



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

Lucas Martins Gonçalves Ribeiro

**Avaliação ergonômica com proposta de melhoria na agradabilidade do ruído
de refrigeradores domésticos**

Florianópolis
2024

Lucas Martins Gonçalves Ribeiro

**Avaliação ergonômica com proposta de melhoria na agradabilidade do ruído
de refrigeradores domésticos**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de produção mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica com habilitação em engenharia de produção.
Orientador: Prof^a. *Lizandra Garcia Lupi Vergara, Dra.*

Florianópolis
2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Ribeiro, Lucas
Avaliação ergonômica com proposta de melhoria na
agradabilidade do ruído de refrigeradores domésticos /
Lucas Ribeiro ; orientadora, Profa. Lizandra Garcia Lupi
Vergara, 2024.
62 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, Florianópolis,
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Mecânica. 2. Ergonomia. 3.
Engenharia do Produto. 4. Qualidade Sonora. 5.
Agradabilidade. I. Vergara, Profa. Lizandra Garcia Lupi.
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia de Produção Mecânica. III. Título.

Lucas Martins Gonçalves Ribeiro

**Avaliação ergonômica com proposta de melhoria na agradabilidade do ruído
de refrigeradores domésticos**

Este trabalho de conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de produção mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de bacharel em engenharia mecânica com habilitação em engenharia de produção. Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “bacharel em engenharia mecânica com habilitação em engenharia de produção” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de produção mecânica.

Florianópolis, 10 de dezembro de 2024.

Prof^a. *Monica Maria Mendes Luna, Dra.*
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof^a. *Lizandra Garcia Lupi Vergara, Dra.*
Orientador

Dedicatória

Dedico este trabalho a Bruna e Marilda,
por todo o apoio emocional, carinho e compreensão
durante esta etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Laboratório de Vibrações e Acústica pela oportunidade de aprendizado e, especialmente, aos professores Arcanjo Lenzi e Felipe Vergara, pelo suporte técnico ao longo do desenvolvimento deste trabalho. À minha orientadora, expresso minha gratidão pela confiança no meu trabalho, pela liberdade e autonomia concedidas, e pelas orientações essenciais para a realização deste projeto.

Um agradecimento especial ao Ricardo e ao Henrique, ambos doutorandos no laboratório, com quem tive a oportunidade de compartilhar valiosas trocas de conhecimento e aprendizado. Agradeço a generosidade ao transmitir conhecimento e disponibilidade em ajudar.

Aos colaboradores e colegas de trabalho, Rafael e Dona Sônia, sou grato pelos momentos de descontração e companheirismo, sempre com uma palavra de apoio ou um riso fácil.

Agradeço também a todos que se mostraram solícitos e dispostos a me auxiliar ao responderem ao teste de júri. Por fim, meu sincero agradecimento à minha namorada Bruna, aos meus familiares e aos amigos de longa data, cujo apoio foi fundamental nesta jornada.

*“Educação não transforma o mundo.
Educação muda as pessoas.
Pessoas transformam o mundo.
(Paulo Freire, 1992)*

RESUMO

Este estudo visa avaliar e aprimorar a qualidade sonora de um refrigerador doméstico, focando principalmente no ruído gerado pelo compressor e ventilador. O objetivo é entender as características acústicas dessas fontes de ruído e otimizar a operação do compressor, que possui rotação variável, para aumentar a agradabilidade do produto e promover um ambiente mais tranquilo. A pesquisa não se limita a identificar a rotação ideal, tendo também como enfoque explorar as faixas de frequências que causam maior desconforto auditivo. Com base nessa análise, o estudo propõe melhorias, como o revestimento do "DogHouse", onde o compressor está localizado, visando reduzir o ruído e aprimorar a experiência do usuário. As iniciativas pretendem não apenas elevar a eficiência técnica, mas também fortalecer a conexão entre a marca e os consumidores, aumentando a satisfação do cliente e a qualidade de vida. O resultado obtido é uma melhoria significativa na agradabilidade do refrigerador, estabelecendo um padrão elevado na experiência do consumidor e consolidando a posição do produto no mercado.

Palavras-chave: Ergonomia. Engenharia do Produto. Qualidade Sonora. Ruído. Agradabilidade.

ABSTRACT

This study aims to evaluate and enhance the sound quality of a domestic refrigerator, focusing primarily on the noise generated by the compressor and fan. The objective is to understand the acoustic characteristics of these noise sources and optimize the operation of the compressor, which has variable speed, to increase the product's agradability and promote a quieter environment. The research does not merely seek to identify the ideal rotation speed but also focuses on exploring the frequency ranges that cause greater auditory discomfort. Based on this analysis, the study proposes improvements, such as insulating the "DogHouse," where the compressor is located, to reduce noise and improve user experience. These initiatives aim not only to enhance technical efficiency but also to strengthen the connection between the brand and consumers, increasing customer satisfaction and improving quality of life. The result is a significant enhancement in the refrigerator's agradability, setting a high standard in consumer experience and consolidating the product's position in the market.

Keywords: Ergonomics. Product Engineering. Sound Quality. Noise. Agradability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos relacionados com o desenvolvimento de produtos. Fonte: Rozenfeld et al. (2006).	20
Figura 2 – Etapas da pesquisa das necessidades de mercado Fonte: Baxter (1998) .	21
Figura 3 – Contornos padrão de audibilidade para tons puros Fonte: Imagem cedida por Gabriel Brandão [2024]	26
Figura 4 – Cobertura do Doghouse. Fonte: do Autor.	30
Figura 5 – Calibrador acústico utilizado nas medições. Fonte: o Autor	33
Figura 6 – Placa ADC utilizada no experimento para captura de dados. Fonte: do Autor	34
Figura 7 – Frequencímetro utilizado para ajustes de rotação do compressor. Fonte: do Autor	37
Figura 8 – Interface teste de júri (Cadastro). Fonte: Silveira (2024)	42
Figura 9 – Interface teste de júri (Instruções). Fonte: Silveira (2024)	43
Figura 10 – Interface teste de júri (Treinamento). Fonte: Silveira (2024)	43
Figura 11 – Interface teste de júri (Testes). Fonte: Silveira (2024)	44
Figura 12 – Interface teste de júri (FeedBack). Fonte: Silveira (2024)	44
Figura 13 – Posição do microfone em relação ao refrigerador. Fonte: do Autor. . . .	45
Figura 14 – Distância do microfone em relação ao solo. Fonte: do Autor.	46
Figura 15 – Distância do microfone em relação ao refrigerador. Fonte: do Autor. . .	46
Figura 16 – Resultados Obtidos da métrica Loudness. Fonte: do autor	47
Figura 17 – Resultados Obtidos da métrica Roughness. Fonte: do autor	48
Figura 18 – Resultados Obtidos da métrica Sharpness. Fonte: do autor	49
Figura 19 – Média das respostas de incômodo do teste de júri. Fonte: do autor . . .	51
Figura 20 – Histogramas das respostas dos áudios. Fonte: do autor	51
Figura 21 – Resultado teste T comparativo com e sem Doghouse. Fonte: do autor .	53
Figura 22 – <i>Heatmap</i> dos valores-p para configuração com cobertura do <i>Doghouse</i> . Fonte: do autor.	54
Figura 23 – <i>Heatmap</i> dos valores-p para configuração padrão. Fonte: do autor. . . .	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações sobre o Microfone de Campo Livre <i>Type</i> 4966	32
Tabela 2 – Distribuição das Variáveis Sociodemográficas	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	ERGONOMIA	16
2.1.1	Ergonomia do Produto	16
2.1.1.1	Usabilidade	17
2.1.1.2	Agradabilidade	18
2.2	PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO	19
2.2.1	Necessidades do mercado	20
2.2.2	Experiência do usuário	21
2.3	PSICOACÚSTICA	22
2.3.1	Coleta dos sinais no domínio do tempo	24
2.3.2	Sinais no Domínio da Frequência - FFT	24
2.3.3	Métricas psicoacústicas	25
2.3.3.1	Loudness	27
2.3.3.2	Sharpness	27
2.3.3.3	Roughness	27
2.3.4	Teste de júri	27
3	MÉTODOS ADOTADOS	29
3.1	COLETA DE DADOS DE PRESSÃO SONORA	31
3.1.1	Equipamentos e Estrutura Requerida	31
3.1.1.1	Câmara Reverberante	31
3.1.1.2	Microfones de campo livre	32
3.1.1.2.1	Aferição dos microfones	32
3.1.1.3	Conversores Analógico-Digital (ADC)	33
3.1.1.4	Software de Aquisição de Dados (BK Connect)	34
3.1.2	Medição de pressão sonora do refrigerador	35
3.1.2.1	Coleta de Dados	36
3.1.2.2	Alteração da rotação	37
3.1.2.3	Cobertura do <i>Doghouse</i>	38
3.2	MÉTRICAS PSICOACÚSTICAS	38
3.2.1	Aplicação das métricas psicoacústicas no ruído do refrigerador	39

3.3	TESTE DE JÚRI	40
3.3.1	Calibração do fone de ouvido	40
3.3.2	Equipamentos e Estrutura Requerida	41
3.3.3	Procedimento de Coleta de Dados	41
4	RESULTADOS	45
4.1	COLETA DE DADOS	45
4.2	MÉTRICAS PSICOMÉTRICAS	46
4.2.1	Loudness	46
4.2.2	Roughness	47
4.2.3	Sharpness	48
4.3	TESTE DE JÚRI	49
4.3.1	Análises paramétricas	52
4.3.2	Análises não paramétricas	53
4.3.2.1	ANOVA e Teste de Dunn	54
5	CONCLUSÕES	57
6	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A qualidade sonora dos produtos domésticos, especialmente daqueles que operam continuamente, como os refrigeradores, é essencial para a experiência dos usuários e para a aceitabilidade do produto no mercado. Sons inadequados emitidos por esses equipamentos podem causar desconforto e prejudicar o bem-estar dos consumidores, o que torna a qualidade sonora um aspecto crítico no desenvolvimento de novos produtos (LANGEVELD et al., 2013). Segundo Pedersen e Fog (1998), o som de um produto deve ser projetado com o intuito de transmitir atributos de qualidade, evitando se tornar um fator de irritação.

No caso de eletrodomésticos de uso contínuo, como refrigeradores, o ruído torna-se ainda mais relevante devido à exposição prolongada, o que pode afetar significativamente a qualidade de vida dos usuários. Imagine conviver diariamente com um som que é, no mínimo, desagradável. Esse é o impacto que um ruído excessivo ou mal projetado pode causar, e, como observa Jay (2007), a exposição a sons indesejáveis interfere diretamente na sensação de conforto em casa e na satisfação com o produto.

Além disso, a ergonomia desempenha um papel essencial no desenvolvimento de produtos focados na experiência do usuário. O design precisa considerar não apenas aspectos técnicos, mas também as percepções e as necessidades dos consumidores. De acordo com Iida (2018), a ergonomia aplicada ao design de produtos visa melhorar não apenas a funcionalidade, mas também o bem-estar do usuário, atendendo a necessidades físicas, cognitivas e emocionais.

Outro aspecto fundamental é a percepção sonora. Estudos em psicoacústica mostram que sons e ruídos influenciam a nossa percepção de qualidade, confortando ou incomodando de maneiras que afetam diretamente a nossa satisfação. Gerges (2000) observa que combinar critérios de engenharia de ruído com avaliações subjetivas, como testes de júri, permite uma análise mais completa sobre como as características acústicas de um produto impactam seu uso. Nesse sentido, Bech e Zacharov (2006) também destacam que o foco na experiência sonora é essencial para o desenvolvimento de produtos que realmente se conectem com as expectativas dos usuários, criando ambientes mais agradáveis e confortáveis.

Assim, este trabalho espera contribuir para o aprimoramento da qualidade sonora de refrigeradores, com o objetivo de proporcionar uma experiência de uso mais agradável para os consumidores. Ao entender melhor como o som é percebido e como ele afeta o conforto diário, é possível criar produtos que não apenas desempenhem bem sua função, mas que também tragam mais qualidade ao nosso dia a dia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Aprimorar a qualidade sonora de um refrigerador doméstico visando melhorar a eficiência técnica do produto para maior aceitabilidade do consumidor.

1.2.2 Objetivos Específicos

A partir do objetivo geral, têm-se os objetivos específicos:

- Avaliar a qualidade acústica de um refrigerador doméstico com base na experiência do usuário.
- Verificar a agradabilidade do produto quanto ao grau de aceitação do produto.
- Propor melhorias na configuração do produto, com a tecnologia embarcada já existente, para agregar valor ao produto.

1.3 JUSTIFICATIVA

A qualidade sonora de produtos domésticos, como refrigeradores, é crucial para a experiência do usuário e para sua aceitação no mercado, pois ruídos incômodos afetam o bem-estar e a satisfação do consumidor. Estudos em ergonomia e psicoacústica mostram que o som contínuo e inadequado pode tornar-se um fator de rejeição (Langeveld et al., 2013; Gerges, 2000). Este trabalho, portanto, busca avaliar e aprimorar a agradabilidade do ruído de refrigeradores, focando no compressor como principal fonte de incômodo auditivo.

A pesquisa justifica-se pela demanda crescente por produtos silenciosos que favoreçam o conforto doméstico. Utilizando análise psicoacústica e testes de júri, este estudo investiga os níveis de incômodo em diferentes rotações do compressor e propõe melhorias acústicas, como o uso de revestimento no Doghouse. Essas intervenções visam não apenas melhorar a percepção do ruído, mas também agregar valor ao produto, fortalecendo a conexão com os consumidores.

Em resumo, a pesquisa contribui para o desenvolvimento de produtos ergonômicos e agradáveis, propondo soluções práticas e baseadas em dados que atendam às expectativas de conforto, reforçando a relevância do design acústico na engenharia de produto.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos que buscam apresentar de forma lógica e sequencial a pesquisa realizada, desde a contextualização do problema até as

conclusões e recomendações. Abaixo, é apresentada uma visão geral de cada capítulo, que facilita a compreensão e a estruturação dos temas abordados.

No Capítulo 1 – Introdução, são estabelecidos o contexto e a relevância do estudo, abordando as motivações que justificam a pesquisa e os objetivos principais a serem alcançados. Este capítulo também inclui uma justificativa sobre a importância da qualidade sonora em produtos domésticos e o impacto que o ruído contínuo, como o de refrigeradores, pode ter na experiência do usuário e na aceitação do produto no mercado.

O Capítulo 2 – Fundamentação Teórica fornece a base teórica que embasa a pesquisa, abordando temas como ergonomia, ergonomia do produto e psicoacústica. O enfoque inicial explora a importância do design focado na usabilidade e na agradabilidade, considerando as necessidades físicas e emocionais dos usuários. Em seguida, são discutidos conceitos fundamentais de psicoacústica e suas principais métricas, como loudness, sharpness e roughness, essenciais para a análise da percepção do som no uso de produtos.

No Capítulo 3 – Métodos Adotados, são descritos os procedimentos de coleta e análise de dados utilizados na pesquisa. Este capítulo abrange a configuração do ambiente de medição, os equipamentos empregados, incluindo microfones e câmaras reverberantes. Também é apresentado o procedimento do teste de júri, utilizado para avaliar a percepção subjetiva de incômodo dos participantes com o ruído gerado pelo refrigerador em diferentes condições de operação.

O Capítulo 4 – Resultados apresenta os achados da pesquisa, organizados em duas partes principais: análise das métricas psicoacústicas e resultados do teste de júri. São discutidos os valores das métricas de loudness, sharpness e roughness obtidos para diferentes rotações do compressor, bem como a eficácia da cobertura acústica Doghouse no atenuamento do ruído. Além disso, são aplicadas análises paramétricas e não paramétricas para validar a percepção de incômodo auditivo, permitindo uma análise robusta das respostas dos participantes.

Finalmente, no Capítulo 5 – Conclusões, são discutidas as principais contribuições do estudo e as implicações dos resultados para o desenvolvimento de produtos mais agradáveis e ergonômicos. Este capítulo também destaca as limitações da pesquisa e oferece recomendações para estudos futuros, reforçando a importância de aprimorar a qualidade sonora de refrigeradores domésticos para proporcionar uma experiência de uso mais confortável e satisfatória.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ERGONOMIA

A ergonomia, conforme ressaltado pelo Engenheiro e Professor Itiro Iida (2018), tem como objetivo fundamental o estudo de sistemas que promovem a harmonia entre máquinas, ambientes e o ser humano. Esse conceito vai além da simples otimização de tarefas e espaços, pois envolve uma compreensão profunda das necessidades físicas, cognitivas e emocionais dos indivíduos. Ao projetar ambientes e dispositivos, é essencial considerar essas características humanas para garantir não apenas a eficácia operacional, mas também o bem-estar do usuário.

A ergonomia se desdobra em diversas áreas, incluindo a ergonomia física, que se concentra na adequação das características físicas do trabalho às capacidades e limitações do corpo humano, e a ergonomia cognitiva, que aborda a interação entre usuários e sistemas, enfatizando a importância de um design que facilite a compreensão e a usabilidade. Além disso, a ergonomia emocional, um conceito emergente, reconhece que a experiência do usuário é influenciada por fatores emocionais, reforçando a necessidade de um design que promova a satisfação e o conforto.

A busca pela harmonia destaca a importância da integração equilibrada entre o ser humano e o ambiente em que ele opera. Essa interdependência entre elementos técnicos e humanos é fundamental para o desenvolvimento de ambientes de trabalho que não apenas melhorem a eficiência, mas também garantam a saúde e a segurança dos usuários. Assim, a ergonomia não se limita a um mero ajuste físico; é uma disciplina comprometida em criar ambientes que promovam a qualidade de vida.

Ademais, é vital considerar as implicações psicoacústicas na ergonomia, uma vez que a qualidade sonora dos ambientes de trabalho pode influenciar diretamente o desempenho e o conforto dos indivíduos. Estudos em psicoacústica mostram que ambientes com ruídos indesejáveis podem causar distrações e estresse, enquanto uma acústica bem projetada contribui para um ambiente mais produtivo e agradável (Blauert, 2005; Fastl e Zwicker, 2007). Assim, a ergonomia, ao integrar aspectos físicos, cognitivos, emocionais e sonoros, busca proporcionar um espaço de trabalho holístico que favoreça tanto a eficiência quanto o bem-estar.

2.1.1 Ergonomia do Produto

A ergonomia do produto é uma disciplina essencial que busca projetar e produzir objetos e dispositivos que se integrem harmoniosamente às necessidades e conveniências humanas. Segundo Itiro Iida (2018), "os seres humanos sempre procuram adaptar a natureza às suas necessidades e conveniências, modificando e criando meios artificiais quando ela não lhe fosse favorável". Essa adaptação não se limita apenas à funcionalidade do

produto, mas abrange uma série de aspectos que influenciam diretamente a interação do usuário com o objeto.

Para entender a qualidade global de um produto, é crucial classificá-la e identificar os parâmetros que permitem sua mensuração. Iida (2018) destaca que "a qualidade técnica depende dos aspectos materiais, a usabilidade, dos aspectos anatômicos-fisiológicos, e a agradabilidade, dos aspectos emocionais". Nesse contexto, a usabilidade refere-se à facilidade de uso, levando em consideração as características físicas e fisiológicas dos usuários, enquanto a agradabilidade abrange fatores estéticos e simbólicos que impactam a aceitação e o prazer proporcionado pelo produto.

Esse enfoque na ergonomia do produto não apenas responde às necessidades práticas dos usuários, mas também considera aspectos emocionais e estéticos. Designers e engenheiros que aplicam esses princípios buscam criar produtos que não apenas desempenhem suas funções técnicas de maneira eficaz, mas também proporcionem uma experiência de uso agradável e intuitiva. A incorporação de elementos ergonômicos enriquece a interação entre o usuário e o produto, tornando-o mais atrativo e adequado ao seu público-alvo.

Além disso, ao considerar a ergonomia do produto, é fundamental entender como a interação entre humanos e máquinas pode ser otimizada. Um produto bem projetado não deve apenas ser funcional, mas também facilitar a execução das tarefas, minimizando o esforço e o desconforto do usuário. Isso é especialmente relevante em contextos onde o uso prolongado de dispositivos pode levar à fadiga ou ao estresse, refletindo na saúde e no bem-estar do indivíduo.

Portanto, a ergonomia do produto emerge como uma abordagem abrangente que vai além da simples funcionalidade, considerando a interação complexa entre o usuário e o produto. Ao compreender as dimensões técnica, anatômica, fisiológica e emocional, os profissionais podem criar produtos que não apenas atendam às expectativas práticas, mas também proporcionem uma experiência agradável e satisfatória para os usuários. Essa abordagem integrada é essencial para o desenvolvimento de produtos que se destacam em um mercado cada vez mais competitivo, onde a experiência do usuário é um diferencial chave.

2.1.1.1 Usabilidade

A usabilidade é um conceito central na ergonomia do produto, pois se refere à facilidade com que os usuários podem interagir com um dispositivo ou objeto. De acordo com Iida (2018), a usabilidade não se limita apenas à funcionalidade do produto, mas também envolve a adequação do design às características físicas e cognitivas dos usuários. Um produto com alta usabilidade é intuitivo e eficiente, permitindo que o usuário complete suas tarefas com mínimo esforço e frustração.

Para garantir uma usabilidade eficaz, os designers devem considerar vários fatores, como a disposição dos controles, a legibilidade das informações e a acessibilidade dos

recursos. A ergonomia desempenha um papel importante aqui, pois produtos bem projetados devem atender às necessidades específicas de diferentes usuários, levando em conta variáveis como altura, alcance e capacidade física. Quando esses fatores são integrados ao design, o resultado é uma experiência de uso que promove não apenas a eficiência, mas também a satisfação do usuário.

Além da usabilidade, o conforto é um aspecto crítico que deve ser considerado. O conforto físico e psicológico dos usuários tem um impacto significativo na interação com o produto. Iida (2018) ressalta que um ambiente de trabalho ou um dispositivo que proporciona conforto não apenas melhora o desempenho, mas também reduz o estresse e a fadiga, contribuindo para o bem-estar geral do usuário.

Um componente fundamental do conforto é o conforto acústico, que se refere à qualidade sonora do ambiente e como ela afeta a experiência do usuário. Segundo Gerges (2000), ambientes com níveis de ruído controlados e agradáveis facilitam o foco e aprimoram o desempenho, além de proporcionar uma atmosfera mais tranquila.. Os contornos padrão de audibilidade, gerados com base em testes de júri, ilustram como a percepção auditiva varia com a frequência e evidenciam a importância de projetar ambientes que considerem a acústica como um fator essencial para o conforto do usuário.

A inter-relação entre usabilidade, conforto e conforto acústico é evidente em produtos que são projetados com a ergonomia em mente. Por exemplo, em ambientes de trabalho que utilizam dispositivos como computadores, a atenção ao design acústico — como o uso de materiais que absorvem som ou a disposição de fontes de ruído — pode evitar distrações e promover um ambiente mais produtivo. Dessa forma, um enfoque integrado que une usabilidade, conforto e conforto acústico não apenas melhora a experiência do usuário, mas também assegura que os produtos sejam sustentáveis e seguros para uso contínuo.

Assim, ao desenvolver produtos, é fundamental que designers e engenheiros não apenas atendam às expectativas funcionais, mas também criem uma experiência de uso que seja agradável e confortável. Essa abordagem holística é essencial para promover a aceitação do produto e a satisfação do usuário, consolidando a importância da ergonomia na prática de design.

2.1.1.2 Agradabilidade

A agradabilidade é um aspecto essencial na ergonomia do produto, que se refere à capacidade de um dispositivo ou objeto não apenas atender às necessidades funcionais dos usuários, mas também proporcionar uma experiência positiva e satisfatória. Segundo Iida (2018), a agradabilidade vai além das características funcionais e envolve elementos estéticos e emocionais que impactam a aceitação e a desejabilidade do produto. Um design agradável pode despertar emoções positivas, criando uma conexão emocional entre o usuário e o produto, o que é fundamental para a sua aceitação no mercado.

Um produto projetado com foco na agradabilidade considera fatores como forma, cor, textura e ergonomia, além de garantir que esses elementos estejam alinhados com as expectativas e preferências do usuário. Iida (2018) destaca que "os aspectos emocionais são determinantes para a aceitação do produto", sugerindo que a experiência do usuário não se limita à funcionalidade, mas inclui também o prazer estético e a satisfação emocional proporcionados pelo produto.

Além disso, a agradabilidade está intimamente relacionada ao conforto, que é outro aspecto crítico na ergonomia do produto. Produtos que oferecem uma experiência agradável e confortável não só melhoram o desempenho, mas também reduzem a fadiga e o estresse, contribuindo para o bem-estar do usuário. De acordo com Blauert (2001), "o design acústico de um produto deve considerar a experiência sensorial completa, incluindo a interação entre som, forma e ambiente", reforçando a importância de um enfoque holístico que integre a agradabilidade ao design do produto.

A relação entre agradabilidade e conforto acústico é particularmente relevante. Um ambiente que proporciona conforto acústico adequado não apenas melhora a experiência do usuário, mas também contribui para a agradabilidade do produto. A pesquisa de Gerges (2000) indica que a percepção sonora de um produto, como ruídos ou sons indesejados, pode impactar significativamente a satisfação do usuário. Assim, projetar produtos que minimizem ruídos perturbadores e proporcionem uma experiência sonora agradável é fundamental para promover a aceitabilidade e o prazer de uso.

Portanto, ao desenvolver produtos, é crucial que designers e engenheiros considerem a agradabilidade como um elemento central na experiência do usuário. Um enfoque que une usabilidade, conforto e agradabilidade não só melhora a interação do usuário com o produto, mas também fortalece sua aceitação e valor percebido no mercado.

2.2 PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

O Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) é uma área fundamental nas engenharias e na gestão de projetos e, segundo Rozenfeld et al. (2006), é responsável pela concepção, planejamento, desenvolvimento, lançamento e acompanhamento de novos produtos. A compreensão desse processo é crucial para garantir a eficiência e o sucesso de um produto no mercado. A Figura 1 a seguir, de Rozenfeld et al. (2006), explicita os processos relacionados ao PDP.



Figura 1 – Processos relacionados com o desenvolvimento de produtos. Fonte: Rozenfeld et al. (2006).

A identificação de oportunidades no PDP é o ponto de partida para a criação de novos produtos, ou até mesmo modificações em produtos existentes. Essa fase envolve a análise das necessidades dos consumidores, o monitoramento de tendências de mercado e a avaliação das capacidades tecnológicas e das estratégias da empresa. Empresas bem-sucedidas identificam lacunas ou oportunidades de inovação que podem ser preenchidas com novos produtos ou com aprimoramentos de produtos existentes. Uma identificação bem fundamentada de oportunidades pode determinar o sucesso ou o fracasso do projeto.

Este trabalho tem como um de seus objetivos específicos a melhoria da agradabilidade de um produto já lançado e consolidado no mercado. O foco, portanto, está na etapa de acompanhamento do desempenho do produto junto ao usuário, buscando esclarecer quais são as demandas do mercado em relação ao ruído do refrigerador, com vistas a tomar ações que tornem o produto mais aceito e desejado pelo mercado.

2.2.1 Necessidades do mercado

Conforme destacado por Baxter (1998), as ferramentas de projeto contêm a descrição de métodos sistemáticos para o desenvolvimento de novos produtos, podendo ser utilizadas de acordo com a tarefa em questão. A avaliação das necessidades do mercado pode ser feita por meio de abordagens qualitativas ou quantitativas. Neste trabalho, o foco será na avaliação qualitativa, mais especificamente na percepção do usuário a respeito da qualidade sonora do ruído emitido por refrigeradores domésticos. Para o sucesso de um produto, é fundamental conhecer as necessidades do mercado e, se possível, antecipar-se a elas, propondo soluções que tragam diferenciação aos produtos, o que é um fator-chave em um mercado competitivo.

Segundo Gerges (s.d.), "a sensação humana reflete a avaliação de percepção não somente do som pela audição, mas também pela visão, olfato, gustação e tato. É possível usar dois tipos de avaliadores: um grupo de avaliadores treinados (por exemplo, testado-

res de vinho) e outro não treinado (ingênuo), como, por exemplo, o consumidor." Nesse contexto, a percepção será avaliada em ambos os tipos de avaliadores, ou seja, tanto por pessoas com conhecimento em acústica quanto por aquelas sem esse conhecimento, garantindo uma análise abrangente e fiel às diferentes experiências perceptivas.

A pesquisa qualitativa visa obter uma compreensão aprofundada das necessidades de um grupo de consumidores, conforme destacado por Baxter (1998). Essa abordagem inicia-se com a definição do objetivo geral da pesquisa, estabelecido com base no que se deseja saber a respeito do mercado. Em seguida, seguem-se as etapas apresentadas na Figura 2, que ilustram a aplicação da ferramenta de pesquisa das necessidades do mercado.

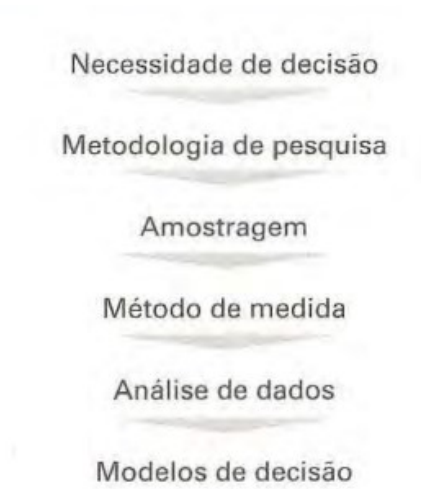


Figura 2 – Etapas da pesquisa das necessidades de mercado Fonte: Baxter (1998)

Sendo a pesquisa qualitativa a abordagem escolhida, o trabalho que se segue baseou-se nas orientações do mesmo autor, que sugere que, para a obtenção de melhores resultados, a amostra deve conter entre 20 e 30 pessoas, no mínimo. Nesse contexto, a pergunta central da pesquisa é se o sinal gerado pelo refrigerador é incômodo ou não. As respostas dos entrevistados serão avaliadas em uma escala, permitindo a comparação em relação ao ruído em diferentes condições de operação do equipamento.

Com os resultados do teste de júri, abordados adiante e fundamentados nas premissas apresentadas por Baxter (1998), espera-se realizar uma análise aprofundada que possibilite a construção de modelos de decisão, levando a uma melhor compreensão das necessidades do mercado.

2.2.2 Experiência do usuário

A experiência do usuário (UX) envolve a totalidade das interações que uma pessoa tem com um produto ou serviço, incluindo elementos como facilidade de uso, acessibilidade e a satisfação emocional resultante dessas interações. Segundo Iida (2018), a experiência do usuário não se restringe apenas à funcionalidade e usabilidade; ela engloba também a percepção contínua que o usuário forma sobre o produto ao longo do tempo. Isso

significa que, mesmo que um produto seja fácil de usar, a experiência do usuário pode ser prejudicada se faltar uma conexão emocional positiva ou se o produto não cumprir com as expectativas do usuário.

Uma experiência positiva do usuário é fundamental para o sucesso de um produto. Ela é influenciada por diversos fatores, como a estética do design, a intuitividade dos controles e a forma como o produto se encaixa nas necessidades e preferências do usuário. Além disso, a criação de um ambiente confortável e seguro também contribui significativamente para a experiência geral (Iida, 2018; Fastl e Zwicker, 2007).

A experiência do usuário deve ser cuidadosamente considerada durante o Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP). Designers e engenheiros devem buscar não apenas a funcionalidade, mas também como o usuário se sente ao interagir com o produto. O feedback dos usuários é crucial para identificar pontos de melhoria, permitindo que os produtos evoluam para atender melhor às necessidades e expectativas do mercado.

Os consumidores frequentemente se sentem atraídos por determinadas marcas com base nas emoções e sentimentos que estas transmitem. Essa associação pode ocorrer de forma subconsciente e é influenciada por experiências pessoais ao longo da vida, moldando a percepção de segurança e conforto que uma marca pode oferecer. Por exemplo, uma marca que consistentemente promove valores de qualidade e confiabilidade tende a cultivar uma lealdade mais forte entre seus consumidores (Iida, 2018; Bech e Zacharov, 2006).

Quando os consumidores interagem com uma marca, suas experiências anteriores e suas associações emocionais podem influenciar a decisão de compra. Marcas que criam experiências positivas, seja por meio do design, usabilidade ou atendimento ao cliente, são mais propensas a serem escolhidas, mesmo que essas decisões não sejam totalmente racionais. O conforto e a segurança associados a uma marca podem, portanto, ser determinantes cruciais em ambientes de compra, levando a uma preferência por produtos que gerem uma sensação de bem-estar (Gerges, 2000; Gonçalves, 2009).

Além disso, a marca pode se tornar um símbolo de status ou um reflexo da identidade do consumidor, onde a escolha de uma marca específica pode expressar valores e aspirações pessoais. Dessa forma, o marketing emocional desempenha um papel fundamental na construção da imagem da marca, influenciando a forma como os consumidores a percebem e a relacionam com suas próprias experiências de vida (Lyon, 2000; Fastl e Zwicker, 2007). Essas dinâmicas são vitais para a compreensão de como a experiência do usuário e a psicologia do consumidor se entrelaçam, impactando diretamente a lealdade à marca e a satisfação do cliente.

2.3 PSICOACÚSTICA

A psicoacústica é uma área fascinante que explora como sentimos o som. Não se trata apenas de medir a intensidade ou a frequência de um ruído. Fastl e Zwicker (2007) explicam que a psicoacústica investiga fenômenos como o tom, o volume e a duração de

um som, ajudando a compreender porque certos sons nos agradam e outros podem ser irritantes. Esse conhecimento é fundamental, por exemplo, no design de produtos sonoros, pois a maneira como ouvimos um som pode influenciar diretamente nossa experiência com determinado produto.

Na criação de dispositivos como eletrodomésticos, a qualidade do som é um fator importante para o conforto do consumidor. Blauert (2005) aponta que, além de avaliar as características físicas do som, como intensidade ou tonalidade, é essencial levar em conta como esses sons são percebidos emocionalmente pelas pessoas. Isso significa que um som pode ser tecnicamente "normal", mas se for percebido como irritante ou incômodo, ele pode impactar negativamente a aceitação do produto.

Além disso, Gerges (2000) destaca que a percepção de um som não envolve apenas a audição. Outros sentidos, como a visão e o tato, também podem influenciar como percebemos o ruído de um ambiente ou de um dispositivo. Ele sugere que tanto especialistas, como profissionais treinados em acústica, quanto consumidores comuns devem ser incluídos em testes de percepção para ter uma visão mais completa sobre a qualidade sonora.

De acordo com Pedersen e Fog (1998), a qualidade sonora de um produto influencia diretamente a percepção da qualidade geral que os usuários têm sobre ele. O som de um produto deve ser projetado para comunicar atributos positivos e ser percebido como parte da "qualidade do produto", em vez de um ruído indesejado. Essa abordagem considera que o som não é um resíduo incidental, mas sim um componente que pode melhorar a experiência do usuário e a satisfação geral ao interagir com o produto

Bech e Zacharov (2006) reforçam essa ideia ao combinar métodos objetivos e subjetivos na avaliação sonora. Eles explicam que é preciso não só medir o som com equipamentos, mas também ouvir a opinião dos usuários para entender o que realmente faz um som ser agradável ou incômodo. Isso ajuda engenheiros e designers a desenvolverem produtos com uma experiência sonora mais refinada e satisfatória.

Quando pensamos em eletrodomésticos, como refrigeradores, esse cuidado é especialmente importante. Jeon (2017) estudou o ruído de refrigeradores em ambientes reais e mostrou que a análise de qualidade sonora pode identificar os sons que causam desconforto, permitindo ajustes para torná-los mais agradáveis. Afinal, ninguém quer conviver com um eletrodoméstico barulhento e incômodo na cozinha.

Para alcançar uma qualidade sonora desejável, é comum usar escalas subjetivas de incômodo, como aquelas mencionadas por Pellegrini (2005) em sua pesquisa com compressores de refrigeradores. Ao entender o que incomoda os consumidores, as empresas podem ajustar o som emitido por seus produtos, criando uma experiência sonora mais tranquila e agradável para o dia a dia.

Cerrato (2007) aponta que entender a qualidade sonora é essencial para alinhar as características acústicas de um produto com as expectativas do consumidor. A simples medição de níveis de ruído não é suficiente para garantir uma experiência sonora agradável;

é necessário correlacionar as características do som com a percepção subjetiva dos usuários.

2.3.1 Coleta dos sinais no domínio do tempo

De acordo com Gerges (2000), a coleta e análise de sinais temporais são fundamentais para a avaliação de dispositivos acústicos, pois permitem a extração de características que influenciam a percepção auditiva. A coleta dos dados no tempo, é uma prática indispensável em diversas áreas que se relacionam com a acústica e o controle de ruído. A pressão sonora, uma medida da variação na pressão do ar ocasionada por ondas sonoras, é frequentemente expressa em decibels (dB), no caso uma escala logarítmica, muito útil para quando se tem uma grande amplitude de valores. Nesse contexto, o microfone obtém os dados na unidade de milipascal (μPa).

A coleta sistemática de dados de pressão sonora ao longo do tempo não apenas viabiliza análises temporais, mas também possibilita a identificação de padrões, a avaliação da eficácia de estratégias de controle de ruído de equipamentos ou ambientes. Essa abordagem é uma prática muito importante tanto para a pesquisa científica, quanto para aplicações práticas, como o monitoramento do ruído gerado por refrigeradores. Compreender esse fenômeno de forma abrangente é essencial para implementar medidas de controle eficientes (Kinsler et al., 2000).

2.3.2 Sinais no Domínio da Frequência - FFT

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é uma técnica utilizada na análise de sinais, que permite decompor um sinal temporal em suas frequências componentes. Essa decomposição é utilizada para entender o comportamento do som em projetos ergonômicos, uma vez que características sonoras dependem das propriedades frequenciais dos sinais.

Blauert (2001) ressalta que a localização do som também é afetada pelas características frequenciais. A FFT é utilizada para analisar a direção e distância de fontes sonoras, o que é relevante em ambientes de trabalho e em produtos de consumo. Entender como os usuários localizam sons em ambientes complexos ajuda a otimizar a experiência acústica e a usabilidade dos produtos.

Além da acústica, a análise de sinais frequenciais é aplicada na saúde auditiva. Gelfand (2010) menciona que a FFT é fundamental na avaliação de audiogramas, auxiliando na detecção de perdas auditivas e distúrbios. Essa técnica permite a formulação de intervenções clínicas mais eficazes, mostrando sua versatilidade na avaliação da saúde auditiva.

Por fim, a literatura, incluindo estudos de Gonçalves (2009) e Zhang (2019), destaca a relação entre qualidade sonora e características frequenciais. Com o avanço das tecnologias de análise, a FFT continua a ser uma ferramenta muito importante na melhoria da qualidade do som em diferentes contextos, proporcionando uma compreensão mais profunda da interação humana com sinais acústicos.

2.3.3 Métricas psicoacústicas

A qualidade sonora é um campo que analisa as relações entre as propriedades físicas do som e as respostas subjetivas que este provoca. Dentro desse contexto, as métricas psicométricas emergem como ferramentas para quantificar e avaliar as sensações auditivas. O objetivo fundamental da psicoacústica é alcançar magnitudes de sensação que sejam análogas às magnitudes do estímulo, conforme discutido por Fastl e Zwicker (2007). Ou seja, busca-se compreender e descrever as experiências auditivas de maneira proporcional às características dos estímulos sonoros.

Para estabelecer essas relações, foi criado um conjunto de fórmulas e tabelas conhecidas como métricas psicoacústicas. Essas métricas objetivas, combinadas com avaliações realizadas por júris, visam avaliar as correlações entre o estímulo físico e a sensação auditiva. O uso de júris é particularmente relevante, pois permite comparar os resultados obtidos de forma experimental com as respostas subjetivas dos avaliadores, proporcionando uma visão mais ampla sobre como o fenômeno sonoro se relaciona com a sensação percebida.

O sistema auditivo humano, com sua capacidade de discernir uma ampla gama de frequências e intensidades, é altamente sofisticado. Entretanto, a deterioração da audição devido à exposição prolongada ao ruído exige uma compreensão detalhada do comportamento e das limitações do sistema auditivo. Além disso, é essencial compreender os efeitos que o ruído e as vibrações podem ter sobre o corpo humano. Segundo Gerges (2000), é muito importante distinguir entre som e ruído; enquanto o ruído é frequentemente associado a sons indesejáveis e desconfortáveis, o som é caracterizado por variações na pressão do ar, dentro de limites que o ouvido humano é capaz de processar.

O conceito de limiar da audição, que representa a pressão acústica mínima que o ouvido humano pode detectar. Este limiar é de 2×10^{-5} Pa na frequência de 1 kHz. A Figura 3 ilustra a variação do limiar de audição com a frequência e os contornos de audibilidade, gerados com base em testes de júri. É importante notar que, na banda de frequência auditiva, que se estende de 20Hz a 20.000Hz, a sensibilidade do ouvido não é uniforme. Os contornos de audibilidade evidenciam que diferentes frequências são sentidas de maneira distinta.

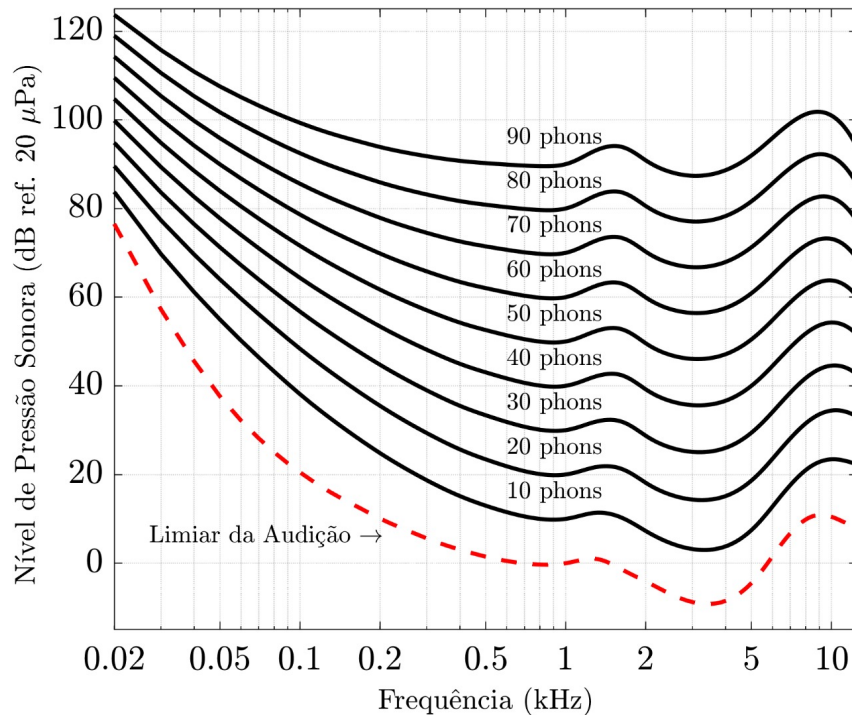


Figura 3 – Contornos padrão de audibilidade para tons puros Fonte: Imagem cedida por Gabriel Brandão [2024]

As métricas psicoacústicas, possibilitam uma avaliação objetiva do som, revelando como as sensações auditivas ocorrem de forma impessoal. A aplicação dessas métricas em diversos contextos, como no desenvolvimento de eletrodomésticos, é fundamental para entender quais são as sensações auditivas mais presentes no produto e/ou sistema.

Além disso, Bech e Zacharov (2006) enfatizam a importância de combinar métodos objetivos e subjetivos na avaliação sonora. Eles destacam que, para entender verdadeiramente o que torna um som agradável ou incômodo, é necessário não apenas medir o som com equipamentos, mas também considerar as opiniões dos usuários. Essa abordagem permite que engenheiros e designers aprimorem a qualidade sonora de seus produtos, proporcionando experiências auditivas mais satisfatórias.

Por fim, quando analisamos produtos como refrigeradores, a análise psicoacústica se torna essencial. Jeon (2017) mostrou que ao investigar o ruído de refrigeradores em ambientes reais, é possível identificar os sons que causam desconforto, permitindo ajustes para torná-los mais agradáveis. Ninguém deseja conviver com um eletrodoméstico barulhento e incômodo na cozinha. Assim, a utilização de escalas subjetivas de incômodo, como mencionadas por Pellegrini (2005), é uma prática comum. Ao entender o que realmente incomoda os consumidores, as empresas podem ajustar os sons emitidos por seus produtos, criando uma experiência sonora mais tranquila e agradável para o dia a dia.

2.3.3.1 Loudness

A métrica de Loudness está relacionada a intensidade percebida do som e sua relação com a sensação de volume e para isso foi utilizado testes de júri no seu desenvolvimento, e é sabido que a intensidade sonora afeta significativamente na qualida sonora (Fast, 2007, wicker, 2007) . Utilizando a análise dos sinais e obtenção do valor da métrica, foram realizadas avaliações específicas para quantificar a Loudness em diferentes condições de operação do refrigerador, mensurando a percepção subjetiva da intensidade percebida do som.

2.3.3.2 Sharpness

A métrica Sharpness está relacionada a sensação de agudeza do som, vai determinar e quantificar o quão grave ou agudo é este sinal sonoro, o que claramente influencia na qualidade subjetiva da experiência auditiva. A nitidez pode ser tida como a cor do tom que lhe confere uma ideia de potência, que em excesso pode gerar um efeito agressivo por parte de quem ouve (Fast, 2007, wicker, 2007). A análise da Sharpness, realizada por meio da análise dos sinais e obtenção do valor da métrica, permitirá avaliar como as características do ruído do refrigerador contribuem para a percepção de nitidez sonora em diferentes rotações.

2.3.3.3 Roughness

A métrica de Roughness é essencial para compreender a qualidade subjetiva do som, concentrando-se na sensação de flutuação rápida da amplitude do sinal. A medida observada é a variação temporal do som, ou seja a sua modulação da amplitude que pode variar em função do mascaramento do som (Fast, 2007, wicker, 2007), que representa um outro ruído que dificulta a inteligibilidade do sinal analisado. Durante a análise do Roughness, foram identificados padrões na textura do som emitido pelo refrigerador.

2.3.4 Teste de júri

Uma etapa muito importante para a avaliação da qualidade sonora é o teste de júri. Para garantir análise, é imperativo preparar um ambiente de teste com baixo nível de ruído de fundo, evitando interferências externas. A sala de teste deve ser natural, confortável, com iluminação moderada e temperatura adequada, condições que favorecem uma experiência auditiva mais precisa (Fastl e Zwicker, 2007). A utilização de simuladores tem ganhado destaque, proporcionando ambientes virtuais na fase de projeto, permitindo que a avaliação sonora ocorra em cenários que reproduzem a realidade (Lyon, 2000).

A seleção do júri é essencial para representar fielmente os consumidores finais. Pouchoulin (2008) ratifica a não trivialidade na escolha do júri, considerando fatores como familiaridade com o produto, experiência em ensaios, além de aspectos demográficos como

idade, sexo e status econômico. Jurados representativos minimizam expectativas que podem comprometer os resultados da avaliação, pois a experiência influencia a percepção sonora. Entretanto, jurados com menos experiência podem ser empregados para tarefas menos complexas, permitindo que a análise seja realizada de forma ampla e abrangente. Assim, aspectos demográficos são levados em consideração para garantir uma representatividade fiel da população-alvo.

A preparação da amostra é outro fator muito importante para garantir a fidelidade da avaliação. A amostra é para remover ruídos indesejados, e a ordem de apresentação dos sons, bem como a duração do ensaio, são cuidadosamente planejadas para evitar erros sistemáticos e desconforto do júri.

O uso de fones de ouvido individualmente calibrados é recomendado, pois isso garante estímulos equivalentes para cada jurado. Apresentações visuais, como a reprodução no local original ou simuladores, contribuem para resultados autênticos. Caso isso não seja viável, pode-se contornar a situação com estímulos visuais adicionais, que ajudam a contextualizar a experiência sonora. Esses cuidados são essenciais para assegurar a validade dos ensaios de júri na análise da qualidade sonora de produtos, contribuindo para um entendimento mais aprofundado das preferências dos consumidores e dos fatores que influenciam a aceitação do produto no mercado (Bech e Zacharov, 2006).

Por fim, é fundamental considerar os impactos do som e do ruído sobre o bem-estar humano. Estudos mostram que a exposição prolongada a níveis inadequados de ruído pode levar a efeitos adversos na saúde física e mental, reforçando a importância da qualidade sonora em produtos do cotidiano (Gelfand, 2010). A combinação desses fatores — desde a preparação do ambiente até a escolha do júri e a análise psicoacústica — é crucial para garantir que os produtos sonoros atendam às expectativas dos consumidores e contribuam para uma melhor experiência auditiva.

3 MÉTODOS ADOTADOS

O refrigerador avaliado neste trabalho possui um compressor de rotação variável. Para avaliar diferentes rotações desse compressor, utilizou-se um aparelho chamado frequencímetro, que permite ajustar externamente a frequência de operação, sem depender do controle do próprio inversor do refrigerador. Embora o ventilador seja uma segunda fonte de ruído, ele não teve sua rotação alterada, pois opera em velocidade fixa.

As medições de pressão sonora foram conduzidas entre os dias 19/02/2024 e 08/03/2024, após um estudo preliminar do sistema, com o apoio técnico de profissionais especializados na área de refrigeração. Durante três semanas, avaliou-se como o ruído variava conforme as rotações do compressor, com cada medição durando cerca de dois minutos. Na ocasião, apenas trechos de dez segundos em regime permanente foram considerados para a análise.

Para garantir a confiabilidade dos resultados, as medições foram realizadas em uma câmara reverberante, que proporcionou um ambiente controlado e adequado para análise acústica. A câmara foi projetada para maximizar as reflexões sonoras, possibilitando um campo acústico uniforme, o que permitiu a obtenção de dados precisos e representativos do comportamento acústico do sistema. Esse tipo de ambiente é ideal para simular condições acústicas controladas e observar como o som se propaga em um espaço fechado, um aspecto muito importante para a precisão dos resultados.

Os dados foram capturados por meio de um microfone de campo livre capacitivo, posicionado a 1,5 metro de altura e a 1 metro do refrigerador. O microfone foi calibrado antes de cada bateria de medições com o auxílio de calibradores acústicos, garantindo que a resposta fosse representativa do ambiente e minimizando erros sistemáticos. Esse processo de calibração é essencial para manter a qualidade e a consistência dos dados coletados.

A transformação dos sinais acústicos analógicos em dados digitais foi realizada por meio de Conversores Analógico-Digital (ADC) de alta resolução. Esses conversores foram configurados com uma taxa de amostragem adequada para capturar todos os detalhes relevantes das características sonoras do refrigerador, garantindo que os dados coletados fossem precisos e úteis para análises subsequentes.

Para a aquisição e tratamento dos dados, utilizou-se o software BK Connect, uma ferramenta utilizada para a coleta dos dados em tempo real, permitindo também permite a aplicação de métricas psicoacústicas e outras técnicas de análise. Esse software cumpre normas internacionais de teste e medição, como as normas ISO e ANSI, o que reforça a confiabilidade dos resultados obtidos.

De acordo com Gerges (2000), a captura e extração de características dos sinais coletados são fundamentais para compreender melhor as informações contidas neles. A coleta de dados precisa ser feita de forma a maximizar a quantidade de informações

válidas, permitindo que técnicas avançadas de processamento possam ser aplicadas para analisar e interpretar os dados. Isso é especialmente relevante em aplicações que envolvem a avaliação do desempenho de dispositivos acústicos, como os refrigeradores, onde a análise no domínio da frequência e a extração de características dos sinais são cruciais para entender o comportamento acústico e vibracional sob diferentes condições operacionais.

A realização da coleta de dados contou com o apoio do LVA - Laboratório de Vibrações e Acústica, que dispõe de uma estrutura completa para avaliações acústicas, tanto na questão de câmaras tratadas acusticamente, como é o caso da câmara reverberante, além dos microfones, que neste caso são instrumentos de altíssima precisão. O software comercial BK Connect foi utilizado tanto na coleta dos dados quanto nos tratamentos posteriores desses dados.

Para minimizar a radiação sonora do compressor, foi aplicada uma cobertura de espuma acústica na parte traseira da cavidade do compressor, conhecida como *Doghouse*, conforme mostra a Figura 4. Esse condicionamento visa avaliar se a cobertura pode proporcionar melhorias na qualidade sonora nas diferentes rotações analisadas, o que justificaria um estudo aprofundado dos benefícios da implementação de cobertura caso os resultados demonstrem um benefício significativo. A estrutura porosa da espuma acústica proporciona alta absorção da energia sonora, reduzindo a propagação de ruídos no ambiente. Espera-se que essa cobertura apresente um valor elevado de absorção devido às suas características, potencializando a atenuação de ruídos.



Figura 4 – Cobertura do Doghouse. Fonte: do Autor.

Antes do teste de júri, realizou-se a calibração dos sinais em função do fone de ouvido para garantir que todos os participantes tivessem uma experiência auditiva uniforme e

a mais representativa possível das condições reais, assegurando a precisão das avaliações subjetivas e permitindo comparações consistentes entre os resultados.

A seguir são apresentadas as etapas das metodológicas do presente estudo, que dividi-se em:

- Coleta dos dados: definição dos equipamentos e estrutura requerida para a medição de pressão sonora do refrigerador.
- Aplicação de métricas psicoacústicas: Utilizadas para correlação com os resultados subjetivos do ruído do refrigerador.
- Teste de júri: Análise subjetiva do incômodo atrelado ao eletrodoméstico.

3.1 COLETA DE DADOS DE PRESSÃO SONORA

A coleta de dados de pressão sonora é uma prática que requer o uso coordenado de vários elementos especializados. Dentre esses, destacam-se um ambiente adequado, os microfones. Cada componente desempenha um papel fundamental na obtenção e análise precisa de dados acústicos.

3.1.1 Equipamentos e Estrutura Requerida

3.1.1.1 Câmara Reverberante

As câmaras reverberantes desempenham um papel muito importante na medição e análise de fenômenos acústicos, especialmente no contexto de medições de ruído e pressão sonora. De acordo com Peterson, as câmaras reverberantes são projetadas para simular condições acústicas em ambientes fechados, permitindo a análise do comportamento das ondas sonoras em um espaço confinado. Elas proporcionam um ambiente controlado onde a reverberação é predominante, facilitando a avaliação da propagação do som e a interação entre diferentes frequências.

Kinsler et al. (2000) explicam que a reverberação é o resultado da reflexão das ondas sonoras nas superfícies das paredes, teto e chão da câmara. Portanto, são amplamente utilizadas para entender como o som se comporta para diferentes fontes sonoras, dando destaque de como os ruídos são gerados, como os gerados por refrigeradores, se propagam e se percebem no espaço. A duração da reverberação em uma câmara pode ser ajustada, o que permite aos pesquisadores simular diferentes condições acústicas e estudar como isso afeta a percepção humana do som.

Além disso, a utilização de câmaras reverberantes é uma prática comum em ensaios de produtos, para garantir que os níveis de ruído estejam dentro dos padrões aceitáveis. Essa abordagem é essencial para o desenvolvimento de produtos que atendam aos requisitos de conforto acústico e saúde pública.

3.1.1.2 Microfones de campo livre

Os microfones de campo livre são instrumentos muito importantes na medição e análise acústica, projetados para capturar ondas sonoras em um ambiente aberto, minimizando as interferências de reflexões e outras fontes de ruído. Eles são frequentemente utilizados em estudos de ruído ambiental, medições de pressão sonora e testes de desempenho de equipamentos, como aparelhos eletrodomésticos.

Segundo Kinsler et al. (2000), os microfones de campo livre são tipicamente posicionados em locais estratégicos para garantir que o som captado seja representativo do ambiente. O *Handbook of Noise Measurement de Peterson* também destaca a importância da escolha do microfone adequado para diferentes aplicações, ressaltando que os microfones de campo livre são projetados para oferecer resposta de frequência ampla e linear, o que os torna ideais para medições em uma variedade de cenários acústicos. O uso de tais microfones permite a obtenção de dados mais precisos sobre a propagação do som e suas características.

Tabela 1 – Informações sobre o Microfone de Campo Livre *Type 4966*

Categoria	Informação
Tipo	Campo livre pré-polarizado (Type 4966)
Diâmetro	½ polegada
Faixa de Frequência	5 Hz a 20 kHz
Sensibilidade	50 mV/Pa
Faixa Dinâmica	14.6 – 144 dB
Ruído Inerente	14.6 dB A
Frequência de Corte Inferior -3dB	3 Hz
Capacitância	14 pF
Coeficiente de Temperatura	0.003 dB/°C
Faixa de Temperatura	50 – 150 °C
Tipo de Entrada	CCLD IEPE

Esses microfones são, portanto, uma ferramenta para engenheiros e pesquisadores que buscam entender e controlar o ambiente acústico, permitindo a avaliação precisa de como os sons se propagam e são percebidos em diferentes contextos.

3.1.1.2.1 Aferição dos microfones

Embora os microfones sejam calibrados em laboratórios especializados, é uma boa prática realizar uma aferição adicional antes e depois das medições para assegurar a precisão dos resultados. Essa verificação permite identificar possíveis desvios na calibração original do microfone, evitando, assim, erros sistemáticos.

Para pequenas diferenças, é aplicado um ajuste no ganho. Tais diferenças podem ser mensuradas com calibradores acústicos portáteis, como o ilustrado na Figura 5, que foi

utilizado nas medições. Esse calibrador emite um sinal com uma pressão sonora conhecida em 1000 Hz, e a resposta do microfone é então corrigida.



Figura 5 – Calibrador acústico utilizado nas medições. Fonte: o Autor

Caso a diferença esteja acima das especificações definidas pelo fabricante pode indicar que o microfone precisará ser recalibrado, ou na pior das hipóteses o mesmo foi danificado. Em ambos os casos citados, o microfone não deverá ser utilizado, portanto para evitar que isso ocorra é importante o correto manuseio e armazenamento pois se tratam de instrumentos sensíveis a choques mecânicos, fontes de calor ou umidade.

3.1.1.3 Conversores Analógico-Digital (ADC)

A escolha de um ADC adequado, com taxa de amostragem e resolução apropriadas para os microfones utilizados, é fundamental para assegurar dados confiáveis para análises subsequentes. A Figura 6 ilustra a placa ADC utilizada no experimento.



Figura 6 – Placa ADC utilizada no experimento para captura de dados. Fonte: do Autor

Os Conversores Analógico-Digital (ADC) desempenham um papel fundamental em sistemas de aquisição de dados acústicos, sendo responsáveis por converter sinais analógicos em formatos digitais adequados para processamento e análise. A taxa de amostragem adotada é muito importante, pois determina a frequência com que o sinal analógico é convertido. Para garantir a fidelidade do sinal, essa taxa deve ser, no mínimo, o dobro da maior frequência a ser medida, conforme o Teorema de Nyquist. Para medições acústicas, taxas de amostragem de 44,1 kHz ou mais são frequentemente utilizadas, pois garantem que toda a faixa de frequência do audível será adquirida corretamente (Kinsler et al., 2000).

Além da taxa de amostragem, a resolução do ADC, que é expressa em bits, define a precisão com que as variações de tensão são representadas no sinal digital. Conversores ADC de maior resolução capturam com mais precisão menores flutuações de pressão sonora do sinal acústico, permitindo análises mais detalhadas (Peterson, n.d.). A compatibilidade da impedância de entrada do ADC com a fonte de sinal, como microfones, é igualmente importante para minimizar distorções durante a captura do sinal (Kinsler et al., 2000).

Portanto, a escolha de um ADC adequado, com taxa de amostragem e resolução apropriadas para os microfones utilizados, é fundamental para assegurar dados confiáveis para análises subsequentes.

3.1.1.4 Software de Aquisição de Dados (BK Connect)

O *BK Connect* é um software avançado de aquisição e tratamento de dados que oferece uma interface integrada para coleta, análise e apresentação de dados acústicos e vibracionais. Desenvolvido pela *Brüel e Kjær*, o *BK Connect* é amplamente utilizado em

laboratórios e indústrias para monitoramento e análise de ruído, proporcionando suporte robusto para medições complexas e tratamento de dados.

Uma das principais características do *BK Connect* é sua capacidade de coletar dados de forma eficiente em tempo real, integrando-se facilmente com diferentes tipos de hardware, como microfones e sensores de vibração. O software permite a personalização de configurações de medição, possibilitando a seleção de parâmetros como a taxa de amostragem e o tipo de análise a ser realizada. Essa flexibilidade torna-o adequado para uma variedade de aplicações, incluindo testes de desempenho de produtos, medições ambientais e controle de qualidade.

Além disso, o *BK Connect* oferece ferramentas para a análise de dados, inclusive as métricas psicométricas aplicadas neste trabalho, permitindo a visualização de resultados em gráficos, tabelas e relatórios. As funções de pós-processamento incluem a aplicação de filtros, a realização de análises estatísticas e a geração de relatórios detalhados, facilitando a interpretação dos dados coletados. Essa abordagem contribui para a tomada de decisões informadas em projetos de engenharia e desenvolvimento de produtos.

O software também é projetado para atender a padrões internacionais de teste e medição, garantindo que as medições sejam realizadas de acordo com normas reconhecidas, como ISO e ANSI. Isso é determinante para garantir a confiabilidade e a comparabilidade dos dados em estudos de pesquisa e aplicações industriais (Brüel e Kjær; Kinsler et al., 2000).

Em resumo, o *BK Connect* se destaca como uma solução abrangente para aquisição e análise de dados acústicos e vibracionais, oferecendo recursos robustos que atendem tanto a demandas acadêmicas, quanto industriais. O cumprimento das normas ISO e ANSI é essencial para garantir a qualidade e a replicabilidade das medições no campo da acústica.

3.1.2 Medição de pressão sonora do refrigerador

A medição da pressão sonora no domínio do tempo se inicia com a preparação do ambiente, sendo um passo muito importante, principalmente em medições em câmaras reverberantes. Este tipo de espaço é projetado para maximizar as reflexões sonoras e criar um campo acústico uniforme, permitindo medições mais precisas e confiáveis.

Para garantir a confiabilidade da medição, é essencial controlar variáveis ambientais, como temperatura e umidade, que podem influenciar o comportamento acústico dos materiais e equipamentos. Além disso, deve-se assegurar que não haja interferências sonoras externas que possam comprometer a qualidade das medições, uma vez que a câmara deve ser isolada de ruídos indesejados para obter resultados fidedignos.

A configuração do ambiente deve incluir a verificação de que todos os dispositivos de medição estão posicionados e devidamente calibrados, de acordo com as especificações do fabricante. Um ambiente bem preparado não apenas melhora a precisão dos dados coletados, mas também aumenta a reprodutibilidade das medições, essencial para a comparação

de resultados em diferentes experimentos.

Além disso, a câmara reverberante deve ser mantida em condições adequadas, incluindo a limpeza dos painéis acústicos, para evitar a absorção indesejada de som. Esses cuidados garantem que as medições reflitam com precisão as características acústicas do produto e/ou sistema em análise.

Cuidados adicionais para minimizar ruídos de fundo indesejado foram tomados, a condução das medições no período noturno foi um deles, pois mesmo sendo as câmaras estruturas desassociadas das do prédio do LVA, algumas das transmissões de ruído como batida de portas podem afetar as medições, tal problema é minimizado no período noturno, que tem menor circulação de pessoas no prédio.

3.1.2.1 Coleta de Dados

Com o ambiente devidamente preparado e toda a instrumentação montada, inicia-se a coleta inicial dos dados de pressão sonora, com uma duração de dois minutos para cada medição. Durante esse período, o microfone registrou continuamente as variações na pressão sonora. Essa abordagem permite uma análise abrangente das características sonoras, possibilitando a identificação de padrões e flutuações que podem ser relevantes para a compreensão do comportamento acústico do sistema em questão, o refrigerador doméstico.

Durante a medição, é crucial que todos os dispositivos estejam em funcionamento adequado, e que o ambiente permaneça livre de interferências externas. Isso não só assegura a qualidade dos dados coletados, mas também contribui para a reprodutibilidade das medições, fundamental para a validação dos resultados em investigações futuras. Essa prática é respaldada por estudos que ressaltam a importância da coleta de dados em um intervalo suficiente para refletir as condições reais do ambiente, como sugerido por Kinsler et al. (2000) e Peterson (2009).

A duração da medição permitiu a seleção de um trecho medido para posterior análise em que o sistema estivesse operando em regime permanente, assim podendo selecionar trechos que não tenha grandes flutuações nos níveis de pressão ou que houvesse eventos impulsivos, Segundo Silveira (2024), "existem eventos impulsivos em refrigeradores cujos mecanismos de radiação ainda não são bem compreendidos. Dentre esses eventos, destaca-se o *cracking* noise. Este evento sonoro é evidenciado, principalmente, durante o período noturno devido à redução natural do ruído de fundo, tornando-se bastante incômodo.", Ainda que este estudo se restrinja-se na análise do ruído do sistema operando em regime permanente, o conhecimento de ruídos impulsivos se torna importante, para que seja evitada que haja a detecção desses fenômenos, em uma eventual medição.

3.1.2.2 Alteração da rotação

Conforme já mencionado, para alterar a rotação de operação do compressor e efetuar a medição em diferentes rotações, foi utilizado o frequencímetro. Tal aparelho foi colocado fora da câmara, facilitando as alterações das rotações sem a necessidade de entrada a cada medição, como ilustrado na Figura 7.

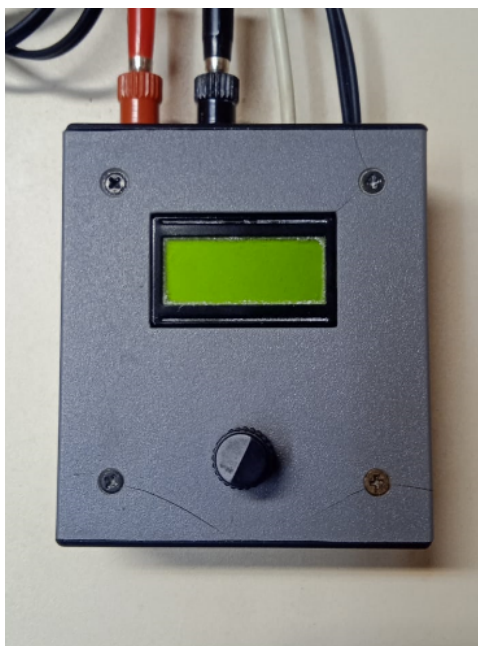


Figura 7 – Frequencímetro utilizado para ajustes de rotação do compressor. Fonte: do Autor

Alguns cuidados foram tomados, como a escuta do sinal em tempo real do sinal obtido pelo microfone durante antes do início da medição, afim de tentar notar se o sistema opera dentro da normalidade, o que inclui o compressor e o ventilador ligado sem ruídos anormais. Além disso, a cada 3 medições em rotações diferentes o sistema era colocado em operação padrão, ou seja, com rotação definida pelo próprio hardware embarcado, o qual define a correta rotação em função de parâmetros, como temperatura interna do congelador na parte superior, e o refrigerador na parte inferior.

O parâmetro que define as temperaturas é dado em função das normas NBR 4587 que define que “Os refrigeradores devem manter a temperatura entre 0°C e 10°C para o armazenamento de alimentos perecíveis, enquanto os congeladores precisam operar a -18°C ou menos, assegurando a conservação dos alimentos” (ABNT, 2023, NBR 4857). Sendo as rotações alteradas do seu modo padrão, o sistema pode operar fora da normalidade, ou seja, o ruído emitido naquela rotação poderia ser alterado, pois o sistema não estaria operando em condição próxima ao que ocorreria em operação normal. Assim, o sistema exibe um comportamento em que o compressor é desligado, e volta a ser ligado novamente conforme for necessário, além é claro de alterar a rotação de acordo com a necessidade de uso.

Ao estudar um sistema e entender o seu comportamento em diferentes rotações, são muitas as variáveis que podem influir, e o estudo se restringiu a duas das principais fontes de ruído sendo o compressor e o ventilador neste caso, as que prevalecem no sistema. Com isso a importância de que as demais variáveis que possam influir no ruído sejam minimizadas tais cuidados foram tomados.

3.1.2.3 Cobertura do *Doghouse*

Esta etapa do trabalho foi fundamental para que este estudo pudesse quantificar a melhora do conforto acústico com a cobertura do *Doghouse*, serão tomados os dados de pressão sonora novamente conforme descrito na seção anterior. As condições de medição deve ser as mesmas, incluindo a posição do microfone e refrigerador, assim permitindo comparar a redução da emissão ruído numa mesma rotação do compressor.

Se espera que tal configuração representará uma ganho significativo no conforto acústico, e tal proposta de mudança do produto também precisará avaliar considerando a eficiência do refrigerador, que pode diminuir, pois a cobertura deve ser bem projetada a não afetar as trocas de calor que devem ocorrer, de modo que não interfira na capacidade de refrigerar ou alto custo de produção.

O resultado obtido nesta etapa pode encontrar um gargalo quando se trata de emissões sonoras, permitindo maiores investigação e propostas de otimização acústicas de coberturas.

A escolha da espuma acústica foi dada pela alta disponibilidade que se tem do material no mercado, e ser amplamente utilizada nas mais diversas aplicações quando se quer ter condicionamento sonoro, como em estúdios de gravação e auditórios.

3.2 MÉTRICAS PSICOACÚSTICAS

Ao realizar a análise detalhada dos dados coletados, empregou-se um processo rigoroso de processamento de sinais com o objetivo de extrair informações relevantes sobre as características acústicas do refrigerador. Nesse contexto, o software *BK Connect* desempenhou um papel central na manipulação e interpretação dos sinais acústicos.

A primeira etapa desse processo consiste na seleção de um período representativo para uma investigação mais aprofundada, escolhendo um segmento de pelo menos 10 segundos isento de interferências externas, como os eventos transitórios já citados. Tal sinal deve também ser previamente calibrado em função do fone de ouvido conforme mencionado na fundamentação deste trabalho. Utilizando o *BK Connect*, foi realizada uma análise visual cuidadosa do sinal acústico, além da escuta dos trechos, identificando e selecionando trechos em que o refrigerador atua em regime permanente.

Feita a seleção dos trechos, estes serão avaliados a partir das métricas psicométricas e posteriormente utilizados para o teste de júri. O teste de júri implica na calibração do

sinal em função do fone de ouvido e placa de áudio utilizada, assim este mesmo sinal foi utilizado para o cálculo das métricas considerando a calibração dos sinais em função do fone, pois caso tal cuidado não fosse tomado o resultado de métricas não representariam o que foi escutado pelos participantes do teste de júri, e assim não poderiam ser comparados.

3.2.1 Aplicação das métricas psicoacústicas no ruído do refrigerador

Para aprofundar a análise objetiva do som do refrigerador, foram aplicadas três métricas psicoacústicas: *loudness*, *sharpness* e *roughness*. Essas métricas oferecem uma visão mais detalhada das sensações auditivas do som e revelam aspectos específicos como intensidade, tonalidade e flutuações de amplitude.

- **Loudness:** A métrica de *Loudness* quantifica a intensidade sonora percebida e é expressa em *sones*. Valores típicos para sons cotidianos moderados geralmente ficam entre 0 e 30 *sones*. Sons suaves, como o ruído ambiente em uma sala tranquila, apresentam valores baixos, enquanto sons altos, como o barulho de um liquidificador, resultam em valores altos. A análise do *loudness* do refrigerador ajuda a entender o quão perceptível e potencialmente incômodo é o som para o usuário.
- **Sharpness:** *Sharpness* mede a agudeza do som, indicando se ele é percebido como “agudo” ou “grave”. A unidade de medida é o *acum*, e os valores variam de 0 a 4. Valores baixos ocorrem em sons com predominância de frequências graves, como o som de um trovão, enquanto valores próximos a 4 são encontrados em sons com maior concentração de frequências altas, como o de um alarme agudo. No contexto do refrigerador, *sharpness* ajuda a identificar se o som é “afilado” ou “suave” para o ouvinte.
- **Roughness:** *Roughness* avalia a percepção de flutuações rápidas de amplitude no som, medida em *aspers*. A variação vai de 0 a 1, onde valores mais altos, como 1 *asper*, representam sons com grandes flutuações. Sons com *roughness* próxima de zero têm flutuações mínimas, como o som constante de um ventilador. No caso do refrigerador, a análise de *roughness* ajuda a entender se o som possui variações incômodas ou instáveis.

Os resultados das análises dessas métricas foram obtidos por meio de um software específico, que permitiu processar os sinais e avaliar essas características para cada condição de operação do refrigerador. Os dados de *loudness*, *sharpness* e *roughness* serão comparados com os resultados dos testes de júri, proporcionando uma visão integrada da percepção subjetiva do ruído do refrigerador e possibilitando propostas de melhorias acústicas.

3.3 TESTE DE JÚRI

Para realizar o teste de júri dos sons emitidos pelo refrigerador nas diferentes rotações, e na condição normal e com o *DogHouse* coberto com a espuma acústica, foi essencial seguir uma metodologia bem estruturada. Inicialmente, os sinais de áudio foram devidamente selecionados e calibrados para garantir que todos os participantes ouvissem os sons na mesma intensidade e qualidade, eliminando possíveis variações que pudessem influenciar o julgamento individual.

Para a aplicação deste teste, uma interface em Python já desenvolvida pelo em estudos prévios, foi então adaptada para este teste com o objetivo de simplificar o processo e tornar a coleta de respostas mais prática e padronizada. A interface permitia que cada participante, ao ouvir cada amostra de som, expressasse seu nível de incômodo ajustando um *slider* (barra deslizante), de modo que cada participante pudesse avaliar de forma contínua o desconforto sentido em relação aos sons apresentados.

Os participantes receberam instruções específicas antes de iniciar a avaliação dos áudios. Primeiramente, foi permitido a cada um visitar e reavaliar áudios já julgados, para que pudessem ajustar suas percepções. Os participantes também foram orientados a escolher os sons percebidos como menos e mais incômodos e definir esses extremos nos sliders (barras deslizantes). Os demais áudios deveriam ser distribuídos entre essas posições extremas, de acordo com o grau de incômodo percebido para cada um.

Adicionalmente, foi solicitado que, ao final de todas as avaliações, qualquer áudio que tivesse recebido a mesma pontuação (ou seja, estivesse na mesma posição no slider) fosse reavaliado. Isso permitiria que os participantes ajustassem suas respostas caso percebessem alguma diferença sutil entre os sons semelhantes em incômodo. Dessa forma, todos os áudios receberam posições distintas no slider, o que gerou valores numéricos de 0 a 100.

Para aumentar a representatividade dos dados, decidiu-se que o júri seria dividido em dois grupos com características distintas: um grupo de indivíduos com conhecimento em acústica e outro de indivíduos sem conhecimento prévio sobre o tema. Cada grupo contava com pelo menos 30 participantes, o que ajuda a garantir a validade estatística e a diversidade nas respostas obtidas. Dessa forma, foi possível coletar percepções tanto de pessoas tecnicamente instruídas, que talvez percebam nuances específicas nos sons, quanto de usuários comuns, cuja percepção de incômodo pode diferir significativamente.

3.3.1 Calibração do fone de ouvido

A calibração do sistema de reprodução sonora, em especial os fones de ouvido, é uma etapa crucial para garantir a precisão das medições acústicas. Segundo Silveira (2024), a calibração eletroacústica é fundamental para minimizar os erros, tanto aleatórios quanto sistemáticos, que podem afetar a qualidade do sinal durante a reprodução. Esta

calibração é realizada com o uso de um sistema de gravação binaural, que deve reproduzir com fidelidade as pressões sonoras no ouvido do sujeito, especialmente quando as correções de sinal são corretamente aplicadas.

Para realizar a calibração binaural, o primeiro passo é medir a resposta em frequência do sistema em malha fechada. Isso envolve a colocação dos fones de ouvido no HATS, os quais são conectados a um Conversor Analógico Digital. O mesmo dispositivo reproduz também é responsável por armazenar o sinal acústico captado pelo HATS, interligando-se através de um dispositivo de aquisição (ADC). O sinal gerado pelo ADC deve ser registrado pelo HATS, resultando em um sinal acústico corrigido que será posteriormente analisado.

De acordo com a metodologia proposta por Silveira (2024), a função de transferência obtida, que relaciona a excitação do sistema e a resposta, atua como um filtro inverso. Este filtro, projetado para compensar as falhas da reprodução, requer atenção especial para evitar problemas de não-causalidade e instabilidade. Para mitigar essas dificuldades, podem ser aplicadas técnicas de regularização de fase mínima, assegurando um atraso de grupo adequado em toda a faixa de operação do filtro.

A instrumentação utilizada para essa calibração inclui HATS de alta qualidade, como o modelo G.R.A.S 45BB KEMAR, fones de ouvido Sennheiser modelo 58X, um DAC Behringer UCA222 e um ADC da BK. Essa configuração permite que as medições sejam realizadas de forma eficiente e precisa, contribuindo para a obtenção de filtros de correção que garantam a fidelidade das pressões sonoras apresentadas aos sujeitos.

3.3.2 Equipamentos e Estrutura Requerida

Para realizar o Teste de Júri, foram utilizados os seguintes equipamentos e estrutura:

- **Ambiente Controlado:** Um ambiente acusticamente tratado e isolado para garantir que os participantes experimentem o ruído do refrigerador sem interferências externas. Que neste caso foi a sala de reuniões do LVA que possui tratamento acústico, e baixo nível de ruído.
- **Fones de Ouvido Calibrados:** Utilização de fones de ouvido calibrados, com curvas de resposta conhecidas, para garantir uma reprodução precisa e uniforme do ruído do refrigerador entre os participantes. Assim todos os testes foram aplicados neste mesmo local e com o

3.3.3 Procedimento de Coleta de Dados

O procedimento de coleta de dados, após encontrar voluntários seguirá as seguintes etapas, que foram organizadas dentro da própria interface, conforme está descrito a seguir, e seguido das imagens da interface de avaliação:

- **Seleção de Participantes:** O grupo foi composto por voluntários que representavam os dois perfis de interesse, com e sem conhecimento em acústica, e que puderam comparecer ao local para a realização dos testes e registro dos resultados.
- **Apresentação das Condições de Teste:** Ao usuário foi apresentada a interface, onde foi feito o registro do participante e na página seguinte as instruções eram passadas, conforme as duas imagens a seguir.
- **Avaliação Subjetiva:** Antes da coleta de julgamentos subjetivos dos participantes, tem uma página de teste para sanar possíveis dúvidas, sobre a avaliação comparativa dos ruídos como mais ou menos incômodos.
- **Registro de Dados:** Registro dos dados coletados, associando cada avaliação à condição específica de teste para análises posteriores, permitindo também que o usuário na ultima página pudesse deixar algum comentário opcionalmente.

As Figuras 8 e 9 a seguir demonstram a interface de forma sequencial. Inicia-se com o cadastro coletando informações como nome, idade, gênero e se o participante possui ou não conhecimento em acústica. Logo em seguida o usuário recebe orientações a respeito do teste, informações orais adicionais eram passadas também, como que ele poderia ouvir os áudios e avalia-los e reavaliar sempre que considerasse necessário.

a sound quality toolbox

Cadastro

Nome: Lucas Martins

Idade: 30

Sexo:

Homem Mulher

Você possui conhecimento em acústica?

Sim Não

Seguinte

Cadastro Instruções Treinamento Testes Feedback

Desenvolvido por Henrique Silveira and Jordão Teixeira Junior

Figura 8 – Interface teste de júri (Cadastro). Fonte: Silveira (2024)



Figura 9 – Interface teste de júri (Instruções). Fonte: Silveira (2024)

Na etapa seguinte o participante recebe um breve treinamento específico do teste conforme a Figura 10, assim tendo uma melhor compreensão de como deverá avaliar os áudios nos quais serão expostos a ele para avaliação. Na Figura 11 mostra onde é feita a classificação, conforme a sua percepção entre mais ou menos incômodo, e se caso houvesse situações de dois áudios fossem percebidos com mesma sensação de incômodo o usuário deveria novamente escuta-los e se possível diferenciar o incômodo percebido.

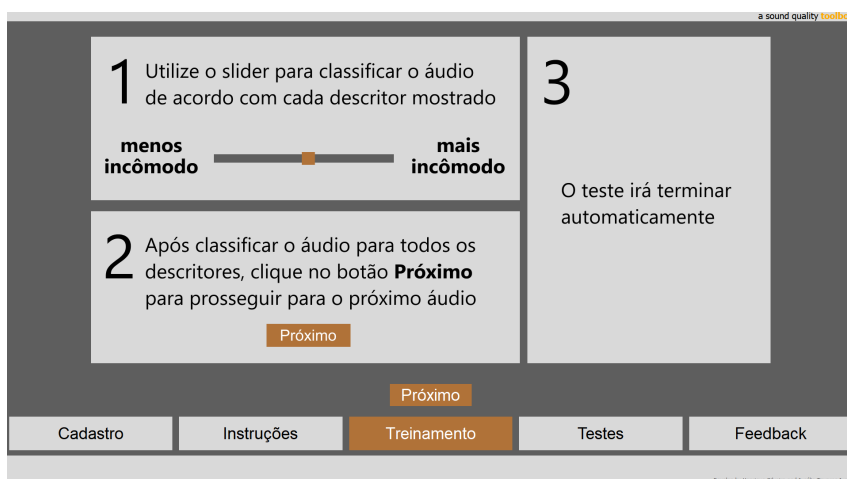


Figura 10 – Interface teste de júri (Treinamento). Fonte: Silveira (2024)

Importante destacar que nesta seção de testes, todos os doze áudios são apresentados conforme pode ser visto novamente na Figura 11, bastava que usasse a barra para visualizar os demais, permitindo assim ao voluntário escutar e ajustar a posição da sensação de incômodo de cada um áudios quantas vezes julgasse necessário.



Figura 11 – Interface teste de júri (Testes). Fonte: Silveira (2024)

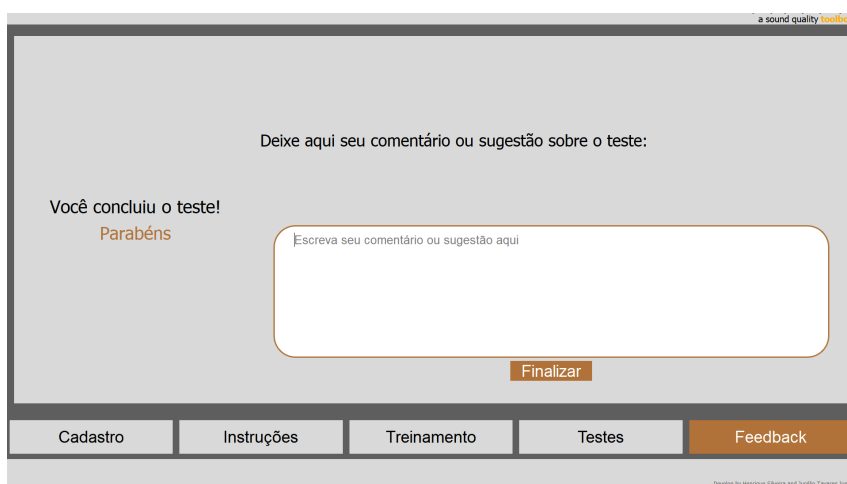


Figura 12 – Interface teste de júri (FeedBack). Fonte: Silveira (2024)

Ao final do teste, os dados são registrados no arquivo *'Informações dos Usuários.csv'*, que possui a seguinte estrutura nas colunas: Nome; Idade; Gênero; Conhecimento em acústica; Ordem dos áudios; Feedbacks; Respostas. Em uma etapa seguinte, Esses dados serão mais a frente apresentados a pós-processamento, visando a remoção dos *outliers*, para assim serem tratados, obtendo informações por meio das análises parametrizadas e/ou não parametrizadas.

4 RESULTADOS

4.1 COLETA DE DADOS

A escolha da posição se deu em função de simular um usuário de frente ao refrigerador como ilustrado na Figura 13. A geometria e a colocação do microfone são determinantes, pois influenciam diretamente a qualidade das medições e a precisão dos dados coletados. Para garantir resultados confiáveis, os microfones devem ser calibrados regularmente e utilizados em condições controladas.



Figura 13 – Posição do microfone em relação ao refrigerador. Fonte: do Autor.

A posição do microfone escolhida para análise do sinal em relação ao refrigerador foi de 1,5 metro de altura conforme mostra a Figura 14, e a uma distância de 1 metro da parte frontal do refrigerador conforme a Figura 15. A escolha da posição foi feita para representar o usuário em frente ao sistema, com a distância de 1 metro pois é amplamente utilizada em diversos estudos na literatura.



Figura 14 – Distância do microfone em relação ao solo. Fonte: do Autor.

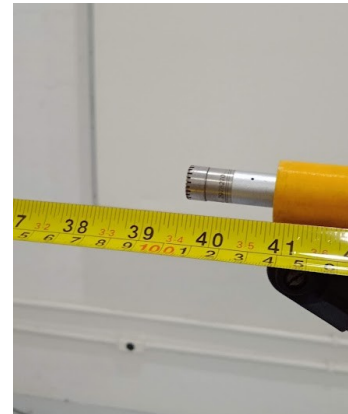


Figura 15 – Distância do microfone em relação ao refrigerador. Fonte: do Autor.

4.2 MÉTRICAS PSICOMÉTRICAS

Os valores obtidos para as métricas psicoacústicas são apresentados a seguir. A sequência dos áudios está organizada das rotações menores para as maiores, exibindo primeiramente os valores das medições realizadas com a cobertura do *Doghhouse*. Essa disposição facilita a comparação e análise dos dados, proporcionando uma visão clara e organizada dos resultados e auxiliando na interpretação de cada métrica em relação ao respectivo áudio avaliado e ao efeito da cobertura no ruído do refrigerador.

4.2.1 Loudness

O gráfico da métrica de Loudness (em sones), conforme ilustrado na Figura 16, revela uma diferença clara entre as sensações de volumes sonoros percebida nos áudios com e sem a presença da cobertura do *Doghhouse* (DH). Observa-se que os valores de Loudness tendem a ser mais elevados nas condições sem a cobertura, alcançando até 1,99 sone no áudio correspondente à rotação de 6330 rpm, em comparação com os valores mais baixos observados nas condições com o *Doghhouse*, como no áudio correspondente à rotação do compressor de 3150 rpm, que apresenta 1,12 sone. Essa diferença na intensidade sonora indica que a configuração com o *Doghhouse* pode reduzir a sensação de volume sonoro, podendo tornar o refrigerador mais agradável ao usuário.

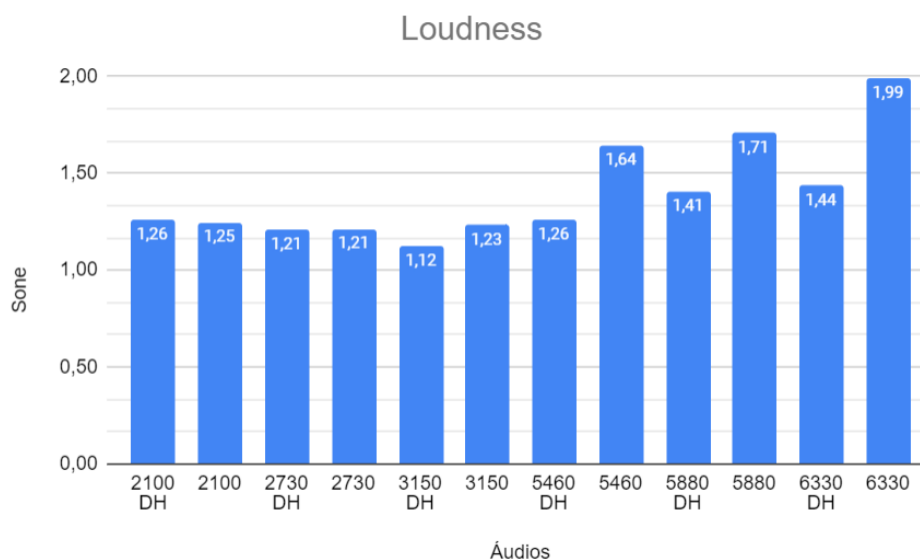


Figura 16 – Resultados Obtidos da métrica Loudness. Fonte: do autor

Observando as rotações de 5460 rpm, 5880 rpm e 6330 rpm, notam-se diferenças marcantes nos valores de Loudness entre as configurações com e sem a cobertura do DH. Na rotação de 5460 rpm, o Loudness sem Doghouse é significativamente mais alto do que com o Doghouse, indicando que a presença da cobertura contribui para uma redução perceptível no ruído. Da mesma forma, na rotação de 5880 rpm, o valor de Loudness se mantém mais elevado na ausência da cobertura, reforçando o papel do Doghouse na atenuação sonora.

A rotação de 6330 rpm apresenta a maior diferença entre os valores de Loudness com e sem Doghouse, com 1,99 sone para a condição sem cobertura e 1,44 sone para a condição com Doghouse. Isso sugere que, em rotações mais elevadas, o Doghouse exerce um efeito de redução ainda mais pronunciado sobre a percepção sonora. Esses resultados confirmam que o Doghouse é particularmente eficaz em minimizar o ruído nas altas rotações, contribuindo para uma experiência de uso mais confortável e menos ruidosa.

4.2.2 Roughness

O gráfico da métrica de Roughness em asper, conforme ilustrado na Figura 17, revela que a flutuação rápida é mais intensa nas rotações mais altas quando a cobertura do (DH) está ausente. Em rotações como 5460 rpm e 5880 rpm, observa-se uma redução significativa na Roughness com a presença do Doghouse, passando de 1,65 para 0,76 asper e de 1,78 para 0,99 asper, respectivamente. Na rotação de 6330 rpm, onde o valor de Roughness sem Doghouse atinge 2,15 asper, a presença do Doghouse reduz esse valor para 1,16 asper, demonstrando um efeito atenuante ainda mais acentuado.

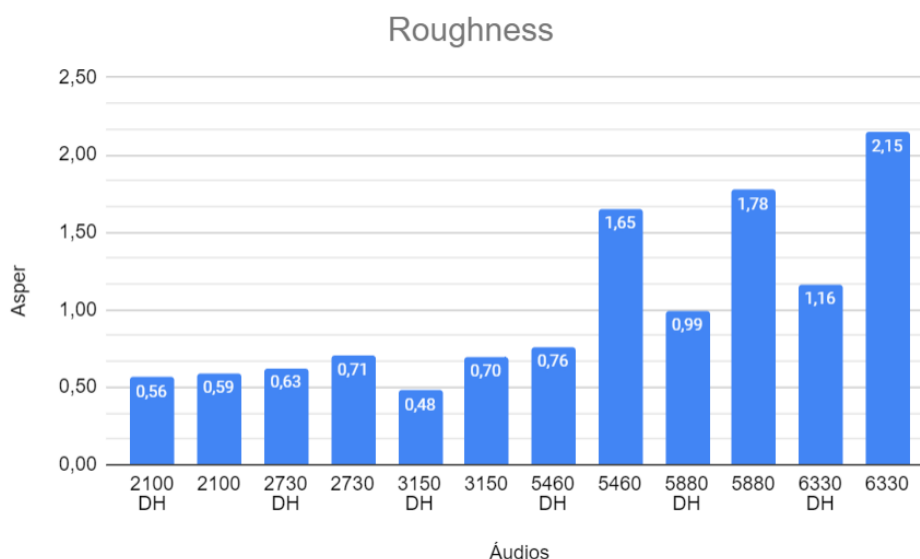


Figura 17 – Resultados Obtidos da métrica Roughness. Fonte: do autor

Esses resultados sugerem que o Doghouse é especialmente eficaz em suavizar a sensação de flutuação rápida do som nas rotações mais elevadas, contribuindo para uma experiência sonora mais agradável e menos intrusiva para o usuário.

4.2.3 Sharpness

O gráfico da métrica de Sharpness (acum), conforme ilustrado na Figura 18, demonstra que a agudeza sonora percebida tende a ser reduzida pela presença da cobertura do Doghouse (DH), especialmente em rotações mais altas. Nas rotações iniciais, entre 2100 e 3150 rpm, os valores de Sharpness variam entre 0,83 e 0,96 acum, com ou sem a cobertura, indicando que o Doghouse tem pouco efeito perceptível na agudeza em velocidades mais baixas do compressor. No entanto, em rotações mais elevadas, como 5460 rpm, a diferença se torna mais evidente, com um valor de Sharpness de 1,22 acum na condição sem Doghouse e uma redução para 0,94 acum com a cobertura. Esse padrão se intensifica na rotação de 5880 rpm, onde o Sharpness sem Doghouse atinge 1,31 acum, em contraste com 0,99 acum com o Doghouse. Na rotação de 6330 rpm, o Sharpness é de 1,29 acum sem a cobertura e 1,12 acum com o Doghouse, mostrando que, mesmo em alta rotação, a cobertura continua a proporcionar uma leve redução na percepção de agudeza sonora.

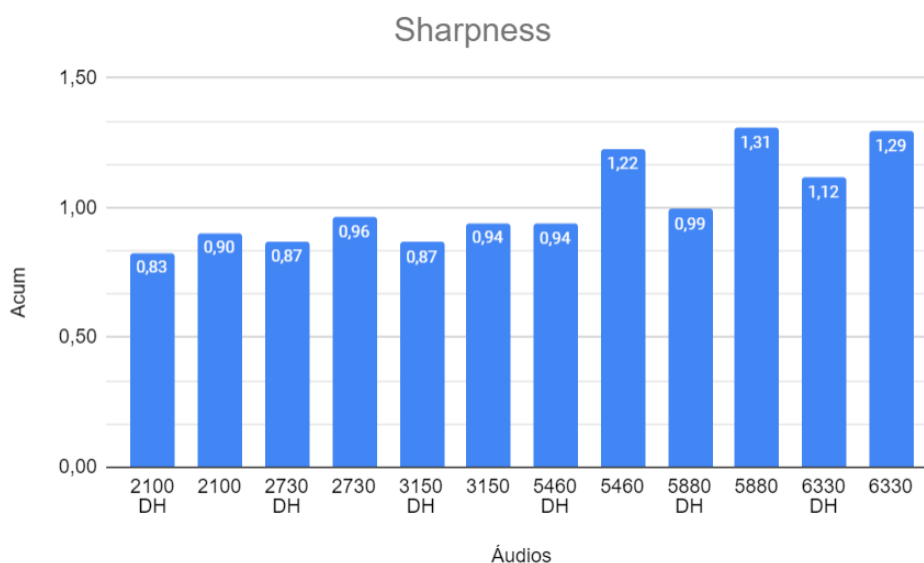


Figura 18 – Resultados Obtidos da métrica Sharpness. Fonte: do autor

Essa redução de Sharpness é particularmente relevante, pois sons com alta agudeza são geralmente percebidos como menos agradáveis, o que pode ser acentuado o incômodo em ambientes domésticos, onde o ruído contínuo do refrigerador pode afetar o conforto do usuário. A presença do *Doghouse* atenua esses picos de agudeza, tornando o som mais suave, especialmente em condições de operação intensiva do compressor. Esse efeito de suavização, embora mais sutil do que nas métricas de Loudness e Roughness, contribui para uma experiência auditiva mais agradável, pois o *Doghouse* reduz características indesejáveis do ruído, como a sensação de um som mais “estridente” em rotações elevadas. Assim, os resultados sugerem que o *Doghouse* não apenas melhora o perfil sonoro geral do refrigerador, mas também minimiza o desconforto auditivo associado a sons agudos em condições de alta rotação.

4.3 TESTE DE JÚRI

O tratamento dos dados do teste de júri envolveu uma série de etapas metodológicas para garantir a precisão e a clareza dos resultados obtidos, com o objetivo de avaliar a percepção de incômodo sonoro dos participantes expostos a diferentes condições de áudio. Inicialmente, os dados foram organizados em um arquivo CSV, no qual cada linha representa as respostas de cada um dos 60 participantes voluntários. Esse arquivo contém, além das respostas de incômodo relativa a cada áudio, informações de perfil, como nome, idade, gênero, nível de conhecimento em acústica e *feedback* em alguns casos. Dessa forma, foi possível relacionar a percepção individual de incômodo a diferentes características dos participantes.

Na Tabela 2 são apresentados os dados sociodemográficos do espaço amostral,

distribuídos segundo as variáveis de sexo, faixa etária e conhecimento em acústica. Esses dados fornecem uma visão detalhada da composição da amostra, permitindo uma análise mais aprofundada das características dos participantes.

Variável Sociodemográfica	Tamanho da Amostra (%)
Sexo	
Masculino	51 (83,61)
Feminino	10 (16,39)
Idade	
20-30	44 (72,13)
30-40	14 (22,95)
40-50	3 (4,92)
Conhecimento em acústica	
Não	31 (50,82)
Sim	30 (49,18)

Tabela 2 – Distribuição das Variáveis Sociodemográficas

Para reduzir potenciais vieses e assegurar a confiabilidade da análise, os áudios foram apresentados em ordem aleatória para cada participante, mantendo-se essa sequência nos registros. No tratamento dos dados, a correspondência entre as respostas e a sequência aleatória de áudios foi preservada, permitindo que cada resposta fosse corretamente associada ao áudio correspondente, conforme experienciado por cada participante.

Com o intuito de eliminar valores atípicos que pudessem distorcer os resultados, aplicou-se um critério de remoção de *outliers* baseado em desvio-padrão. No código, esse processo foi realizado através do critério de 3 sigma, que exclui respostas que desviam em mais de três vezes o desvio padrão da média das respostas para cada áudio. Esse procedimento ajudou a minimizar o impacto de respostas extremas ou inconsistentes, reforçando a confiabilidade da análise ao focar nas percepções mais representativas dos participantes.

Após a exclusão dos *outliers*, as médias das respostas de incômodo auditivo para cada condição foram calculadas, conforme pode ser observado na Figura 19. Observa-se um efeito discreto do uso do *Doghhouse*. Em rotações mais baixas (2100 e 2730 rpm), as médias de incômodo entre as configurações são similares, indicando pouca influência da cobertura nessas condições. Contudo, em rotações mais altas (5460 rpm e acima), o incômodo é significativamente menor na condição com a cobertura, com o maior contraste observado em 6300 rpm. Esses resultados indicam que o *Doghhouse* é efetivo na redução do incômodo sonoro percebido em altas rotações, sugerindo uma contribuição importante para a agradabilidade sonora do refrigerador.

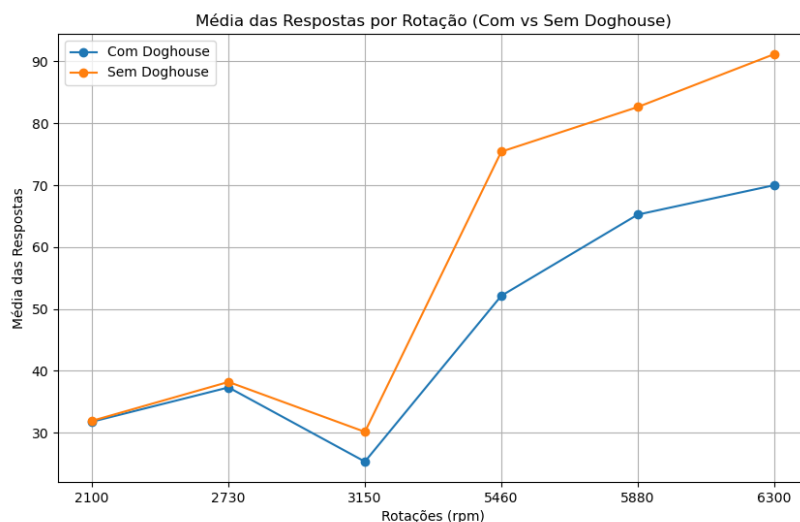


Figura 19 – Média das respostas de incômodo do teste de júri. Fonte: do autor

Com o objetivo de avaliar se as respostas de incômodo seguem uma distribuição normal, foi realizado o teste de normalidade *Shapiro-Wilk*, cujos resultados são representados na Figura 20, com histogramas individuais para cada áudio. Nesses gráficos, a cor alaranjada indica os histogramas das distribuições que não apresentam normalidade, destacando visualmente as condições em que a distribuição dos dados se desvia de uma curva normal.

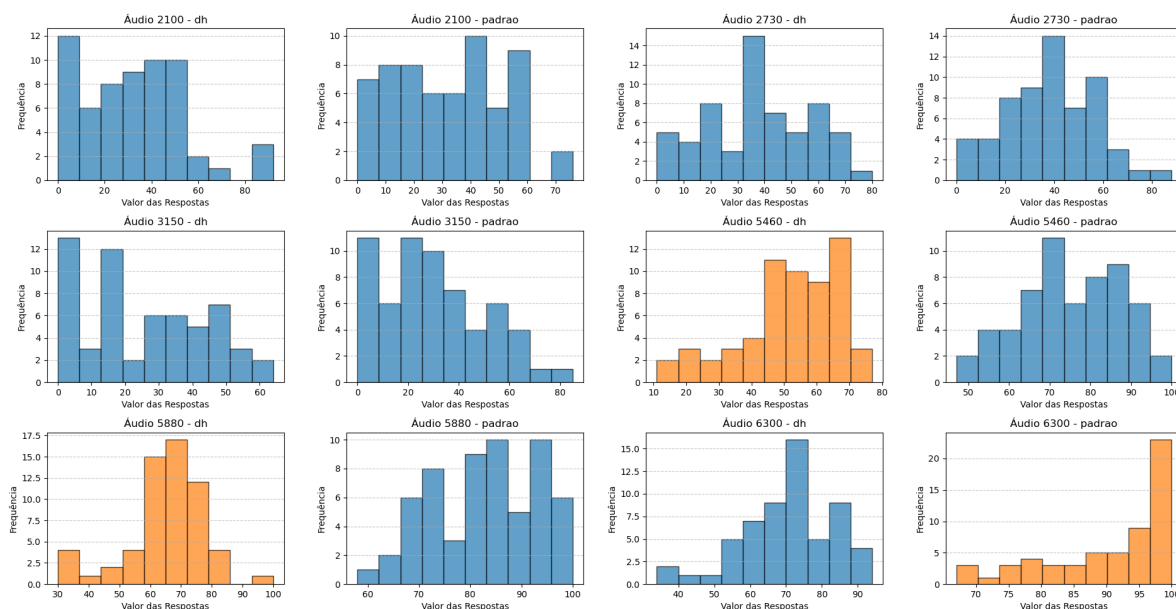


Figura 20 – Histogramas das respostas dos áudios. Fonte: do autor

Essa verificação é essencial para definir a metodologia estatística a ser aplicada: caso os dados apresentem normalidade, testes paramétricos são indicados; caso contrário, testes

não paramétricos são mais apropriados. Com base nos resultados obtidos pelo teste de normalidade *Shapiro-Wilk*, foi observado que, mesmo após a remoção de outliers, alguns conjuntos de dados ainda não apresentaram normalidade. Portanto, decidiu-se aplicar ambas as técnicas, paramétricas e não paramétricas, a todos os dados. Essa abordagem, embora não convencional, permite uma análise estatística mais abrangente e robusta, respeitando as características de distribuição de cada conjunto de respostas de incômodo e possibilitando uma comparação entre os resultados obtidos por diferentes métodos.

Essas etapas de organização, pós-processamento e validação dos dados foram fundamentais para assegurar que os resultados representem as percepções auditivas dos participantes. Dessa maneira, o tratamento rigoroso dos dados permite uma análise estatística confiável e embasa discussões sobre o incômodo gerado pelos diferentes áudios testados, oferecendo uma base sólida para avaliar a eficácia das condições sonoras implementadas no experimento.

4.3.1 Análises paramétricas

Um valor de $p \leq 0,05$ foi adotado como critério de aceitação para significância estatística. Esse critério indica que as diferenças observadas entre as condições com e sem *Doghouse* são consideradas estatisticamente significativas quando a probabilidade de ocorrerem ao acaso é inferior a 5%.

Os resultados do teste T de *Student*, representados no mapa de calor na Figura 21, mostram que a percepção de incômodo entre as condições com e sem *Doghouse* varia conforme a rotação do áudio. Em rotações mais baixas, como 2100 e 2730 rpm, os valores de p são elevados (0.9695 e 0.7977, respectivamente), indicados por tons avermelhados, o que sugere ausência de diferença estatisticamente significativa entre as condições. Isso indica que a cobertura tem pouco ou nenhum impacto perceptível no incômodo sonoro em baixas rotações.

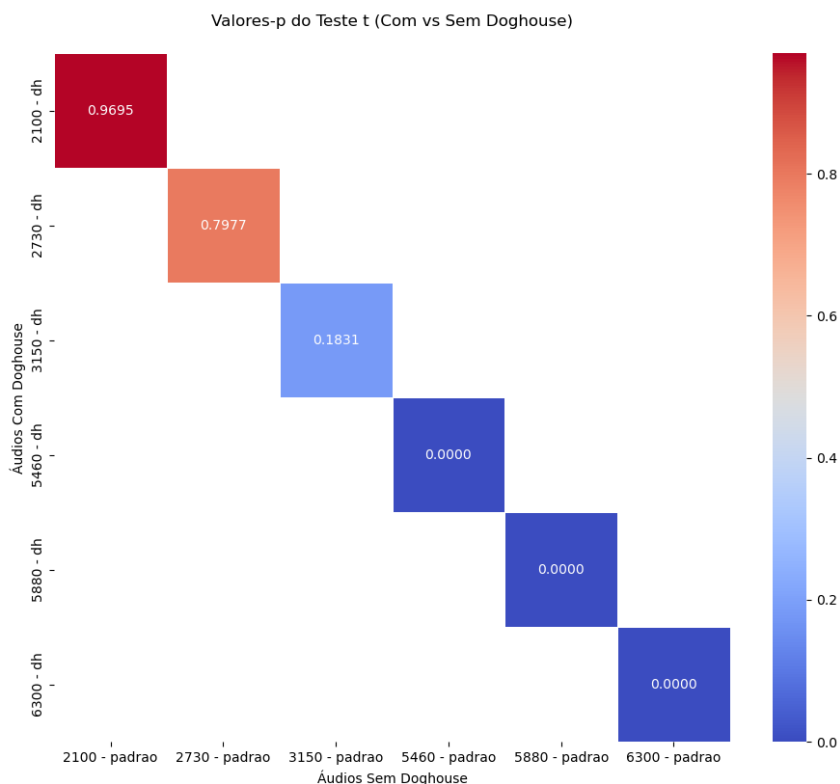


Figura 21 – Resultado teste T comparativo com e sem Doghouse. Fonte: do autor

Em contrapartida, em rotações mais altas, como 5460, 5880 e 6300 rpm, os valores de p são extremamente baixos (próximos de 0), destacados por tons de azul escuro. Esse padrão indica uma diferença estatisticamente significativa entre as condições com e sem a cobertura do *Doghouse* nessas rotações, sugerindo que o uso do *Doghouse* reduz de forma eficaz o incômodo percebido em altas rotações. Dessa forma, a Figura evidencia que a eficácia do *Doghouse* na redução do incômodo sonoro é mais notável em rotações elevadas, enquanto seu impacto é mínimo em rotações baixas.

4.3.2 Análises não paramétricas

Nesta análise, onde utilizou-se métodos não paramétricos para verificar diferenças entre as rotações de áudio. As análises não paramétricas são métodos estatísticos que não assumem uma distribuição específica dos dados, tornando-as mais flexíveis para analisar conjuntos de dados que não seguem a distribuição normal ou que apresentam variâncias heterogêneas. Esses testes baseiam-se em rankings ou ordens dos dados, em vez de médias e variâncias, o que os torna menos sensíveis a *outliers* e à falta de normalidade.

4.3.2.1 ANOVA e Teste de Dunn

Para assegurar uma análise robusta, investigou-se se as diferentes rotações de áudio, nas condições com e sem cobertura do *Doghouse*, apresentavam diferenças significativas nas respostas dos participantes quanto ao incômodo percebido. Utilizou-se o teste ANOVA de uma via em cada condição para avaliar variações nas respostas entre as rotações. Um valor-p inferior a 0,05 foi considerado indicativo de diferenças estatisticamente significativas. Nos casos em que essas diferenças foram identificadas, aplicou-se o teste pós-hoc de Dunn, com correção de Bonferroni, para determinar quais rotações se diferenciavam entre si, permitindo uma análise detalhada das discrepâncias específicas entre os grupos.

Na condição com cobertura do *Doghouse*, o teste ANOVA resultou em um valor-p inferior a 0,05, indicando a existência de diferenças significativas entre as rotações. Assim, o teste pós-hoc de Dunn, com correção de Bonferroni, foi utilizado para comparar individualmente cada rotação. Na Figura 22, que apresenta um *heatmap* dos valores-p obtidos no teste pós-hoc para a configuração com cobertura, observa-se que os pares de rotações com diferenças mais evidentes são representados por áreas em azul escuro. Em contrapartida, os pares representados por cores claras ou vermelhas apresentam valores-p acima do critério de aceitação, indicando a ausência de diferenças significativas entre essas rotações de acordo com as respostas coletadas. Vale ressaltar a simetria neste gráfico e que é esperado que não seja observada diferença em comparação entre mesmas rotações.

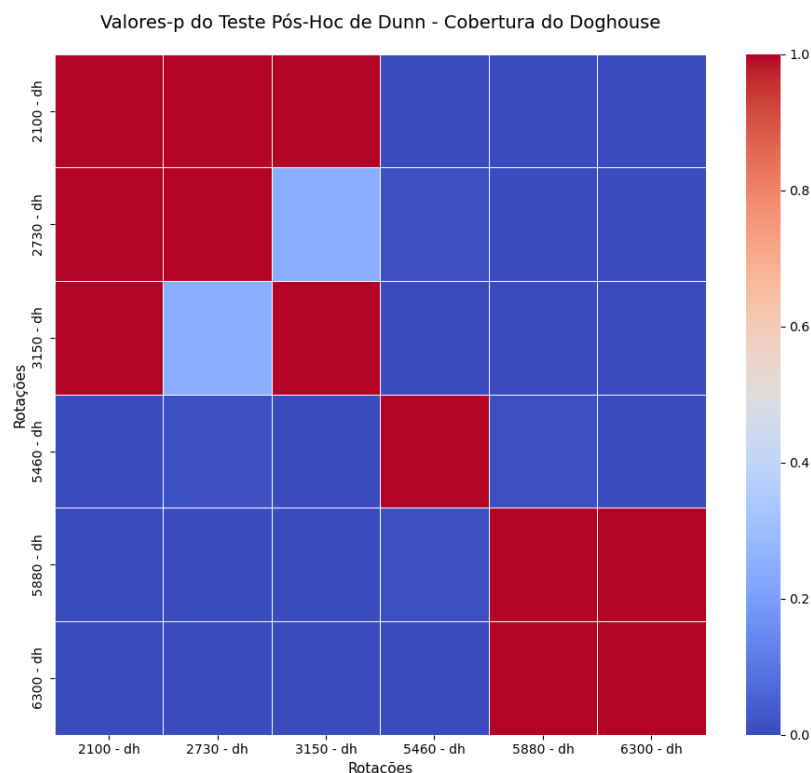


Figura 22 – *Heatmap* dos valores-p para configuração com cobertura do *Doghouse*. Fonte: do autor.

Para a condição sem cobertura do *Doghouse*, o teste ANOVA também indicou diferenças significativas, justificando a aplicação do teste pós-hoc de Dunn. Na Figura 23, referente à configuração padrão, onde apenas as rotações baixas não é possível notar uma diferença significativa entre as respostas similar ao que ocorria com o caso anterior.

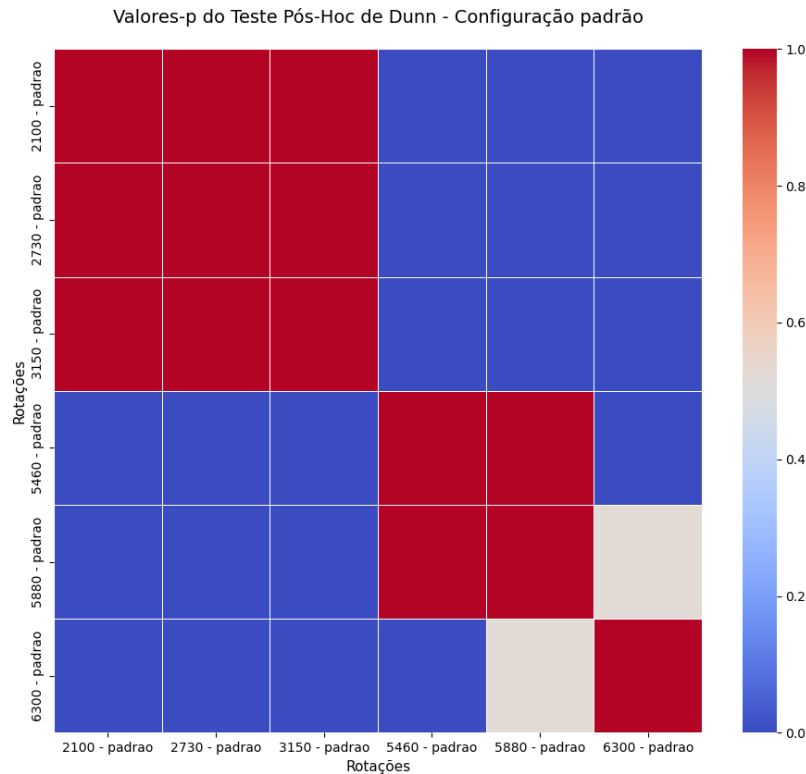


Figura 23 – *Heatmap* dos valores-p para configuração padrão. Fonte: do autor.

Os resultados dessas análises indicam que existe uma diferença perceptível nos níveis de incômodo associados às diferentes rotações, de acordo com as respostas dos participantes. O valor-p no teste ANOVA demonstra que, no conjunto geral das rotações, o incômodo percebido não é uniforme, e algumas rotações se destacam como mais ou menos incômodas. O teste pós-hoc de Dunn complementa essa análise ao identificar especificamente quais rotações apresentam diferenças significativas entre si.

Essa evidência sugere que:

- **Os participantes percebem diferenças reais de incômodo entre os ruídos** associados às rotações, reforçando que certos sons gerados pelo compressor são mais incômodos do que outros.
- **A configuração do *Doghouse* impacta a percepção de incômodo**, alterando a forma como o som é percebido. Por exemplo, com a cobertura, as diferenças entre as rotações podem ser suavizadas ou amplificadas dependendo das características acústicas do *Doghouse*.

Portanto, essa análise evidencia que o incômodo percebido pelos participantes não é aleatório ou indistinguível; há diferenças estatisticamente e perceptualmente significativas que devem ser consideradas para aprimorar a ergonomia acústica do produto. As figuras apresentadas permitem visualizar claramente os pares de rotações que diferem, facilitando o direcionamento das melhorias.

5 CONCLUSÕES

Os resultados indicaram que rotações mais altas aumentam o incômodo, sobretudo pela intensificação da *Loudness* e *Sharpness*, sugerindo que o aumento na intensidade e a agudeza do som em frequências elevadas tornam a experiência mais desagradável. Essa conclusão enfatiza a necessidade de intervenções acústicas que atenuem o ruído, principalmente em frequências críticas.

A aplicação da cobertura acústica *Doghouse* demonstrou potencial para reduzir o incômodo, especialmente em rotações elevadas, o que reforça o benefício de incluir materiais absorventes no design do produto. Esta abordagem pode elevar a percepção de qualidade, promovendo um produto mais agradável e confortável para o consumidor. Os ganhos potenciais envolvem não apenas a redução do desconforto, mas também uma melhor aceitação do produto no mercado, promovendo a fidelização e satisfação dos consumidores. A integração entre as respostas do júri e as métricas psicoacústicas permitiu validar as medições subjetivas e objetivas, oferecendo uma base para ajustes de design com foco em melhorias na qualidade sonora.

A relevância da ergonomia acústica para a engenharia de produtos foi reforçada por este estudo, demonstrando que o conforto auditivo é essencial para otimizar a experiência do usuário em produtos com emissão de ruído contínuo. A abordagem adotada evidencia que melhorias na agradabilidade do som não apenas contribuem para o bem-estar dos usuários, mas também agregam valor competitivo ao produto, estabelecendo a marca como sinônimo de qualidade sonora. Para futuras pesquisas, recomenda-se ampliar a amostragem para incluir diferentes perfis de usuários e explorar técnicas de análise mais refinadas, além de testar diferentes materiais para a cobertura do DH, consolidando o entendimento e aprimoramento do design acústico de eletrodomésticos.

Os objetivos deste trabalho foram alcançados, com destaque para a avaliação da qualidade sonora de um refrigerador doméstico, a investigação do incômodo auditivo causado por diferentes rotações do compressor e a proposta de melhorias acústicas, como a aplicação da cobertura *Doghouse*. A pesquisa conseguiu não apenas identificar as faixas de frequência mais críticas para o conforto do usuário, mas também validar a eficácia de intervenções acústicas específicas no produto. A combinação de testes psicoacústicos e análises subjetivas permitiu uma compreensão aprofundada das respostas dos usuários, confirmando o impacto positivo das soluções implementadas. Com isso, o trabalho atendeu ao objetivo de promover uma experiência sonora mais agradável e alinhada às expectativas do consumidor, oferecendo uma base sólida para futuros aprimoramentos no design acústico de refrigeradores.

Este trabalho proporciona uma experiência significativa na aplicação de conceitos de ergonomia, psicoacústica e desenvolvimento de produto, fundamentais na engenharia de produção. Ao abordar problemas reais de qualidade sonora e satisfação do usuário, o

estudo permite o desenvolvimento de habilidades analíticas e práticas na interpretação de dados e na tomada de decisões com impacto direto no produto. Essa integração de conhecimentos técnico-científicos e sua aplicação prática reforçam a capacidade de propor soluções que agreguem valor e contribuam para a formação de profissionais capacitados a atuar em projetos centrados na experiência do consumidor e na competitividade do mercado.

6 REFERÊNCIAS

- IIDA, Itiro. Ergonomia: projeto e produção. 3ªed. São Paulo: Edgard Blücher, 2018.
- BECH, S., ZACHAROV, N. *Perceptual audio evaluation - theory, method and application*. Wiley, 2006.
- BLAUERT, J. (Editor). *Communication acoustics*. Springer, 2005.
- BLAUERT, J. *Spatial hearing: psychophysics of human sound localization*. MIT Press, 2001.
- FASTL, H., ZWICKER, E. *Psychoacoustics: facts and models*. Springer, 3rd ed., 2007.
- GELFAND, S.A. *Hearing: An Introduction to psychological and physiological acoustics*. Informa Healthcare, 5th ed., 2010.
- GERGES, S. *Ruído - Fundamentos e Controle*. 2. ed. São Paulo: NR Editora, 2000.
- KINSLER, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., e Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of Acoustics* (4ª ed.). New York: Wiley.
- PETERSON, Arnold P. G. *Handbook of Noise Measurement*. 9. ed. Concord, Massachusetts: GenRad, 1980.
- ISO 532: 1975. *Acoustics - Method for calculating loudness level*.
- LYON, R. H. *Designing for product sound quality*, Marcel Dekker, 2000.
- STARTES, L. M. A., & Souza-Formigoni, M. L. O. (2013). Avanços na Psicometria: Da Teoria Clássica dos Testes à Teoria de Resposta ao Item. *Psicologia: Reflexão e Crítica*, 26(2), 241-250.
- POUCHOILIN, G. *Approche Statistique pour L'Analyse Objective et la Caractérisation de la Voix Dysphonique*. Dissertação de Doutorado. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 2008.
- CARVALHO JÚNIOR, Edson Benício et al. Análise dos efeitos do ruído aeronáutico em zonas residenciais circunvizinhas ao Aeroporto Internacional de Brasília. *Journal Of Transport Literature*, Brasília, v. 8, n. 4, p. 59-81, out. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jt1/a/XRjbNR6wNJTL96mPNDPKKLQ/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 17 set. 2023.
- FERNANDES, Júlio César. Avaliação de desempenho acústico de um consultório odontológico. *Produção*, João Pessoa, v. 21, n. 3, p. 509-517, jul. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/zKWgyKrYzNhjMZtvg6cPYXp/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 17 set. 2023.
- GONÇALVES, Valéria de Sá Barreto. Ruído como agente comprometedor da inteligibilidade de fala dos professores. *Produção*, João Pessoa, v. 19, n. 3, p. 466-476, dez. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/3ZsxxgQVby3qXP5PsvM7dqQk/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 17 set. 2023.
- ZENERATO, Thais Sacomani. Análise Acústica de Fachadas de Light Steel

Frame e Placas Cimentícias. *Revista Matéria*, Campinas, v. 24, n. 2, p. 33-44, mar. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/znnZYKgGPVcmdT7vj8fZkDS/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 17 set. 2023.

ZHANG, Junhui. Sound quality evaluation and prediction for the emitted noise of axial piston pumps. *Applied Acoustics*, Hangzhou - China, v. 145, p. 27-40, fev. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X18307552>. Acesso em: 17 set. 2023.

JEON, Jin Yong. Sound radiation and sound quality characteristics of refrigerator noise in real living environments. *Applied Acoustics*, Seoul, v. 68, n. 10, p. 1118-1134, out. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X06001381>. Acesso em: 17 set. 2023.

MORAVEC, Marek. Development of psychoacoustic model based on the correlation of the subjective and objective sound quality assessment of automatic washing machines. *Applied Acoustics*, Košice - Slovakia, v. 1, n. 140, p. 178-182, out. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X18301695>. Acesso em: 17 set. 2023.

DEMOLOINER, Giordano. *AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SONORA DE UM CICLO TÍPICO DE OPERAÇÃO DE UM REFRIGERADOR*. 2017. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/187804/PEMC1819-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 set. 2023.

PELLEGRINI, Cláudio de. *AVALIAÇÃO DA QUALIDADE SONORA DE COMPRESSORES HERMÉTICOS UTILIZANDO REDES NEURAS ARTIFICIAIS*. 2005. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102469/232345.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 set. 2023.

LANGVELD, Lau; VAN EGMOND, René; JANSEN, Reinier; ÖZCAN, Elif. Product Sound Design: Intentional and Consequential Sounds. InTech, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/55274>. Acesso em: 17 ago. 2023.

FASTL, Hugo. Psycho-Acoustics and Sound Quality. In: BLAUERT, Jens (Ed.). *Communication Acoustics*. Springer, 2005. p. 277. Capítulo sobre métodos psicoacústicos e engenharia de qualidade sonora aplicados ao design de som.

CERRATO, Gabriella. Sound/Vibration Quality Engineering Part 1 – Introduction and the SVQ Engineering Process. *Sound and Vibration*, p. 16-17, 2007. Introdução ao processo de engenharia de qualidade sonora e vibração, com foco em expectativas dos usuários e métricas de qualidade.

PEDERSEN, Torben H.; FOG, Carsten L. Optimisation of Perceived Product

Quality. In: Euronoise 98, München. DELTA Acoustics e Vibration, 1998. Discussão sobre a importância da qualidade sonora de produtos e otimização da percepção da qualidade.

SILVEIRA, H. A.; VERGARA, F. E.; LENZI, A. Aplicação da Métrica de Proeminência do Impulso (MPI) na detecção e análise de ruídos impulsivos em sistemas de refrigeração. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA, 13., 2024, Santiago, Chile. Anais [...]. Santiago, Chile: FIA, 2024.