipos de conector são utilizados, dentre os quais os do tipo *Bayonet Neill Concelman* (BNC) e o P10.

Figura 9: Microfone GRAS 40AE e pré-amplificador GRAS 26CA



Fonte: Autoria própria

Figura 10: Módulo de potência GRAS 12AL



Fonte: Autoria própria

3.3 MATERIAIS DO SISTEMA DE POSICIONAMENTO

O sistema de posicionamento essencialmente consiste de um braço robótico, do acoplamento do microfone ao braço e unidades de controle associadas. O conjunto a ser utilizado para esse subsistema é o robô *Mitsubishi* RV-M1 mostrado na Figura 11, composto pelo braço robótico propriamente dito, a unidade de *drive*, responsável por acionar os servomotores das juntas do braço, e pelo *teaching box* (controlador manual do robô). A unidade de acionamento é ligada ao computador pessoal (*personal computer*, PC) via um conversor RS232-USB da marca Comm 5. A comunicação com o robô é feita utilizando protocolo *serial*, por meio do próprio ambiente do MATLAB. O robô é parte da estrutura oficial do Grupo de Automação de Sistemas de Manufatura (GASIM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) do Câmpus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

O *Mitsubishi* RV-M1 possui cinco juntas, o que implica a existência de cinco graus de liberdade. Isso representa um limitante nos posicionamentos possíveis (definidos por uma posição no espaço e uma direção). Dessa forma, é necessária uma análise da validade das posições de medições por meio da cinemática inversa do robô (o processo está detalhado na Seção 4.6).

O acoplamento entre o robô e o microfone deve ser rígido e evitar vibrações. A solução mais apropriada para isso é o acoplamento ser preso diretamente na ponta do robô (onde geralmente ficaria uma garra). O suporte que acopla o microfone ao robô está detalhado na Seção 4.5.

Figura 11: Robô *Mitsubishi RV-M1*



Fonte: Autoria própria

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PARÂMETROS DE AMOSTRAGEM DA RESPOSTA AO IMPULSO DA SALA

Para realização da amostragem da resposta da sala, é necessário definir os parâmetros que regem esse processo. Pelo teorema da amostragem, a frequência de amostragem (em inglês *sampling rate*) deve ser selecionada acima de duas vezes a maior frequência do sinal medido (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010), afim de evitar o fenômeno de *aliasing*, cujo efeito é a representação incorreta de um sinal devido a subamostragem (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010). Como o limite superior da faixa de vibrações audíveis para o ouvido humano é em torno de 20 kHz (JACOBSEN; JUHL, 2013), é comum equipamentos comerciais, como a placa Roland *Quad-Capture*, apresentarem suporte para frequências a partir dos 40 kHz (como os valores clássicos 44,1 kHz, 48 kHz e 96 kHz). O *sampling rate* é informado por meio da propriedade *samplingRate* da classe *itaMSTF*.

Quanto ao número de pontos para o cálculo da FFT – N da Equação (7) – este é definido por uma propriedade da classe *itaMSTF* chamada *fftDegree*. O valor de *fftDegree* é a potência de 2 pela qual se calcula o número de pontos N , relação expressa na Equação (33), tendo em mente que o cálculo da FFT depende de simetrias que dependem de quantidades de pontos iguais a potências de 2 (MANOLAKIS; INGLE, 2011). Vale ressaltar que ambos os parâmetros comentados nesta Seção estão relacionados com o tempo de duração do *sweep* por meio da Equação (34).

$$N = 2^x \quad (33)$$

$$\Delta T = \frac{N}{f_s} = \frac{2^x}{f_s} \quad (34)$$

na qual N é o comprimento da DFT, f_s é a taxa de amostragem (em hertz), x é o valor de *fftDegree*, e ΔT é a duração do *sweep* em segundos.

3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A CALIBRAÇÃO E COMPENSAÇÃO DA LATÊNCIA NA AQUISIÇÃO DE SINAL SONORO

Devido às características espaciais das medições realizadas, é importante compensar a latência causada pelos componentes digitais do subsistema de medição, mais especificamente pela placa de captura de áudio. É possível fazer isso utilizando a rotina de calibração implementada na *ITA Toolbox* (BERZBORN *et al.* 2017), ao se conectar a entrada e a saída utilizadas da Roland *Quad-Capture* e executando o método *calibrate* da classe relacionada a medição de função de transferência (*itaMSTF*). Esse procedimento calibra o zero da escala (para medição de SPL absoluto) e também compensa a latência decorrente das conversões analógico-digital e digital-analógico. Esse procedimento é necessário somente na primeira utilização ou quando se muda a placa de áudio do sistema (desde que o objeto da classe *itaMSTF* seja salvo e que se utilize a instância salva correta).

3.6 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DE RIR

Como apresentado na Seção 2.3, o processo de obtenção da RIR a ser utilizado por esse sistema se dá pela deconvolução do sinal de saída pelo sinal de entrada. Em termos de *software*, isso é feito por meio do método *run* da classe *itaMSTF*. Esse procedimento realiza a emissão do sinal de varredura pelo alto falante e a captura simultânea pelo microfone e o subsequente cálculo da RTF e RIR. O resultado da conta é salvo em um objeto da classe *itaAudio* que pode ser salvo em diversos formatos. Escolheu-se os formatos *waveform audio format* (.WAV) e o formato proprietário da *ITA Toolbox* (.ITA). A duração do sinal para a medição de cada ponto depende da combinação dos parâmetros apresentados na Seção 3.4, e do tipo de operação de convolução utilizada, já que a convolução linear possui um sinal em que o tempo total é a duração do *sweep* mais a mesma quantidade de tempo preenchida por zeros.

3.7 COMUNICAÇÃO ENTRE O COMPUTADOR E O ROBÔ

A comunicação entre o computador e o robô *Mitsubishi RV-M1* é feita por meio de comunicação serial RS232. Este modelo de braço robótico possui comandos que podem ser enviados diretamente via serial para executar diversas funções (MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION, 1989). O Quadro 1 apresenta as descrições das funções utilizadas neste projeto.

Quadro 1: Lista de funções do robô *Mitsubishi RV-M1*

Função	Descrição
MO (“move”)	Movimenta a ferramenta para uma posição salva no robô
MP (“move position”)	Movimenta o robô para as coordenadas x , y e z , com inclinação de chegada dada por β e γ
NT (“nest”)	Movimenta o robô para a posição de zero-máquina
TL (“tool length”)	Indica para o robô um offset de T mm no eixo da ferramenta
ER (“error read”)	Pede para o robô informar o tipo de erro
WH (“where”)	Pergunta ao robô a posição atual da ferramenta
RS (“reset”)	Reinicia o estado de erro do robô

Fonte: Autoria própria

4 DESENVOLVIMENTO

Esta Seção é dedicada à expansão de questões referentes ao desenvolvimento prático do sistema automatizado de medição de RTF, bem como o planejamento dos testes, problemas encontrados e as limitações do sistema.

4.1 LIMITAÇÕES DO SISTEMA

Devido à natureza sequencial das medições no sistema, não se pode computar resultados em tempo real. Além disso, esse sistema é apropriado somente para aplicações de localização de fontes se estas forem fixas e em regime permanente.

Devido ao robô possuir apenas 5 graus de liberdade, o posicionamento do microfone fica limitado às posições atingíveis pelo robô. Dessa forma, a combinação da falta de destreza e do alcance do robô limitam os arranjos esféricos em tamanho e em forma, sendo por vezes apenas possível atingir pontos em certas regiões da casca da esfera ao invés da esfera completa.

Dessa maneira, os formatos de arranjo que consistentemente se pode utilizar são os arranjos aleatórios e esféricos de direção constante (apontam sempre na direção de um plano) e os arranjos que apontam para um ponto fixo (por exemplo, a fonte sonora). Evidentemente, devido às limitações físicas inerentes ao equipamento, existe um trabalho de encontrar *arrays* que sejam completamente representados pelo robô. Dessa forma, a utilização do sistema foi separada em duas fases: a do projeto e preparação da medição, na qual o arranjo é selecionado de maneira que o mesmo seja reproduzível, e a realização da medição em si, na qual o arranjo deve ser lido pelo código e reproduzido pelo robô.

Vale ressaltar também que apesar da natureza transparente dos arranjos virtuais, o fato de existir um braço robótico (formado por volumes irregulares) relativamente próximo da região do arranjo pode influenciar alguns resultados medidos (por exemplo, algumas reflexões espúrias na Seção 5.2.4 podem ser atribuídas a componentes do braço robótico). Em contrapartida, os arranjos esféricos rígidos possuem dimensões conhecidas e difração sonora conhecida, e dessa forma seus efeitos podem ser mais facilmente quantificados.

4.2 ESCOLHA DE PARÂMETROS E DO ARRANJO PELO USUÁRIO

Decidiu-se deixar alguns parâmetros para definição do usuário, como o tipo da convolução utilizada, a frequência de amostragem e o comprimento da FFT como parâmetros. Esses parâmetros estão salvos na função *setupMSTF*, que sempre é chamada pelo *script* de medição. O usuário do sistema também pode escolher um nome padrão para os arquivos gerados pelas medições.

A disposição e/ou quantidade de pontos de amostragem do arranjo também são parâmetros selecionáveis pelo usuário, sendo que essas condições são definidas durante o projeto do arranjo. Isso permite que se opte por eliminar posições inalcançáveis pelo robô ou testar diversos arranjos até que se consiga uma versão que possa ser reproduzida por completo. Essa verificação é feita no momento em que se executam os códigos de geração de arranjo (apresentados na Seção 4.5). Os *arrays* são salvos como arquivos de *workspace* do MATLAB pela praticidade de implementação no código de medição.

4.3 BIBLIOTECA DE FUNÇÕES

Algumas funções de MATLAB foram escritas para facilitar a integração entre os sistemas por meio de *scripts*. O Quadro 2 apresenta uma breve descrição de cada função.

As funções mais importantes do Quadro 2 são *moveCoor*, *ntRobot*, *toolLenght*, *moveto* e *readPosition*, pois são responsáveis por controlar e verificar os movimentos. Na função *setupMSTF* se carregam os parâmetros da medição. As funções *errorRead* e *rsRobot* foram mais úteis do ponto de vista de auxiliar no desenvolvimento e encontrar e eliminar *bugs*. Todas as funções estão transcritas no Apêndice B.

Em adição às funções, foram escritas rotinas em MATLAB para geração dos arranjos e controle do sistema. A rotina de controle é apresentada na Seção 4.7, enquanto as rotinas de geração de arranjos são descritas nesta Seção. A transcrição na íntegra das rotinas está no Apêndice C. Três tipos de arranjos foram projetados:

- arranjo esférico por subdivisão geodésica de icosaedro com orientação constante de microfones;
- arranjo aleatório em um hexaedro com orientação constante de microfones;
- arranjo esférico por subdivisão geodésica de icosaedro com orientação dos microfones na direção da fonte.

Os casos tratados no Capítulo 5 utilizam os dois primeiros tipo de arranjos. O terceiro foi apenas testado, mas não foi necessário para as aplicações desejadas (cálculo do espectro do número de onda).

Para gerar o arranjo esférico foi utilizado um código de MATLAB escrito por Ward (2015) para gerar uma esfera por subdivisão esférica de um icosaedro. A subdivisão esférica de icosedros gera pontos bem distribuídos as superfície e dessa forma, é mais interessante para a geração de um arranjo de microfones do que uma subdivisão equiangular, por exemplo.

Quadro 2: Lista de funções criadas para controle e integração dos sistemas

Função	Argumentos	Saídas	Descrição
<i>setupMSTF</i>		<i>MS 1</i>	Carrega/cria a classe <i>itaMSTF</i> com os parâmetros desejados
<i>moveCoor</i>	$s, x, y, z, \beta, \gamma$		Movimenta o robô na serial s com as coordenadas x, y, z, β, γ
<i>ntRobot</i>	s		Movimenta o robô na serial s para a posição de zero-máquina
<i>toolLenght</i>	s, T		Indica para o robô um offset de T mm no eixo da ferramenta
<i>moveto</i>	s, pos		Movimenta o robô na serial s para uma posição pré-determinada do robô
<i>readPosition</i>	s	<i>msg</i>	Pergunta ao robô na serial s qual a posição da ferramenta e retorna uma <i>string</i> com as coordenadas x, y, z, β, γ
<i>errorRead</i>	s	<i>msg</i>	Reinicia o estado de erro do robô na serial s
<i>verifyPos</i>	$s, x, y, z, \beta, \gamma, \theta_1$	<i>msg</i>	Verifica a possibilidade da posição e orientação dadas por $x, y, z, \beta, \gamma, \theta_1$
<i>rsRobot</i>	s		Reseta o estado de erro do robô na serial s

Fonte: Autoria própria

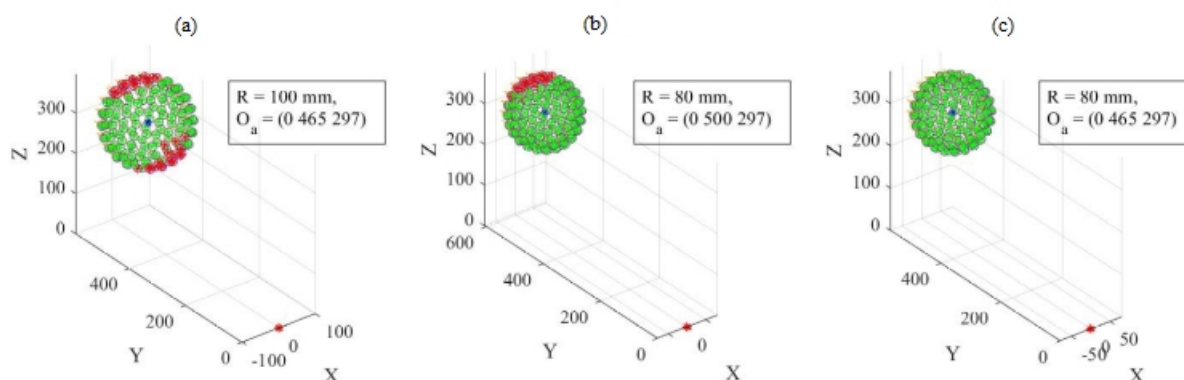
Vale também apresentar um exemplo de como identificar se o arranjo é possível ou impossível. A Figura 12 mostra três exemplos de arranjos, cujas dimensões são informadas na Tabela 1. Os dois primeiros – Figura 27 (a) e (b) – são arranjos com posições impossíveis (marcadas em vermelho) na Figura 12, causadas por diâmetro excessivo – Figura 27 (a) – e mal posicionamento – Figura 27 (b) – respectivamente. O terceiro arranjo – Figura 27 (c) – possui todas suas posições atingíveis pelo braço robótico (marcadas em verde), e corresponde ao arranjo esférico utilizado na Seção 5.2.

Tabela 1: Dimensões dos arranjos da Figura 13

Arranjo	Raio	Centro
<i>Esquerda</i>	100 mm	(0, 465, 297)
<i>Meio</i>	80 mm	(0, 500, 297)
<i>Direita</i>	80 mm	(0, 465, 297)

Fonte: Autoria própria

Figura 12: Exemplos de geração de arranjos esféricos



Fonte: Autoria própria

4.4 PLANEJAMENTO DOS TESTES

Para a realização dos testes é importante selecionar os parâmetros de amostragem e os parâmetros do arranjo, afim de gerar resultados relevantes sobre o funcionamento do sistema. Outro fator de interesse é que inicialmente os testes tenham uma duração relativamente curta (em torno de 1 h).

Como o microfone GRAS 46AQ mede pressão sonora com frequências até 20 kHz (GRAS SOUND & VIBRATION, 2019), a taxa de amostragem escolhida para os testes é 96 kHz (suportada pelos equipamentos da cadeia de medição). Se escolheu a deconvolução linear para executar os testes, devido ocorrer uma filtragem do ruído de fundo (inclusive potenciais ruídos causados pelo robô e seu gabinete) (MÜLLER; MASSARANI, 2001). Fatores como o comprimento da varredura (em segundos) e a ordem da FFT foram escolhidos de forma a obter relações sinal-ruído apropriadas aos métodos a serem empregados.

Os testes foram feitos no Laboratório de Robótica (sala EK-019) do GASIM do Câmpus Curitiba da UTFPR. Essa localização é conveniente pela proximidade da localização atual do robô e seu *hardware*, e pelo fluxo pequeno de pessoas. A sala possui aproximadamente 11,8 m × 5,3 m × 3,3 m e apresenta uma vasta variedade de itens como mobília e equipamentos, os quais apresentam diversos comportamentos com relação ao campo sonoro. Dessa forma, pode-se considerar a sala como um recinto levemente amortecido e, portanto, pode-se prever que o campo sonoro é composto por uma parcela de radiação direta e uma parcela reverberante. Assim, a posição da fonte deve ser preferencialmente selecionada de forma que na região da amostra a energia do campo reverberante seja maior que a energia do campo de incidência direta (KUTTRUFF, 2016). Essa situação está relacionada à distância crítica da sala, apresentada na Seção 5.1.

A amostra de absorção que foi utilizada nos testes (Seção 5.2) é composta por 15 placas de 0,6 m × 1,2 m de lã de vidro, que é um material muito comum em isolamento acústico e térmico de salas. As placas cobrem uma área de 10,8 m² e foram doadas pela empresa Relacus.

4.5 ACOPLAMENTO ENTRE O MICROFONE E O BRAÇO ROBÓTICO

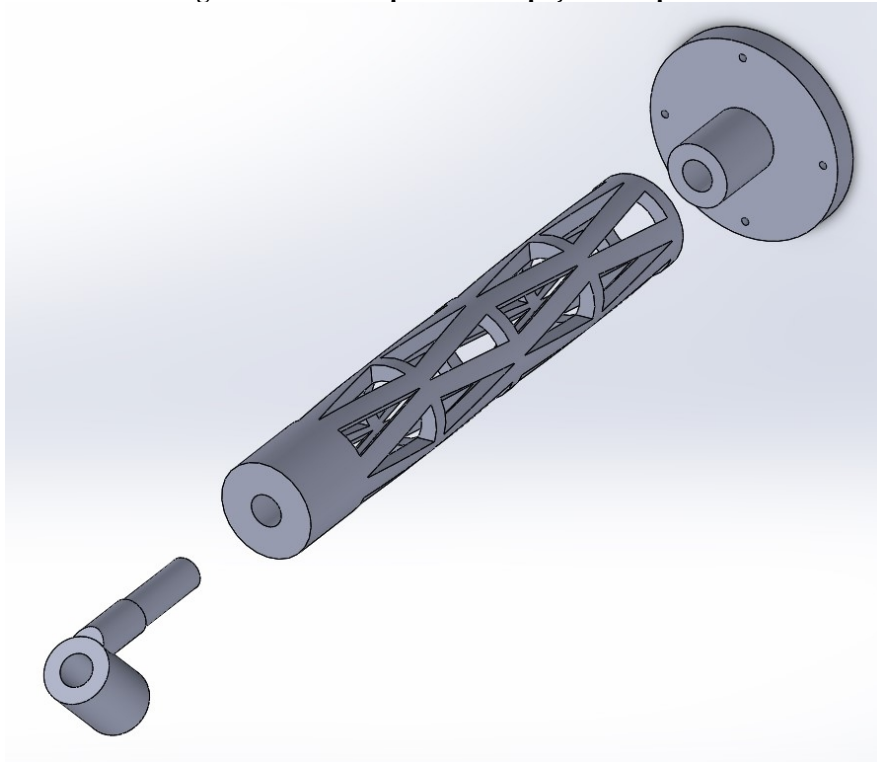
O acoplamento entre o microfone e o braço robótico foi planejado com os seguintes requisitos:

- Proporcionar um posicionamento rígido para que o microfone não fique solto dentro dele;
- Prever a passagem do cabeamento de alimentação e dados do conjunto microfone/pré-amplificador;
- Causar o mínimo de impacto no sistema da sala, isto é, ser acusticamente transparente;
- Deve ser acoplável ao braço robótico;
- Deve respeitar os limites de comprimento de ferramenta do robô (300 mm de comprimento a partir da face do punho do robô).

O *design* pensado consiste de três peças: um tubo treliçado de 240 mm de comprimento, uma base com 10 mm de espessura e um suporte inclinado em 45°. Em uma das pontas do tubo há um furo (com diâmetro maior de ½”) para encaixe do suporte inclinado. Da mesma maneira há um acoplamento cilíndrico no suporte inclinado para encaixe do microfone. A outra ponta tem um diâmetro de 1” (25,4 mm) e é encaixada na base, que tem um cilindro com o mesmo diâmetro. O suporte foi projetado para que o centro do microfone continue coincidente com o centro da junta 5 do robô (Seção 4.5).

A Figura 13 apresenta uma vista explodida dos componentes do suporte. Da esquerda para a direita: acoplamento inclinado, tubo treliçado e base. A Figura 14 mostra o suporte montado na placa do robô.

Figura 13: Vista explodida das peças do suporte



Fonte: Autoria própria

Figura 14: Suporte montado no robô



Fonte: Autoria própria

4.6 VERIFICAÇÃO DAS POSIÇÕES DE MEDIÇÃO POR CINEMÁTICA INVERSA

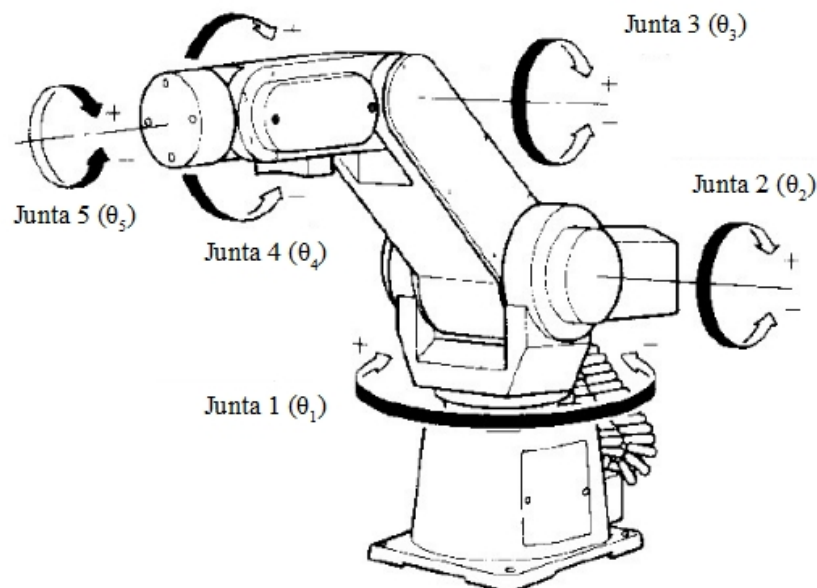
O robô possui cinco juntas rotativas, o que implica em cinco variáveis de junta que correspondem aos ângulos das juntas. A Figura 15 identifica as juntas J1 (cintura), J2 (ombro), J3 (cotovelo), J4 (arfagem/*pitch* do pulso), e J5 (rolamento/*roll* do pulso). Cada junta, e por conseguinte suas variáveis possui limites mínimos e máximos mostrados na Tabela 2 (LAUS, 2017; MITSUBISHI ELECTRICAL CORPORATION, 1989). Devido à falta de graus de liberdade (como apresentado na Seção 2.6.3), esse robô não consegue assumir qualquer orientação em todos os pontos alcançáveis e, portanto, se faz necessário verificar cada posição dos arranjos.

Tabela 2: Limites das variáveis de junta do *Mitsubishi RV-M1*

Junta	Variável	Mínimo	Máximo
1	θ_1	-150°	$+150^\circ$
2	θ_2	-30°	$+100^\circ$
3	θ_3	-110°	$+0^\circ$
4	θ_4	-90°	$+90^\circ$
5	θ_5	-180°	$+180^\circ$

Fonte: Autoria própria

Figura 15: Nomenclatura das juntas do robô e variáveis de junta associadas



Fonte: MELCO (1989)

O suporte com o microfone vai acoplado na placa do punho do robô, mantendo o microfone a uma distância de 289,39 mm e com uma inclinação de 45° do ponto de referência. Como o ponto central do microfone fica sobre o eixo da junta 5, pode-se utilizar o comando “TL” para informar o comprimento da ferramenta para o robô e, dessa forma, pode-se informar a própria posição cartesiana do arranjo para o robô. Assim, apenas é necessário calcular os ângulos β e γ .

Para calcular β e γ é necessário calcular a TH que ajusta o sistema de coordenadas do robô para um sistema do microfone. Isso é feito por meio das equações (35) e (36).

$${}^5_M T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\theta_1) & -\text{sen}(-\theta_1) & 0 & 0 \\ \text{sen}(-\theta_1) & \cos(-\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\beta) & -\text{sen}(-\beta) & 0 \\ 0 & \text{sen}(-\beta) & \cos(-\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\gamma) & 0 & \text{sen}(-\gamma) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen}(-\gamma) & 0 & \cos(-\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$${}^5_M T = \begin{bmatrix} c_\gamma c_1 + s_\beta s_\gamma s_1 & s_1 \left(\frac{\sqrt{2}c_\beta + \sqrt{2}c_\gamma s_\beta}{2} \right) - \frac{\sqrt{2}s_\gamma c_1}{2} & -s_1 \left(\frac{\sqrt{2}c_\beta - \sqrt{2}c_\gamma s_\beta}{2} \right) - \frac{\sqrt{2}s_\gamma c_1}{2} & x \\ s_\beta s_\gamma c_1 - c_\gamma s_1 & c_1 \left(\frac{\sqrt{2}c_\beta + \sqrt{2}c_\gamma s_\beta}{2} \right) + \frac{\sqrt{2}s_\gamma s_1}{2} & \frac{\sqrt{2}s_\gamma s_1}{2} - c_1 \left(\frac{\sqrt{2}c_\beta - \sqrt{2}c_\gamma s_\beta}{2} \right) & y \\ c_\beta s_\gamma & \frac{\sqrt{2}c_\beta c_\gamma}{2} - \frac{\sqrt{2}s_\beta}{2} & \frac{\sqrt{2}s_\beta}{2} + \frac{\sqrt{2}c_\beta c_\gamma}{2} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

na qual β e γ são os ângulos desejados e θ_1 é o ângulo da junta J1. A Equação (36) foi escrita seguindo a mesma notação da Seção 2.7.3, afim de facilitar sua compreensão. Na Equação (36), os termos não nulos da terceira coluna correspondem às coordenadas da direção do microfone (versor \hat{k} do sistemas de coordenadas {5}) com relação ao sistema de coordenadas do robô. As coordenadas da direção do microfone chamar-se-ão i_m , j_m e k_m .

Assim, ao se resolver o sistema de equações para as funções trigonométricas $\text{sen}(\gamma)$ e $\tan(\beta)$ em função de i_m , j_m , k_m e θ_1 , obtém-se as equações (37) e (38).

$$\text{sen}(\gamma) = \sqrt{2}(j_m \text{sen}(\theta_1) - i_m \cos(\theta_1)) \quad (37)$$

$$\tan(\beta) = \frac{k_m + j_m \cos(\theta_1) \cos(\theta_1) + i_m \cos(\gamma) \text{sen}(\theta_1)}{j_m \cos(\theta_1) + i_m \text{sen}(\theta_1) - k_m \cos(\gamma)} \quad (38)$$

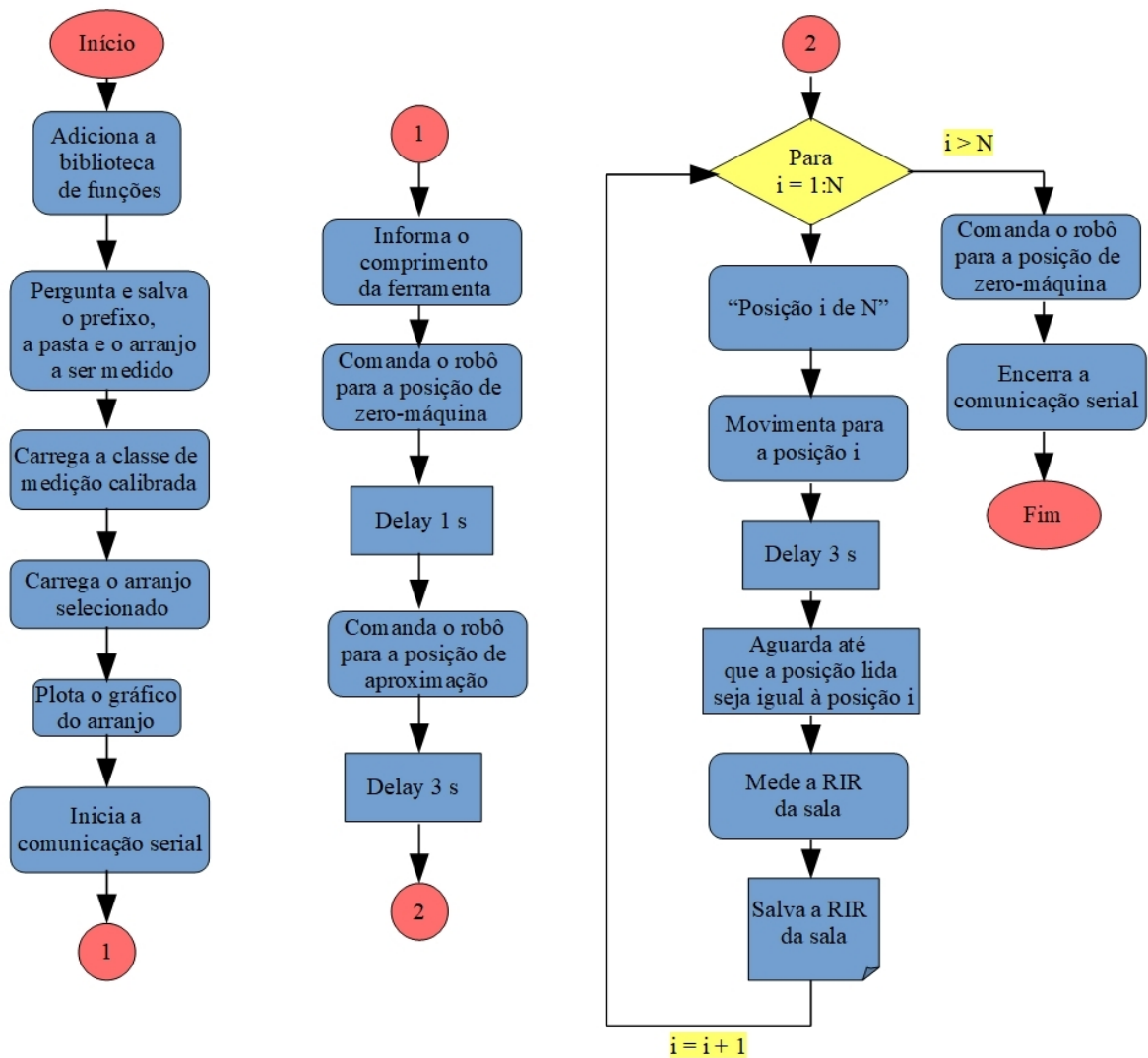
Dessa maneira, ao se resolver as equações (37) e (38) para β e γ respectivamente, obtém-se suas expressões em função de i_m , j_m , k_m e θ_1 . Vale ressaltar que ambas as equações retornam duas soluções possíveis.

Assim, utiliza-se a função *verifyPos*, como escrita nos Quadros 11 e 12 no Apêndice B, para calcular θ_2 , θ_3 , θ_4 e θ_5 a partir dos valores de x , y , z , θ_1 , β e γ e verificar se os ângulos de junta do robô estão dentro dos intervalos de funcionamento.

4.7 CÓDIGO DE CONTROLE DO SISTEMA

O código de controle do sistema foi escrito em MATLAB. A transcrição completa do código está no Apêndice C. O sequenciamento de operações é descrito pelo fluxograma da Figura 16.

Figura 16: Fluxograma do processo de medição



Fonte: Autoria própria

Após o carregamento de itens como o comprimento da ferramenta, a instância salva da classe de medição de RTF, e o arquivo do arranjo, o robô é comandado para a posição de

zero-máquina (posição onde todos os servomotores estão em seus limites mínimos) por uma questão de boa prática, visto que a ativação dos sensores de fim de curso dos motores evita problemas de posicionamento. Após isso, há um *delay* de 1 s e então o robô é comandado para a posição de aproximação (para evitar que o robô tente executar uma trajetória impossível entre o zero-máquina e a posição de medição). Após isso há um atraso de 3 s para estabilização do robô e então ele começa a percorrer as posições do arranjo, sempre com 3 s para estabilização antes do início da varredura. Após finalizado o percurso do arranjo, o robô retorna para a posição de zero-máquina e o processo finaliza.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo se dedica a apresentar os procedimentos realizados e propor discussões acerca de seus resultados.

5.1 DETERMINAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DA SALA

Diversas características interessantes da sala podem ser estimadas utilizando o sistema de medição de resposta ao impulso. Essas determinações são importantes pois permitem uma previsão do comportamento acústico da sala. Além das próprias RTFs e RIRs que podem ser extraídas de diversas combinações de posições fonte-microfone, outros fatores como tempo de reverberação, distância crítica e frequência de Schroeder são por si mesmos potenciais fontes de informação.

Os parâmetros para a varredura exponencial para medição das respostas ao impulso da sala estão descritos na Tabela 3. Os parâmetros que afetam a duração da varredura foram escolhidos de forma que ocorresse um relação sinal-ruído apropriada para o cálculo do tempo de reverberação em uma faixa de 100 Hz a 4 kHz. A partir das RIR medidas, calculam-se os valores do tempo de reverberação (nesse caso indicado por T_{20} pois usa o trecho do decaimento entre -5 e -25 dB para calcular o tempo de um decaimento de 60 dB) nas bandas desejadas. O microfone utilizado nestas medições foi o GRAS 46AQ, de campo difuso.

Tabela 3: Parâmetros selecionados para a medição da distância crítica da sala

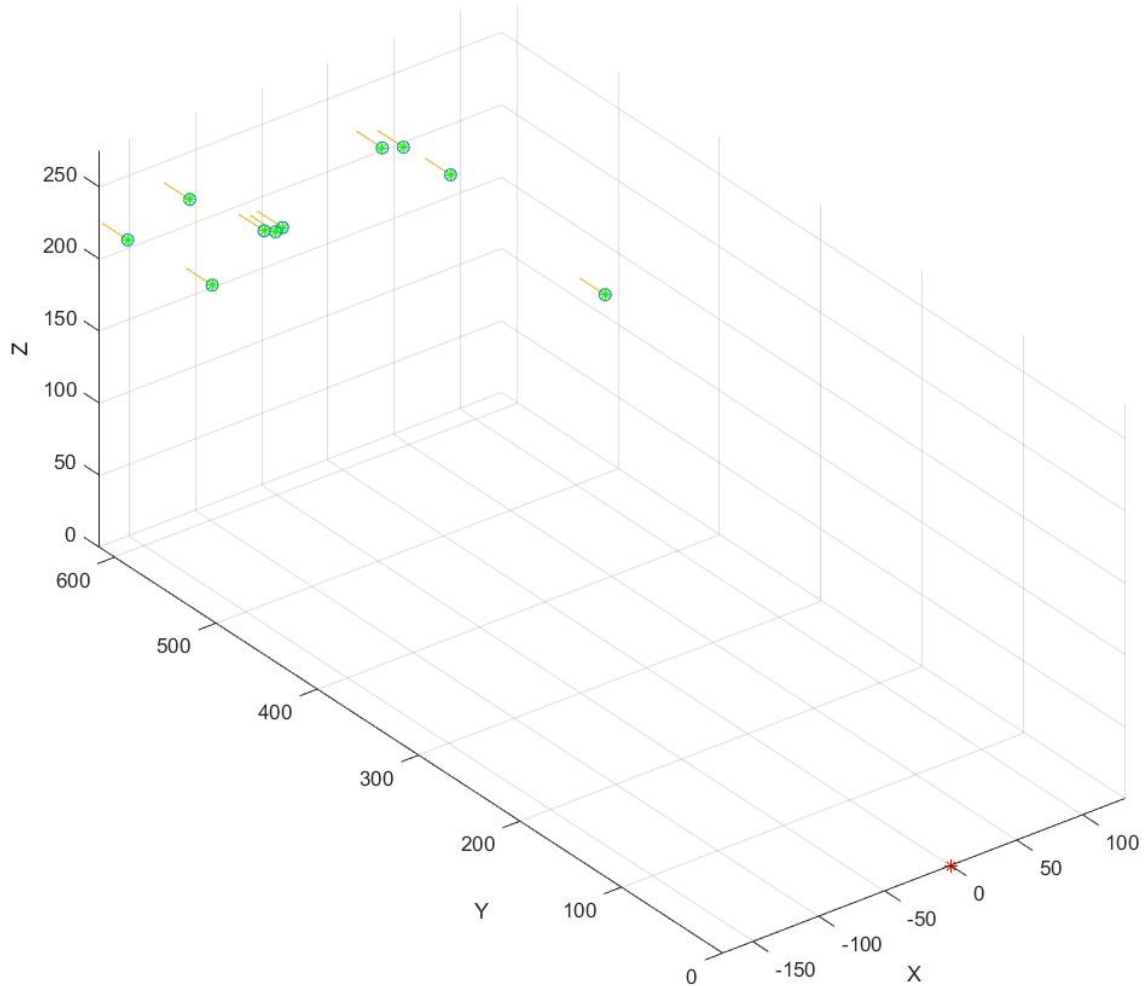
Parâmetro	Símbolo	Valor
Frequência de amostragem	f_s	96000 Hz
<i>fftDegree</i>	x	20
Comprimento da FFT	N	1048576
Duração do <i>sweep</i>	ΔT	10,92 s
Frequência inicial da varredura	f_i	20 Hz
Frequência final da varredura	f_f	20000 Hz

Fonte: Autoria própria

As RIRs foram medidas entre 10 posições de um arranjo aleatório e 3 posições de fonte sonora. O arranjo aleatório tem seus pontos apresentados na Figura 17, em verde. Os

versores de direção da ponta do microfone estão representados em amarelo. Em vermelho está marcado o referencial do robô ($x = y = z = 0$).

Figura 17: Esquema de um arranjo de 10 posições



Fonte: Autoria própria

Dessa forma, após as medições de cada RIR, seus tempos de reverberação são calculados para cada banda de terço de oitava, por meio de um algoritmo já implementado na *ITA Toolbox*. Desses valores calculados, extraem-se as médias para cada banda.

A distância crítica da sala corresponde à distância a partir da fonte na qual o campo sonoro diretamente incidente e o campo sonoro reverberante possuem a mesma densidade de energia (KUTTRUFF, 2017). Kuttruff (2017) apresenta uma maneira de calcular a distância crítica por meio da Equação (39).

$$r_c = \left(\frac{A}{16\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 0,1 \left(\frac{V}{\pi T_{rev}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

na qual A é a área total de absorção, V é o volume da sala e T_{rev} é o tempo de reverberação.

Vale ressaltar que a Equação (39) é válida para uma fonte perfeitamente omnidirecional. A fonte sonora GROM DDC-100, por ser um equipamento real, não é perfeitamente omnidirecional e isso deve ser levado em consideração na hora de analisar os resultados. É uma premissa comum pensar que, além da distância crítica, não há diferença sensível entre as duas parcelas do campo sonoro, do ponto de vista do microfone, e pode-se desconsiderar a incidência direta. Dessa forma, esta é uma característica interessante do ponto de vista do planejamento de outros testes.

A distância crítica é estimada por meio da Equação (39), a partir do menor tempo de reverberação médio avaliado banda a banda. O tempo de reverberação da sala é medido para 30 pares de pontos fonte/receptor diferentes – três posições da fonte e dez posições do transdutor. A Tabela 4 apresenta os pontos de referência (centro do dodecaedro) das posições que a fonte sonora assume.

Assim, pode-se obter uma estimativa da distância crítica, utilizando o menor dos valores de T_{20} apresentados no Apêndice A. Os T_{20} médios calculados para banda de terço de oitava entre 125 Hz e 8000 Hz são mostrados na Figura 18 para efeitos de comparação, sendo representados pelas barras em azul. O valor médio do T_{20} mínimo é aproximadamente igual a 0,5 s, correspondente à banda dos 155 Hz. Utilizando-se deste valor, das dimensões da sala (11,8 m \times 5,3 m \times 3,3 m) e da Equação (39), a distância crítica estimada da sala é aproximadamente 1,2 m.

Tabela 4: Posições da fonte sonora

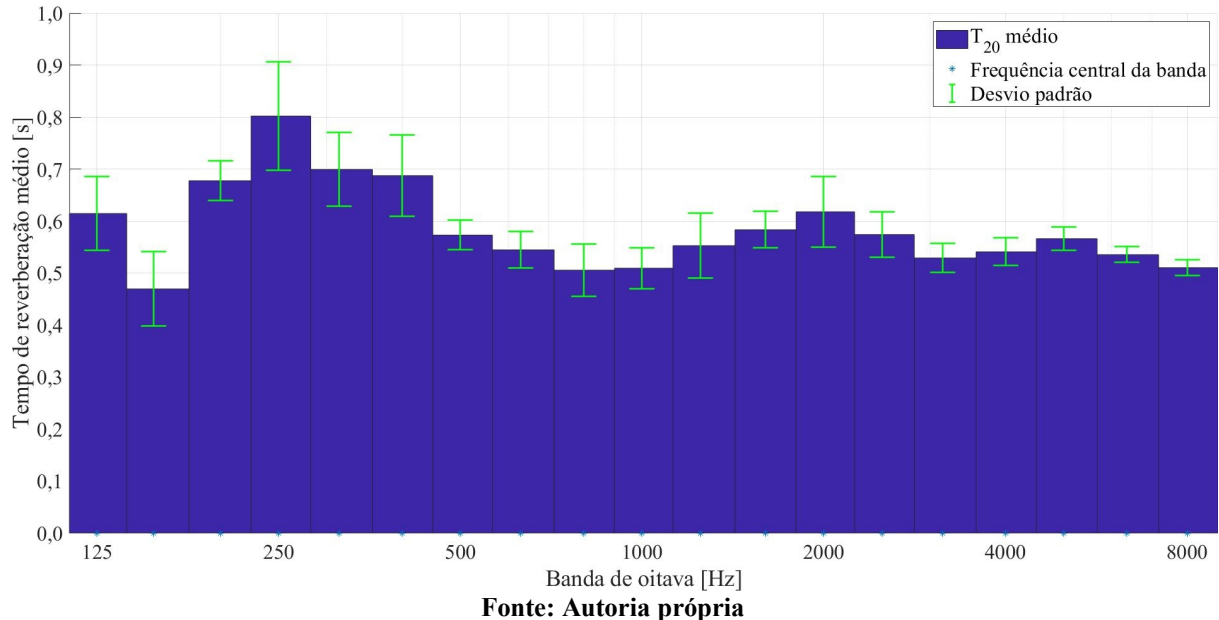
Posição	x	y	z
1	- 3,14 m	1,76 m	1,02 m
2	2,85 m	- 0,62 m	1,02 m
3	1,50 m	2,33 m	1,02 m

Fonte: Autoria própria

Vale ressaltar alguns aspectos do procedimento feito para calcular os tempos de reverberação. As formas de onda foram todas janeladas em 0,7282 s. Isso deve ser feito para evitar problemas no uso da função *ita_roomacoustics*, mais especificamente no que se refere à opção *subtractNoiseAndCutWithCorrection* do parâmetro *edcMethod*. A seleção da ordem da FFT foi baseada em testes anteriores, nos quais se constatou que varreduras mais curtas (efeito de ordens maiores) apresentavam faixas dinâmicas menores. A amplitude do sinal foi

ajustada de forma a utilizar o máximo possível da faixa dinâmica disponível do microfone, mas sem que ocorresse saturação do sinal captado ou outros efeitos adversos como amplificação do ruído de linha na fonte ou distorção dos alto-falantes.

Figura 18: Tempo de reverberação médio por banda de terço de oitava



As Figuras 19, 20 e 21 mostram sobreposições das funções de transferência entre o transdutor e a fonte separadas conforme a posição da fonte (posições 1, 2 e 3, respectivamente).

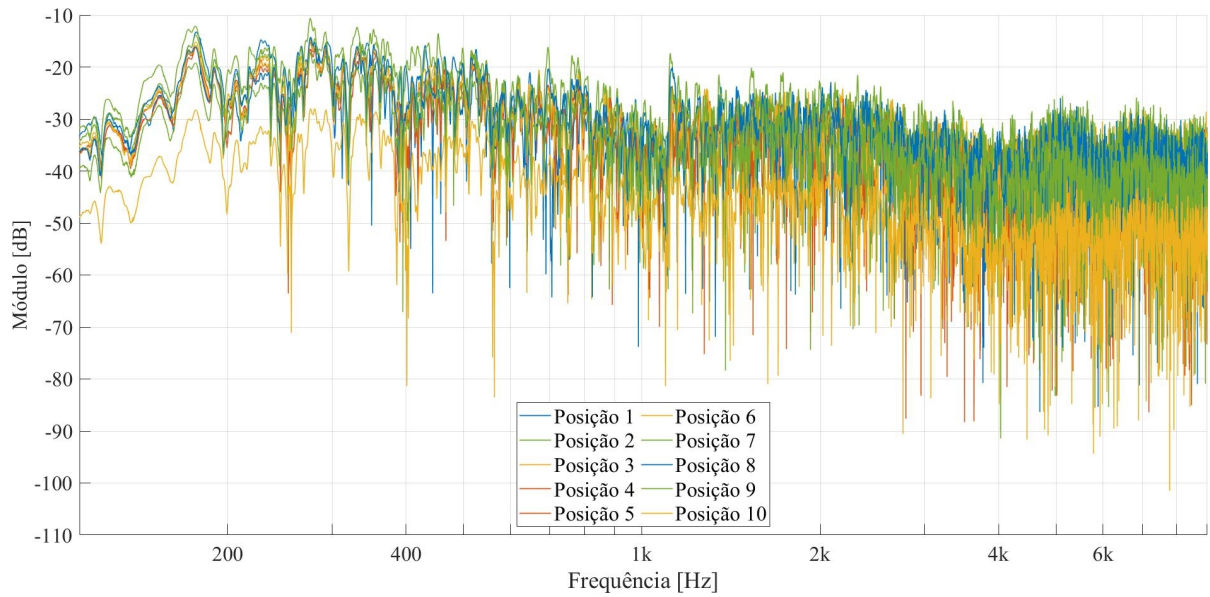
Outra análise que pode ser feita utilizando os dados coletados pelo sistema é o cálculo da frequência de Schroeder da sala. A frequência de Schroeder é um parâmetro indicativo da ocorrência de alta densidade de modos e, assim, sobreposição modal suficiente para justificar o emprego de outras análises estatísticas da sala (JACOBSEN; JUHL, 2013). Jacobsen e Juhl (2013) apresentam uma fórmula para o cálculo da frequência de Schroeder aproximada, que é a Equação (40).

$$f_{Sch} = 2000 \sqrt{\frac{T_{rev}}{V}} \quad (40)$$

na qual f_{Sch} é a frequência de Schroeder, T_{rev} é o tempo de reverberação (nesse caso T_{20}), e V é o volume do recinto. O coeficiente 2000 da equação é resultado da substituição das constantes⁴ velocidade do som c e $4 \ln(10)$.

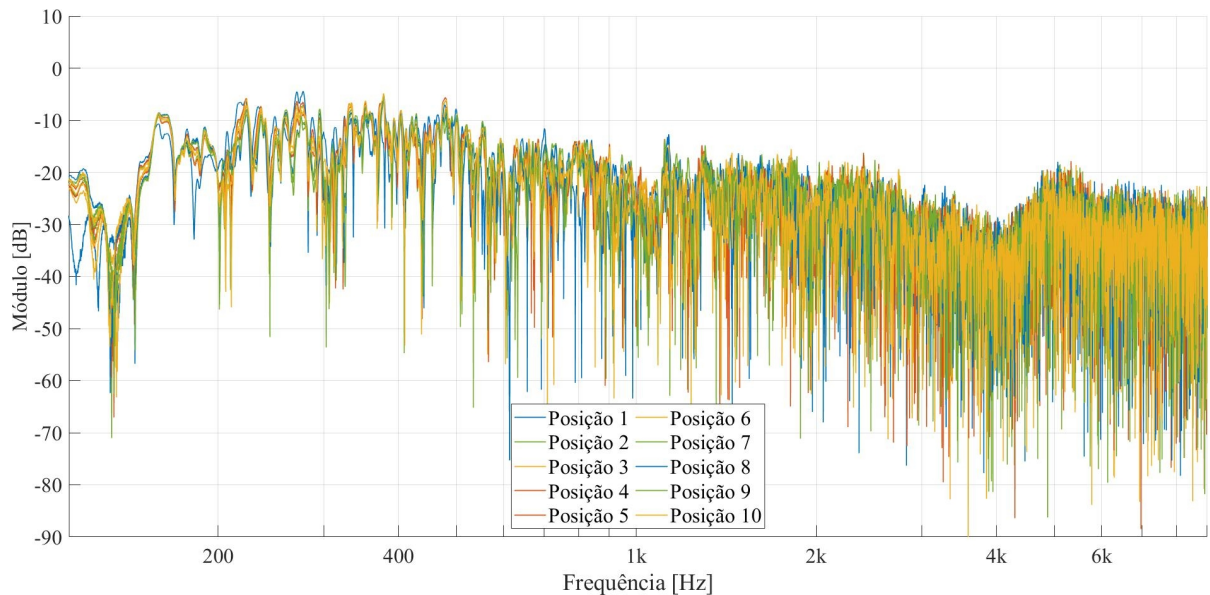
⁴ A fórmula da Equação (40) é a mais comumente utilizada para calcular a frequência de Schroeder pois informa a frequência a partir da qual a sobreposição modal é maior que 3, que a literatura considera como sendo suficiente para justificar a abordagem estatística da acústica da salas. Todavia, pode-se facilmente derivar fórmulas para quaisquer valores limite de densidade de modos, o que dá origem a diferentes fórmulas. Vorländer (2008), por exemplo, apresenta uma equação similar porém com coeficiente 1200.

Figura 19: RTFs para a posição 1 da fonte de 112,5 Hz a 9000 Hz



Fonte: Autoria própria

Figura 20: RTFs para a posição 2 da fonte de 112,5 Hz a 9000 Hz

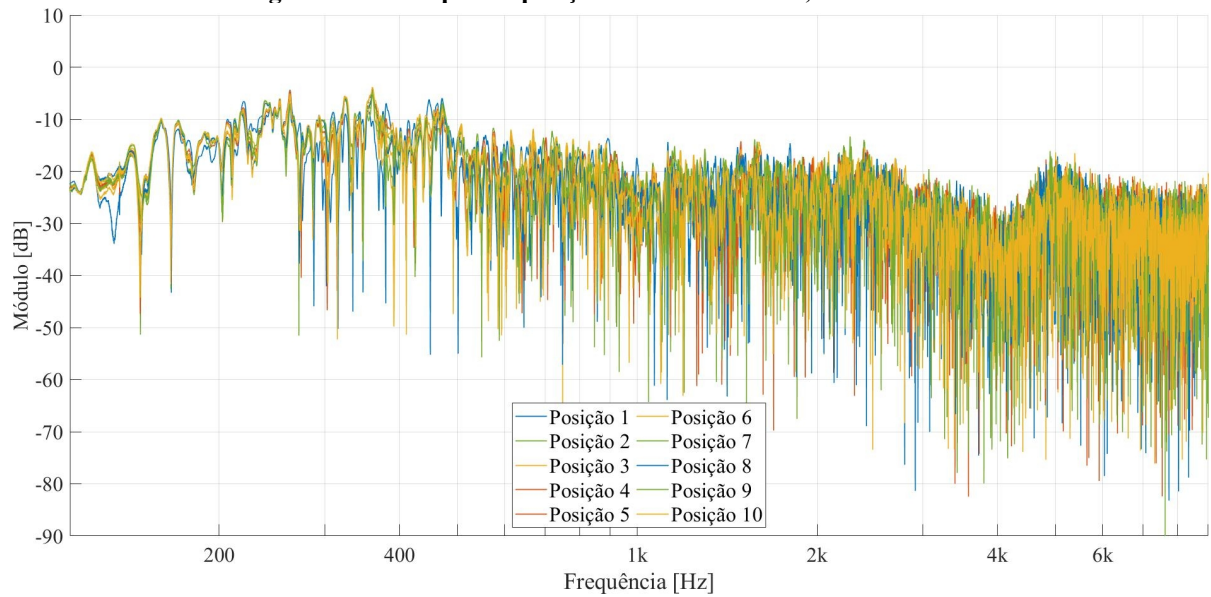


Fonte: Autoria própria

As frequências de Schroeder para cada banda de frequência estão mostradas na Figura 22. Os valores mínimo e máximo são 95,4 Hz (calculado pelo T_{20} da banda de 155 Hz) e 124,7 Hz (pelo T_{20} da banda de 250 Hz), respectivamente. Verifica-se que a partir da banda dos 125 Hz, f_{sch} sempre é menor que a frequência central da banda. Dessa forma, é seguro afirmar que a frequência de Schroeder da sala está na banda dos 125 Hz. Vale apontar também que, segundo Schroeder (1959), nas situações apropriadas para abordagem estatística de salas (isto é, além da frequência de Schroeder), o módulo da RTF é proporcional ao tempo de reverberação. Ao se comparar a Figura 18 com as RTFs das Figuras 19, 20 e 21, este

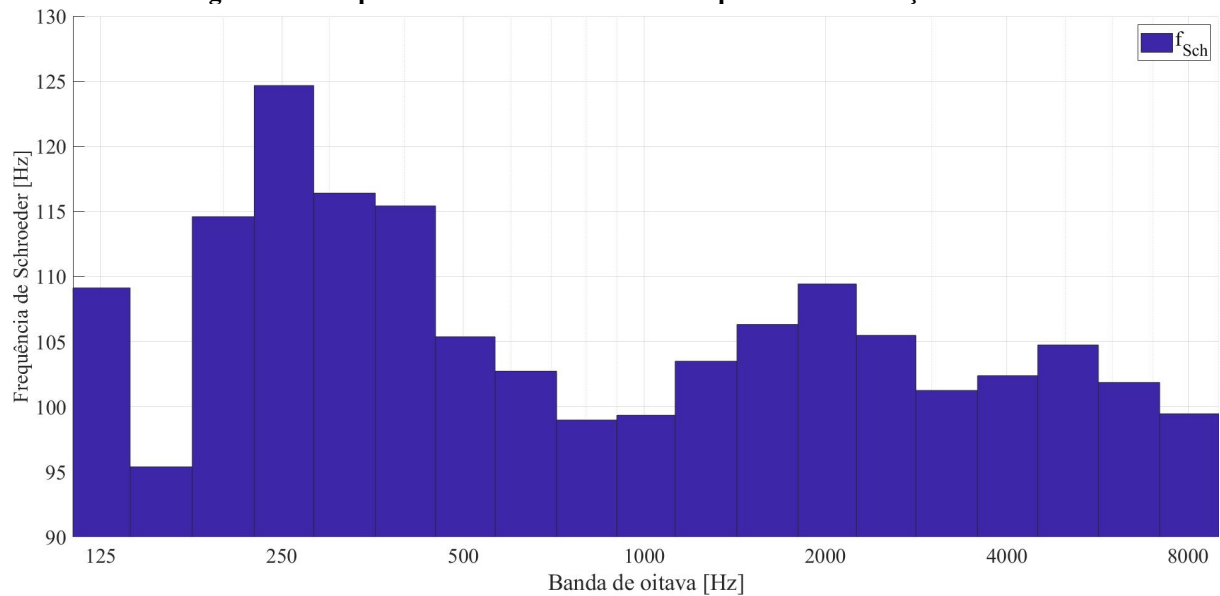
fenômeno pode ser observado nas bandas de terços de oitavas acima de 125 Hz até 8 kHz. Vale ressaltar que há influência das respostas em frequência dos equipamentos – em especial do dodecaedro. Também há a questão da fonte sonora não ser perfeitamente omnidirecional. Estes efeitos não estão sendo quantificados nesta análise, mas possíveis diferenças podem ser atribuídas a eles.

Figura 21: RTFs para a posição 3 da fonte de 112,5 Hz a 9000 Hz



Fonte: Autoria própria

Figura 22: Frequência de Schroeder calculada por banda de terço de oitava



Fonte: Autoria própria

5.2 MEDIÇÕES PARA CÁLCULO DO ESPECTRO DO NÚMERO DE ONDA

Uma aplicação de arranjos virtuais de microfones é o cálculo e análise do espectro de número de onda. A fundamentação por trás desse método está descrita nas seções 2.4 e 2.5.

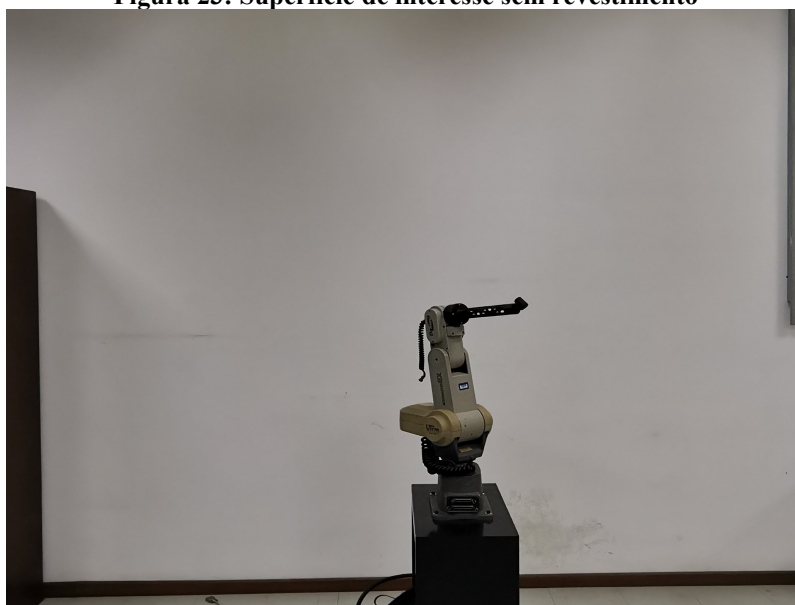
5.2.1 Preparação da Sala

A sala EK-019, onde está presente o braço robótico, foi medida sob condições normais de amortecimento (ou seja, sem o revestimento de lã de vidro) e com o revestimento fono-absorvente, afim de observar possíveis variações no espectro do número de onda. A superfície de interesse corresponde a uma área de 10,8 m² em uma das paredes da sala. As Figuras 23 e 24 apresentam a superfície antes e depois da aplicação do revestimento.

A lã de vidro é classificada, segundo Brandão (2016), como um material poroso do tipo lã mineral, por possuir uma matriz sólida (fibras) e uma fase fluida (ar). Em geral, lãs minerais tendem a possuir uma alta porosidade (entre 0,92 e 0,99). Sua resistividade ao fluxo é dependente da densidade do material, podendo estar entre 5000 Rayl e 20000 Rayl para materiais de baixa densidade e 20000 Rayl a 60000 Rayl para lãs com alta densidade.

Brandão (2016) mostra por meio de alguns modelos que a absorção em materiais porosos é mais acentuada nas altas frequências. Dessa forma, esse é o tipo de comportamento que se espera do material utilizado para o revestimento.

Figura 23: Superfície de interesse sem revestimento



Fonte: Autoria própria

Figura 24: Superfície de interesse com revestimento



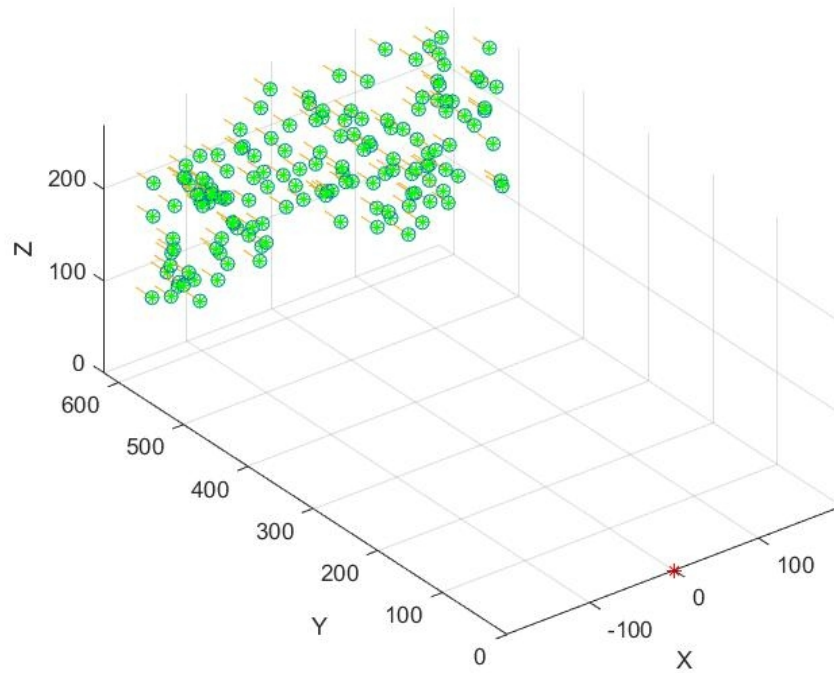
Fonte: Autoria própria

5.2.2 Geração dos Arranjos

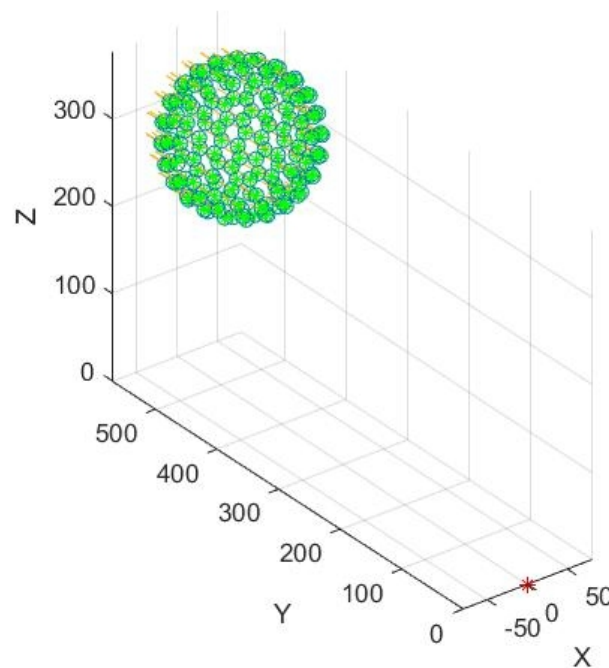
Para o processamento do espectro do número de onda, foram utilizados dois tipos diferentes de arranjos:

- um arranjo aleatório de 150 pontos limitados em um volume de $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$ – as direções de referência desse volume são as mesmas da ferramenta do robô;
- um arranjo esférico de 80 mm com 162 pontos gerados por subdivisão geodésica de icosaedro, centrado em $(0,465,297)$.

Em ambos os arranjos, o microfone fica direcionado para a superfície de interesse. Devido às curvas do microfone utilizado (GRAS 40AE, de campo livre) serem planas até 1 kHz (na correção para incidência direta) e a fonte estar além da distância crítica calculada para essa sala (com relação ao ponto do arranjo mais próximo da fonte), as medições podem ser utilizadas com confiança. O robô foi posicionado de forma que o ponto mais próximo do arranjo aleatório esteja em torno de 300 mm da superfície quando revestida. As Figuras 25 e 26 mostram os arranjos aleatório e esférico, respectivamente.

Figura 25: Arranjo virtual aleatório de microfone

Fonte: Autoria própria

Figura 26: Arranjo virtual esférico de microfone

Fonte: Autoria própria

5.2.3 Preparação dos Dados para o Cálculo do Espectro do Número de Onda

Após realizadas as medições, os conjuntos de dados precisaram ser preparados para se adequar aos algoritmos de cálculo do espectro de número de onda produzidos pelo Prof.

Dr. Eric Brandão, da Universidade Federal de Santa Maria. As coordenadas dos pontos que formam os arranjos precisavam ser dadas com referência a um novo sistema de coordenadas mais conveniente. Dessa forma, os pontos dos arranjos aleatório foram mapeados do sistema de coordenadas do robô para um sistema de coordenadas cujo eixo z é normal à superfície de interesse e passa pelo centro da face mais próxima do volume de definição do arranjo. As coordenadas $(0,0,0)$ do arranjo devem ficar no mesmo plano que a superfície de interesse. Dessa forma, os pontos foram re-mapeados por meio de uma transformação homogênea – Equação (41) – que rotaciona o sistema de coordenadas em 90° no eixo x e translada em $(0,185,-705)$ o centro do sistema de coordenadas até a superfície de interesse. Dessa forma, aplica-se a transformação homogênea

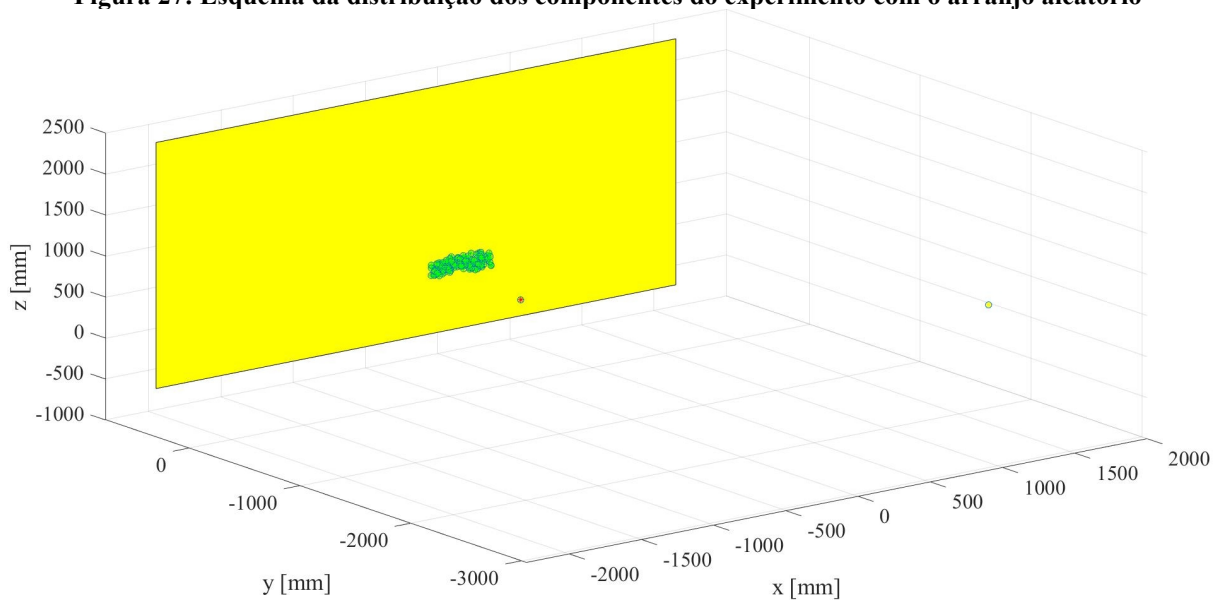
$${}^R_A\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & -\text{sen}\left(-\frac{\pi}{2}\right) & -185 \\ 0 & \text{sen}\left(-\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) & 705 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (41)$$

na qual o índice R é o sistema de coordenadas do robô e A é o novo sistema de coordenadas na amostra. Vale ressaltar que, como essa TH é aplicada nos pontos, utiliza-se os valores negativos – uma rotação em 90° do sistema é o mesmo que uma rotação em -90° para os pontos e de maneira análoga uma translação de l do sistema de coordenadas equivale a uma translação de $-l$ dos pontos.

A Figura 27 mostra o arranjo aleatório (verde), o referencial do robô e do arranjo (vermelho), o centro da fonte sonora (ponto amarelo) e a superfície do material de absorção (retângulo amarelo). Vê-se que nessa configuração há incidência quase normal da fonte sonora sobre a amostra.

A Figura 28 mostra o efeito da Transformação Homogênea no sistema. Vale ressaltar que isso foi realizado apenas para o arranjo aleatório. As medições utilizando o arranjo esférico não foram utilizadas, visto que o algoritmo utilizando esse tipo de arranjo ainda não foi desenvolvido.

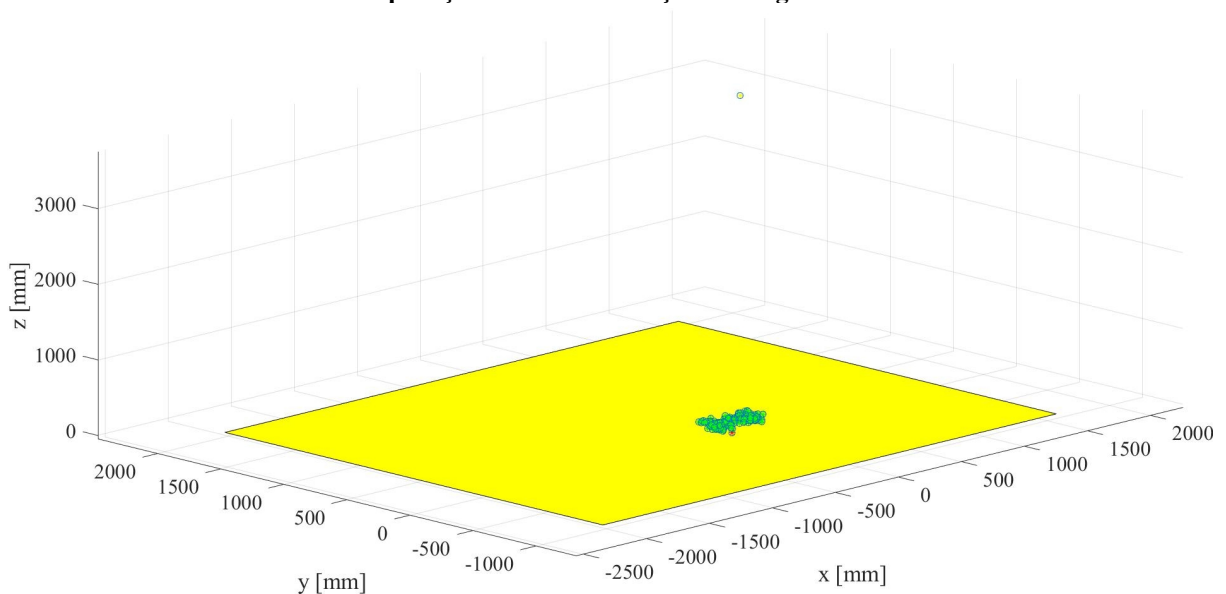
Figura 27: Esquema da distribuição dos componentes do experimento com o arranjo aleatório



Fonte: Autoria própria

Outra etapa interessante foi o cálculo da matriz dos espectros das medições do arranjo. Essa matriz relaciona os espectros de cada ponto (calculados por meio da FFT das medições) com a posição na qual ele foi medido. Em outras palavras, cada linha da matriz corresponde ao espectro medido em uma posição. Essa matriz, juntamente com um vetor contendo cada incremento de frequência de 0 a 96 kHz e com as coordenadas modificadas do arranjo foram enviadas para o Prof. Dr. Eric Brandão em um arquivo com extensão *.mat*.

Figura 28: Esquema da distribuição dos componentes do experimento com o arranjo aleatório após a aplicação da Transformação Homogênea



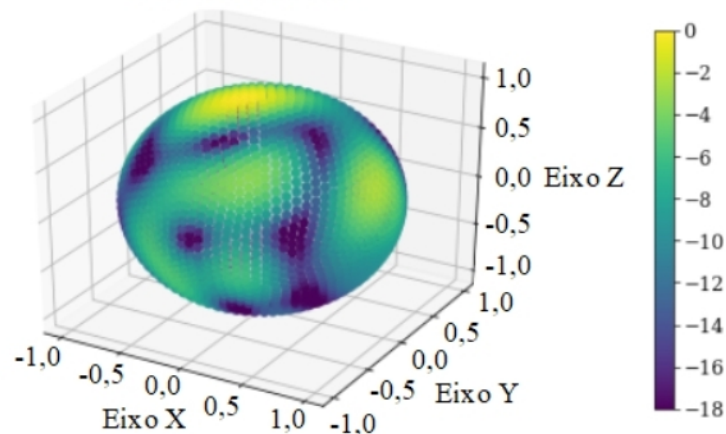
Fonte: Autoria própria

5.2.4 Análise do Espectro do Número de Onda para o Caso com Absorção

Após o envio dos dados do arranjo aleatório aplicado no caso com uma superfície absorvente para o Prof. Dr. Eric Brandão, os dados foram processados. A Figura 29 mostra a distribuição energética do espectro do número de onda avaliada em 1 kHz $|P(\mathbf{k})|$, na qual os eixos correspondem a k_x , k_y e k_z .

A Figura 29 (produzida pelo Prof. Dr. Eric Brandão) apresenta um perfil tridimensional da energia que incide e é refletida pela amostra. Observa-se uma mancha amarelada (contendo mais energia) no topo da esfera, correspondente à energia diretamente incidente da fonte sonora. Pode-se observar também manchas de coloração esverdeada menos energéticas, que correspondem às reflexões. Devido à natureza tridimensional da Figura 29, pode ser difícil visualizar simultaneamente todas as reflexões. Uma visão alternativa da distribuição energética é proporcionada planificando a esfera, mostrando $|P(\theta, \phi)|$. A Figura 30 apresenta um gráfico plano do módulo do espectro do número de onda em função da elevação θ (com abertura de cima para baixo) e do azimute ϕ .

Figura 29: Distribuição energética na região do arranjo a 1 kHz

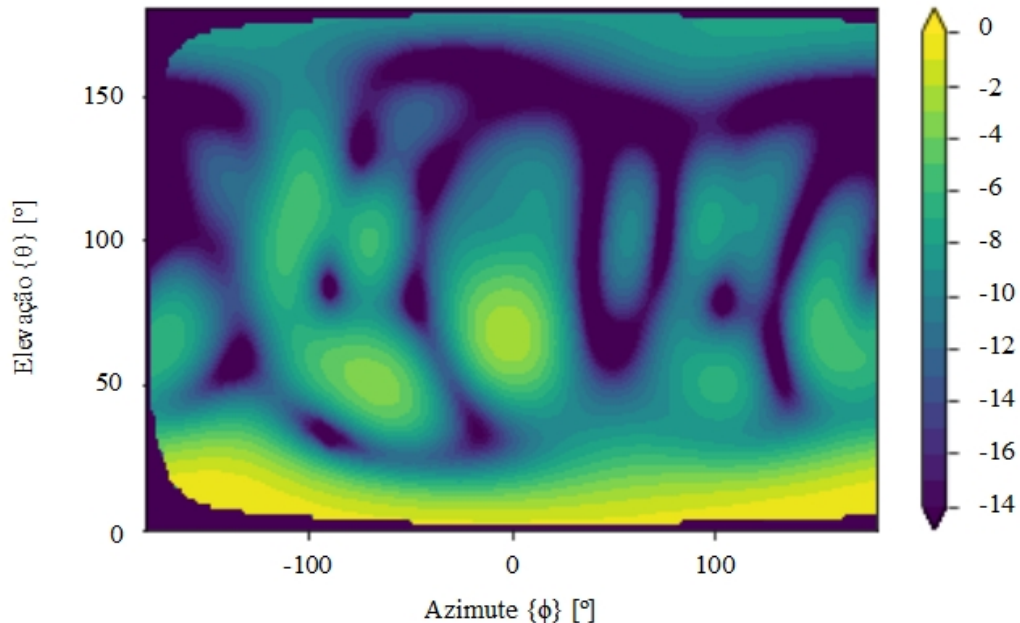


Fonte: BRANDÃO (2021)

Na Figura 30 (cedida pelo Prof. Dr. Eric Brandão), é mais claro observar as reflexões e em certos casos descobrir suas origens. Por exemplo, por toda a extensão do azimute na elevação entre 150° e 180° (na direção da amostra) há uma região esverdeada, correspondente às reflexões especulares na superfície da lâ de vidro. Também é possível visualizar a região da energia diretamente incidente vinda da fonte sonora, correspondente a parte amarelada do gráfico (0° de elevação). Também é possível observar outras reflexões espalhadas entre 45° e 150° de elevação. Essas reflexões podem ser consideradas de origens espúrias (ou seja, vindas

de outras regiões da sala e não da superfície de interesse), levando em consideração a natureza irregular da sala e dos equipamentos dispostos.

Figura 30: Distribuição energética na região do arranjo a 1 kHz em termos de θ e ϕ



Fonte: BRANDÃO (2021)

5.2.5 Cálculo da Absorção da Superfície

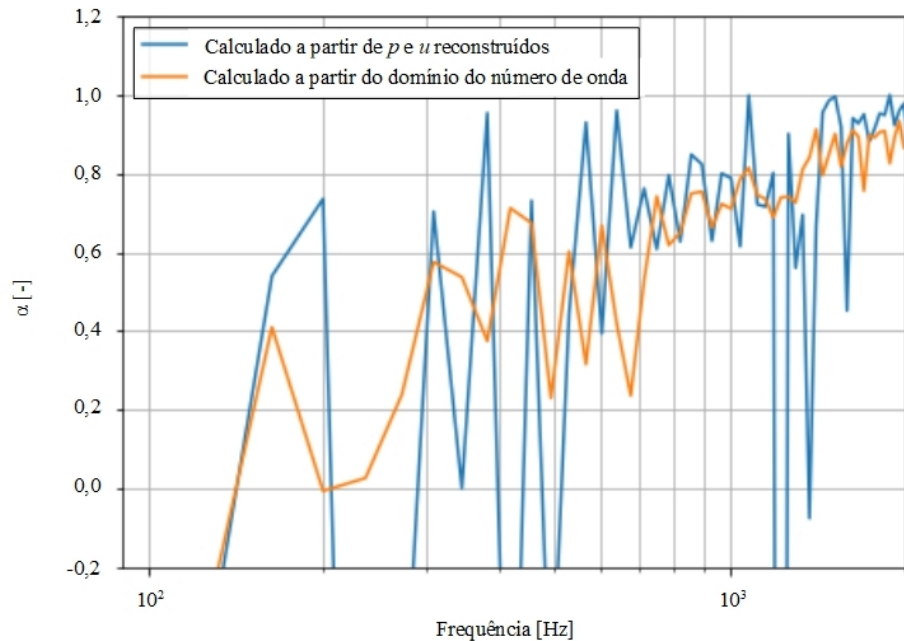
Outra análise que pode ser feita é a da absorção da superfície de interesse. Essa análise pode ser abordada de duas maneiras: calculando a absorção por meio do domínio do número de onda (conforme fundamentado na Seção 2.5) ou calculando a impedância acústica da superfície (ou seja, em z igual a zero) a partir de valores de pressão sonora e velocidade de partícula reconstruídos (as reconstruções procedem conforme Seção 2.6).

A Figura 31 (produzida pelo Prof. Dr. Eric Brandão) apresenta duas curvas para a absorção da superfície de interesse. A curva em laranja corresponde à absorção calculada pelo domínio do número de onda, enquanto a curva azul corresponde à absorção calculada a partir das reconstruções da pressão sonora $-p(\mathbf{r})$ e da velocidade de partícula $-u(\mathbf{r})$.

Ambas as curvas apresentam um comportamento errático, possivelmente em função das reflexões de origens espúrias. Porém, de uma maneira geral, ambas tendem a ser mais absorventes nas altas frequências (nesse caso, acima de 1 kHz). Esse comportamento é coerente conforme as previsões e modelos explorados por Brandão (2016). Além da observação direta da evolução da absorção na frequência, pode-se observar nas Figuras 32,

33, 34, 35 e 36 que a energia refletida diminui conforme a frequência aumenta. Isso pode ser considerado efeito da absorção do material aumentando conforme a frequência.

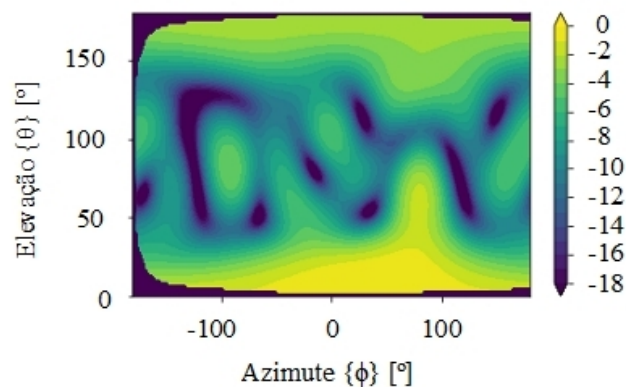
Figura 31: Absorção da superfície revestida em lã de vidro calculada pelo domínio do número de onda e pelos valores p e u reconstruídos



Fonte: BRANDÃO (2021)

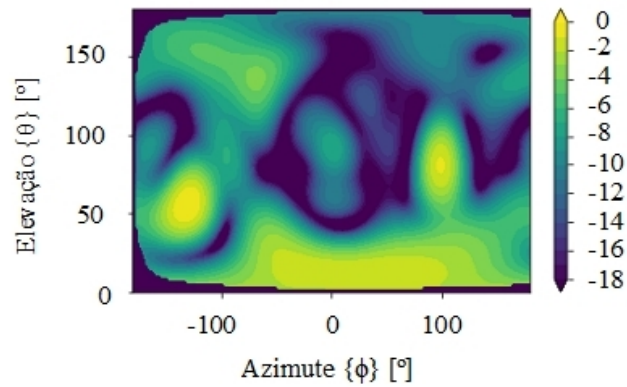
Ao observar as Figuras 32, 33, 34, 35 e 36, também é possível notar a permanência das reflexões de outras origens que não as da superfície de interesse. O posicionamento praticamente constante delas indica que essas reflexões podem vir da mobília da sala, do chão, do teto, do pedestal do robô, entre outras superfícies.

Figura 32: Distribuição energética na região do arranjo a 500 Hz em termos de θ e ϕ



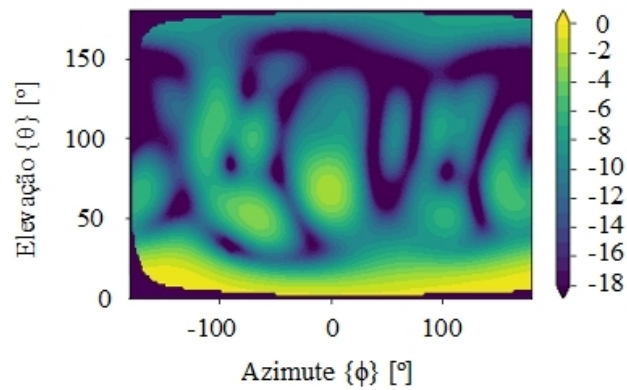
Fonte: BRANDÃO (2021)

Figura 33: Distribuição energética na região do arranjo a 800 Hz em termos de θ e ϕ



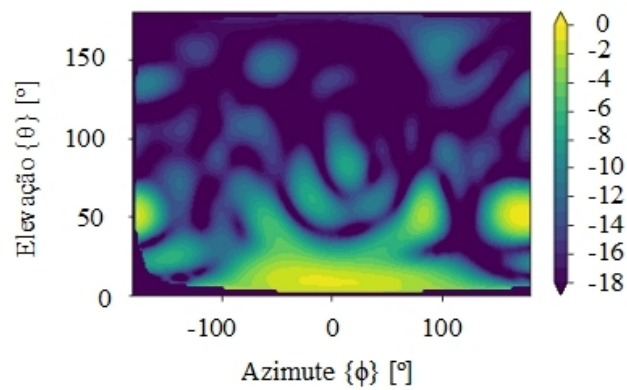
Fonte: BRANDÃO (2021)

Figura 34: Distribuição energética na região do arranjo a 1 kHz em termos de θ e ϕ



Fonte: BRANDÃO (2021)

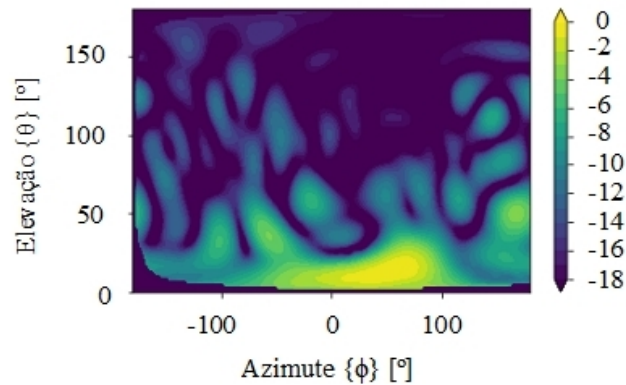
Figura 35: Distribuição energética na região do arranjo a 1,6 kHz em termos de θ e ϕ



Fonte: BRANDÃO (2021)

As pequenas diferenças entre as posições das reflexões espúrias se dá devido à resolução utilizada e à resposta do próprio arranjo.

Figura 36: Distribuição energética na região do arranjo a 2 kHz em termos de θ e ϕ

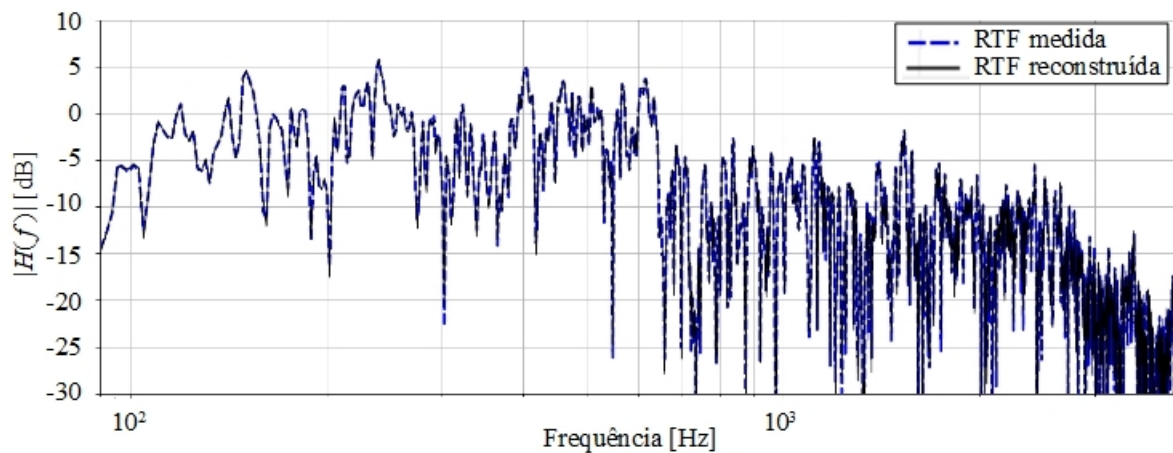


Fonte: BRANDÃO (2021)

5.2.6 Reconstrução da Função de Transferência

Outra análise que pode ser feita utilizando a decomposição em ondas planas e o espectro do número de onda é a reconstrução de uma função de transferência em um ponto não contido no arranjo. Para isso, Brandão (2021) isola o ponto de número 150 do arranjo aleatório, criando assim um novo arranjo com os 149 pontos restantes. Então Brandão (2021) utiliza o arranjo para executar a decomposição em ondas planas, por meio da Equação (14), e uma subsequente reconstrução do campo acústico nas coordenadas do ponto 150 por meio da Equação (17). A Figura 37 apresenta uma comparação entre a RTF medida no ponto 150 (curva azul tracejada) e a RTF reconstruída para a posição do ponto 150 (curva preta sólida) entre a faixa dos 100 Hz até 2 kHz.

Figura 37: Comparação entre RTF reconstruída no ponto 150 e medida no ponto 150 do arranjo aleatório



Fonte: BRANDÃO (2021)

Dessa forma, pode-se afirmar que a decomposição em ondas planas foi bem sucedida. Uma conclusão que pode ser tirada a partir da reconstrução bem sucedida nessa faixa

de frequências é que o comportamento errático das curvas na Figura 31 não é devido a problemas na decomposição e reconstrução do campo sonoro.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e considerações sobre o sistema desenvolvido, e também dificuldades encontradas e ideias para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema automatizado de medição de função de transferência e resposta ao impulso de salas utilizando um braço robótico, de maneira que se pudesse facilmente automatizar essas medições para várias posições de microfone e assim, formando um arranjo virtual de microfones. Aplicações para um sistema desse tipo incluem medições no arranjo virtual para cálculo do espectro do número de onda, medições em posições sortidas para cálculos de parâmetros de acústica de salas.

A implementação de um sistema de posicionamento do transdutor envolveu a comunicação entre o MATLAB e robô, por meio da criação de funções que enviavam os comandos respectivos à ação que se desejava que o robô executasse (transcritos no Apêndice A). Além da implementação desses comandos, foi necessário o projeto mecânico do acoplamento entre o microfone e o robô. O acoplamento foi projetado de maneira eficiente e modular o suficiente para que se possa mudar algumas medidas (por exemplo comprimento e inclinação do microfone).

O projeto do sistema de medição de RIR e RTF foi realizado lançando mão da ITA *Toolbox* para MATLAB. Apesar dessa biblioteca apresentar funções já implementadas para esse tipo de medição, foi necessário um tempo de estudo para aprender como utilizá-las corretamente. Além disso, diversos testes foram necessários para adequar parâmetros como a duração da varredura e a amplitude sonora afim de obter medições com faixa dinâmica apropriada para as aplicações desejadas.

A integração entre o posicionamento do microfone e as medições foi realizada por meio dos códigos de geração dos arranjos (transcritos no Apêndice C) e pelo código de execução das medições (transcritos no Apêndice B). A geração dos arranjos dependeu da implementação da função de verificação das posições por meio da cinemática inversa do robô (*verifyPos*). Essa função é o que permite que o sistema funcione de maneira harmônica e sincronizada, visto que a tentativa de acessar posições inatingíveis causa erros que impedem o funcionamento do robô. Por meio da função *verifyPos*, pode-se evitar as posições

inatingíveis no projeto do arranjo, de forma a contronar os erros do robô. A integração propriamente dita é feita pelo código de controle do robô e das medições.

Os testes utilizando o arranjo virtual proposto foram bem sucedidos. Nos testes de acústica de salas, conseguiu-se estimar o tempo de reverberação médio e a distância crítica da sala. Pode-se também estimar a frequência de Schroeder e verificar a proporcionalidade entre as RTFs e os tempos de reverberação além desse valor. A aquisição de RIRs para aplicação no cálculo da decomposição em ondas planas e reconstrução do campo acústico também foi bem sucedida.

Dessa forma, pode-se dizer que o objetivo geral explicitado na Seção 1.2.1 foi cumprido. Existe uma integração e sincronia entre o sistema de medição de RTF e o robô. Isso se deve, em grande parte, à decisão de escrever funções modulares para comunicação entre o robô e o computador. Outra decisão que facilitou a execução do projeto foi a de separar as etapas de criação e verificação dos arranjos da etapa de medição propriamente dita. Isso implica em um sistema menos *user friendly*, mas, por outro lado oferece mais flexibilidade nas aplicações práticas, pois o usuário pode eliminar posições impossíveis e projetar os arranjos de maneira ótima, dentro do que o robô consegue executar. Dito isso, o sistema ainda possui limitações de forma e tamanho dos *arrays*, que estão vinculadas a características construtivas relacionadas ao suporte do microfone e ao próprio robô.

Dessa forma, o sistema resultado do trabalho consegue executar, com certeza:

- Medições com arranjos de posições aleatórias e com direções constantes;
- Medições com arranjos esféricos e direções constantes;
- Medições com arranjos esféricos na direção da fonte sonora (não aplicados neste trabalho).

A perfeita execução das medições está vinculada a um bom projeto por parte do usuário do sistema, no que se refere a respeitar as limitações do sistema, isto é, posicionar as amostras ou a fonte sonora de maneira adequada e projetar os arranjos dentro dos limites de diâmetro e posição.

6.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Dentre as dificuldades encontradas, a mais complicada foi a implementação dos *arrays* gerados virtualmente utilizando o braço robótico. Isso se deve ao fato do robô não consegue posicionar a ferramenta com qualquer orientação em qualquer posição devido a suas limitações de destreza e alcance, e muitas vezes os arranjos gerados tinham pontos justamente

em posições impossíveis, que implicavam em erros na execução do robô. Isto, por sua vez, requisitou que ocorresse um certo refino do algoritmo de cinemática inversa e que existisse um processo iterativo por parte do usuário na geração e verificação dos arranjos. Esse processo iterativo inclusive se mantém na própria operação do sistema. Este foi um dos motivos pelo qual o resultado do projeto foi, na prática, uma biblioteca de funções ao invés de um aplicativo de controle. Vale ressaltar que o *Mitsubishi RV-M1* é usualmente utilizado para alimentação de máquinas de comando numérico, que são operações que não exigem movimentos complexos por parte do robô. Dessa forma, pensa-se que para as aplicações propostas nesse trabalho, a capacidade do manipulador robótico foi bem utilizada.

Por fim, outra dificuldade que precisou ser superada foi no compromisso entre o nível do sinal de varredura e a relação sinal-ruído. Verificou-se que, ao se aumentar o volume do sinal no amplificador, ocorria a amplificação do ruído de 60 Hz da fonte (comum em equipamentos eletrônicos em geral) e isso implicava em RIRs com uma baixa relação sinal-ruído, o que pode dificultar o pós-processamento das medições (como visto na Seção 5.1). Outra dificuldade foi o ruído do próprio gabinete de acionamento do robô, devido ao seu sistema de arrefecimento do *hardware*. Dessa forma, a melhor relação sinal-ruído conseguida foi 60 dB, o que é um valor apropriado – por exemplo, para o cálculo do T_{20} – porém não é ótimo.

6.3 TRABALHOS FUTUROS

Possíveis trabalhos futuros que envolvam o sistema desenvolvido neste Trabalho de Conclusão de Curso ou que são de alguma forma inspirados por este são:

- Implementação do sistema para outros robôs;
- Implementação de outros tipos de arranjo (planar, múltiplas camadas, parabólico etc);
- Implementação de outros tipos de suportes (por exemplo, para medição de absorção do assoalho ou do teto);
- Aplicação do robô em medições de ambientes padronizados (como por exemplo a câmara reverberante do DACOC-CT);
- Processamento e análise dos dados medidos neste trabalho;
- Medição de novos conjuntos de dados para análises de campo sonoro; e
- Refino dos algoritmos para implementação de novas funções (como a eliminação ou substituição de posições impossíveis).

O autor planeja de fato utilizar os dados extraídos durante os procedimentos descritos na Seção 5.2 para avaliar o desempenho da abordagem do número de onda em ambientes anisotrópicos e previamente amortecidos. Indo além, deseja-se utilizar essa abordagem para quantificar absorção e difusão do som causadas pelas superfícies e também analisar a interação desses aparatos com o campo sonoro da sala. Além disso, ainda espera-se que essa abordagem forneça uma métrica para o grau de difusão do campo acústico do recinto.

REFERÊNCIAS

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM C423: Acoustics - Standard test method for sound absorption and sound absorption coefficients by the reverberation room method**. 2017.

BERZBORN, Marco *et al.* On the directional properties of energy decay curves. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS*, 23. 2019, Aachen, Alemanha. **Proceedings...** Aachen, Alemanha: International Commission for Acoustics, 2019. p. 4043–4050.

BERZBORN, Marco *et al.* The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing. *In: ANNUAL GERMAN CONGRESS ON ACOUSTICS*, 43. 2017, Kiel, Alemanha. **Proceedings...** Kiel, Alemanha: German Acoustic Society (DEGA), 2017. p. 222-225.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de salas: projeto e modelagem**. São Paulo: Blucher, 2016.

BRANDÃO, Eric. **Decomposição em Ondas Planas e Espectro do Número de Onda**. 2021. 9 imagens digitais em formato jpeg.

CRAIG, John J. **Intoduction to robotics mechanics and control**. Nova Jersey: Pearson Education, 2005.

DEFRANCE, Guillaume. POLACK, J-D. **Acoustics, Information and Communications**. Cham: Springer, 2015.

FERNANDEZ-GRANDE, Efren. Sound field reconstruction using a spherical microphone array. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 139, 2016.

GRAS. GRAS Sound & Vibration. **GRAS 40AE**. Dinamarca: GRAS Sound & Vibration, 2019.

GRAS. GRAS Sound & Vibration. **GRAS 46AQ**. Dinamarca: GRAS Sound & Vibration, 2021.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 3741: Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for reverberation test rooms.** Genebra, Suíça, 2010.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 354:2003(E): Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room.** Genebra, Suíça, 2003.

JACOBSEN, Finn. JUHL, Peter M. **Fundamentals of general linear acoustics.** Chichester: John Wiley & Sons, 2013.

JEONG, C-H. Diffuse sound field: challenges and misconceptions. *In: INTER-NOISE, 45.* 2016, Hamburgo, Alemanha. **Proceedings...** Hamburgo, Alemanha: German Acoustic Society (DEGA). p. 1015–1021.

JEONG, C-H.; NOLAN, Mélanie. Difficulties in comparing diffuse sound field measures and data/code sharing for future collaboration. *In: EURONOISE 2018.* 2018, Creta, Grécia. **Proceedings...** Creta, Grécia: European Acoustics Association. p. 1997-2004.

JEONG, C-H. Kurtosis of room impulse responses as a diffuseness measure for reverberation chambers. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 139, p. 2833–2841, 2016.

KUTTRUFF, Heinrich. **Room acoustics.** 6 ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

LAUS, Luís P. **Introdução à robótica.** Curitiba, Brasil. 2017. Notas de aula da disciplina de Robótica do curso de Engenharia Mecatrônica.

MANOLAKIS, Dimitris G. INGLE, Vinay K. **Applied digital signal processing.** Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

MELCO. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. **Industrial micro-robot system model RV-M1 technical manual.** Nagoya, Japão. Mitsubishi Electric Corporation, 1989.

MÜLLER, Swen. MASSARANI, Paulo. Transfer-Function Measurement with Sweeps. **Journal of the Audio Engineering Society**, v. 49, p. 443-471, 2001.

NOLAN, Mélanie *et al.* A wavenumber approach to quantifying the isotropy of the sound field in reverberant spaces. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 143, p. 2514-2526, 2018.

NOLAN, Mélanie. *et al.* Experimental characterization of the sound field in a reverberation room. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 145, p. 2237-2246, 2019.

NOLAN, Mélanie. BERZBORN, Marco. FERNANDEZ-GRANDE, Efren. Experimental characterization of the decaying sound field in a reverberation room. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS*, 23. 2019, Aachen, Germany. **Proceedings...** Aachen, Alemanha: International Commission for Acoustics, 2019. p. 4035-4042.

OPPENHEIM, Alan V. WILLSKY, Alan S. **Sinais e sistemas**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

RAFAELY, Boaz. **Fundamentals of spherical array processing**. Berlim: Springer-Verlag, 2015.

RAO, Dan. Effect of transducer mismatch on the performance of spherical microphone arrays. *In: International Congress on Noise Control Engineering*, 43. 2014, Melbourne, Austrália. **Proceedings...** [s.l.]: Australian Acoustical Society, 2014. Disponível em: http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/INTERNOISE2014/index.htm. Acesso em: 04 de maio. 2021.

SCHROEDER, Manfred R. Effect of frequency and space averaging on the transmission responses of multimode media. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 46, p. 277-283, 1969.

SCROSATI, Chiara *et al.* On the diffusion of the sound field in a reverberation room. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION*, 26. 2019, Montreal, Canadá. **Proceedings...** Montreal, Canadá: International Institute of Acoustics and Vibration, 2019, p. 3655-3662.

SHIN; Kihong. HAMMOND, Joseph. **Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers**. Reino Unido: John Wiley & Sons, 2008.

VORLÄNDER, Michael. **Auralization**. Berlim, Alemanha: Springer, 2008.

WARD, Wil. **Icosphere**. v. 1.2.0.0. [S.l.], 19 mar. 2015. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50105-icosphere>. Acesso em: 06 ago. 2021.

APÊNDICE A – Transcrição dos Códigos em MATLAB

Este apêndice é dedicado às transcrições das funções em MATLAB produzidas para este trabalho. A função do Quadro 3 (*setupMSTF*) é para atualização e carregamento da instância salva da classe de medição *itaMSTF* do ITA Toolbox. Os Quadros 4 a 10 (*ntRobot*, *errorRead*, *moveCoor*, *moveto*, *toolLenght*, *readPosition* e *rsRobot*) são funções de comunicação com o *Mitsubishi RV-M1*. Os Quadros 11 e 12 são a função de verificação da cinemática inversa (*verifyPos*).

Quadro 3: Função *setupMSTF*

```
function [outputArg1] = setupMSTF()
    % Setup of measurement parameters for ITA Toolbox Transfer Function
    % Measurement
    % Creates/loads and saves measurement class with the parameters for
    % transfer function measurement
    load('MS1.mat');           % Loads file
    MS1.type = 'exp';          % Measurement type
    MS1.lineardeconvolution = 'true'; % Linear deconvolution
    MS1.inputChannels = 1;     % for multiple channels
                                % (e.g. 1, 2 & 3): [1 2 3]
    MS1.outputChannels = 2;    % for multiple channels
                                % (e.g. 1, 2 & 3): [1 2 3]
    MS1.fftDegree = 18;        % FFT degree
    MS1.samplingRate = 96000;  % Sampling rate
    MS1.stopMargin = 0.3;      % "Excess" sensing time after sweep
    MS1.outputamplification = 0; % Amplification of the output
    MS1.averages = 1;
    save('MS1.mat');
    outputArg1 = MS1;
end
```

Fonte: Autoria própria

Quadro 4: Função *ntRobot*

```
function ntRobot(s)
    % Sends robot back to zero machine position
    s.RequestToSend = 'on';
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'off')
        % Waits until CTS is on
    end
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'on')
        fwrite(s,['nt',13,10]); % asks robot to nest
        break
    end
end
```

Fonte: Autoria própria

Quadro 5: Função *errorRead*

```
function outputArg1 = errorRead(s)
    % Reads and informs the type of error
    s.RequestToSend = 'on';
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'off')
        % Waits until CTS is on
    end
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'on')
        fwrite(s,['er', 13, 10]); % asks robot the type of error
        msg = fscanf(s);
        break
    end
    outputArg1 = msg; % outputs the robot's answer
end
```

Fonte: Autoria própria**Quadro 6: Função *moveCoor***

```
function moveCoor(s, x, y, z, tp, tr)
    % Instructs robot to move to a coordinate
    %     x_s -> x
    %     y_s -> y
    %     z_s -> z
    %     tp_s -> pitch angle
    %     tr_s -> roll angle
    s.RequestToSend = 'on';
    x_s = num2str(round(x,1), '%.1f');
    y_s = num2str(round(y,1), '%.1f');
    z_s = num2str(round(z,1), '%.1f');
    tp_s = num2str(round(tp,1), '%.1f');
    tr_s = num2str(round(tr,1), '%.1f');
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'off')
        % Waits until CTS is on
    end
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'on')
        fwrite(s,['mp ',x_s,', ',y_s,', ',z_s,', ',tp_s,', ',tr_s, 13,
10]);
        % Instructs the robot to move to the specified cartesian point
        %     x_s -> x
        %     y_s -> y
        %     z_s -> z
        %     tp_s -> pitch angle (beta)
        %     tr_s -> roll angle (gamma)
        %     13,10 -> CR,LF
        break
    end
end
```

Fonte: Autoria própria

Quadro 7: Função *moveto*

```
function toolLenght(s, tl)
    % Informs the robot of the Tool Lenght 289.4
    s.RequestToSend = 'on';
    tl_s = num2str(round(tl,1), '%.1f');
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'off')
        % Waits until CTS is on
    end
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'on')
        fwrite(s, ['tl ', tl_s, 13, 10]); % Instructs the robot to move
to                                     % the specified
        break
    end
end
```

Fonte: Autoria própria

Quadro 8: Função *toolLenght*

```
function toolLenght(s, tl)
    % Informs the robot of the Tool Lenght 289.4
    flag_e = 0;
    s.RequestToSend = 'on';
    tl_s = num2str(round(tl,1), '%.1f');
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'off')
        % Waits until CTS is on
    end
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'on')
        while (flag_e ~= 1)
            fwrite(s, ['tl ', tl_s, 13, 10]); % Instructs the robot to
                                                % move to the specified
            break
        end
        break
    end
end
```

Fonte: Autoria própria

Quadro 9: Função *readPosition*

```
function [outputArg1] = readPosition(s)
    % Asks robot what position it's currently on
    s.RequestToSend = 'on';
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'off')
        % Waits until CTS is on
    end
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'on')
        fwrite(s, ['wh', 13, 10]); % asks robot what position it's currently
on
        msg = fscanf(s);
        break
    end
    outputArg1 = msg; % outputs the robot's answer
end
```

Fonte: Autoria própria

Quadro 10: Função *rsRobot*

```

function rsRobot(s)
    % Resets robot after an error
    s.RequestToSend = 'on';
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'off')
        fwrite(s,['rs', 13, 10]); % asks robot to reset
        break
    end
    while strcmp(s.pinstatus.ClearToSend, 'on')
        fwrite(s,['rs', 13, 10]); % asks robot to reset
        break
    end
    fclose(s); % disconnect serial port object from the device
    delete(s); % remove serial port object from memory
    clear s; % remove serial port object from the MATLAB workspace
end

```

Fonte: Autoria própria

Quadro 11: Função *verifyPos* (parte 1)

```

function outputArg1 = verifyPos(p_x, p_y, p_z, bd, gd, th1d)
    % Reads a robot position and verifies if it is a possible ('false') or
    % impossible ('true') position (based and to be used for the
Mitsubishi
    % RV-M1's inverse kinematics)
    d1 = 300;
    d6 = 72 + 289.4;
    a2 = 250;
    a3 = 160;
    b = deg2rad(bd);
    g = deg2rad(gd);
    th1 = deg2rad(th1d);
    %% Joint angle calculations
    if ((p_x)^2 + (p_y)^2 < ((10)^(-6)))
        t1 = th1;
    else
        t1 = atan2(p_x, p_y);
        th1 = sqrt((p_x)^2 + (p_y)^2);
        if(abs(b) > pi()/2)
            t1 = (t1 + pi());
            th1 = -th1;
        end
    end
    t2 = (th1 - d6*cos(b))^2 + (p_z - d1 - d6*sin(b))^2;
    t3 = (a2 - a3)^2;
    t4 = (a2 + a3)^2;
    if((t3 <= t2) && (t2 <= t4))
        t4 = (t2 - a2^2 - a3^2)/(2*a2*a3);
        t5 = -sqrt(1.0 - t4^2);
        t3 = -acos(t4);
        t2 = atan2((p_z-d1-d6*sin(b))*(a2+a3*t4) - (th1-d6*cos(b))*a3*t5, ...
            (th1-d6*cos(b))*(a2+a3*t4) + (p_z-d1-d6*sin(b))*a3*t5);
    else
        outputArg1 = 1;
        return
    end
    t4 = b - t2 - t3;
    t5 = -g;

```

Fonte: Autoria própria

Quadro 12: Função *verifyPos* (parte 2)

```
%% Joint limit verification
if((t1 >= deg2rad(-150.0))&&(t1 <= deg2rad(150.0)))
    outputArg1 = 0;
else
    outputArg1 = 1;
    return
end
if((t2 >= deg2rad(-30.0))&&(t2 <= deg2rad(100.0)))
    outputArg1 = 0;
else
    outputArg1 = 1;
    return
end
if((t3 >= deg2rad(-109.0))&&(t3 <= deg2rad(0.0)))
    outputArg1 = 0;
else
    outputArg1 = 1;
    return
end
if((t4 >= deg2rad(-90.0))&&(t4 <= deg2rad(90.0)))
    outputArg1 = 0;
else
    outputArg1 = 1;
    return
end
if((t5 >= deg2rad(-179.9))&&(t5 <= deg2rad(179.9)))
    outputArg1 = 0;
else
    outputArg1 = 1;
    return
end
end
```

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B – Código de Controle do Robô

Este apêndice apresenta o código para controle e integração do entre as medições de RIR e o percurso do robô nas posições do arranjo. A sequência de operações segue o fluxograma da Figura 16. O *script* está dividido em dois quadros para melhor diagramação do texto.

Quadro 13: Script de controle do sistema (parte 1)

```
clear; clc;
%% MEASUREMENT
% AUTHOR: AUGUSTO CESAR FANTINELLI DE CARVALHO
% The following program asks for movement to predetermined array positions
% Date: 5/8
addpath('Robot Array Forming');
%% File name
msg_1 = 'What prefix do you wish to give the measurement files?\n';
fileName = input(msg_1, 's');
msg_1 = 'What name do you wish to give the folder?\n';
folderName = input(msg_1, 's');
msg_1 = 'What array do you wish to use?\n\nAfter informing this, you will
have 2 minutes\nto leave the room\n';
arrayName = input(msg_1, 's');
%% Create directory
mkdir(folderName);

%% Load TF measurement class
MS1 = setupMSTF();
%% Load array
load(strcat(arrayName, '.mat'), 'array', 'beta_wt', 'gamma_ws', 't1_w');

%% Plot array
N = array.nPoints;
% Constant orientation
lng_m = pi/2;
clt_m = pi/2;
figure;
scatter(array);
hold on
scatter3(0,0,0, 'r*');
hold on
dir_vs = [sin(clt_m)*cos(lng_m), sin(clt_m)*sin(lng_m), cos(clt_m)];
for i = 1:1:N
    quiver3(array.x(i), array.y(i), array.z(i), ...
        dir_vs(1), dir_vs(2), dir_vs(3), 25, 'Color', [0.9290 0.6940
0.1250]);
end
valid = 0;
invalid = 0;
isPos = zeros(N,1);
hold on
```

Fonte: Autoria própria

Quadro 14: Script de controle do sistema (parte 2)

```

for i = 1:1:N
    isPos(i) = verifyPos(array.x(i), array.y(i), array.z(i), ...
        beta_wt(i), gamma_ws(i), t1_w(i));
    if isPos(i) == 0
        scatter3(array.x(i),array.y(i),array.z(i),'g*');
        valid = valid+1;
    else
        scatter3(array.x(i),array.y(i),array.z(i),'r*');
        invalid = invalid+1;
    end
end
pause(120);
%% Serial
s = serial('com3', 'BaudRate', 9600, 'DataBits', 7, 'Parity', 'even',...
'StopBits', 1, 'Terminator', 'CR', 'FlowControl', 'hardware');
fclose(instrfind);
error = zeros(N,1);

fopen(s);
toolLenght(s, 289.4);
ntRobot(s); %Nest robot
pause(1);

moveto(s, 10); %Approach position
pause(3);

%% Movement and measurements
for i = 1:1:N
    fprintf(1, 'Position %i of %i\n', i, N);
    moveCoor(s,array.x(i),array.y(i),array.z(i),beta_wt(i),gamma_ws(i));
    pause(3);
    while(1)
        pos = readPosition(s);
        pos_num = str2double(split(pos, ','));
        if pos_num == ([round(array.x(i),1);round(array.y(i),1);...
            round(array.z(i),1);round(beta_wt(i),1);...
            round(gamma_ws(i),1)])
            break
        end
    end
    result(i) = MS1.run;
    i_str = string(i);

    fileNameExtITA =
strcat(strcat(strcat(strcat(folderName, '\'), ...
        fileName), '_'), i_str), '.ita');
    fileNameExtWAV =
strcat(strcat(strcat(strcat(folderName, '\'), ...
        fileName), '_'), i_str), '.wav');

    ita_write(result(i), fileNameExtITA); % Saves individual measurement
                                        % in .ita format
    audiowrite(fileNameExtWAV, result(i).timeData, 96000,...
        'BitsPerSample', 32); % Saves individual measurement
                                % in .wav format
end
ntRobot(s);
fclose(s); % disconnect serial port object from the device
delete(s); % remove serial port object from memory
clear s; % remove serial port object from the MATLAB workspace

```

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE C – Códigos de Geração dos Arranjos

Este apêndice traz os códigos para geração dos arranjos esférico unidirecional, aleatório unidirecional e esférico apontando para a fonte sonora (não utilizado).

Quadro 15: Script de geração do arranjo esférico unidirecional (parte 1)

```

%% ARRAY FORMATION TEST
% AUTHOR: AUGUSTO CESAR FANTINELLI DE CARVALHO
% Date: 6/8
% The following program creates spherical arrays using geodesic
subdivision
% Modified to be compatible with the movement and measurement program;
clear; clc;
addpath('Robot Array Forming');
addpath('icosphere');

%% Array reference
x_c = 0;
y_c = 500;
z_c = 297;
R = 80; % Radius
sph = icosphere(2);
%% Source reference
x_s = 3000;
y_s = 3000;
z_s = 600;
%% Array limits
xlim = [-361.6 - x_c, 361.6 - x_c]; % Limit in X
ylim = [407.1 - y_c, 577.2 - y_c]; % Limit in Y
zlim = [34.8 - z_c, 610.4 - z_c]; % Limit in Z
lng_mlim = [0 2*pi];
clt_mlim = [0 pi];

%% Spherical array
lng_m = pi/2;
clt_m = pi/2;

N = length(sph.Vertices);
beta_wt = zeros(N,1); % Initializes the list of beta angles
gamma_w = zeros(N,1); % Initializes the list of gamma angles
gamma_ws = zeros(N,1);
gamma_wc = zeros(N,1);
t1_w = zeros(N,1); % Initializes the list of theta 1 gamma angles

array = itaCoordinates(length(sph.Vertices));

array.cart(:,1) = R*sph.Vertices(:,1) + x_c;
array.cart(:,2) = R*sph.Vertices(:,2) + y_c;
array.cart(:,3) = R*sph.Vertices(:,3) + z_c;
nrm = sqrt((array.cart(:,1) - x_c).^2 + (array.cart(:,2) - y_c).^2 +
(array.cart(:,3) - z_c).^2);

```

Fonte: Autoria própria

Quadro 16: Script de geração do arranjo esférico unidirecional (parte 2)

```

for i = 1:1:N
    i_m = sin(clt_m)*cos(lng_m);
    j_m = sin(lng_m)*sin(clt_m);
    k_m = cos(clt_m);
    t1_w(i) = atan2d(array.x(i),array.y(i));
    gamma_ws(i) = asind(sqrt(2)*(-i_m*cosd(t1_w(i)) + j_m*sind(t1_w(i))));
    beta_wt(i) = atand(-(k_m + j_m*cosd(gamma_ws(i))*cosd(t1_w(i))...
        + i_m*cosd(gamma_ws(i))*sind(t1_w(i)))/(j_m*cosd(t1_w(i)) ...
        + i_m*sind(t1_w(i)) - k_m*cosd(gamma_ws(i))));
end
% Plot the array points
figure;
str1 = ['R = ', num2str(R), 'mm,'];
str2 = ['O_a = ', num2str(x_c, '%.2f'), ', ', num2str(y_c, '%.2f'), ', ', ...
    num2str(z_c, '%.2f')];
annotation('textbox', [0.6 0.5 .3 .3], 'String', {str1,str2},...
    'FitBoxToText', 'on', 'FontName', 'Times New Roman');
scatter(array);
hold on
scatter3(0,0,0,'r*', 'LineWidth', 1); % Robot reference
scatter3(x_c,y_c,z_c,'b*', 'LineWidth', 1); % Array centre
scatter(array);
hold on
scatter3(0,0,0,'r*');
hold on
dir_vs = [sin(clt_m)*cos(lng_m), sin(clt_m)*sin(lng_m), cos(clt_m)];
for i = 1:1:N
    quiver3(array.x(i), array.y(i), array.z(i),...
        dir_vs(1), dir_vs(2), dir_vs(3),25, 'Color', [0.9290 0.6940
0.1250]);
end

valid = 0;
invalid = 0;
isPos = zeros(N,1);
hold on
for i = 1:1:N
    isPos(i) = verifyPos(array.x(i), array.y(i), array.z(i), beta_wt(i),
    ...
        gamma_ws(i), t1_w(i));
    if isPos(i) == 0
        scatter3(array.x(i),array.y(i),array.z(i),'g*');
        valid = valid+1;
    else
        scatter3(array.x(i),array.y(i),array.z(i),'r*');
        invalid = invalid+1;
    end
end
end

fileID = fopen('sph_array.txt', 'w');
fprintf(fileID, ' x y z \n');
for i = 1:1:N
    fprintf(fileID, '%4.4f %4.4f %4.4f \n', array.x(i), array.y(i),
array.z(i));
end
fclose(fileID);

save('array_name.mat', 'array', 'beta_wt', 'gamma_ws', 't1_w');

```

Fonte: Autoria própria

Quadro 17: Script de geração do arranjo aleatório unidirecional (parte 1)

```

%% RANDOM ARRAY FORMATION TEST
% AUTHOR: AUGUSTO CESAR FANTINELLI DE CARVALHO
% Date: 6/8
% The following program creates RANDOM position arrays with CONSTANT
% orientation;
% Modified to be compatible with the movement and measurement program;
clear; clc;
addpath('Robot Array Forming');

%% Array reference
x_c = 0;
y_c = 0;
z_c = 0;

%% Source reference
x_s = 3000;
y_s = 3000;
z_s = 600;

%% Array limits
xlim = [-200, +200];    % Limit in X
ylim = [+500, +600];  % Limit in Y
zlim = [+100, +270];  % Limit in Z

lng_mlim = [0 2*pi];
clt_mlim = [0 pi];

%% Random positions array
N = 5; % # of positions
array = itaCoordinates(N); % Initializes the list of positions
% Setting the positions by generating x, y and z vectors of random numbers
array.x = xlim(1) + (xlim(2) - xlim(1)).*rand(N,1) + x_c;
array.y = ylim(1) + (ylim(2) - ylim(1)).*rand(N,1) + y_c;
array.z = zlim(1) + (zlim(2) - zlim(1)).*rand(N,1) + z_c;

% Constant orientation
lng_m = pi/2;
clt_m = pi/2;

beta_wt = zeros(N,1); % Initializes the list of beta angles
beta_wt2 = zeros(N,1);
gamma_ws = zeros(N,1); % Initializes the list of gamma angles
gamma_ws2 = zeros(N,1);
t1_w = zeros(N,1); % Initializes the list of theta 1 gamma angles

for i = 1:1:N
    i_m = sin(clt_m)*cos(lng_m);
    j_m = sin(lng_m)*sin(clt_m);
    k_m = cos(clt_m);
    t1_w(i) = atan2d(array.x(i),array.y(i));
    gamma_ws(i) = asind(sqrt(2)*(-i_m*cosd(t1_w(i)) + j_m*sind(t1_w(i))));
    gamma_ws2(i) = 180 - gamma_ws(i);
    beta_wt(i) = atand(-(k_m + j_m*cosd(gamma_ws(i))*cosd(t1_w(i)) + ...
        i_m*cosd(gamma_ws(i))*sind(t1_w(i)))/(j_m*cosd(t1_w(i)) +
    i_m*sind(t1_w(i)) - k_m*cosd(gamma_ws(i))));
    beta_wt2(i) = atand(-(k_m + j_m*cosd(gamma_ws2(i))*cosd(t1_w(i))...
        + i_m*cosd(gamma_ws2(i))*sind(t1_w(i)))/(j_m*cosd(t1_w(i)) +
    i_m*sind(t1_w(i)) - k_m*cosd(gamma_ws2(i))));
end

```

Fonte: Autoria própria

Quadro 18: Script de geração do arranjo aleatório unidirecional (parte 2)

```

% Plot the array points
figure;
scatter(array);
hold on
scatter3(0,0,0,'r*');
hold on
%scatter3(x_c,y_c,z_c,'b*', 'LineWidth', 1); % Array centre
hold on
dir_vs = [sin(clt_m)*cos(lng_m), sin(clt_m)*sin(lng_m), cos(clt_m)];
for i = 1:1:N
    quiver3(array.x(i), array.y(i), array.z(i),...
            dir_vs(1), dir_vs(2), dir_vs(3),25, 'Color', [0.9290 0.6940
0.1250]);
end

valid = 0;
invalid = 0;
isPos = zeros(N,1);
hold on
for i = 1:1:N
    isPos(i) = verifyPos(array.x(i), array.y(i), array.z(i),
beta_wt(i),...
    gamma_ws(i), t1_w(i));
    if isPos(i) == 0
        scatter3(array.x(i),array.y(i),array.z(i),'g*');
        valid = valid+1;
    else
        scatter3(array.x(i),array.y(i),array.z(i),'r*');
        invalid = invalid+1;
    end
end

fileID = fopen('rnd_array_5.txt', 'w');
fprintf(fileID, '  x      y      z  \n');
for i = 1:1:N
    fprintf(fileID, '%4.4f %4.4f %4.4f \n', array.x(i), array.y(i),
array.z(i));
end
fclose(fileID);

save('array_name.mat','array','beta_wt','gamma_ws','t1_w');

```

Fonte: Autoria própria

Quadro 19: Script de geração do arranjo esférico apontando para a fonte (parte 1)

```

%% ARRAY FORMATION
% AUTHOR: AUGUSTO CESAR FANTINELLI DE CARVALHO
% Date: 30/8
% The following program creates spherical arrays using geodesic subdivision
% with the microphone pointing to the sound source
clear; clc;
addpath('Robot Array Forming');
addpath('icosphere');

%% Array reference
x_c = 300;
y_c = 300;
z_c = 300;
R = 75; % Radius
sph = icosphere(2);

%% Source reference
x_s = 1500;
y_s = 2000;
z_s = 500;

%% Array limits
xlim = [-361.6 - x_c, 361.6 - x_c]; % Limit in X
ylim = [407.1 - y_c, 577.2 - y_c]; % Limit in Y
zlim = [34.8 - z_c, 610.4 - z_c]; % Limit in Z

lng_mlim = [0 2*pi];
clt_mlim = [0 pi];

%% Spherical array
array = itaCoordinates(length(sph.Vertices));
N = length(sph.Vertices);

r_array_w = itaCoordinates(N); % Initializes the list of robot wrist (w)
positions
beta_wt = zeros(N,1); % Initializes the list of beta angles
gamma_w = zeros(N,1); % Initializes the list of gamma angles
gamma_ws = zeros(N,1);
gamma_wc = zeros(N,1);
t1_w = zeros(N,1); % Initializes the list of theta 1 gamma angles

array.cart(:,1) = R*sph.Vertices(:,1) + x_c;
array.cart(:,2) = R*sph.Vertices(:,2) + y_c;
array.cart(:,3) = R*sph.Vertices(:,3) + z_c;
nrm = sqrt((x_s - array.cart(:,1)).^2 + (y_s - array.cart(:,2)).^2 + (z_s -
array.cart(:,3)).^2);

```

Fonte: Autoria própria

Quadro 20: Script de geração do arranjo esférico apontando para a fonte (parte 2)

```

figure;
str1 = ['R = ', num2str(R), 'mm,'];
str2 = ['O_a = ', num2str(x_c, '%.2f'), ', ', num2str(y_c, '%.2f'), ', ',
num2str(z_c, '%.2f')];
annotation('textbox', [0.6 0.5 .3 .3], 'String', {str1,str2},
'FitBoxToText', 'on');
scatter(array);
hold on
scatter3(0,0,0,'r*', 'LineWidth', 1); % Robot reference
scatter3(x_c,y_c,z_c,'b*', 'LineWidth', 1); % Array centre
% scatter3(x_s,y_s,z_s,'y*', 'LineWidth', 1) % Source centre
hold on
quiver3(array.cart(:,1), array.cart(:,2), array.cart(:,3),...
(x_s - array.cart(:,1)).*nrm.^(-1),...
(y_s - array.cart(:,2)).*nrm.^(-1),...
(z_s - array.cart(:,3)).*nrm.^(-1), 'Color', [0.9290 0.6940 0.1250]);

clt_m = acos((z_s - array.cart(:,3)).*nrm.^(-1));
lng_m = real(acos((x_s - array.cart(:,1)).*nrm.^(-1)).*sin(clt_m).^(-1));

for i = 1:1:N
    i_m = sin(clt_m).*cos(lng_m);
    j_m = sin(lng_m).*sin(clt_m);
    k_m = cos(clt_m);
    t1_w(i) = atan2d(array.x(i),array.y(i));
    gamma_ws(i) = asind(sqrt(2)*(-i_m(i)*cosd(t1_w(i))...
+ j_m(i)*sind(t1_w(i))));
    gamma_wc(i) = acosd(sqrt(2)*(i_m(i)*cosd(t1_w(i))...
+ j_m(i)*sind(t1_w(i))));
    beta_wt(i) = atand(-(k_m(i) + j_m(i)*cosd(gamma_ws(i))*cosd(t1_w(i))...
+ i_m(i)*cosd(gamma_ws(i))*sind(t1_w(i)))/(j_m(i)*cosd(t1_w(i))...
+ i_m(i)*sind(t1_w(i)) - k_m(i)*cosd(gamma_ws(i))));
end

valid = 0;
invalid = 0;
isPos = zeros(array.nPoints,1);
for i = 1:1:array.nPoints
    isPos(i) = verifyPos(array.x(i), array.y(i), array.z(i),...
beta_wt(i), gamma_ws(i), t1_w(i));
    if isPos(i) == 0
        scatter3(array.x(i),array.y(i),array.z(i),'g*');
        valid = valid+1;
    elseif isPos(i) == 1
        scatter3(array.x(i),array.y(i),array.z(i),'r*');
        invalid = invalid+1;
    end
end
end
save('array_name.mat', 'array', 'beta_wt', 'gamma_ws', 't1_w');

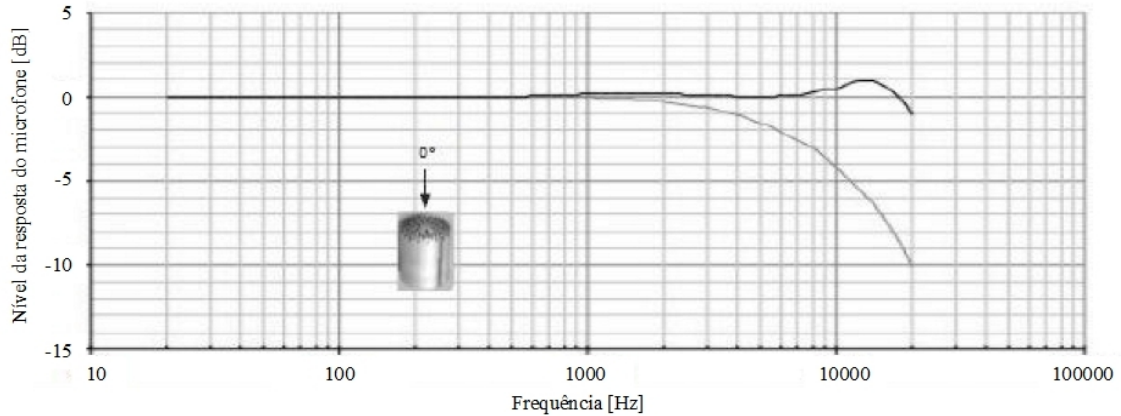
```

Fonte: Autoria própria

ANEXO A – Respostas em Frequência dos Microfones

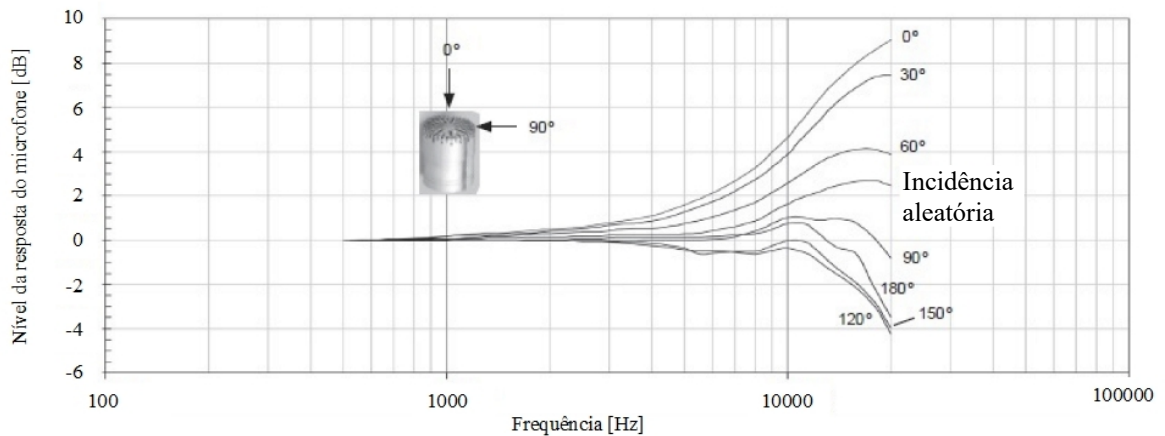
Este anexo é dedicado a mostrar as respostas em frequência dos microfones GRAS 40AE de campo livre (Figura 28) e GRAS 46AQ de campo difuso (Figura 30). As correções de campo livre para os microfones estão nas Figura 29 (GRAS 40AE) e Figura 30 (GRAS 46AQ). Segundo os respectivos manuais dos microfones, esses gráficos foram obtidos a partir de excitações em 250 Hz (GRAS, 2019; GRAS, 2019).

Figura 38: Resposta em frequência do microfone GRAS 40AE

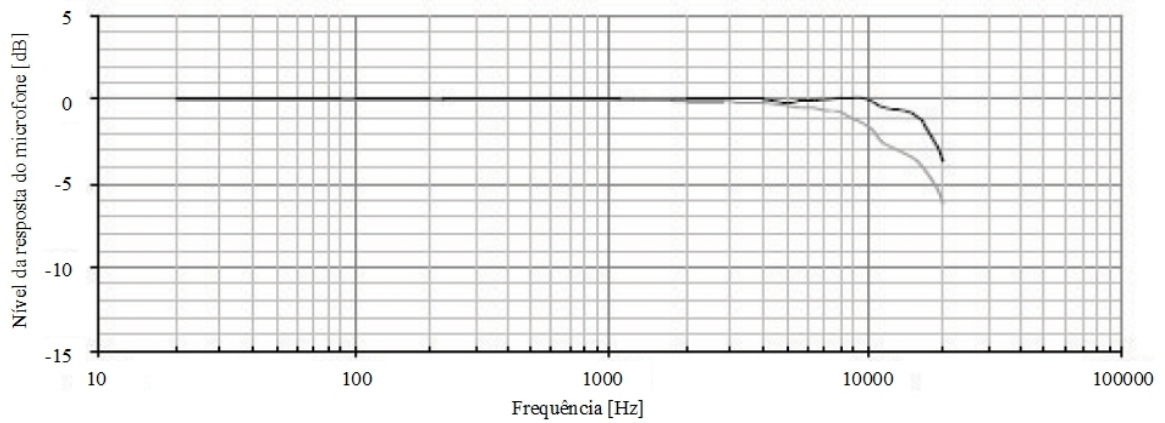


Fonte: GRAS (2019)

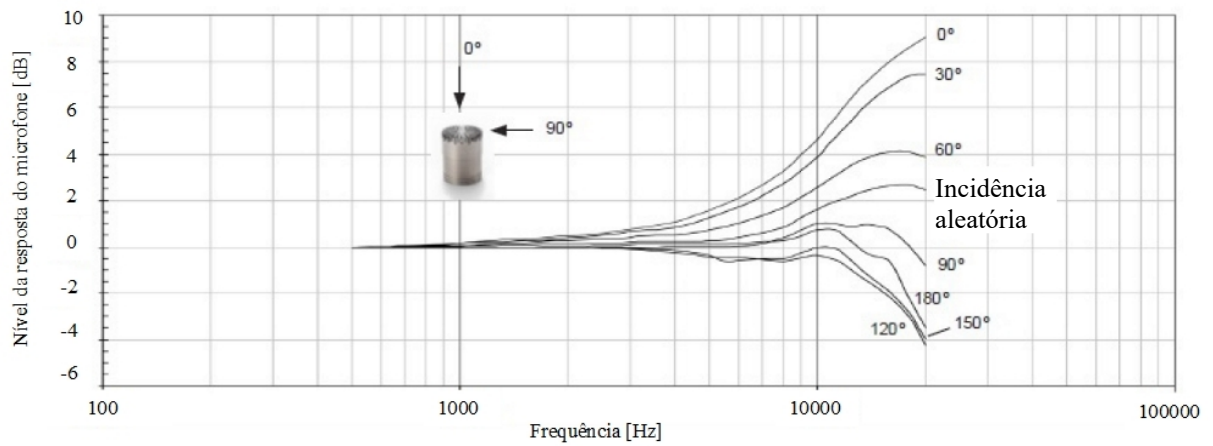
Figura 39: Correções de campo livre para o microfone GRAS 40AE



Fonte: GRAS (2019)

Figura 40: Resposta em frequência do microfone GRAS 46AQ

Fonte: GRAS (2019)

Figura 41: Correções de campo livre para o microfone GRAS 46AQ

Fonte: GRAS (2019)