

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO GABRIEL DE MOURA PRESTES

**MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO SONORO PELO MÉTODO DA FUNÇÃO DE
TRANSFERÊNCIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc2 - Nº de Inscrição - 41)

CURITIBA

2015

PEDRO GABRIEL DE MOURA PRESTES

MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO SONORO PELO MÉTODO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa " MEDIÇÃO DE ISOLAMENTO SONORO PELO MÉTODO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA", realizado pelo aluno Pedro Gabriel de Moura Prestes, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Márcio Henrique de Avelar Gomes

Damec, UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Alexandre Augusto Pescador Sardá

Demec, UFPR

Avaliador

Prof. Dr. João Morais da Silva Neto

Demec, UFPR

Avaliador

Curitiba, 07 de Julho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a coordenação do departamento de engenharia mecânica da universidade federal do paraná (DEMEC-UFPR) pelo apoio e disponibiliza o do laboratório de vibra es e acústica (LVR).

RESUMO

PRESTES, Pedro G. M. Medição de isolamento sonoro pelo método da função de transferência. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso Superior em Engenharia Industrial Mecânica, Curitiba, 2015.

Uma das características importantes para um bom desempenho acústico de uma edificação é o isolamento sonoro entre ambientes, de modo que o campo sonoro em uma sala não sofra a interferência sons externos. Neste trabalho são comparados dois métodos experimentais para determinação do isolamento em campo (*in situ*). Tem-se como proposta analisar a medição de isolamento sonoro utilizando o método da função de transferência, método alternativo ao comumente empregado e descrito pela norma ISO 140 e NBR 15575. Esse método tem sua teoria consolidada a décadas e é vastamente utilizado em diversas aplicações principalmente na engenharia elétrica. Segundo estudos com aplicação em acústica, o método apresenta maior relação sinal-ruído, menor influência a ruídos de fundo na medição e seus resultados são menos afetados por distorções causadas pela fonte sonora, obtendo conseqüentemente uma maior confiabilidade e precisão de resultados em relação ao método tradicional. Uma questão que ainda necessita ser aprofundada para esse método é a completa determinação de sua incerteza de medição. Para iniciar a abordagem a essa questão, os componentes de incerteza mais primárias foram identificadas e foi seguido um procedimento para seu cálculo. Foram realizados testes em diferentes condições experimentais, com o objetivo de testar os métodos em condições adversas. Com os resultados obtidos pelos testes nessas condições os métodos puderam ser comparados, em termos da diferença padronizada de nível sonoro e incerteza de medição. Neste primeiro estudo, mostrou-se que o método da função de transferência apresenta resultados que são equivalentes ou em alguns casos melhores que o método tradicional. Além disso, como resultado adicional, foram feitas considerações sobre a metodologia utilizada pelo método de função de transferência que são relevantes no resultado final de medição.

Palavras-chave: Técnicas de medição acústica, medição do isolamento sonoro, método da função de transferência.

ABSTRACT

PRESTES, Pedro G. M. Medição de isolamento sonoro pelo método da função de transferência. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso Superior em Engenharia Industrial Mecânica, Curitiba, 2015.

One important characteristic for a good acoustical performance in a room is the sound isolation between rooms, so that the sound field in a room won't suffer interference of external sound fields. In the present work experimental methods to assess the in-situ sound isolation are studied. The primary goal is to evaluate the transfer function method, an alternative to the most commonly used method, described in the ISO 140 and NBR 15575. These method is based on a consolidated theory and is vastly used in many applications mainly in electrical engineering. According to studies in acoustics, the method features better signal-to-noise ratio, less influence of background noises and sound source distortions, obtaining thus greater reliability and precision comparing to the traditional method. A question that still must be investigated for this method is the complete determination of its measurement uncertainty. To initiate the study of this issue the most primary components of uncertainty were identified and a procedure for its calculation was adopted. Tests in different experimental conditions were performed, aiming to test the methods in adverse conditions. The results obtained by in these conditions enabled the methods to be compared, through the standardized level difference and the measurement uncertainty. In this initial study, it was demonstrated that the transfer function method shows results that are equivalent or in some cases better than the traditional method. Besides, as an additional result, some considerations relevant for the final measurement results concerning the methodology applied to the transfer function method ,were done.

Keywords: Acoustical measurement techniques, sound insulation measurement, transfer function method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação genérica de um sistema.....	14
Figura 2. Representação de um sistema LIT.....	15
Figura 3. Caminhos da transmissão sonora e estrutura de medição do isolamento. 18	
Figura 4. Fontes de incerteza de medição associadas ao sistema e derivação de parâmetros com incerteza incluída no resultado.....	21
Figura 5. Amplificador de potência 01dB ampli 12 e fonte sonora omnidirecional dodecaédrica 01dB.	27
Figura 6. Medidor 01dB solo e fonte sonora de referência.....	27
Figura 7. Sequência de procedimentos e operações para a medição do isolamento sonoro utilizando o método tradicional.	28
Figura 8. Sistema de medição da resposta ao impulso utilizando varredura de senos.	29
Figura 9. Microfone 01dB mce 212 e pré-amplificador G.R.A.S. Type 26ca.	30
Figura 10. Placa conversora de sinais AD/DA Roland Quad-Capture.....	30
Figura 11. Amplificador e condicionador de sinais 01dB opus.	31
Figura 12. Controle da execução dos experimentos por computador com Matlab e ITA-Toolbox instalados.....	31
Figura 12. Sequência de procedimentos e operações para a medição do isolamento sonoro utilizando o método da função de transferência.	32
Figura 13. Local de realização dos experimentos e posicionamentos de microfone e fonte sonora.	33
Figura 14. Equipamentos montados para medições das funções de transferência entre pontos da sala emissora.	34
Figura 15. Equipamentos montados na sala receptora para medições das funções de transferência entre a sala emissora e receptora.	34
Figura 16. Equipamentos montados para medições das funções de transferência em pontos da sala receptora para medição do tempo de reverberação.	35

Figura 17. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição padrão..	39
Figura 19. Composição de incertezas para os métodos na condição padrão.	42
Figura 20. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição de ruído de fundo.	43
Figura 21. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição com ventilação (sistema variante no tempo).....	45
Figura 22. Diferença padronizada e incerteza combinada para o teste sob condição de repetibilidade	47
Figura 23. Comparação entre incertezas combinadas.	49
Figura 24. Comparação a sequência de procedimentos entre o método da função de transferência utilizando a média das energias, a), e a média das funções de transferência, b).	51
Figura 25. Comparação entre as funções de transferência e sua média.	52
Figura 26. Comparação entre médias das medições.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores da distribuição t de student para nível de confiança de 95%.	24
Tabela 2. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição padrão. ...	40
Tabela 3. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição com ruído de fundo.	44
Tabela 4. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição com ventilação.	46
Tabela 5. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição de repetibilidade.	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Contexto do Tema.....	11
1.2	Caracterização do Problema.....	12
1.3	Objetivos.....	13
1.4	Justificativa.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	Noções de processamento de sinais.....	14
2.1.1	Obtenção da função de transferência.....	15
2.2	Isolamento sonoro.....	16
2.3	Medição do isolamento sonoro.....	18
2.3.1	Método tradicional.....	18
2.3.2	Método da função de transferência.....	19
2.4	Determinação da incerteza de medição.....	20
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	Método tradicional.....	25
3.2	Método da função de transferência.....	28
3.3	Configuração dos experimentos.....	32
3.3.1	Condição padrão.....	35
3.3.2	Condição com ruído de fundo.....	35
3.3.3	Condição com ventilação (sistema não LTI).....	36
3.3.4	Teste de repetibilidade.....	36
3.4	Incerteza de medição.....	36
4	RESULTADOS.....	38
4.1	Comparação entre os métodos.....	38
4.1.1	Condição padrão.....	38
4.1.2	Condição com ruído de fundo.....	42
4.1.3	Condição com ventilação (sistema não LTI).....	44
4.1.4	Teste de repetibilidade.....	46
4.2	Comparação condições.....	48
4.3	Análise da metodologia para o método da função de transferência.....	50
5	CONCLUSÕES.....	54
6	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

O problema abordado neste trabalho pertence a uma linha de pesquisa que tem como enfoque estudar técnicas de medição acústica. Essa é uma das possíveis subdivisões no estudo da acústica, área multidisciplinar que envolve conhecimentos em diversos campos e pode ser considerada como uma subárea das engenharias civil, elétrica e mecânica, de acordo com a abordagem.

O estudo da acústica, apesar de bem desenvolvida e estudada de maneira intensiva na Europa e América do Norte, por exemplo, comparativamente ainda é pouco desenvolvida e estudada no Brasil, sendo poucas as universidades que apresentam continuamente publicações sobre o assunto. Desta maneira, ainda há bastante potencial para desenvolvimento da área no país, de forma que o estudo e aplicação da acústica seja considerado parte integrante de projetos relacionados ao desenvolvimento de produtos, construção civil, planejamento urbano, entre outros.

O objeto de pesquisa deste trabalho é a medição do isolamento sonoro entre ambientes, característica que no projeto acústico é controlada de modo a garantir que as paredes/estrutura de um ambiente impeça a transmissão de ruídos de outros ambientes.

O estudo do isolamento sonoro possibilita, entre outras aplicações, testar a conformidade com especificação prevista em projeto ou com uma norma que se necessite atender. As normas ISO 140-5 [4] , ISO 16283-1 [5] e nacionalmente a NBR 15575 [1] descrevem um método a ser usado como padrão para medição de isolamento sonoro, no qual prevê-se medições de nível de pressão sonora e de tempo de reverberação através do ruído interrompido, denominado aqui como método tradicional. Uma alternativa a esse método é através da medição de funções de transferência, que, apesar de potencialmente vantajoso, ainda não é uma técnica vastamente aplicada na engenharia civil e mecânica. O que é esperado desse método é que se obtenham resultados de maneira mais rápida e prática e com menor incerteza associada à medição.

Existem atualmente algumas publicações sobre o emprego do método da função de transferência aplicado à medição de isolamento sonoro, como em Michalski, 2011 [9] e Venegas, 2007 [12], porém, até o momento não há grande quantidade trabalhos que abordem de maneira completa e detalhada o problema da determinação da incerteza de medição. Em Dietrich, 2013 [2], a incerteza de medição aplicada à medição de função de transferência é estudada a fundo, apesar do método não ser aplicado ao isolamento sonoro e não ser proposta uma metodologia prática para cálculo da incerteza de medição. Em Michalski, 2011 [9] foi realizado o estudo da medição da incerteza de medição relativa à medição de isolamento sonoro, porém menos detalhadamente do que em Dietrich, 2013 [2].

1.2 Caracterização do Problema

Existem dois métodos para se avaliar o isolamento sonoro de salas, utilizando a medição de intensidade ou pressão sonora. O último método é abordado neste trabalho, por ter aplicação mais simples, rápida e com menor custo, apesar da desvantagem de apresentar menor precisão (Hongisto,2000 [8]).

Utilizando-se a medição da pressão sonora, tem-se o método tradicional de medição de isolamento sonoro in situ que é proposto pelas normas ISO 140-5 e normalmente utilizado. Esse método apresenta certas desvantagens sobre o aspecto prático, principalmente em frequências mais baixas, devido à baixa relação sinal-ruído obtida, conforme apontado em Dietrich,2013, sofrendo então maior influência de ruídos de fundo, o que causa grande variabilidade no resultados dos teste e pode inclusive inviabilizá-lo em algumas situações.

Tem-se como oportunidade estudar a aplicação do método alternativo, que utiliza medições de respostas ao impluso ou funções de transferência para obter parâmetros acústicos. Segundo a literatura, esse método apresenta em menor grau as desvantagens apresentadas.

Um problema específico que é gerado pela proposta do método da função de transferência é a determinação de sua incerteza associada à medição, estudo que já foi iniciado por alguns pesquisadores, porém até o momento ainda não foi completamente desenvolvido.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos:

- Estudar o método de função de transferência aplicado à medição de isolamento sonoro e compará-lo com o método convencional, descritos pelas normas ISO 140-5 e ISO 16283-1.
- Identificar as principais fontes de incerteza no processo de medição e utilizar uma metodologia para quantificá-las com o fim de descrever a incerteza de medição combinada e expandida.

1.4 Justificativa

O primeiro e mais evidente ponto em que o projeto se justifica é o contexto científico ao qual o trabalho faz parte. Conforme se mostra em Müller e Massarani, 2001 [10], Dietrich, 2013 [2] e Michalski, 2011 [9], se trata de um tema em que há potencial para desenvolvimento e o produto de projeto pode ser útil para futuros estudos e medições. O resultado do trabalho pode ser utilizado para promover o método no meio acadêmico, como também servir como uma possível contribuição para novas versões das normas relativas à medição do isolamento sonoro.

O problema proposto, que inicialmente é focado na utilização do método da função de transferência na medição do isolamento sonoro, pode se desdobrar em diferentes áreas e ser aproveitada em outros estudos e projetos. Desta maneira, o estudo poderia ser utilizado e desenvolvido para o projeto de salas (ou automóveis, aeronaves, trens e embarcações), desenvolvimento e teste de materiais para isolamento sonoro, questões relacionadas à análise e processamento de sinais, entre outros. Além disso, imaginando o problema de maneira mais ampla, a técnica utilizada (medição de funções de transferência) é transferível com algumas adaptações para diversas outras aplicações envolvendo a análise de sistemas dinâmicos.

Como motivação pessoal tem-se a possibilidade de formação numa área de interesse, não comumente disponível para pesquisa no Brasil e que tem potencial para desenvolvimento, tanto nacionalmente quanto internacionalmente. Há o aprendizado e experiência obtidos através de questões práticas relacionadas às atividades experimentais, a possibilidade de integrar conhecimentos de diferentes áreas da engenharia de complementando a formação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Noções sobre sistemas lineares invariantes no tempo

Para a utilização do método da função de transferência para o cálculo do isolamento sonoro, é utilizada uma abordagem baseada na teoria de sistemas, mais especificadamente de sistemas lineares invariantes no tempo, denominados sistemas LIT (em inglês: LTI). Um sistema pode ser definido como qualquer processo no qual é possível estabelecer uma relação, linear ou não, entre suas grandezas de entrada e de saída. Aplica-se uma perturbação no sistema e obtêm-se uma resposta, que é determinada pelas suas características. Na Figura 1 é ilustrado um sistema genérico, composto por diversas variáveis de entrada e saída.

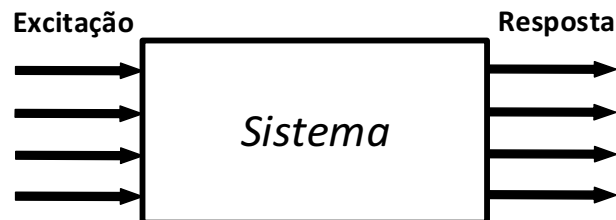


Figura 1. Representação genérica de um sistema.

Fonte: Autoria própria.¹

Quando o processo estudado é considerado linear e invariante no tempo, pode-se estabelecer relações lineares entre as variáveis de entrada e saída. Essas variáveis podem ser analisadas no domínio do tempo ou no domínio da frequência, através da aplicação da transformada de Fourier. Na figura 2 é representado um sistema LIT dependente de apenas uma variável.

¹ Figuras sem indicação de fonte são de autoria própria.

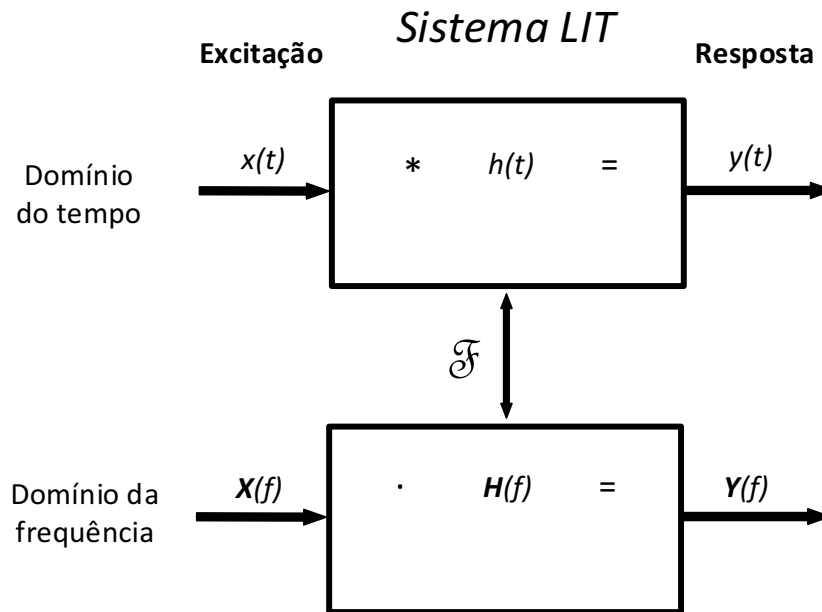


Figura 2. Representação de um sistema LIT.

Analisando o sistema LIT descrito na figura 2 no domínio do tempo, pode-se escrever:

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (1)$$

Aplicando a transformada de Fourier à equação (1) obtemos a resposta no domínio da frequência, como mostra a equação (2).

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega) \quad (2)$$

Nota-se que a operação de convolução é substituída por uma operação de multiplicação no domínio da frequência. Dessa forma pode-se obter a função de transferência do sistema, como é mostrado na equação (3).

$$H(\omega) = Y(\omega) / X(\omega) \quad (3)$$

Como consequência prática para o problema estudado neste trabalho, tem-se que a partir da excitação da fonte sonora com um sinal $x(t)$ determinado, e da gravação do sinal obtido $y(t)$, pode-se determinar, com algumas operações, a resposta ao impulso do sistema, que no caso do trabalho é composto pelo ar existente nas salas e pelas estruturas que separam os ambientes.

2.1.1 Obtenção da função de transferência

Para obter-se a resposta ao impulso de um sistema, pode-se utilizar como sinal de excitação diversas técnicas. A maneira mais intuitiva é gerar impulsos que se

aproximem de um impulso unitário (delta de Dirac), como por exemplo um estouro de um balão. Porém como é descrito em Dietrich, 2011 [2]. essa técnica não é a mais recomendada, devido principalmente à baixa razão sinal/ruído que é obtida. Há várias técnicas que foram desenvolvidas no decorrer do tempo, como o método TDL (Time Delay Spectrometry), MLS (técnica de correlação que usa sequências de comprimento máximo como sinal de excitação) e a varredura de senos, que proporcionam uma melhor faixa dinâmica, capacidade de reprodução de experimentos, menor influência de ruídos externos, entre outras vantagens, conforme descrito em Müller e Massarani, 2001 [9].

2.2 Isolamento sonoro

O isolamento sonoro se refere a capacidade de transmissão do som entre salas. Essas salas podem ser interpretadas de diversas formas, de acordo com a aplicação. Pode-se pensar, por exemplo, no interior de um automóvel ou de uma aeronave. Neste trabalho, os ambientes estudado serão salas de aula, portanto o estudo terá enfoque de aplicação na construção civil. Como a formulação do problema é genérica, pode-se facilmente transpor o método para outras aplicações.

A transmissão sonora entre os ambientes é calculada em medições em laboratório pelo índice de redução sonora, dado pela equação (4)

$$R = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right), \quad (4)$$

onde W_1 representa a potência sonora emitida e W_2 é a potência transmitida para a sala receptora.

Existem basicamente dois métodos para calcular o isolamento sonoro. Pode-se obter as potências pela medição da intensidade sonora ou a partir da medição da pressão sonora. Neste trabalho será utilizando o método da pressão, por ser o método mais simples e rápido, apesar de possibilitar resultados menos detalhados e com maior incerteza (Hongisto, 2000 [8]).

Admitindo-se um campo difuso em ambas as salas, pode-se estabelecer uma relação aproximada entre a potência sonora e a pressão sonora, dada pelas equações (5) e (6), como apresentado em Hongisto,2000, onde p é pressão sonora,

ρ_0 é a densidade do ar , c_0 é a velocidade do som no ar, S é a área do elemento de separação e A_2 é a área de absorção sonora .

$$W_1 = \frac{P_1^2}{4\rho_0 c_0} S \quad (5)$$

$$W_2 = \frac{P_2^2}{4\rho_0 c_0} A_2 \quad (6)$$

Assim, substituindo as equações (5) e (6) na equação (4) temos a equação (7), onde L_E e L_R representam os níveis de pressão sonora das salas emissora e receptora. A terceira parcela representa a absorção sonora da sala receptora.

$$R = L_E - L_R + 10 \log \left(\frac{S}{A_2} \right) \quad (7)$$

Na equação (7) é pressuposto que toda a energia é transmitida pelo elemento de separação, hipótese que pode ser considerada em medições controladas em laboratório. Para medições *in situ* utilizando o método da pressão sonora, que é o caso deste estudo, é mais comum utilizar a diferença padronizada D_{nT} ou a diferença normalizada D_n . Nessas medições, o último termo da equação é substituído por parâmetros para referência entre testes: o tempo de reverberação (T_0) para D_{nT} (ver equação 8) e área (A_0) para D_n .

A transmissão das ondas sonoras entre ambientes ocorre devido à propagação dessas ondas no ar e na estrutura. As possíveis trajetórias das ondas sonoras entre dois ambientes são mostradas na Figura 3. Nessa figura também é ilustrado a estrutura geral da medição do isolamento obtido pela medição de nível de pressão sonora, com uma fonte sonora, e microfones nas sala emissora e receptora.

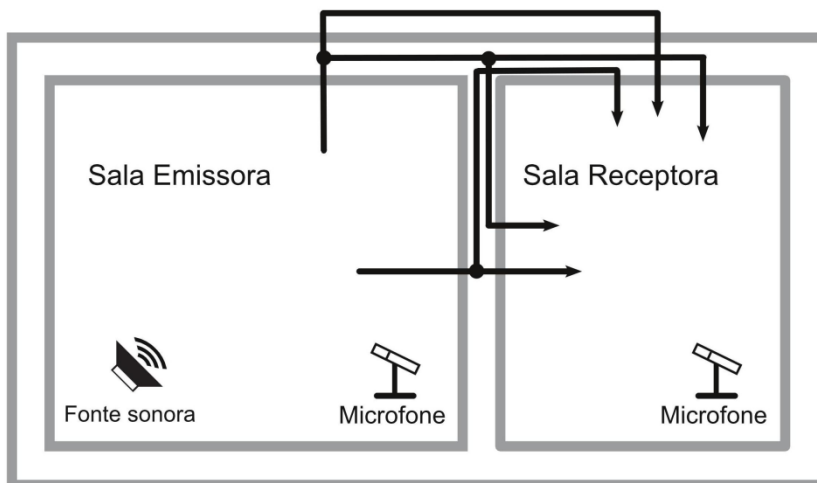


Figura 3. Caminhos da transmissão sonora e estrutura de medição do isolamento.

2.3 Medição do isolamento sonoro

Como discutido no item anterior a medição do isolamento sonoro será feito através da medição do nível de pressão sonora e não pelo método da intensidade sonora. Serão comparados o método tradicional, que é o método mais empregado na prática e o método alternativo da função de transferência, cujo desempenho se deseja estudar.

2.3.1 Método tradicional

O método tradicional consiste em medir níveis de pressão sonora em bandas de oitava em diversos pontos da sala emissora e da sala receptora. Em seguida o tempo de reverberação da sala receptora é medido e pode-se estimar a diferença padronizada de nível entre as salas, dada pela equação (8).

$$D_{nT} = L_E - L_R + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (8)$$

onde L_E e L_R representam, respectivamente os níveis de pressão sonora das salas emissora e receptora, T representa o tempo de reverberação da sala receptora e T_0 é o tempo de reverberação de referência, com valor de 0,5s.

O tempo de reverberação é definido como o tempo necessário para que o nível de pressão sonora no ambiente diminua em 60dB a partir do interrompimento do sinal de excitação.

2.3.2 Método da função de transferência

O método da função de transferência baseia-se na obtenção da resposta ao impulso em ambas as salas para a cálculo da diferença de nível. Isso é realizado abordando-se o problema como um sistema LIT, condição para a utilização do método. A diferença sonora de nível é calculada pela equação (9), descrita em Venegas, 2007 [12]. e na norma ISO 18233[6], onde \mathbf{H}_E e \mathbf{H}_R correspondem às funções de transferência da sala emissora e receptora.

$$D = L_E - L_R = 10 \log \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \overline{|\mathbf{H}_E(\omega)|^2} d\omega \right) - 10 \log \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \overline{|\mathbf{H}_R(\omega)|^2} d\omega \right), \quad (9)$$

Rearranjando os termos obtemos a equação (10):

$$D = L_E - L_R = 10 \log \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \overline{|\mathbf{H}_E(\omega)|^2} d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \overline{|\mathbf{H}_R(\omega)|^2} d\omega}, \quad (10)$$

onde as médias espaciais energéticas das funções de transferência são definidas por:

$$\overline{|\mathbf{H}_E(\omega)|^2} = \frac{1}{n_E} \sum_{i=1}^{n_E} |\mathbf{H}_E(\omega)_i|^2 \quad \text{e} \quad \overline{|\mathbf{H}_R(\omega)|^2} = \frac{1}{n_R} \sum_{i=1}^{n_R} |\mathbf{H}_R(\omega)_i|^2 \quad (11)$$

Na equação (11) n_E e n_R representam o número de medições na salas emissora e receptora.

Alternativamente, utilizando o teorema de Parseval, obtemos a equação (10) transformada para o domínio do tempo.

$$D = L_E - L_R = 10 \log \frac{\int_{t_1}^{t_2} \overline{h_E(t)^2} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \overline{h_R(t)^2} dt}, \quad (12)$$

onde h_E e h_R são as respostas ao impulso das salas descritas no domínio do tempo. Caso o procedimento de cálculos sejam realizados no domínio do tempo, é

recomendado pela norma ISO 18233 [6] o método de Schroeder de integração de trás para frente.

2.4 Determinação da incerteza de medição

Para que o resultado de um experimento seja expresso da maneira correta, a incerteza associada à medição deve ser demonstrada. A maneira mais comum é realizar experimentos com a mesma configuração diversas vezes e extrair através de conceitos estatísticos a incerteza de medição.

Uma maneira um pouco mais detalhada é realizar esse cálculo a partir de ensaios denominados *round-robin*, no qual diversos parâmetros do sistema de medição são variados e obtêm-se a incerteza da medição através de suficiente repetição de experimentos. Com isso tem-se como resultado uma influência global da variação de parâmetros na incerteza.

Os dois métodos descritos anteriormente servem apenas para determinar a incerteza no que diz respeito a erros aleatórios, mas não a erros sistemáticos. Quando se deseja que a influência de cada uma das variáveis seja analisada separadamente, para um estudo mais aprofundado do sistema, deve-se formular o problema em termos das diversas fontes de incerteza, que podem ser medidas ou estimadas. Através de técnicas estatísticas, as incertezas causadas pelos diversos parâmetros são relacionadas, de forma a obter e a incerteza combinada e expandida.

Na Figura 4 é ilustrado um sistema genérico de medição pelo método da função de transferência com alguns exemplos de fontes de incerteza associadas ao processo. Os parâmetros derivados da medição são expressos com sua incerteza combinada.

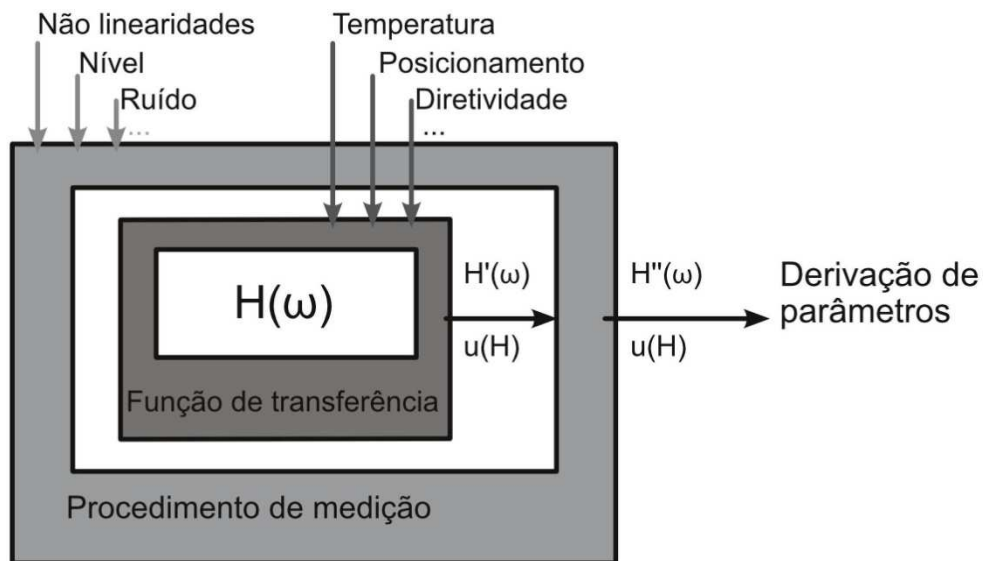


Figura 4. Fontes de incerteza de medição associadas ao sistema e derivação de parâmetros com incerteza incluída no resultado.

Fonte: Adaptado de Dietrich, 2013.

Para a determinação da incerteza de medição, conforme descrito em Dietrich, 2013 [2] e Michalski, 2011 [9], recorre-se aos passos recomendados pelo GUM (Guia para a expressão de incerteza de medição) [3]. Nesse documento, o sistema pode ser representado como mostrado na equação (13), em que o valor obtido da medição Y é relacionada às variáveis X_i por meio de uma função do modelo f_M .

$$Y = f_M(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (13)$$

De acordo com o descrito no GUM, as incertezas podem ser classificadas de acordo com seu tipo, podendo ser do tipo "A" ou do tipo "B". As incertezas do tipo "A" se referem às incertezas obtidas com métodos estatísticos, as incertezas do tipo "B" se referem às incertezas obtidas com outros métodos, estes podendo ser, catálogos de fabricantes ou quaisquer estimativas proposta por fontes confiáveis.

Os passos descritos para avaliar a incerteza serão, conforme descrito em Dietrich, 2013 [2]:

- Coletar informações sobre o mensurando Y e sobre as variáveis de entrada X_j ;
- Determinar uma função f_M adequada ao modelo;
- Classificar as variáveis de entrada de acordo com o tipo de

incerteza "A" ou "B" ;

- Cálculo dos resultados em termos de uma média y e da incerteza combinada $u(y)$;
- Obter o resultado completo da medição, em termo da incerteza expandida: $y \pm U$.

Existem diferentes procedimentos possíveis para propagar as incertezas combinadas a partir das incertezas padrão das variáveis de entrada. Entre as maneiras utilizadas está a teoria clássica com propagações de incertezas através da expansão de série de Taylor e simulações numéricas, utilizando o método de Monte Carlo.

Neste trabalho será utilizado o método clássico, que é o método mais simples, utilizado e aceito pelas normas. Para esse método, é seguido uma sequência de cálculos, descrita a seguir.

Primeiramente define-se a média de um conjunto de medições, x_i são os valores das medições e n é o número de medições:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (14)$$

Caso de grandezas sejam expressas em escala logarítmica, sua média, em decibéis, é dada pela equação (15).

$$\bar{x} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{x_i/10} \right) \quad (15)$$

O desvio padrão desse conjunto é dado pela equação (16)

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

Para avaliar a incerteza combinada, primeiramente é necessário verificar a correlação das variáveis de entrada, dada na equação (17) pelo coeficiente de correlação r . Nessa equação é avaliada a correlação entre as variáveis X e Y .

$$r(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (17)$$

Caso as variáveis não sejam correlacionadas, aplica-se a equação (18) para propagar as incertezas de x_i variáveis de entrada.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2} \quad (18)$$

Para casos em que a função do modelo são constituídos de operações simples, soma subtração, multiplicação e divisão a equação pode ser simplificada. Para o caso da função ser composta somente de termos somados ou subtraídos tem-se:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u(x_i)^2} \quad (19)$$

Caso a função do modelo envolva multiplicação ou divisão de termos tem-se:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2} \quad (20)$$

Para determinar as incertezas expandidas primeiramente deve-se calcular os graus de liberdade efetivos, dados pela equação (21).

$$v_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_{x_i}^4(y)}{v_i}} \quad (21)$$

sendo v_i os graus de liberdade do experimento, no caso dado por $n-1$ graus. Com o número de graus de liberdade efetivos pode-se obter a incerteza expandida

$$U(y) = k \cdot u(y) \quad (22)$$

O fator de abrangência k deve ser obtido para um nível de confiança desejado através da distribuição t de student. Para um nível de confiança de 95%, têm-se os valores do fator de abrangência de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Valores da distribuição t de student para nível de confiança de 95%.

v_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$k_{95\%}$	12,71	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26	2,23	2,20	2,18	2,16	2,15	2,13
v_i	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$k_{95\%}$	2,12	2,11	2,10	2,09	2,09	2,08	2,07	2,07	2,06	2,06	2,06	2,05	2,05	2,05	2,04

3 METODOLOGIA

Os experimentos conduzidos neste trabalho foram realizados *in situ*, utilizando-se o método tradicional e o método da função de transferência e seguindo as metodologias e recomendações obtidas da literatura e normas regulamentadoras para cada método. O local de realização dos testes foi o laboratório de vibrações e ruídos (LVR) do departamento de engenharia mecânica (DEMEC) da UFPR.

De modo a avaliar o desempenho dos dois métodos em medições em campo e obter informações para estimar a incerteza dos métodos, foram realizados experimentos em diferentes configurações: em ambiente sem interferências externas (condição padrão), na presença de ruído, com ventilador (para tentar induzir uma variação na condição da sala ao longo do tempo) e na configuração para teste de repetibilidade. Mais detalhes para cada caso são explicados na seção 3.3.

O próximo passo realizado foi o processamento dos dados adquiridos nos experimentos, obtendo os resultados relativos ao isolamento sonoro e sua incerteza associada. O procedimento adotado para cada método foi similar porém com determinadas peculiaridades, explicadas nas seções 3.1, 3.2.

3.1 Método tradicional

Para a medição utilizando o método tradicional, foram seguidas as recomendações feitas pela norma ISO 140-5 :

- A sala de maior volume deve ser a emissora;
- O nível de pressão sonora deve ser medido em pelo menos 5 pontos para cada sala;
- Devem ser feitas medições em bandas de 1/1 de oitava ou de 1/3 de oitava;
- A fonte deve ser posicionada em duas localizações diferentes;
- O nível de pressão sonora da fonte sonora deve ser pelo menos 6 dB mais alto que o ruído de fundo. Recomenda-se valores maiores ou iguais a 10 dB;
- A fonte sonora deverá gerar diferenças de nível de pressão

sonora entre duas bandas de 1/3 de oitava menor ou igual a 6dB;

- O posicionamento e distâncias mínimas do sistema de medição devem seguir tabelas descritas na norma.

Para determinar o tempo de reverberação foi adotado o procedimento descrito na norma ISO 354 [7], no qual é analisado o decaimento sonoro de um ruído interrompido em diversos pontos da sala. O ruído utilizado para o teste foi um ruído rosa, devido ao seu maior valor energético em frequências baixas.

O material utilizado para a realização do teste foi:

- Amplificador de potência 01dB ampli 12;
- Fonte sonora omnidirecional dodecaédrica 01dB;
- Aparelho medidor de nível de pressão sonora 01dB solo, com filtros de 1/3 de oitava e com ferramentas para medir o tempo de reverberação implementadas;
- Fonte sonora de referência, para regulagem do medidor .

Nas figuras 5 e 6 são mostrados os instrumentos utilizados para o método tradicional.



Figura 5. Amplificador de potência 01dB ampli 12 e fonte sonora omnidirecional dodecaédrica 01dB.



Figura 6. Medidor 01dB solo e fonte sonora de referência.

Os resultados salvos no medidor de nível de pressão sonora 01dB solo foram transferidos para o computador como arquivo de texto. Em seguida rotinas desenvolvidas no Matlab foram utilizadas para os próximos procedimentos. Os arquivos foram lidos, foi feita uma média das várias medições e então a diferença de nível sonoro e tempo de reverberação, assim como as incertezas de medição puderam ser calculados. Na figura 7 é ilustrado um fluxograma mostrando a sequência de operações para o método tradicional.

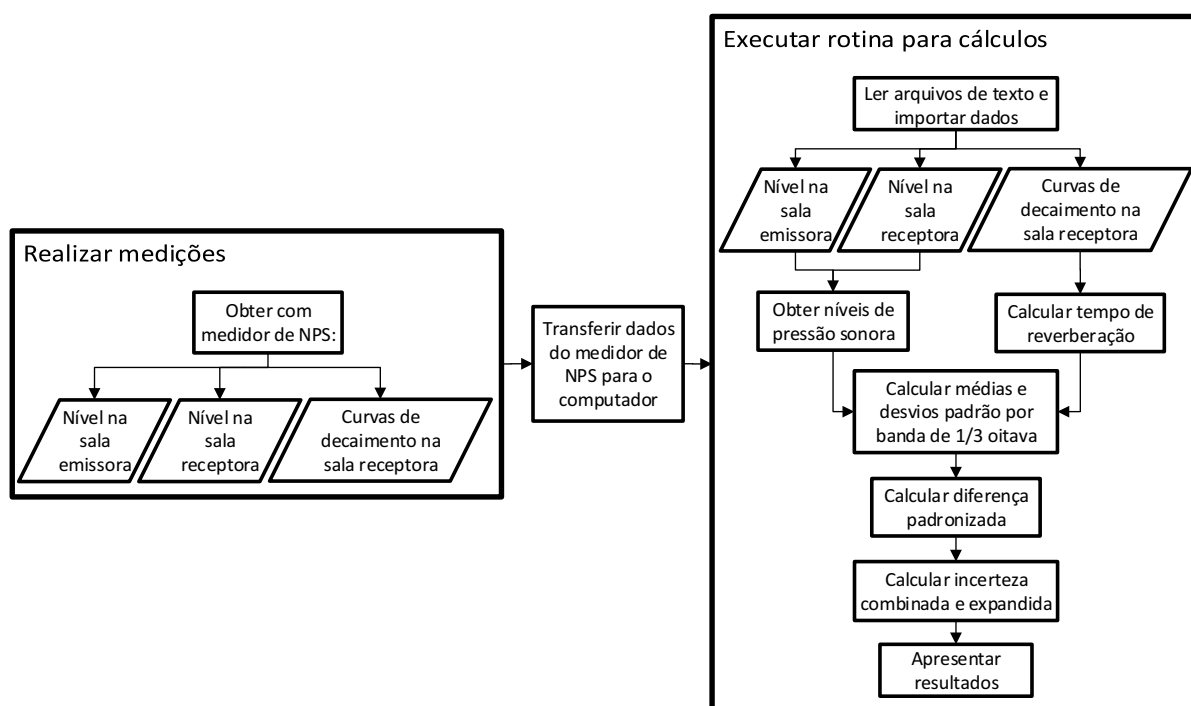


Figura 7. Sequência de procedimentos e operações para a medição do isolamento sonoro utilizando o método tradicional.

3.2 Método da função de transferência

O método da função de transferência foi realizado utilizando recomendações obtidas pela literatura e pela norma ISO 18233 [6], que aborda medições utilizando métodos alternativos, entre eles medições acústicas utilizando o método da função de transferência.

Para obtenção da função de transferência foi utilizado o sinal de excitação com varredura de senos, método mais recomendado para medições acústicas, conforme aponta Müller e Massarani, 2001 [10]. Esse método consiste em gerar um sinal

constituído de uma função harmônica com frequência variante, de modo que todas as frequências do sistema sejam suficientemente excitadas.

Um esquema do sistema de medição é mostrado na Figura 8. Neste método é utilizada a transformada rápida de Fourier e sua inversa (FFT e IFFT) para converter a resposta entre os domínios do tempo e da frequência. Outra técnica utilizada é a janela, que tem a função eliminar do resultado as distorções harmônicas geradas pelos alto falantes. Essas distorções, por consequência do método, são facilmente identificadas, pois se concentram em um intervalo de tempo no final da resposta ao impulso.

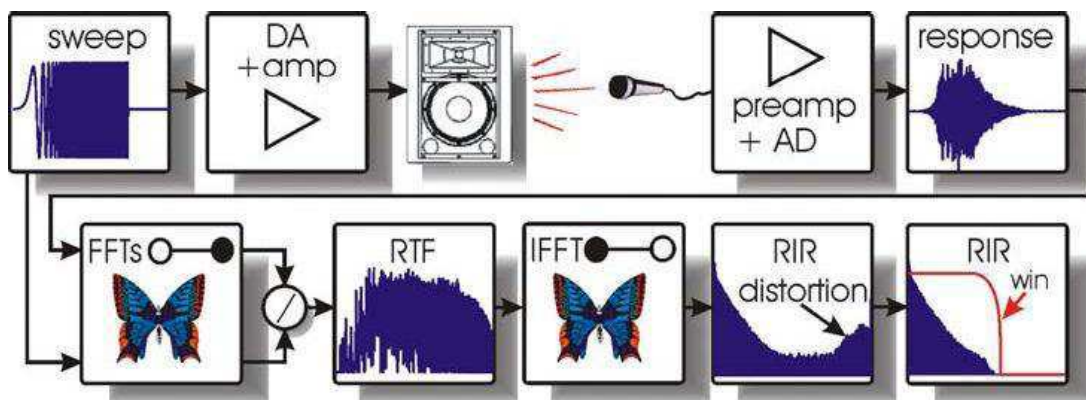


Figura 8. Sistema de medição da resposta ao impulso utilizando varredura de senos.

Fonte: Müller, Massarani, 2001.

Com relação à medição do tempo de reverberação da sala receptora, o parâmetro será obtido através da resposta ao impulso do sistema. A maior vantagem do método em relação ao método do ruído interrompido para a determinação do tempo de reverberação é a maior faixa dinâmica obtida.

Além das considerações específicas ao método apontadas, também foram empregadas as recomendações descritas para o método tradicional.

O material utilizado para a realização do teste foi:

- Amplificador de potência 01dB ampli 12;
- Fonte sonora omnidirecional dodecaédrica 01dB;
- Microfone de medição acústica 01dB mce 212 e pré-amplificador G.R.A.S. Type 26ca ;

- Amplificador e condicionador de sinais 01dB opus;
- Placa conversora de sinais analógico-digital e digital-analógico Roland Quad-Capture;
- Computador com Matlab e o ITA-Toolbox instalados, para geração, aquisição e processamento de sinais.

Os instrumentos utilizados para o método da função de transferência são mostrados nas figuras 9 a 12.



Figura 9. Microfone 01dB mce 212 e pré-amplificador G.R.A.S. Type 26ca.



Figura 10. Placa conversora de sinais AD/DA Roland Quad-Capture.



Figura 11. Amplificador e condicionador de sinais 01dB opus.

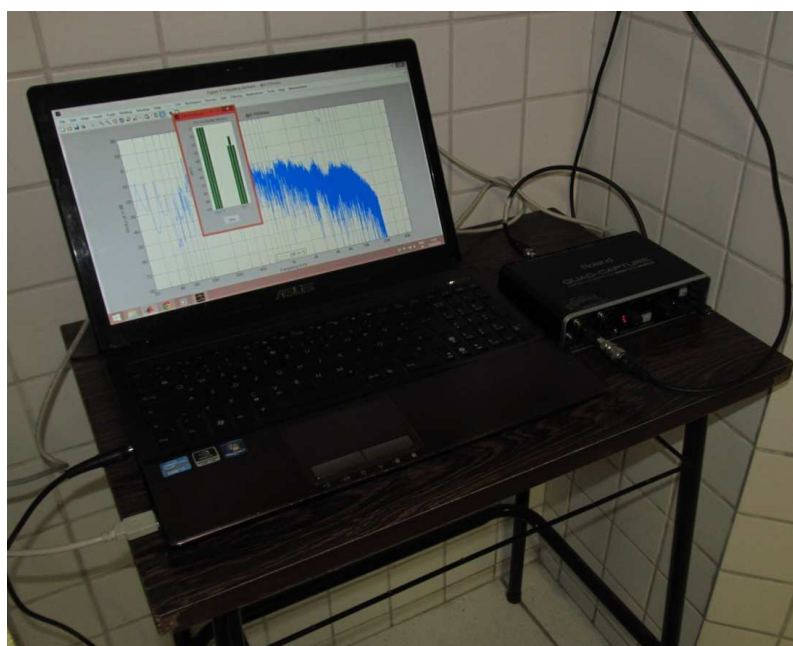


Figura 12. Controle da execução dos experimentos por computador com Matlab e ITA-Toolbox instalados.

Para realizar os experimento com o método da função de transferência utilizou-se o ITA-Toolbox, pacote de programa desenvolvido no Matlab pelo instituto de acústica (Institut für Technische Akustik - ITA) da universidade RWTH-Aachen. Com esse programa controla-se o sinal de excitação enviado à fonte sonora e capta-se o sinal do microfone. A partir desses sinais o programa calcula a função de transferência de cada medição e o resultado é salvo em um arquivo do programa.

Ainda com o ITA-Toolbox são realizadas janelas nas funções de transferência obtidas, de forma a excluir distorções e não-linearidades da medição O resultado dessa operação é filtrado em bandas de 1/3 oitava. Em seguida rotinas

desenvolvidas no Matlab calculam a energia de cada uma das medições em cada banda de frequência. Então é calculada uma média das energias de cada sala analisada e a diferença de nível sonoro pode ser calculada. O tempo de reverberação é calculado com uma aplicação do ITA-Toolbox e seus resultados são incluídos na diferença de nível padronizada. Posteriormente é calculada a incerteza da medição associada às medições. A sequência de procedimentos para o método da função de transferência é mostrado na Figura 12.

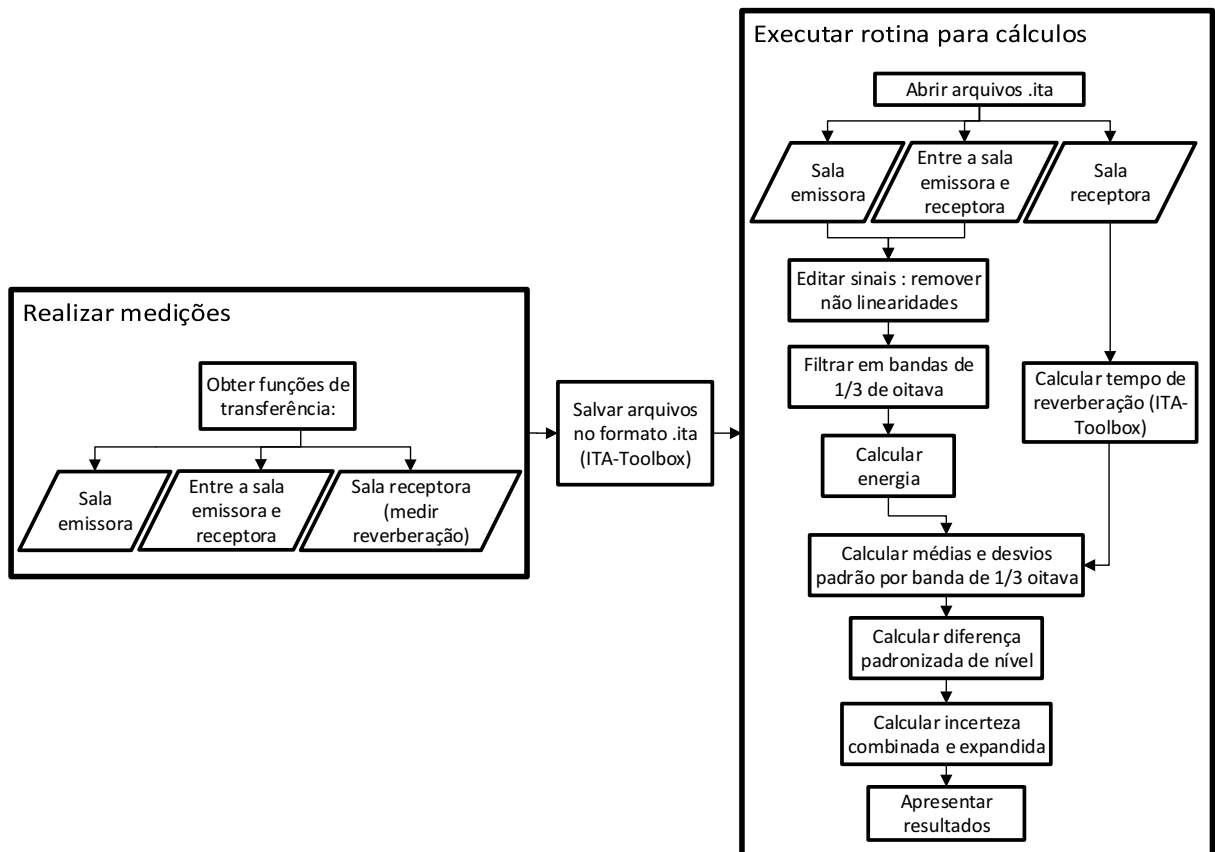


Figura 12. Sequência de procedimentos e operações para a medição do isolamento sonoro utilizando o método da função de transferência.

3.3 Configuração dos experimentos

Conforme citado anteriormente, o teste foi realizado no laboratório de vibrações e ruído da UFPR. O laboratório, localizado no subsolo, tem características de uma câmara reverberante e possui estrutura básica para ensaios acústicos. As salas, tiveram sua temperatura e umidade monitoradas, e devido a elas serem localizadas no subsolo, essas propriedades apresentaram poucas variações.

A sala emissora é bem isolada do ambiente externo, possuindo janelas de dupla lâmina de vidro e porta isolante. Já a sala receptora, que possui uma porta comum dividindo os ambientes, sofre mais influência de ruídos externos. Além disso, um poço de armazenamento e bombeamento de água localizado sob a sala gera um ruído intermitente de gotas de água. Essas considerações feitas são importantes na análise dos resultados.

Um desenho da localização dos experimentos nas salas é mostrado na Figura 13.

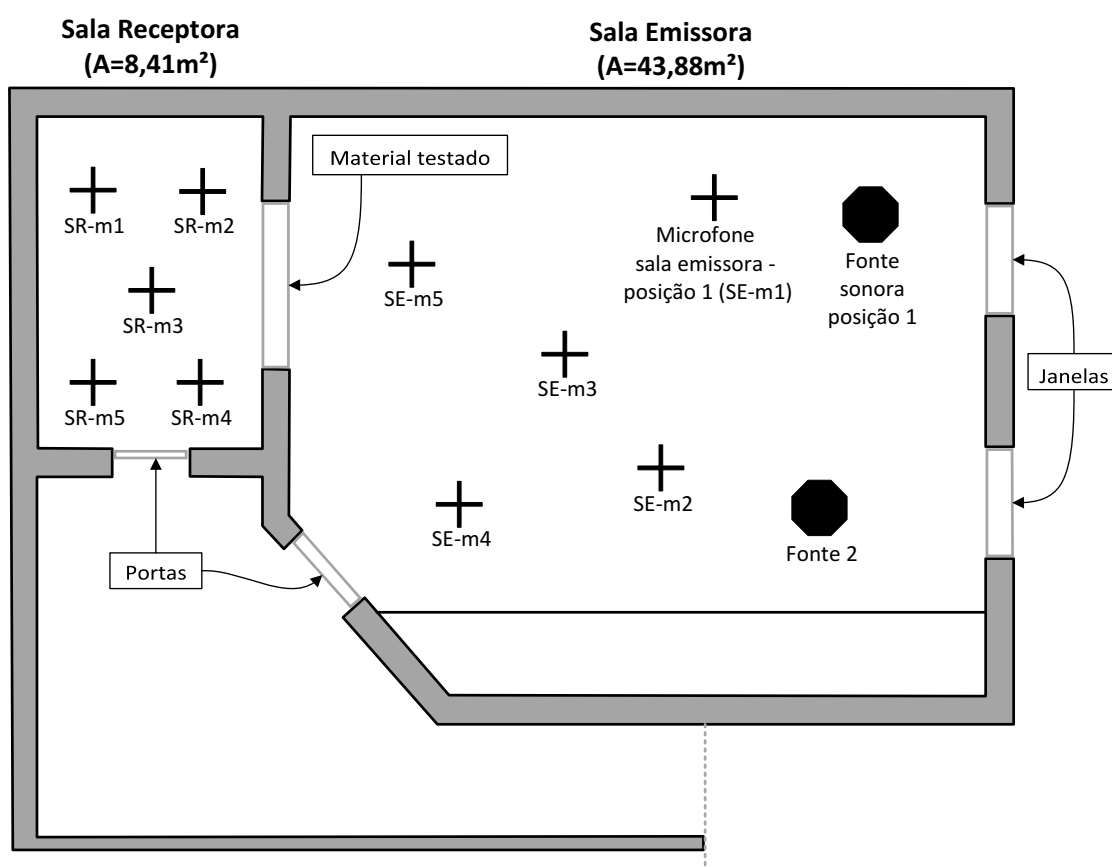


Figura 13. Local de realização dos experimentos e posicionamentos de microfone e fonte sonora.

Para determinar a diferença de nível, os experimentos foram realizados em 5 posições do microfone em cada sala e em duas posições da fonte sonora na sala emissora. Isso é válido para todas as medições, exceto para o teste de repetibilidade, no qual foram repetidas 10 medições nos pontos SE-m3 e SR-m3 segundo a denominação utilizada na Figura 13. Para a medição da reverberação na sala receptora, a fonte sonora foi posicionada nos pontos SR-m1 e SR-m4.

Os testes foram realizados em diferentes condições para cada um dos métodos, de modo a identificar diferenças nos resultados entre os dois métodos e entre as diferentes condições.

Nas figuras 14 a 16 são mostrados os equipamentos montados nas salas emissora e receptora, para realização das medições. Nessas figuras os instrumentos estão montados para utilização do método de função de transferência.



Figura 14. Equipamentos montados para medições das funções de transferência entre pontos da sala emissora.



Figura 15. Equipamentos montados na sala receptora para medições das funções de transferência entre a sala emissora e receptora.



Figura 16. Equipamentos montados para medições das funções de transferência em pontos da sala receptora para medição do tempo de reverberação.

3.3.1 Condição padrão

Nessa condição nenhuma perturbação foi causada no sistema, como em uma medição seguindo as recomendações das normas regulamentadoras. Dessa forma essa condição é utilizada como referência na comparação com os outros experimentos.

As incertezas relacionadas ao experimento são consequência do método empregado e das perturbações que ocorrem no ambiente, entre eles ruídos externos aleatórios e ao ruído intermitente na sala receptora.

3.3.2 Condição com ruído de fundo

Para essa condição um gerador de ruído rosa, obtido a partir de um aplicativo gerador de sinais para celular android foi acoplado a uma fonte sonora, um amplificador de guitarra Marshall. A fonte foi posicionada em um ponto da sala receptora, onde o ruído influencia com maior intensidade o resultado dos teste. A diferença de nível média entre o ruído gerado e o nível de pressão sonora

transmitido pela sala emissora foi de 4dB, criando uma condição desfavorável para os dois métodos e violando as condições recomendadas pela norma no método tradicional.

3.3.3 Condição com ventilação (sistema não LIT)

Nesses experimentos um ventilador foi posicionado na sala emissora, violando, através do movimento de ar na sala, a condição de sistema linear invariante no tempo (sistema LIT), necessária à aplicação do método da função de transferência. Adicionalmente, o ventilador também gera ruído e seu efeito é combinado ao efeito do movimento do ar na sala.

3.3.4 Teste de repetibilidade

Para avaliar os métodos sob a condição de repetibilidade, foi realizado este teste. Foram realizadas 10 medições para um ponto fixo na sala emissora e na sala receptora. O teste foi realizado com a condição padrão, ou seja, nenhum distúrbio foi causado ao sistema durante as medições.

3.4 Incerteza de medição

Um dos objetivos do trabalho é apresentar uma metodologia para cálculo da incerteza de medição, composta por diversas fontes distintas identificadas. Neste estudo inicial o problema foi simplificado e a incerteza foi composta pela contribuição de três fontes (variáveis de entrada) : incerteza na sala emissora, na sala receptora e incerteza relativa à medição da reverberação na sala receptora. Efeitos como temperatura, umidade, ruídos externos aleatórios, diretividade da fonte sonora e do microfone tiveram seus efeitos englobados nas incertezas dessas três fontes.

A incerteza de medição foi calculada a partir de dois tipos de conjunto de medições distintos. Para os testes na condição padrão, de ruído e com o ventilador, a incerteza foi obtida a partir da comparação das medições realizadas com o microfone e fonte sonora em diferentes pontos da sala. Para o teste de repetibilidade a incerteza foi obtida pela comparação das medições realizadas no mesmo ponto da sala.

Os testes realizados em diferentes condições foram utilizados para obter o comportamento dos métodos sob a influência de distúrbios causados ao sistema. Assim, não é obtido um valor que quantifique a incerteza produzida por determinado distúrbio, porém a partir dos experimento realizados em diferentes condições, pode-

se obter pistas sobre como determinados parâmetros afetam o sistema, dados importantes para a análise do sistema em questão e para estudos posteriores.

A metodologia para cálculo das incertezas combinadas seguiu a teoria apresentada no capítulo 2. A incerteza combinada foi propagada empregando-se a equação (23), para função do modelo composta por soma dos três termos de incerteza, sendo essas variáveis de entrada não correlacionadas:

$$u_c = \sqrt{\left(\sigma_{SE}^2 + \sigma_{SR}^2 + \frac{10}{T \cdot \ln(10)} \sigma_{Rev}^2 \right)}, \quad (23)$$

onde σ_{SE} é a incerteza padrão da sala emissor, σ_{SR} é a incerteza da sala receptora, σ_{Rev} é a incerteza relativa à medição do tempo de reverberação e T é o tempo de reverberação.

4 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos. Primeiramente são apresentados os resultados relativos à diferença de nível e à incerteza associada à medição. São feitas comparações entre os métodos tradicional e da função de transferência e também entre as condições de medição. Em seguida são apresentados algumas questões e particularidades referentes ao processamento dos dados para o método da função de transferência. Apesar de não serem previstas na proposta do projeto, a análise dessas questões se mostrou importante durante a execução dos experimentos, já que os resultados finais são consideravelmente afetados por elas.

4.1 Comparação entre os métodos

Neste item são comparados os valores obtidos para a diferença padronizada de nível de pressão sonora e incerteza combinada entre os dois métodos analisados e para cada condição estabelecida para os ensaios.

Os resultados são apresentados em bandas de 1/3 de oitava a partir de 63Hz, já que para frequências mais baixas ambos os métodos apresentaram valores altamente dispersos e diferentes do valor real, principalmente devido à baixa relação sinal-ruído na medição do tempo de reverberação na sala receptora. Essa escolha também é justificada pela presença do ruído de fundo intermitente na sala receptora, que tem maior influência na faixa de frequência de 40 a 60Hz, aproximadamente.

A incerteza associada à medição, para as condições padrão, com ruído de fundo e ventilação, é calculada com base na variação entre os resultados nos diferentes pontos de medição nas salas emissora e receptora. Para a condição de repetibilidade, foi utilizado um único par de pontos e a medição foi repetida diversas vezes.

4.1.1 Condição padrão

Na figura 17 e tabela 2 são apresentados os resultados para a condição padrão, na qual nenhum distúrbio proposital é causado ao sistema. Os resultados dessas medições servem como referência na comparação com os obtidos nos outros testes.

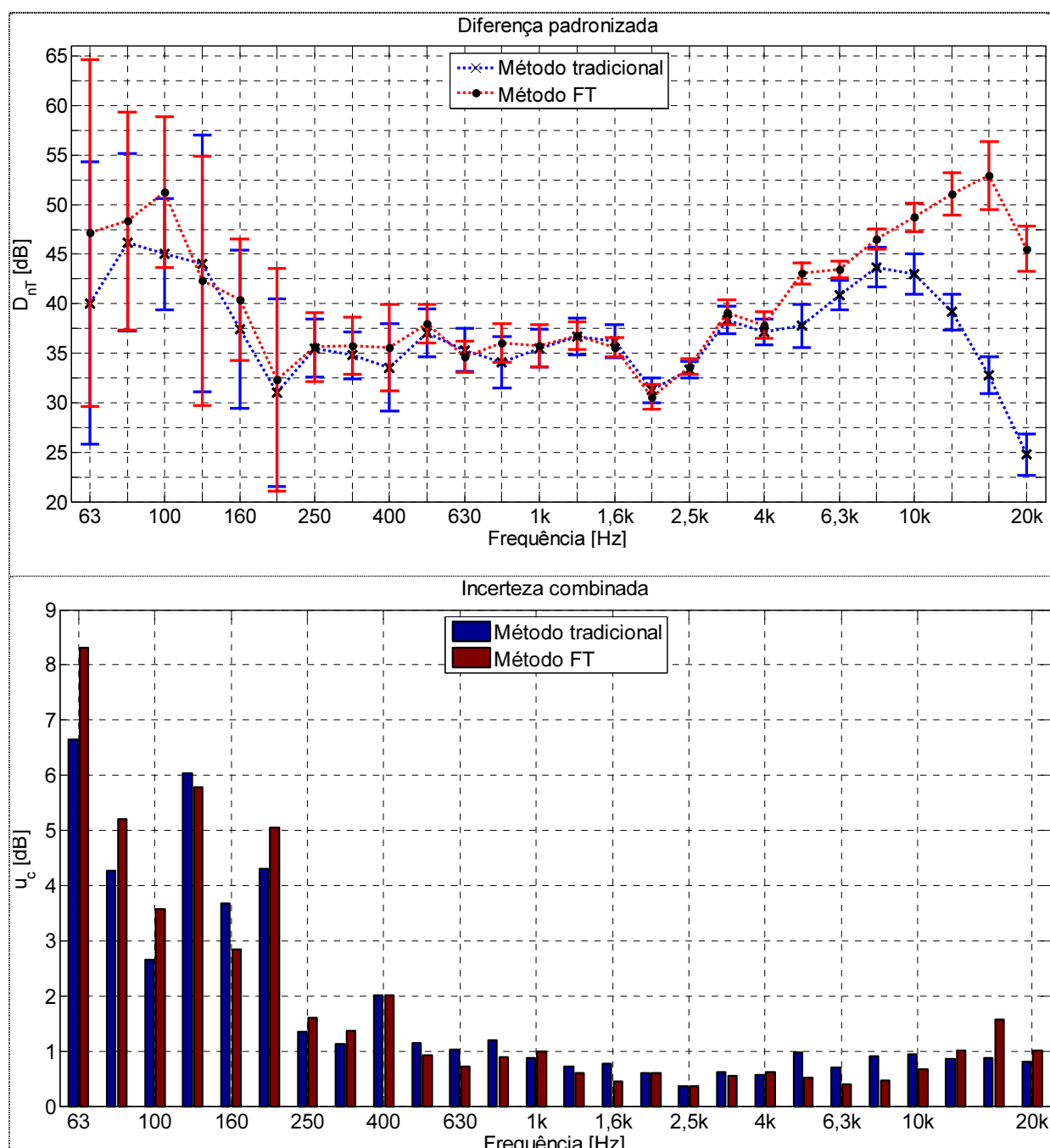


Figura 17. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição padrão.

Pode-se perceber que o método tradicional e da função de transferência apresentam resultados semelhantes para a maior parte da faixa de frequências analisada. Os resultados diferem mais em frequências baixas e principalmente em frequências altas. Uma das possíveis causas para essa diferença em altas frequências, que também é observada nos testes nas outras condições, é a diferença da sensibilidade dos microfones, que não são os mesmos para os dois métodos.

Em relação à incerteza combinada, observa-se também resultados parecidos entre os métodos, de forma que não é possível apontar o método mais vantajoso a partir dessa comparação. Como o esperado, também são observados valores mais altos de incerteza para frequências baixas.

Tabela 2. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição padrão.

Frequência(Hz)		63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k
Trad.	D _{nT}	40,05	46,19	45,04	44,06	37,42	31,03	35,48	34,80	33,56	37,06	35,32	34,10	35,52
	u _C	6,64	4,28	2,65	6,04	3,67	4,31	1,34	1,12	2,01	1,15	1,04	1,20	0,87
F.T.	D _{nT}	47,14	48,37	51,31	42,32	40,38	32,30	35,62	35,75	35,53	37,97	34,62	36,01	35,75
	u _C	8,32	5,21	3,57	5,78	2,84	5,05	1,61	1,37	2,01	0,92	0,72	0,90	1,00
Frequência(Hz)		1,25k	1,6k	2k	2,5	3,15	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	20k
Trad.	D _{nT}	36,65	36,20	31,25	33,31	38,35	37,15	37,78	40,84	43,69	43,00	39,15	32,77	24,74
	u _C	0,73	0,77	0,60	0,36	0,63	0,57	0,98	0,71	0,91	0,95	0,86	0,87	0,80
F.T.	D _{nT}	36,80	35,61	30,59	33,65	39,13	37,83	43,05	43,45	46,52	48,73	51,06	52,91	45,54
	u _C	0,60	0,44	0,61	0,37	0,55	0,62	0,52	0,40	0,47	0,67	1,00	1,58	1,01

Na figura 18 é apresentada a composição da diferença padronizada, através dela é possível analisar a parcela relativa à absorção sonora, com correção do tempo de reverberação para o tempo de referência de 0,5s . Mostra-se que essa parcela de correção é de mesma ordem de grandeza para os dois métodos, com valores decrescentes com o aumento da frequência.

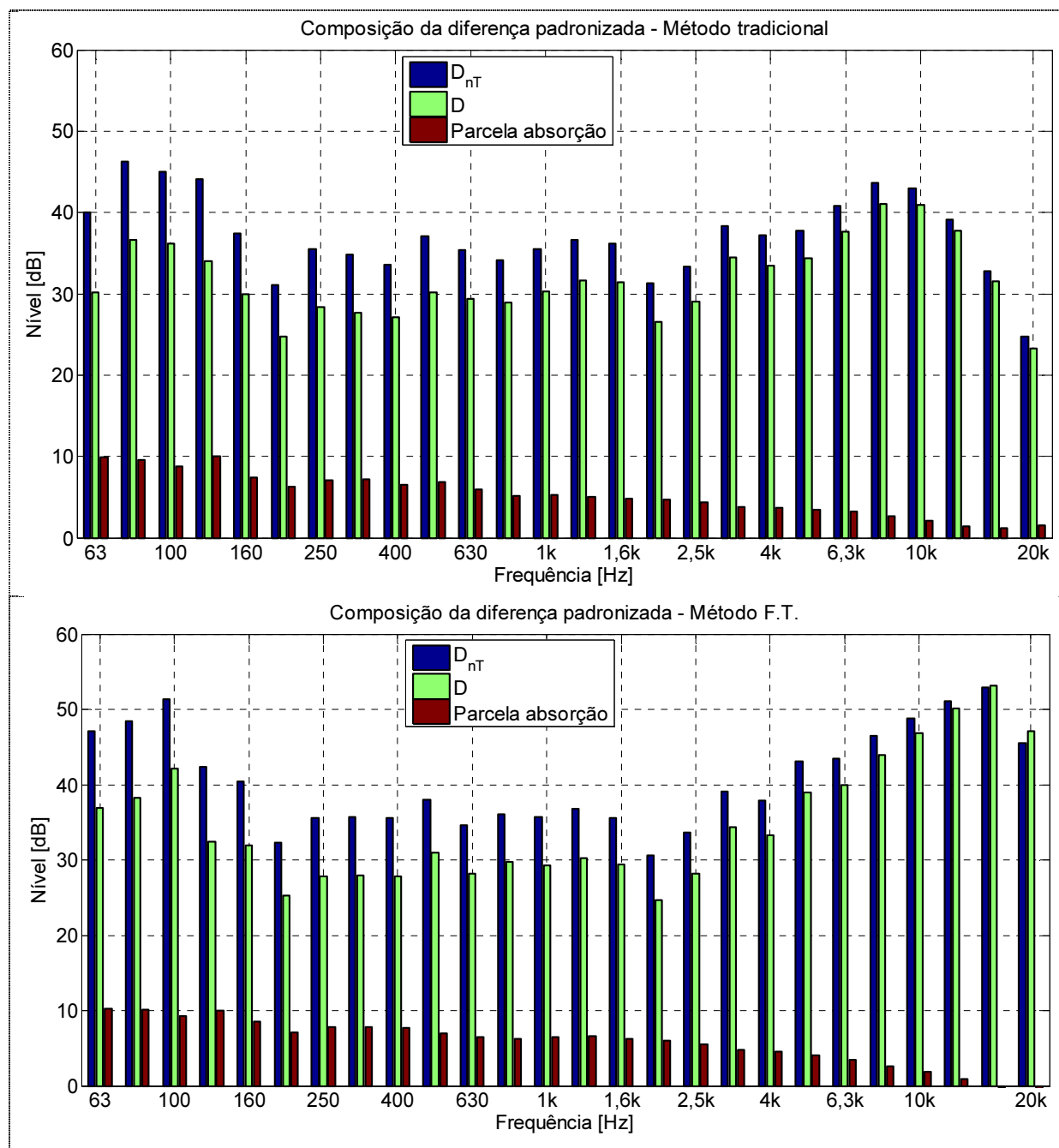


Figura 18. Composição da diferença padronizada para os métodos na condição padrão.

A composição das incertezas padrão é apresentada na figura 19. Para este trabalho essas parcelas são compostas pela incerteza da sala emissora, sala receptora e do tempo de reverberação, para a parcela relativa à absorção sonora.

Pode-se observar que os dois métodos possuem composição semelhante, com as maiores parcelas de incerteza da sala emissora para frequências de até aproximadamente 200Hz e parcelas da sala receptora com maiores valores para

frequências de até aproximadamente 400Hz e valores de máximo nas bandas de 125hz e 200Hz.

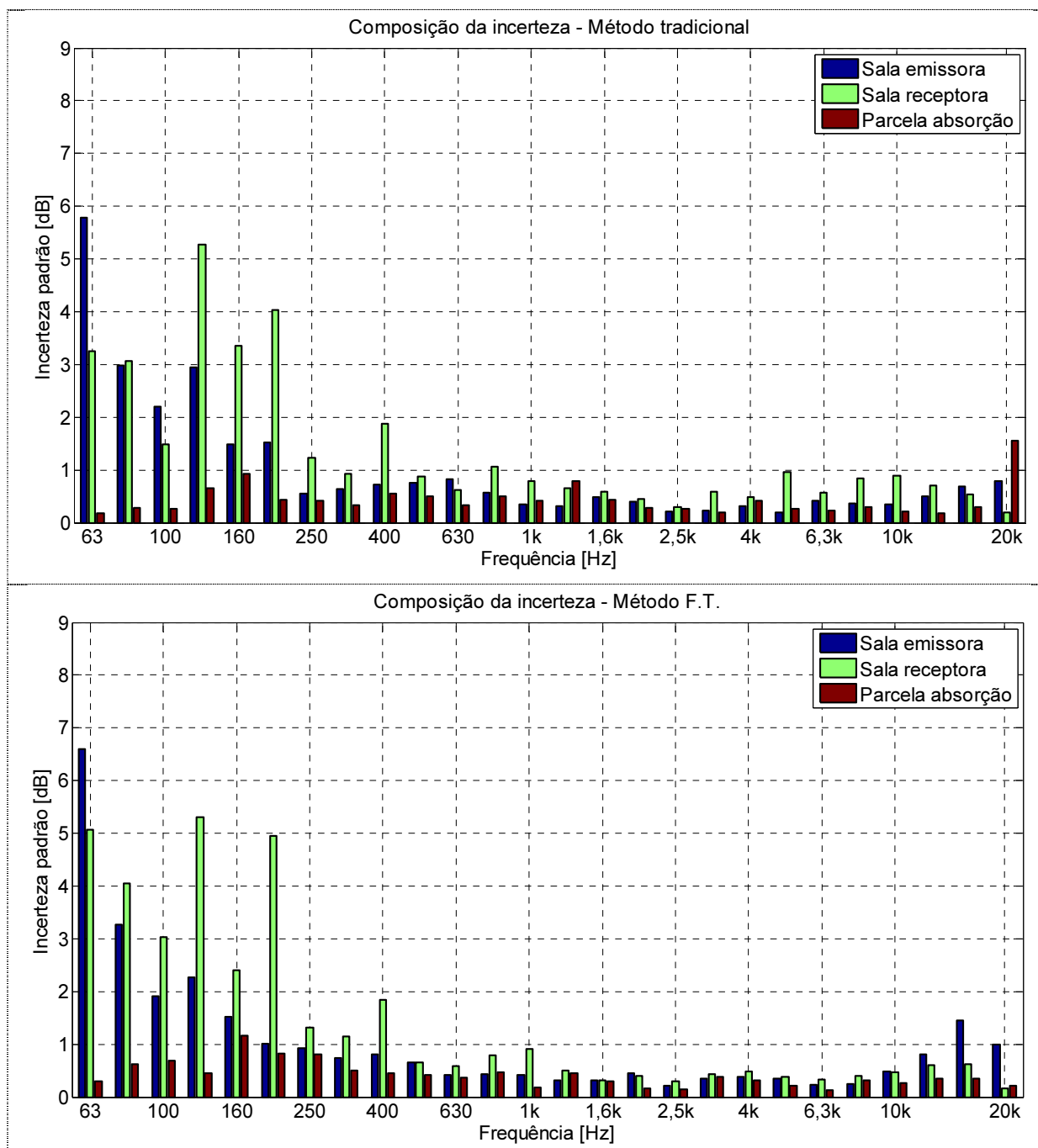


Figura 19. Composição de incertezas para os métodos na condição padrão.

4.1.2 Condição com ruído de fundo

Os resultados, apresentados na figura 20 e tabela 3, mostram que a condição de ruído não apresenta grande influência nos resultados finais para ambos os métodos, mesmo com uma diferença média de apenas 4dB entre o nível de pressão sonora na sala receptora e o ruído gerado pela fonte sonora. Como no teste anterior,

os resultados dos testes entre os dois métodos tem maior diferença em frequências altas.

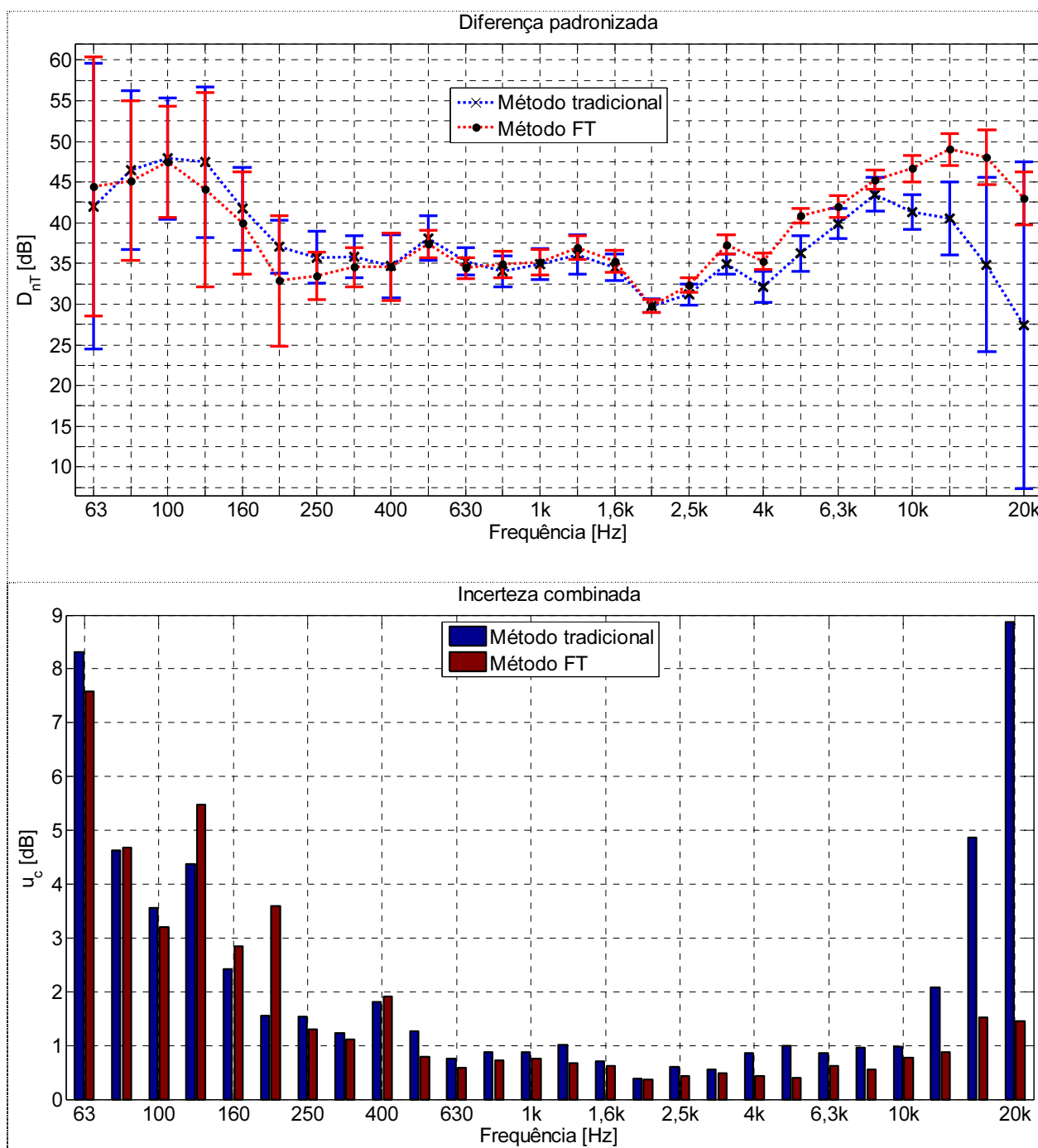


Figura 20. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição de ruído de fundo.

Para a incerteza combinada, os resultados também são semelhantes, com exceção em algumas bandas de frequência. O método tradicional apresentou incertezas muito maiores para frequências acima de 10kHz e o método da função de

transferência apresentou incerteza notavelmente maiores para as bandas de 125 e 200Hz.

Tabela 3. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição com ruído de fundo.

Frequência(Hz)		63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k
Trad.	D_{nT}	42,03	46,49	47,89	47,43	41,72	37,01	35,76	35,82	34,65	38,10	35,26	34,01	34,93
	u_C	8,32	4,63	3,55	4,37	2,41	1,55	1,54	1,22	1,81	1,26	0,76	0,88	0,88
F.T.	D_{nT}	44,44	45,17	47,47	44,09	39,93	32,85	33,45	34,57	34,58	37,40	34,44	34,87	35,11
	u_C	7,58	4,68	3,21	5,48	2,85	3,58	1,29	1,12	1,90	0,79	0,59	0,72	0,75
Frequência(Hz)		1,25k	1,6k	2k	2,5	3,15	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	20k
Trad.	D_{nT}	36,08	34,52	29,81	31,19	34,91	32,09	36,24	39,90	43,50	41,34	40,56	34,83	27,43
	u_C	1,01	0,71	0,38	0,60	0,55	0,86	1,00	0,86	0,96	0,98	2,07	4,87	8,87
F.T.	D_{nT}	36,91	35,23	29,75	32,37	37,31	35,24	40,86	41,97	45,25	46,69	49,01	48,00	43,01
	u_C	0,66	0,62	0,36	0,44	0,48	0,44	0,40	0,62	0,55	0,77	0,87	1,51	1,45

4.1.3 Condição com ventilação (sistema não LIT)

Na figura 21 e tabela 4 são apresentados os resultados para o sistema perturbado por um ventilador sala emissora, gerando um sistema que é variante no tempo e violando umas das condições necessárias ao método da função de transferência.

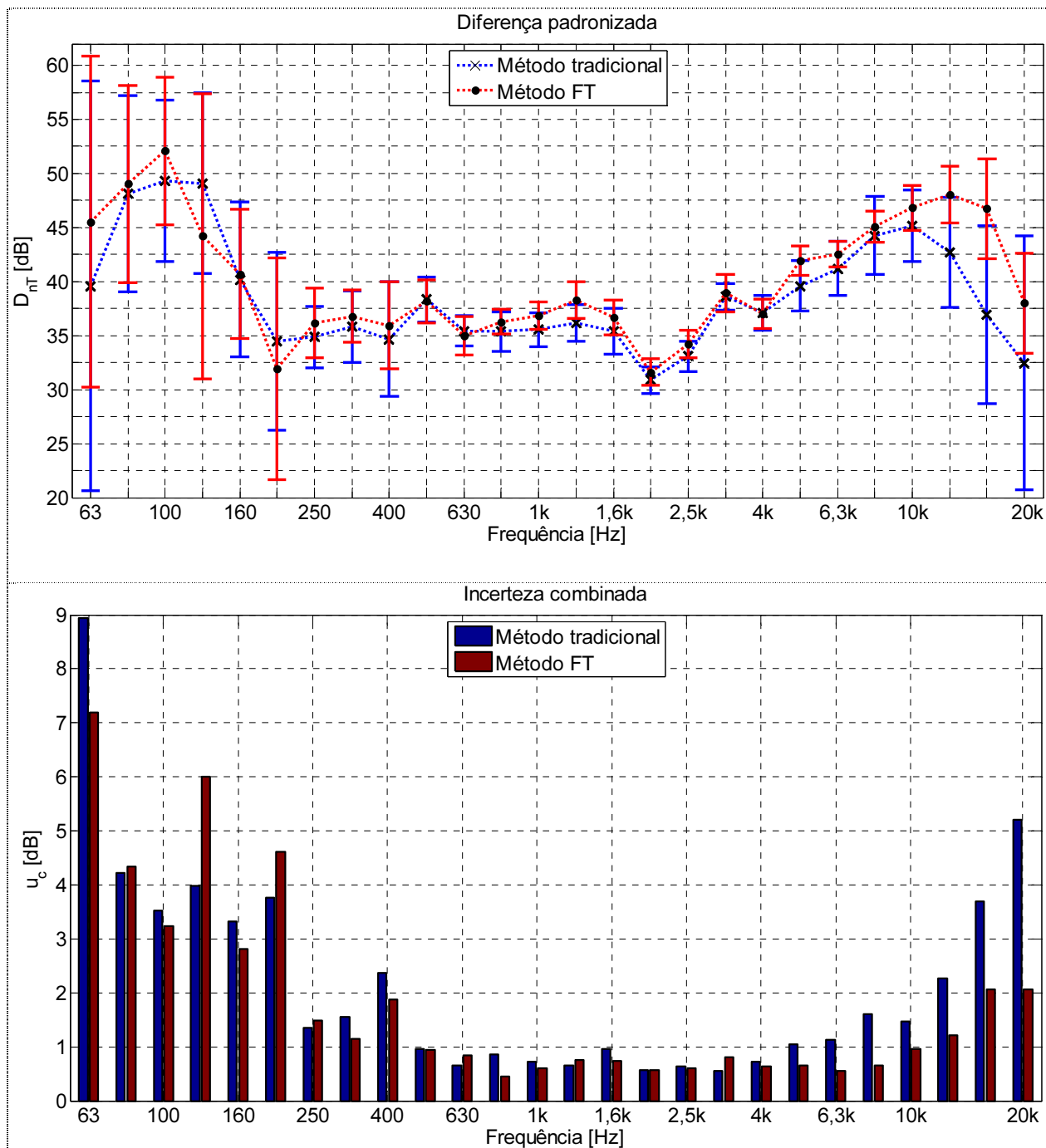


Figura 21. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição com ventilação (sistema variante no tempo).

Em relação à diferença padronizada as mesmas considerações feitas nos teste anteriores são válidas. Analisando a incerteza combinada, observam-se resultados parecidos aos obtidos na condição de ruído de fundo. Novamente o método tradicional apresenta maior incerteza para frequências altas e o método da função de transferência apresenta incertezas visivelmente maiores nas bandas de 125 e 200Hz.

Tabela 4. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição com ventilação.

Frequência(Hz)		63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k
Trad.	D_{nT}	39,59	48,10	49,31	49,07	40,17	34,46	34,87	35,82	34,67	38,33	35,44	35,36	35,56
	u_C	8,94	4,22	3,53	3,98	3,32	3,77	1,35	1,55	2,36	0,96	0,65	0,86	0,72
F.T.	D_{nT}	45,52	49,02	52,08	44,19	40,69	31,93	36,18	36,78	35,93	38,19	35,01	36,27	36,84
	u_C	7,19	4,34	3,24	6,01	2,81	4,62	1,49	1,15	1,87	0,94	0,84	0,45	0,60
Frequência(Hz)		1,25k	1,6k	2k	2,5	3,15	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	20k
Trad.	D_{nT}	36,15	35,40	30,87	33,08	38,59	37,07	39,59	41,19	44,25	45,17	42,70	36,93	32,46
	u_C	0,66	0,96	0,56	0,64	0,56	0,72	1,04	1,13	1,61	1,48	2,27	3,70	5,21
F.T.	D_{nT}	38,27	36,67	31,61	34,21	38,93	37,00	41,95	42,50	45,06	46,82	48,07	46,74	37,99
	u_C	0,76	0,74	0,57	0,60	0,80	0,63	0,66	0,56	0,66	0,96	1,22	2,07	2,07

4.1.4 Teste de repetibilidade

Neste teste, a diferença padronizada de nível foi calculada em um mesmo ponto da sala 10 vezes para cada método, mostrando o comportamento de cada método sob condições de repetibilidade. Os resultados são mostrados na figura 22 e na tabela 5.

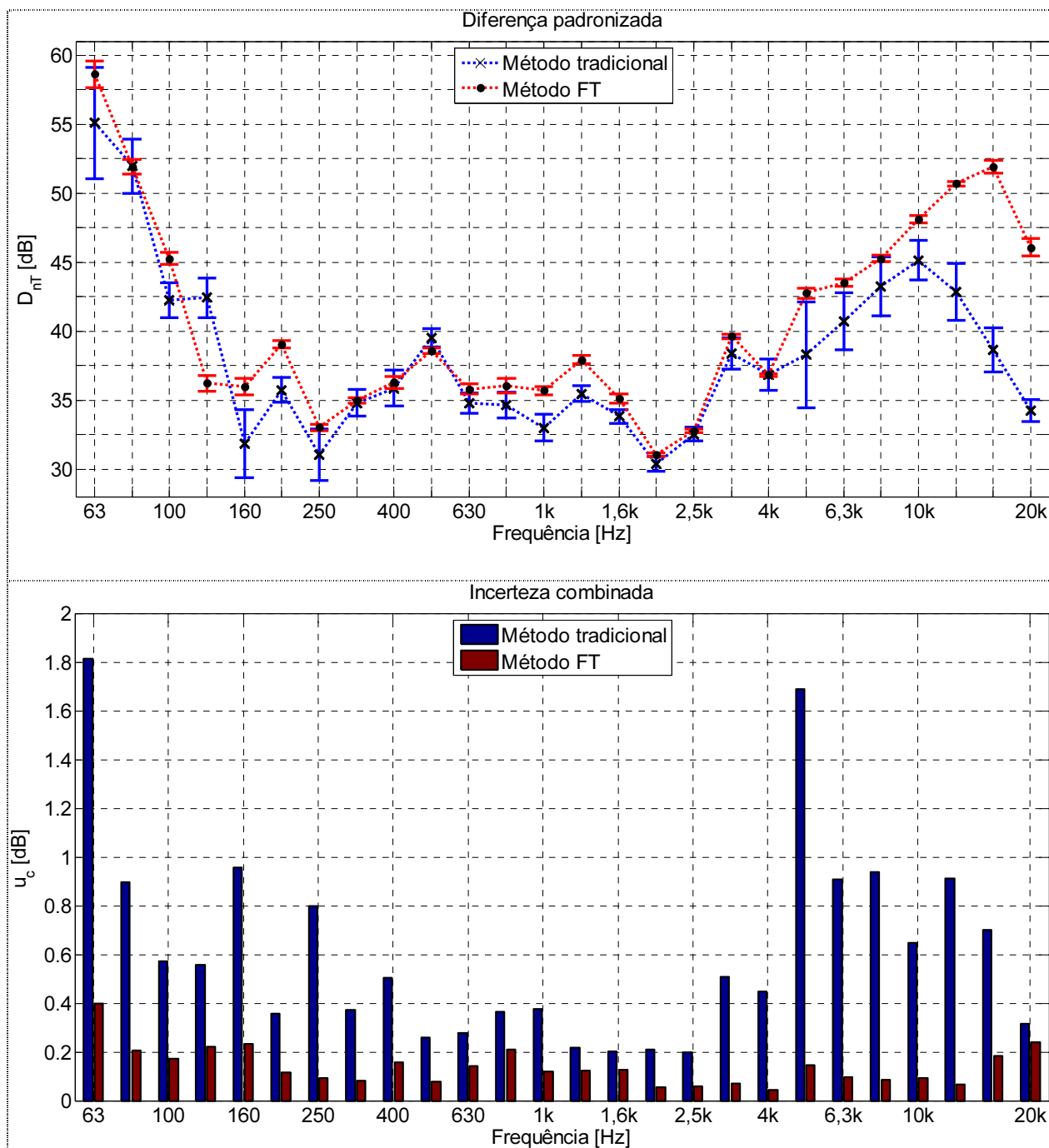


Figura 22. Diferença padronizada e incerteza combinada para o teste sob condição de repetibilidade .

Como nas comparações anteriores, os resultados para a diferença padronizada são semelhantes entre os métodos, com exceção nas frequências mais altas. Porém, em relação à incerteza combinada, observou-se valores mais baixos para o método da função de transferência, que obteve valores menores em todas as frequências. Isso pode indicar uma vantagem do método, que não pôde ser determinada nos testes anteriores. Isso se deve ao tipo de experimento utilizado

nesses testes, que engloba em seus resultados; além da incerteza dos métodos, a própria diferença de resultados causada pela localização dos experimentos nas salas.

Tabela 5. Diferença padronizada e incerteza combinada para a condição de repetibilidade.

Frequência(Hz)		63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k
Trad.	D_{nT}	55.09	51.93	42.24	42.42	31.82	35.73	31.04	34.79	35.86	39.50	34.76	34.65	33.00
	u_C	1.82	0.94	0.63	0.85	1.34	0.57	0.90	0.49	0.75	0.56	0.42	0.61	0.56
F.T.	D_{nT}	58.60	51.91	45.25	36.21	35.95	39.03	33.02	34.95	36.27	38.58	35.79	36.01	35.68
	u_C	0.50	0.65	0.71	0.51	1.18	0.83	0.81	0.51	0.48	0.42	0.39	0.51	0.21
Frequência(Hz)		1,25k	1,6k	2k	2,5	3,15	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	20k
Trad.	D_{nT}	35.44	33.82	30.37	32.52	38.35	36.82	38.27	40.69	43.24	45.13	42.86	38.64	34.22
	u_C	0.81	0.47	0.35	0.32	0.55	0.61	1.71	0.93	0.98	0.68	0.93	0.76	1.58
F.T.	D_{nT}	37.93	35.12	31.04	32.75	39.62	36.81	42.76	43.50	45.25	48.10	50.68	51.90	46.05
	u_C	0.46	0.33	0.18	0.16	0.40	0.32	0.25	0.16	0.32	0.27	0.35	0.39	0.33

4.2 Comparação entre condições

Embora os testes realizados neste trabalho não sejam suficientes para quantificar a influência dos distúrbios no sistema nas incertezas de medição, a comparação entre os resultados nas diferentes condições pode ser feita de maneira a identificar qualitativamente o comportamento dos métodos sob condições de medição não ideais.

Na figura 23 são comparadas as três condições experimentais para cada método avaliando-se as suas respectivas incertezas combinadas.

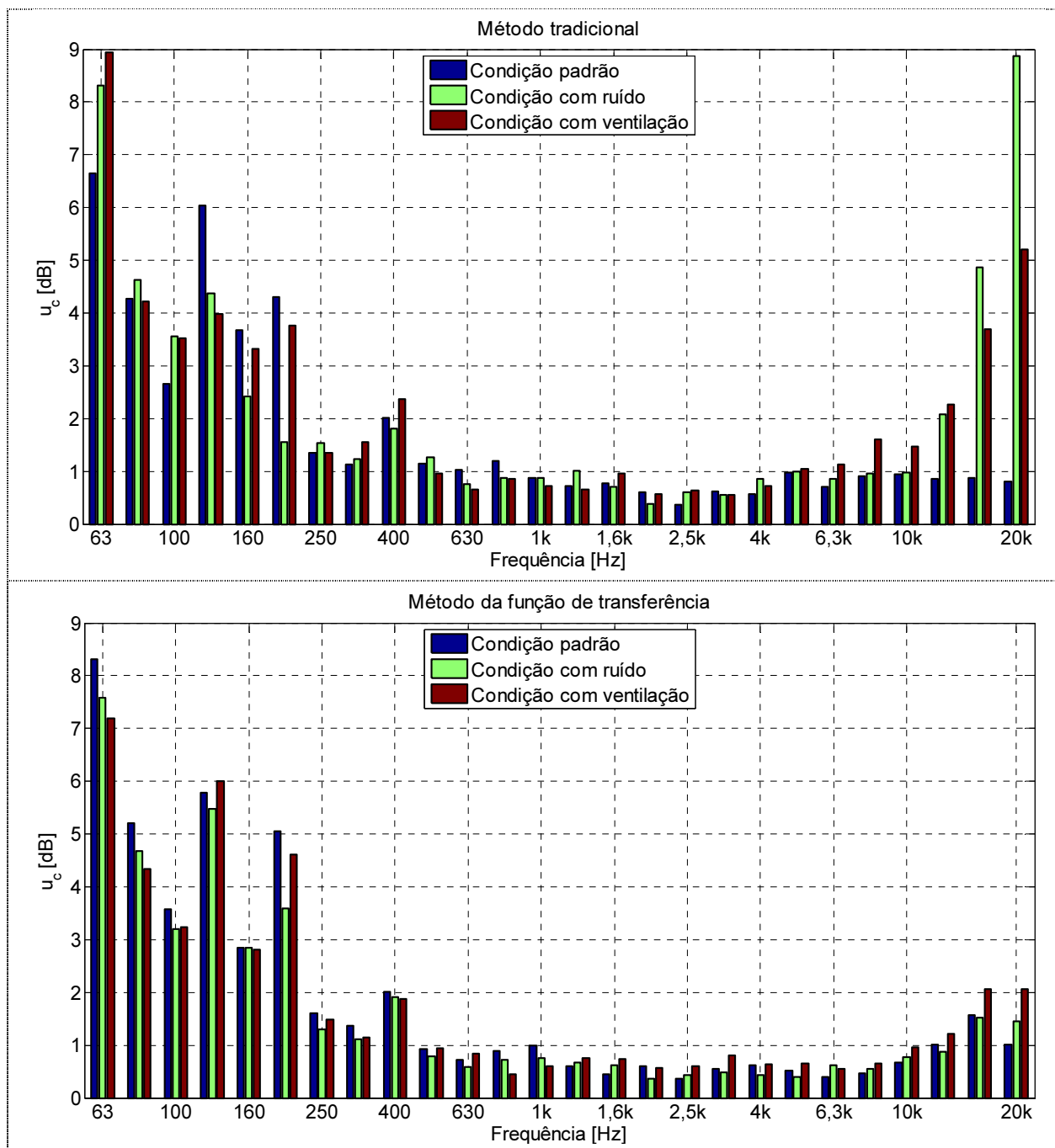


Figura 23. Comparação entre incertezas combinadas.

Para o método tradicional, observa-se que as condições de ruído e ventilação produzem incerteza claramente maior para frequências altas. Para a faixa de frequências de 125 a 200Hz observa-se que a condição padrão tem maior incerteza, o que pode indicar a predominância de erros aleatórios nessas frequências. Esse efeito também é observado para o método da função de transferência, porém de maneira menos expressiva. Também é observado que o método da função de transferência

de maneira geral apresenta resultados mais uniformes e consistentes, sofrendo menos variações entre as condições do que o método tradicional.

4.3 Análise da metodologia para o método da função de transferência

Como já comentado no início desta seção, essa seção foi adicionada para ilustrar um procedimento da metodologia que foi investigado. Segundo a análise feita, a ordem na qual se faz o processamento das respostas ao impulso/ funções de transferência afeta o resultados finais, no caso deste trabalho, a diferença de nível.

Existem pelo menos duas maneiras em que se poderia processar as funções de transferência obtidas nas medições. A primeira seria obter média das f.t. dos diversos pontos de medição, filtrar essa função de transferência média em bandas de frequências e calcular a energia da média para cada banda. O outro método é filtrar em bandas de frequência as funções de transferência de cada ponto de medição, calcular a energia de cada f.t para todas as bandas e obter então média da energia. Na figura 24 é mostrado um fluxograma que compara a sequência de operações utilizando a média das energias e a média das funções de transferência. A figura 24-a) equivale à figura 12.

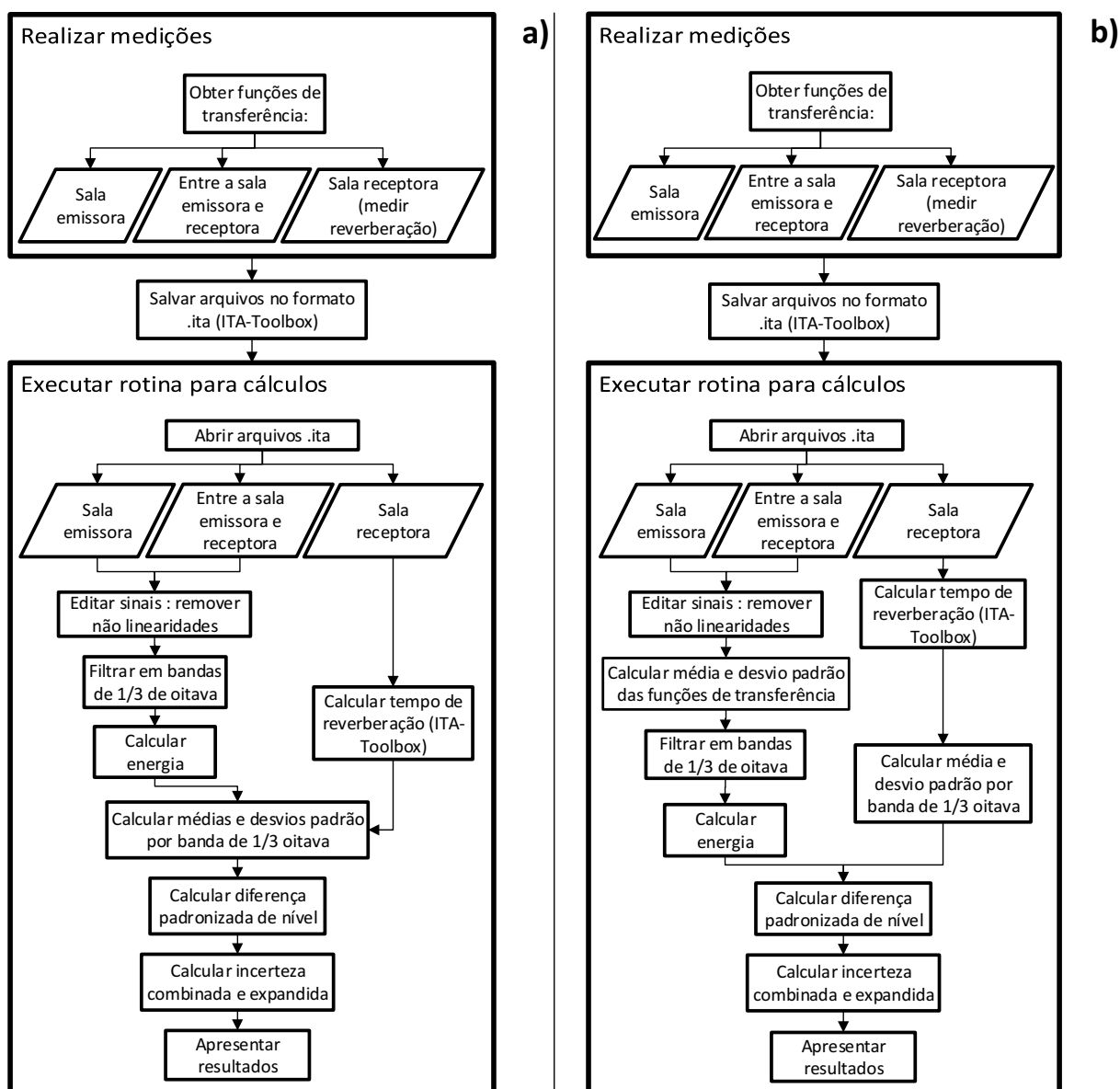


Figura 24. Comparação a sequência de procedimentos entre o método da função de transferência utilizando a média das energias, a), e a média das funções de transferência, b).

Na figura 25 são mostradas as f.t. de cada ponto de medição, e essas medições são comparadas com a média das funções de transferência. É observado, que a simples média das f.t não representa as funções de transferência em cada ponto de medição da sala. Logo percebe-se que uma média simples, sem nenhum processamento adicional, não representa a realidade e influencia os resultados das medições.

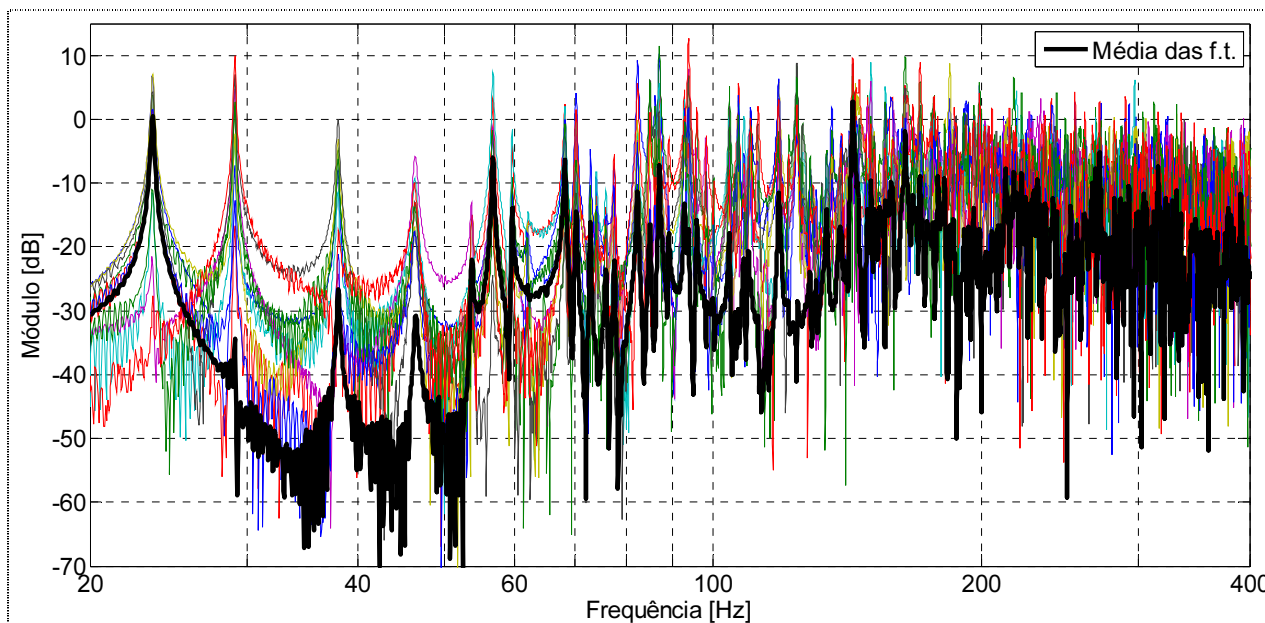


Figura 25. Comparação entre as funções de transferência e sua média.

Para ilustrar a diferença dos resultados (diferença de nível - D) entre as maneiras de processar as medições, é apresentada a figura 26. Nesta figura são comparadas as diferenças de nível obtidas por quatro métodos distintos na condição padrão.

São comparadas as diferenças obtidas pelas duas maneiras anteriormente citadas, isto é, a média das funções de transferência e a média das energias, como também as diferenças de nível obtidas para o método tradicional e para a combinação de experimentos. Nessa última os 10 experimentos de cada sala são combinados entre si, totalizando 100 combinações. O valor da diferença de nível é obtido pela média dessas combinações.

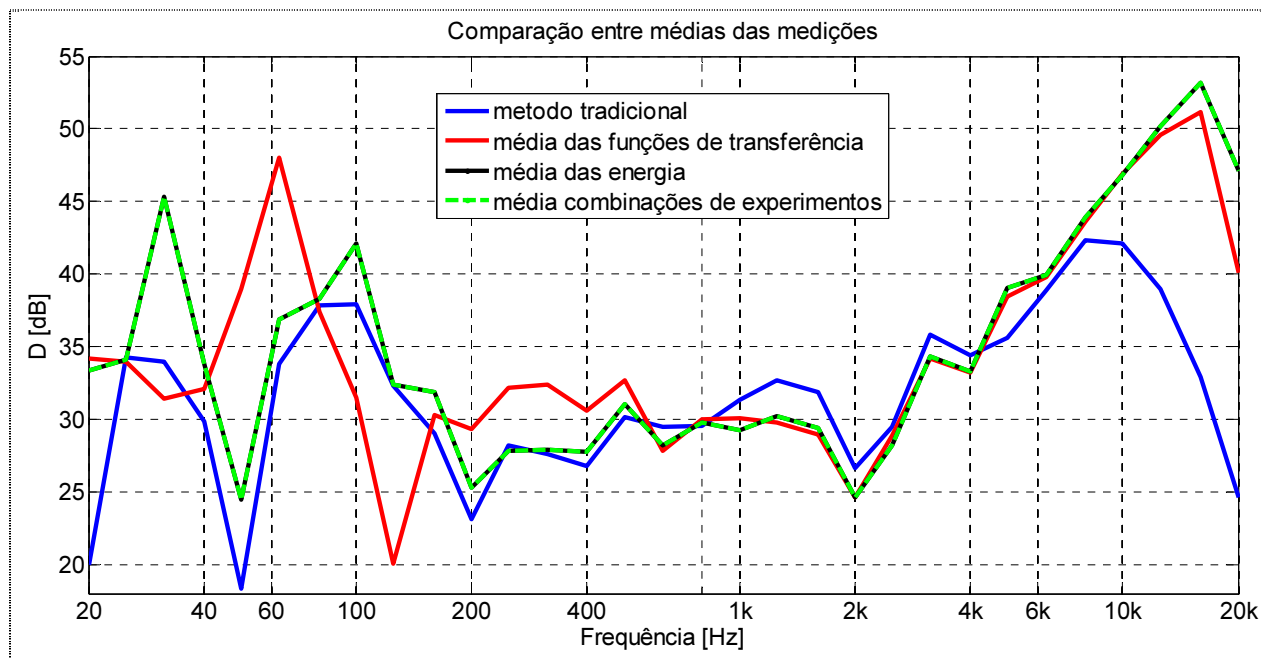


Figura 26. Comparação entre médias das medições.

Observa-se que a média das energias e a média das combinações de experimentos obtém os mesmos resultados, esses próximos do obtido pelo método tradicional. Os resultados obtidos pela média das funções de transferência são próximos aos outros métodos somente para frequências acima de aproximadamente 600 Hz, abaixo dessa frequência os resultados do método diferem de todos os outros. Dessa forma, fica sugerido para o método da função de transferência, o processamento das medições pela média das energias.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho o método da função de transferência foi aplicado à medição do isolamento sonoro. A metodologia proposta na literatura à esse método foi aplicada e diversos detalhes e fatores de influência na metodologia foram analisados. Um procedimento para cálculo da incerteza de medição foi seguido e as informações obtidas possibilitaram um primeiro estudo sobre a composição dessa incerteza no processo de medição. Através de testes em diferentes condições experimentais, foi possível observar as diferenças produzidas pelos distúrbios no resultado final de medição e os métodos foram comparados entre si através do cálculo da diferença de nível padronizada e incerteza de medição.

Mostrou-se que o método da função de transferência produz resultados ao menos equivalentes aos obtidos pelo método tradicional. Essa condição foi observada pelos testes na condição padrão, com ruído de fundo e com ventilação. Nesses testes, que têm seus resultados obtidos por medições feitas em diversos pontos da sala, foram observados resultados similares entre os métodos, não sendo possível apontar claramente um método vantajoso.

No entanto, através dos testes realizados em condição de repetibilidade foi mostrado um desempenho maior do método de função de transferência, sendo observada uma tendência do método em obter resultados mais homogêneos e consistentes. Para que isso possa ser afirmado com mais convicção, é necessária ainda a realização de mais testes na condição de repetibilidade e de maneira complementar um estudo da incerteza de medição que considere mais fatores, como o efeitos do posicionamento da fonte sonora e do microfone na sala.

Com relação à determinação da influência de distúrbios no sistema (ruído de fundo, ventilação) foram observadas algumas características para cada método, como a resposta prejudicada em altas frequências com o método tradicional. Porém, de maneira geral, os experimentos apresentaram respostas semelhantes e não foram suficientes para determinar uma incerteza relativa a cada fonte de distúrbio. Desta maneira, em futuros trabalhos são necessários testes mais minuciosos, para que se possa atribuir um valor numérico de incerteza à influência de parâmetros que causam distúrbio no sistema, como o ruído, movimentação do ar, temperatura, umidade.

Detalhes da metodologia para o método da função transferência foram analisados e foram obtidas informações não encontradas com tratamento claro na literatura. O resultado desse estudo mostrou que realizar a média espacial das funções de transferência ao invés de realizar a média das energias referentes à essas funções de transferência influencia na resposta final da medição. Isso ocorre pois detalhes das funções de transferência de cada ponto da sala não são bem representadas quando é feita a simples média de seus valores. Apesar de ser uma pequena diferença no procedimento, causa uma significativa mudança nos resultados, principalmente em salas que sofrem grande influência de modos vibratórios.

Do ponto de vista do custo e praticidade do ensaio, observou-se que o volume e preço dos instrumentos necessários é parecido para os dois métodos e o tempo para execução do teste também é equivalente. O método tradicional apresenta vantagem principalmente para medições rápidas, pois o medidor possui rotinas prontas para diversas aplicações e exibe os resultados diretamente em seu display. No entanto, com o método da função de transferência, os resultados obtidos tem melhor interface com outros programas, tornando mais fácil a condução e controle de experimentos mais elaborados e extensivos. Além disso pode-se obter mais detalhes sobre o sistema físico em estudo e sua aplicação é mais genérica, sendo também menos dependente de software e hardware específicos dos fabricantes e menos sujeito à obsolescência. Em contrapartida o método exige mais interação e conhecimento por parte do usuário.

6 REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 15575: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- [2] DIETRICH, P., Uncertainties in Acoustical Transfer Functions - Modeling, Measurement and Derivation of Parameters for Airborne and Structure-borne Sound. Tese D. Alemanha: RWTH Aachen/ITA, 2013.
- [3] JCGM 100:2008 .7Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement - GUM ,BIPM, 2008.
- [4] ISO 140-5: 1998, Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades, International Organization for Standardization, 1998.
- [5] ISO 16283-1: 2014, Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, International Organization for Standardization, 2014.
- [6] ISO 18233, Acoustics – Application of new measurement methods in building and room acoustics, International Organization for Standardization, 2006.
- [7] ISO 354, Acoustics – Measurements of sound absorption in a reverberation room, International Organization for Standardization, 2003.
- [8] HONGISTO, V. Airborne sound insulation of wall structures - measurement and prediction methods. Tese D. Finlândia: Helsinki University of Technology, 2011.
- [9] MICHALSKI, R. L X. N. : 2011. Metodologias para medição de isolamento sonoro em campo e para expressão da incerteza de medição na avaliação do desempenho acústico de edificações. Tese D. Sc. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.
- [10] MULLER, S., MASSARANI, P., Transfer Function Measurement with Sweeps, Journal of the Audio engineering Society, Vol. 49, No. 6, 2001.
- [11] SHIN, K., HAMMOND, J. Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers. Editora Wiley, 2008.
- [12] VENEGAS, R., NABUCO, M, MASSARANI, P., In situ evaluation of sound insulation using transfer function measurements, International Congress on Acoustics, Vol.19, 2007.