

Análise experimental das fontes de ruído em uma lavadora de roupas

Vargas, J. G.¹ ; Santos, H. L. V.¹; Kulakauskas, L. V. Q.¹ ; Lenzi, A.¹ ; Silva, O. M.¹ 

¹ Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, jgvargasemc@gmail.com

Resumo

Lavadoras de roupas são eletrodomésticos que vibram e emitem ruído durante o seu funcionamento. Uma das principais fontes de ruído de uma lavadora de roupas é o motor elétrico que aciona seu tambor agitador e os maiores níveis de potência sonora radiada são normalmente observados no processo de centrifugação. Diante do problema vibroacústico associado ao funcionamento desse eletrodoméstico, foi desenvolvido um estudo por meio de procedimentos experimentais com o objetivo de identificar os principais caminhos e fontes de propagação da energia vibroacústica em uma lavadora de roupas de carregamento frontal. Durante a caracterização do comportamento vibroacústico do motor elétrico da lavadora, detectou-se regiões críticas em que pequenas variações de velocidade rotacional resultavam em um aumento acentuado no ruído radiado. Fez-se um estudo detalhado nessas regiões críticas com o auxílio da análise de ordem e chegou-se à conclusão de que as frequências naturais dos componentes do motor estavam sendo excitadas pelo carregamento de origem magnética. Com base na análise dos resultados obtidos, corroborou-se a hipótese preliminar de que o motor elétrico é a principal fonte de ruído da lavadora analisada e que o gabinete da lavadora proporciona, em toda faixa de operação, atenuações entre 5 dB e 10 dB nos níveis globais da potência sonora radiada pelas fontes internas da lavadora. Propostas de melhorias ao isolamento acústico do gabinete da lavadora foram testadas e obtiveram-se reduções significativas entre 6 dB até 8 dB nos níveis globais da potência sonora.

Palavras-chave: lavadora de roupas, fontes de ruído, motor elétrico, métodos experimentais.

PACS: 43.10.SV, 43.20.Bj, 43.60.-c, 46.40.Ff.

Experimental analysis of noise sources in a washing machine

Abstract

Washing machines are household appliances that vibrate and emit noise during their operation. One of the main noise sources of a washing machine is the electric motor that drives its washer drum and the highest levels of radiated sound power are normally observed in the spin cycle process. Faced with the vibroacoustic problem associated with operating this household appliance, a study was developed by experimental procedures in order to identify the main sources and propagation paths of the vibroacoustic energy in a front loading washing machine. During the vibroacoustic behavior characterization of the washing machine's electric motor, critical regions were detected in which small variations in rotational speed resulted in a marked increase in radiated noise. A detailed study was performed on these critical regions with the aid of order analysis tracking, concluding that natural frequencies of motor components were being excited by magnetic source loadings. Based on the analysis of obtained results, the preliminary hypothesis that the electric motor is the main noise source from the analyzed machine was confirmed. In addition, over the entire operating range the washing machine cabinet provides, attenuations between 5 dB and 10 dB in the overall sound power levels radiated by the internal sources of the washing machine. Proposals for improvements to the acoustic insulation of the washing machine cabinet were tested and significant reductions between 6 dB and 8 dB were obtained in the overall levels of radiated sound power.

Keywords: washing machine, noise, electric motor, experimental procedures.

1. INTRODUÇÃO

Diante da competitividade do mercado atual e da tendência natural, por parte dos usuários, da escolha de eletrodomésticos mais eficientes e que emitem menos ruído durante o seu funcionamento, as fabricantes de lavadoras de roupas têm se preocupado cada vez mais com o ruído gerado pelo produto. Em mercados exigentes, como o europeu, o selo de ruído já é um dos critérios decisivos no momento da escolha do modelo de lavadora de roupas, sendo tão importante quanto o selo de eficiência energética e de eficiência do processo de lavagem.

Com relação à análise das fontes de ruído de lavadoras de roupas, é escasso o número de trabalhos publicados com maior nível de detalhamento. Barpanda et al. [1], por exemplo, investigaram as fontes de ruído de uma lavadora de roupas de carregamento frontal de acionamento indireto. Nesse trabalho, foram desenvolvidos experimentos para determinar a potência sonora radiada pela lavadora e as acelerações nos painéis do gabinete. Identificou-se que o motor da lavadora é a principal fonte de ruído e que o ciclo de centrifugação é o mais crítico em termos de nível de potência sonora radiada (*Sound Power Level* ou SWL). O motor tem maior contribuição nas frequências superiores a 1 kHz, como fonte ativa, e contribui passivamente no ruído radiado pela lavadora nas componentes de frequências inferiores a 1 kHz. Ao final, fez-se o tratamento acústico das aberturas inferiores e do painel traseiro do gabinete da lavadora por meio da aplicação de material de elevada absorção sonora e material com elevado amortecimento estrutural, respectivamente. Tais autores obtiveram reduções da ordem de até 7,2 dB(A).

Por sua vez, Wang et al. [2] apresentaram uma análise vibroacústica de uma lavadora de roupas de carregamento superior (*top load*) de acionamento convencional. Nesse trabalho, foram desenvolvidos experimentos na área de acústica e vibrações com interesse nas frequências inferiores a 1 kHz. Com base nos dados obtidos, foi aplicada a Análise de Caminhos de Transferência Operacional (*Operational Transfer Path Analysis* ou OTPA) para identificar os

principais caminhos de transmissão da energia vibroacústica e as principais fontes de ruído da lavadora. Como resultado, foi verificado que os maiores contribuidores, em ordem decrescente, são o motor, o sistema de transmissão (polias/correia), o tanque e o gabinete.

Liu et al. [3] caracterizaram experimentalmente o ruído radiado por uma lavadora de roupas de carregamento frontal por meio de medições de uma sonda de intensidade sonora em uma câmara semianecoica. Nesse trabalho, foi criada uma malha de 240 pontos experimentais distribuídos em planos paralelos e distantes 0,20 m dos painéis do gabinete da lavadora, e em cada ponto da malha experimental foram processados os valores da intensidade sonora durante o ciclo de centrifugação. Com o processamento e análise dos dados adquiridos, verificou-se que os maiores níveis de intensidade sonora ocorrem na proximidade à abertura inferior do gabinete nas bandas de frequências de 1/3 de oitava centradas em 100 Hz, 2 kHz e 4 kHz. Níveis de potência sonora de 48,2 dB, 51,0 dB, 45,4 dB e 46,9 dB resultaram do processamento dos dados relativos aos planos de medição frontal, traseiro, esquerdo e direito, respectivamente.

Paris e Tabuenca [4] avaliaram a resposta acústica de uma lavadora de roupas de carregamento frontal durante o ciclo de drenagem. Os dados necessários à caracterização dos níveis de potência sonora radiada pela lavadora foram adquiridos por meio de experimentos realizados em uma câmara semianecoica. Os autores mediram a velocidade de vibração dos painéis do gabinete da lavadora para estimar ruído de origem estrutural. Níveis de potência sonora da ordem de 60 dB(A) foram obtidos nos testes com a lavadora original e 51 dB(A) se removida a fixação da eletrobomba de drenagem do gabinete. Uma proposta de melhoria da fixação da eletrobomba foi testada e os níveis de potência sonora foram reduzidos para 57 dB(A).

Diante do problema ruído relacionado ao funcionamento das lavadoras de roupas, surge a necessidade de analisar o comportamento vibroacústico deste equipamento doméstico. Neste sentido, esse trabalho foi desenvolvido com o

intuito de analisar experimentalmente a contribuição das fontes de ruído de uma lavadora de roupas de carregamento frontal similar ao modelo mostrado na Figura 1.

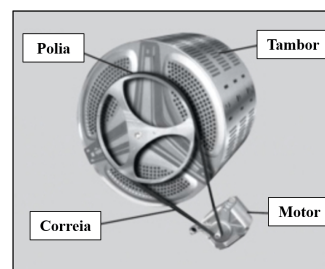


Figura 1: Lavadora de roupas de carregamento frontal (adaptado de Whirlpool [5]).

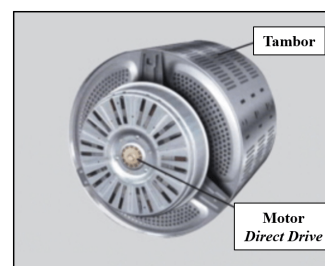
Em geral, os motores elétricos que equipam as lavadoras de roupas de carregamento frontal acionam direta ou indiretamente o tambor agitador da lavadora. No acionamento indireto, ou convencional, a transmissão de movimento e potência do motor ao tambor da lavadora é dada por meio de um sistema de polias e correia (Figura 2 (a)). No acionamento direto (*Direct Drive* ou DD), tem-se um acoplamento direto entre o rotor do motor e eixo do tambor agitador da lavadora (Figura 2 (b)). Desta forma, o eixo do motor é o próprio eixo da lavadora e a transmissão de movimento rotativo e de torque do motor ao tambor da lavadora é direta.

A lavadora objeto de estudo deste trabalho é equipada com um motor DD sem escovas, de ímãs permanentes, síncrono e trifásico. Como ilustra a Figura 3, esse motor é formado por dois componentes principais: um componente fixo, o estator (Figura 3 (a)), que contém os enrolamentos de armadura, e um componente móvel, o rotor (Figura 3 (b)), o qual possui ímãs permanentes que formam os polos do motor.

A metodologia experimental apresentada no presente artigo se assemelha à adotada por Barpanda et al. [1]. Entretanto, as condições operacionais dos testes e algumas das ferramentas de análise utilizadas diferem das encontradas no trabalho supracitado. Barpanda et al.

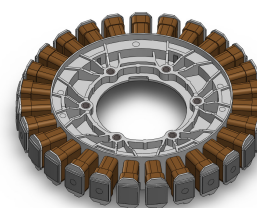


(a)

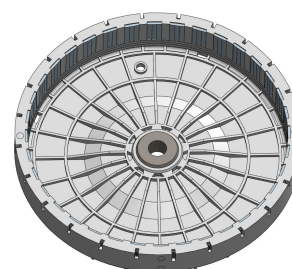


(b)

Figura 2: (a) sistema de acionamento indireto (adaptado de UK Whitegoods [6]) e (b) sistema de acionamento direto (adaptado de UK Whitegoods [6]).



(a)



(b)

Figura 3: Componentes do motor DD que aciona a lavadora: (a) estator e (b) rotor.

[1] desenvolveram as medições experimentais considerando a velocidade rotacional fixa em 1200 RPM. No presente trabalho, fez-se a aquisição e processamento dos sinais entre as velocidades rotacionais de 200 RPM e 1600 RPM. Com relação às análises desenvolvidas, a principal diferença desse trabalho é o uso da análise

das ordens que possibilita identificar as fontes geradoras dos problemas vibroacústicos.

As escalas de alguns gráficos deste artigo foram suprimidas por questão de sigilo industrial, sem que seja prejudicada a interpretação física dos fenômenos envolvidos.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nessa seção, será feita uma breve revisão de conceitos relevantes à compreensão do trabalho que será detalhado. Primeiramente serão apresentados conceitos básicos a respeito da análise de ordem e, na sequência, são revistos conceitos sobre as fontes de vibração e ruído em motores elétricos.

2.1 Análise de ordem

A análise de ordem consiste em uma ferramenta para analisar sinais de vibrações ou acústicos relativos ao funcionamento de máquinas rotativas (Brandt [7]). Tal técnica é aplicável tanto em máquinas de rotação nominal fixa (regime permanente) quanto em máquinas de rotação variável (regime transiente). As máquinas rotativas são, em geral, compostas por vários componentes e cada componente possui padrão de vibração e radiação sonora que contribuem de forma característica na resposta vibroacústica da máquina a cada revolução.

Gade et al. [8] destacam que é comum desenvolver a análise de sinais vibroacústicos de máquinas rotativas em termos do espectro de ordem em vez do espectro de frequência. Um espectro de ordem fornece a amplitude e/ou fase de um sinal de origem vibratória ou acústica como uma função da ordem harmônica da frequência de rotação. A grande vantagem em aplicar a análise de ordem está relacionada ao fato da maioria das excitações dinâmicas de uma máquina rotativa estarem relacionadas à frequência de rotação. Tal característica facilita a interpretação e diagnóstico do fenômeno físico associado ao sinal medido.

A frequência rotacional f_{Ω} de uma máquina rotativa e as ordens harmônicas n são determi-

nadas, respectivamente, por:

$$f_{\Omega} = \frac{\Omega}{60} \quad (1)$$

e

$$n = \frac{f}{f_{\Omega}}, \quad (2)$$

sendo Ω a velocidade rotacional em rotações por minuto (RPM) e f a frequência do espectro de interesse em hertz. É importante destacar que o valor de n não necessariamente precisa ser um número inteiro.

O parâmetro de rastreamento dos sinais na análise de ordem é a posição angular, portanto, na análise de ordem o sinal deve estar no domínio do ângulo. Normalmente, os sinais no domínio angular são obtidos por meio de algoritmos de reamostragem síncrona. Segundo Brandt [7], o algoritmo de processamento de análise de ordem, amplamente utilizada atualmente, foi desenvolvido e patenteada pela Hewlett-Packard nos anos 80 e foi adotado como padrão industrial para reamostragem síncrona de sinais de máquinas rotativas. Em resumo, faz-se a aquisição síncrona dos sinais vibroacústicos e do sensor de velocidade rotacional, que fornece dados sobre a posição angular e velocidade rotacional, e por meio de sucessivas interpolações se obtém um sinal reamostrado no domínio angular. O sinal reamostrado apresenta um espaçamento angular constante de modo que ao se aplicar a transformada de Fourier sobre esse sinal se obtém os espectros das ordens do sinal.

Conforme destaca Brandt [7], é recomendado que os sinais sejam adquiridos à taxa de amostragem constante, considerando uma taxa de sobreamostragem de 10 a 20 vezes para garantir uma boa reamostragem do sinal. Como recomendação prática, recomenda-se utilizar a máxima frequência de amostragem do sistema de aquisição.

2.2 Ruído em motores elétricos

Segundo Gieras et al. [9] e Beranek et al. [10], a vibração e o ruído produzidos pelo funcionamento de motores elétricos alimentados por corrente alternada têm três origens: eletromag-

nética, mecânica e aerodinâmica. Conforme proposto por Beranek et al. [10], Gieras et al. [9], Chen e Tsai [11], Shuguang et al. [12] em motores de pequeno e médio porte a principal fonte de ruído tem origem no carregamento eletromagnético que atua nos componentes do motor. Beranek et al. [10] destaca que em motores de maior potência tem-se, em geral, a redução da contribuição do ruído de origem eletromagnética e o aumento do ruído de origem mecânica e aerodinâmica.

O ruído eletromagnético é resultante da interação das ondas de fluxo magnético de alta densidade que cruzam o entreferro do motor. Gieras et al. [9] relatam que a distribuição das bobinas, distorções na forma de onda da corrente que alimenta as fases do motor, variações na permeabilidade magnética do entreferro em função do núcleo saliente do estator, excentricidade do rotor e desbalanço entre as fases causam deformações que contribuem para a geração de ruído. Segundo Beranek et al. [10], inversores que alimentam alguns tipos de motores elétricos podem inserir harmônicas que aumentam consideravelmente o ruído de origem eletromagnética.

Segundo Shuguang et al. [12], em motores sem escovas, de ímãs permanentes e de rotor externo, a maior fonte de ruído é o rotor e o ruído de origem eletromagnética é resultante da ação das componentes de força magnética que atuam sobre os ímãs. Conforme Krotsch et al. [13], Chen e Tsai. [11] e Gieras et al. [9], a componente magnética radial da força é a principal origem de vibração e ruído radiado pelos motores sem escovas e de ímãs permanentes. As tensões mecânicas resultantes da força radial são proporcionais ao quadrado da densidade de fluxo magnético do entreferro (Beranek et al. [10]).

O ruído de motores elétricos gerados por fontes mecânicas é causado por mancais de rolamentos defeituosos ou inadequados, atrito entre componentes móveis, empenamento do eixo do motor, desalinhamento de montagem, rotor desbalanceado, acoplamentos, juntas e engrenagens (Gieras et al. [9] 2006, Beranek et al. [10]). O desbalanceamento do rotor causa vibração e

excentricidade dinâmica que altera o entreferro do motor, alterando a forma do carregamento de origem magnética, além de transmitir mais esforços à fixação do motor.

O ruído aerodinâmico em motores é comumente associado aos ventiladores utilizados no arrefecimento do motor. Em motores de rotor externo, geralmente são efetuadas modificações topológicas na carcaça do rotor para auxiliar na refrigeração do estator e aumentar a rigidez da própria carcaça. Em ambos os casos, observa-se que estas modificações implicam no aumento do ruído aerodinâmico. Em motores sem escovas, de ímãs permanentes e de rotor externo que equipam lavadoras, o ruído aerodinâmico tem características similares ao ruído de banda larga e aumenta com a elevação da velocidade rotacional do rotor.

A faixa de frequência de interesse na análise de vibrações em máquinas elétricas pode variar dependendo das suas características construtivas. Para Beranek et al. [10], em função da elevada rigidez radial de motores de pequeno e médio porte, a faixa de frequência de interesse para o problema de ruído varia entre 200 Hz e 6 kHz, enquanto que, para vibrações os problemas costumam ocorrer entre 10 Hz e 2 kHz. Em função do número de bobinas e polos do motor DD que equipa a lavadora objeto de estudo desse trabalho e da velocidade rotacional máxima, a faixa de frequência de interesse é limitada a 3,5 kHz.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Esse trabalho tem como objetivo caracterizar experimentalmente as fontes de ruído de uma lavadora de roupas de carregamento frontal de acionamento direto. O ruído radiado pela lavadora em questão é resultante da vibração dos componentes do motor elétrico, do tanque e do gabinete da lavadora. A caracterização do ruído radiado pela lavadora foi executada por meio de técnicas experimentais adequadas com a lavadora em funcionamento no processo de centrifugação em uma câmara acústica semianecoica.

3.1 Montagem e condições dos testes

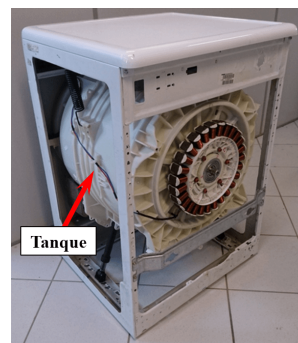
Os testes destinados à caracterização do ruído da lavadora de carregamento frontal foram desenvolvidos considerando duas condições de fixação do motor elétrico. Primeiramente, este foi montado em uma bancada de testes especificamente projetada para executar de forma controlada os experimentos dos motores elétricos DD. A bancada consiste em uma caixa metálica formada por placas de alumínio com espessura de 25,4 mm na tampa superior, 13,5 mm nas tampas laterais e inferior. Essa caixa metálica enclausura um disco de inércia, que é suportado por dois mancais de rolamento, e que simula a carga da lavadora em condições controladas. Uma foto da bancada de testes é apresentada na Figura 4.



Figura 4: Bancada de testes dos motores elétricos DD que acionam as lavadoras.

Na segunda configuração de montagem, o motor foi acoplado e fixado ao tanque de uma lavadora, como normalmente é feito na linha de montagem do produto. Essa configuração de montagem do motor é mostrada na Figura 5 (a). Os testes com o motor montado no tanque da lavadora foram realizados em um gabinete normal e em um gabinete modificado. O gabinete normal é o gabinete com todas as suas características originais preservadas. Diferentes configurações foram adotadas no intuito de isolar a contribuição do motor elétrico, mesmo quando montado no tanque da lavadora.

Os testes de caracterização das fontes de ruído da lavadora foram realizados considerando os dois gabinetes diferentes. Um dos gabinetes per-



(a)



(b)

Figura 5: (a) Detalhes internos da lavadora de referência e (b) lavadora preparada para avaliar todo o sistema.

maneceu inalterado (Figura 5 (b)), e no outro foram realizadas modificações a fim de reduzir o ruído radiado pelos painéis do próprio gabinete (Figura 5 (a)). Adicionalmente, buscou-se reduzir as influências da presença do gabinete no ruído radiado pelos componentes internos da lavadora. As modificações realizadas concentraram-se em recortar os painéis da lavadora, dado o objetivo de reduzir o ruído radiado pelo próprio gabinete. No entanto, garantiu-se a integridade estrutural e rigidez necessária à estrutura que suporta o conjunto interno da lavadora. As alterações não modificaram as posições de encaixe dos amortecedores e molas do sistema de suspensão na estrutura do gabinete.

Nos testes de aceleração (*run-up*) desenvolvidos com o motor montado na bancada ou no tanque da lavadora, o sistema de controle e alimentação do motor foi configurado para acelerar de 200 RPM até 1600 RPM, com taxa de variação de velocidade constante de 10 RPM/s. Além dos testes de *run-up*, foram realizados testes esta-

cionários à velocidade rotacional constante em regiões críticas, em que foram observadas variações abruptas dos níveis de potência sonora radiada pelo motor ou lavadora.

O estudo e a análise das fontes que mais contribuem ao ruído radiado pela lavadora envolveu a montagem, desmontagem e, na medida do possível, componentes da lavadora foram "isolados acusticamente". Ao final de todos os testes, diversas configurações foram experimentadas e os detalhes de cada configuração são apresentados nas próximas seções.

Os experimentos e testes foram executados na câmara semianecoica do Laboratório de Vibrações e Acústica (Departamento de Engenharia Mecânica) da Universidade Federal de Santa Catarina, que é qualificada e está em conformidade com a Norma ISO 3745:2012 *Acoustics—Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure—Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms* [14], como apresenta Gomes [15]. Os espectros de ruído característicos do motor e da lavadora para diferentes pontos de velocidade rotacional são obtidos em um teste cuja duração é de aproximadamente 140 segundos. Para tal, foram instalados e devidamente posicionados a cada rodada de testes um conjunto de dez microfones de campo livre de 1/2 polegada B&K Type 4819. Nas Figuras 6 (a) e 6 (b) são apresentadas fotos dos arranjos experimentais utilizados na caracterização da potência sonora radiada pelo motor e pela lavadora, respectivamente.

O nível de potência sonora (SWL) de cada fonte analisada foi calculado com base nos níveis de pressão sonora (*Sound Pressure Level* ou SPL) medidos nos pontos determinados pelo arranjo de microfones recomendado pela norma ISO 3744:2010 *Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane* [16], conforme Anexo B da Norma. Em função das dimensões das fontes e seguindo as recomendações da Norma, foi adotada uma superfície hemisférica virtual de

medição com raio de 1,50 m resultando em uma frequência limitante inferior de 66 Hz e 120 Hz para o motor e lavadora, respectivamente, segundo o critério de 1/4 do comprimento de onda. Nas medições realizadas com o motor montado na bancada de testes, o centro da fonte foi deslocado em 0,225 m acima do piso da câmara para compensar a altura dos painéis refletores. Conforme a norma supracitada, o cálculo do nível de potência sonora é dado por:

$$\text{SWL} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{\text{SPL}_i}{10}} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{S_0} \right) + K_1 + K_2, \quad (3)$$

sendo SPL_i o Nível de Pressão Sonora relativo ao i -ésimo ponto de medição, N o número de pontos de medição utilizados, S a área da superfície virtual de medição, S_0 a área de referência equivalente à unidade, K_1 e K_2 as constantes de correção do ruído de fundo e da câmara, respectivamente. Além dos microfones, utilizouse um tacômetro óptico laser Monarch modelo PLT200 para medição da velocidade rotacional e posição angular do rotor (ver Figura 6 (a)). Os sinais de saída do tacômetro óptico permitiram referenciar a posição angular do rotor no processamento dos dados adquiridos.

Os sinais dos microfones e do tacômetro óptico foram adquiridos simultaneamente através de um analisador de sinais Siemens SCADAS Mobile de 12 canais equipado com um módulo específico para tacômetros. A faixa de frequência analisada nos experimentos se estendeu até 10 kHz, sendo a taxa de aquisição de 25,6 kS/s. Os sinais adquiridos foram processados no domínio do tempo e no domínio do ângulo da lavadora utilizando algoritmo de reamostragem síncrona em relação à velocidade rotacional do rotor do motor, conforme a teoria da análise de ordem apresentada por Brandt [7]. A faixa de frequência de interesse às análises de ruído radiado pelas fontes em estudo é limitada a 3,5 kHz, tendo em vista que são observadas reduções consideráveis nos níveis de potência sonora radiada acima dessa faixa de frequências. Entretanto, para o cálculo dos níveis globais de potência so-

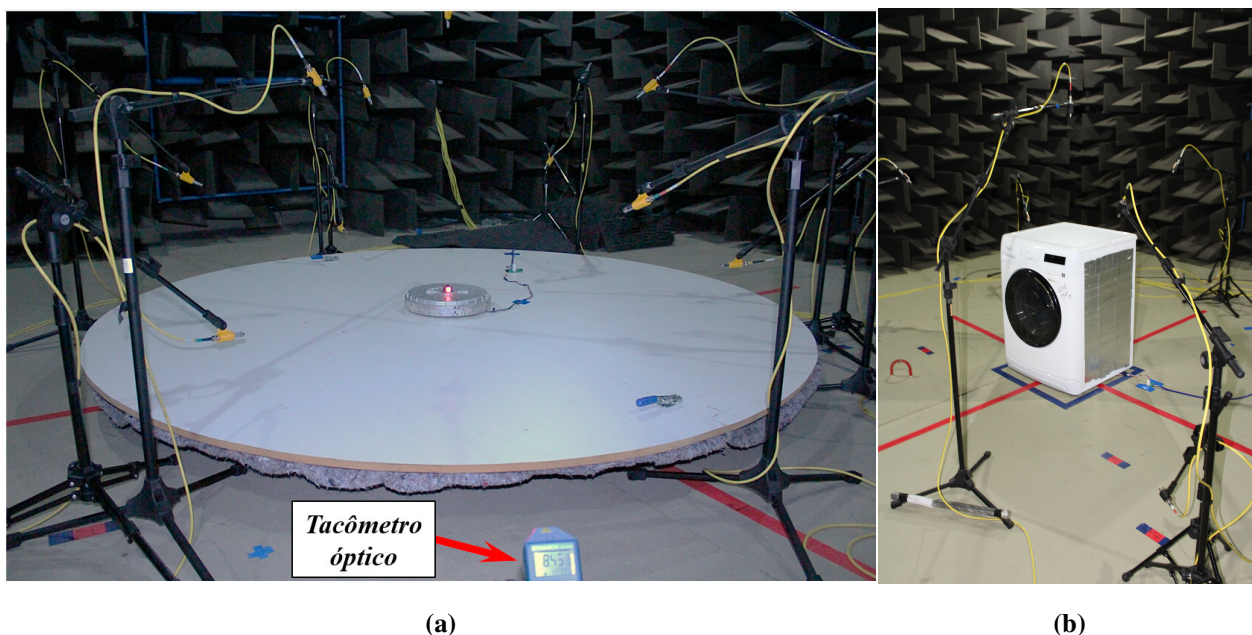


Figura 6: Arranjo experimental utilizado na medição dos sinais das pressões sonoras utilizadas no cálculo da potência sonora radiada pelo motor (a) e pela lavadora (b).

nora foram consideradas todas as componentes de frequência até 10 kHz. Por meio dessas análises foram obtidos os gráficos na forma de mapas de cores da amplitude dos sinais processados em função da frequência e da velocidade rotacional. Esses gráficos consistem em ferramentas que auxiliam a caracterização do ruído radiado pelas fontes estudadas, sendo possível analisar informações nos domínios da frequência e das ordens simultaneamente.

3.2 Testes com o motor elétrico

Durante o seu funcionamento, o motor atua como fonte de ruído da cavidade acústica formada no interior do gabinete e como fonte de vibração da estrutura da lavadora, visto que o motor está mecanicamente acoplado a ela. Portanto, o motor atua como fonte ativa de vibração e ruído. Adicionalmente, por meio da fixação do motor aos componentes da lavadora, tem-se um caminho de transmissão de parte da energia vibratória do motor. Essa energia excita componentes internos da lavadora, fazendo-os vibrar passivamente.

Nos experimentos desenvolvidos com o motor elétrico montado sobre a bancada de testes foram instalados dois painéis bipartidos em MDF

(*Medium Density Fiberboard*) com 18 mm de espessura com formato de semicírculo com raio de 2,0 m, conforme Figura 6 (a). Dessa forma, obteve-se uma superfície de reflexão às ondas sonoras radiadas pelo motor elétrico e atenuou-se parte do ruído radiado pelos mancais de rolamento da bancada. Além disso, a fonte de radiação sonora foi deslocada verticalmente de forma que o centro considerado é o centro do motor e portanto todos os pontos experimentais também foram deslocados de $\delta_z = 0,225$ m na direção vertical. As aberturas entre os painéis e a bancada foram isoladas acusticamente. Inseriu-se material Sonex [17] de elevada absorção entre os painéis refletores e o piso da câmara a fim de minimizar a influência do ruído radiado pela própria bancada de testes nos valores globais dos níveis de potência sonora radiada pelo motor. É importante destacar que não existe contato mecânico entre os painéis e a bancada de testes.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nessa seção do artigo, serão apresentados os resultados das análises experimentais desenvolvidas com o motor elétrico montado na bancada de testes e na lavadora de roupas. Os testes da

lavadora foram executados em dois gabinetes, um original e o outro modificado, conforme será detalhado a seguir. No final, descrevem-se os resultados obtidos ao estudo proposto como forma de melhorar o isolamento acústico do gabinete da lavadora.

4.1 Motor elétrico

O primeiro teste realizado consistiu em analisar a repetibilidade dos resultados obtidos com os testes do motor elétrico montado na bancada de testes. Nessa análise, fez-se a montagem e desmontagem completa do aparato experimental em dias diferentes e obtiveram-se, em cada dia, os dados para calcular a potência sonora radiada. Na Figura 7, são mostrados os resultados obtidos para o SWL global do motor em função da velocidade rotacional, para duas repetições do teste realizado em dias distintos. A análise dos dados permite concluir que variações inferiores a 1,5 dB em termos do SWL global foram observadas. Em termos reais e de execução prática, a repetibilidade foi considerada adequada, dada a complexidade envolvida na preparação, montagem e execução dos testes.

Optou-se por utilizar as curvas de ponderação A na representação dos dados acústicos, uma prática comum na análise de eletrodomésticos, dadas as características de distribuição espectral do ruído radiado pelas fontes em estudo. Além disso, é uma forma simplificada de representar a percepção humana à resposta do produto. A potência sonora de referência $W_{ref} = 1 \text{ pW}$ foi adotada nesse estudo.

A análise dos resultados obtidos para o motor elétrico permite destacar que, de maneira geral, o SWL global radiado pelo motor elétrico aumenta com o aumento da velocidade rotacional. Segundo Gieras et al. [9], em um motor elétrico ideal seria esperado um aumento linear do SWL na escala decibel em função do aumento da velocidade rotacional. Dentro de certos limites, a resposta do motor elétrico em estudo segue essa tendência porém, em determinadas velocidades rotacionais são observados aumentos repentinos nos níveis de potência sonora radiada.

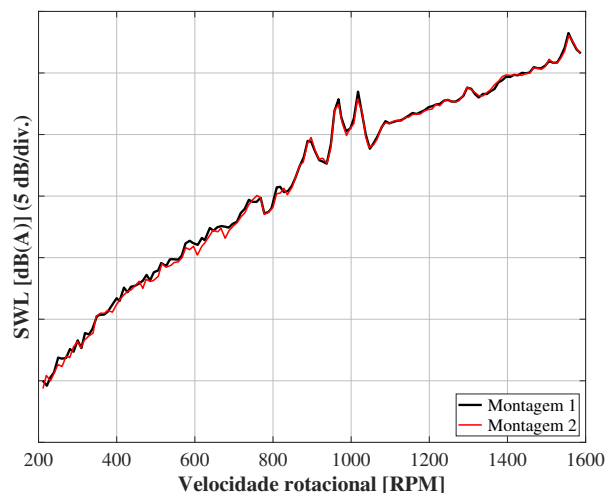


Figura 7: SWL global do motor montado na bancada de testes obtidos em dias diferentes após desmontagem a remontagem do aparato experimental.

Com o objetivo de investigar as causas que levam ao aumento dos níveis ruído radiado pelo motor em determinadas velocidades rotacionais, foi realizada uma análise voltada às regiões críticas. Para tal, foram analisados os espectros de ruído nas regiões em que foram observados os aumentos repentinos dos níveis de potência sonora. Os espectros dos níveis de potência sonora obtidos para 892 RPM, 967 RPM e 1017 RPM são mostrados na Figura 8, enquanto que, o espectro relativo a 1558 RPM é mostrado na Figura 9.

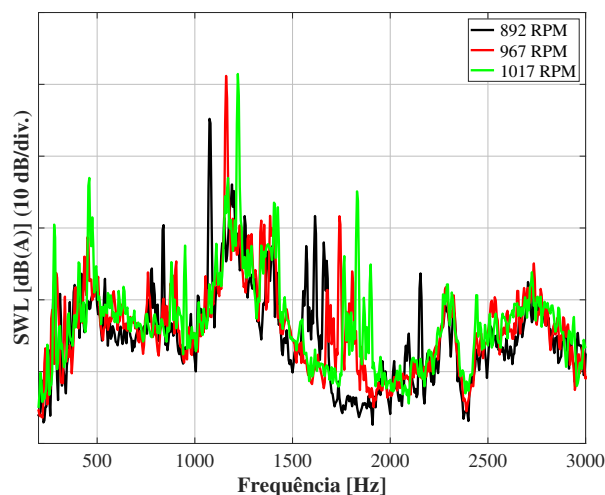


Figura 8: Espectro do SWL do motor montado sobre a bancada de testes para as rotações de 892 RPM (preto), 967 RPM (vermelho) e 1017 RPM (verde).

Observa-se diferenças superiores a 10 dB entre as componentes de maior amplitude dos espectros da Figura 8 em relação às demais com-

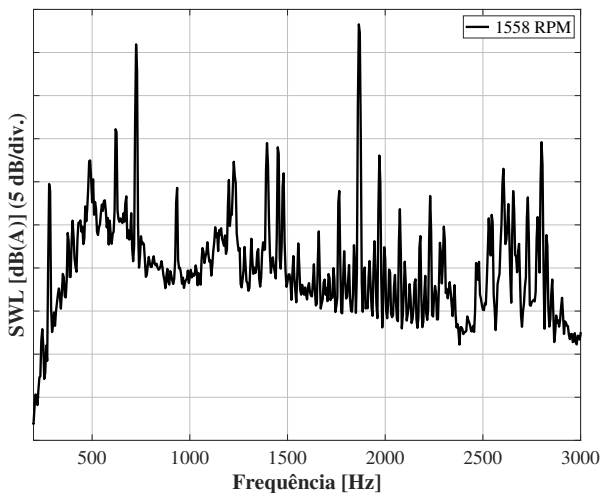


Figura 9: Espectro do SWL do motor montado sobre a bancada de testes para a rotação de 1558 RPM.

ponentes. No espectro da Figura 9, observa-se duas componentes predominantes em 725 Hz e 1870 Hz, cujas diferenças de amplitudes ultrapassam 10 dB.

No sentido de complementar a análise das regiões críticas identificadas nos experimentos com o motor, tem-se na Figura 10 o gráfico do tipo mapa de cores do SWL em função da frequência e da velocidade de rotacional. Na Figura 11 tem-se o gráfico do tipo mapa de cores do SWL em função das ordens e da velocidade de rotacional. Conforme pode ser observado, na faixa de frequências entre 1000 Hz e 1500 Hz tem-se nitidamente, no mínimo, duas frequências naturais que estão sendo excitadas. Nas maiores velocidades rotacionais observam-se nitidamente no mínimo três ressonâncias entre 2000 Hz e 2750 Hz. Conforme será detalhado, nessas componentes de frequência atuam as excitações de origem magnética, identificadas como as ordens magnéticas do motor elétrico. Essas ordens correspondem aos múltiplos inteiros dos números de polos do rotor e de bobinas do estator (Souza [18]).

Da análise dos espectros da região crítica, compreendida na faixa de 892 RPM a 1017 RPM, tem-se que o aumento nos níveis de potência sonora resulta predominantemente da excitação relativa à segunda ordem magnética do estator (ordem 72) que excita uma frequência natural do estator próximo a 1170 Hz. Já na velocidade rotacional de 1558 RPM o aumento é resultante

da composição de dois efeitos. Primeiramente, em torno de 725 Hz a componente magnética fundamental de rotor (ordem 28) excita uma frequência natural do rotor. O segundo efeito é observado quando a segunda ordem magnética do estator (ordem 72) excita uma frequência natural do estator em torno de 1850 Hz.

Segundo Souza [19], o ruído do motor elétrico relativo às ordens magnéticas é predominante em relação ao ruído total radiado. Conforme Beranek e VÉR [10], esse comportamento é esperado para motores com potência inferior a 15 kW e que operam em velocidades rotacionais abaixo de 1500 RPM. Resultados similares aos apresentados Souza [19] foram encontrados nas regiões críticas analisadas.

Embora a máxima velocidade rotacional do teste seja 1600 RPM, o sistema de controle embarcado das lavadoras limita a velocidade rotacional máxima no ciclo de centrifugação para reduzir as amplitudes das forças resultantes do desbalanceamento da carga na lavadora. Para o modelo de lavadora em teste, esses valores normalmente são limitados a 1200 RPM no ciclo de centrifugação, por esse motivo adotou-se esse valor como base de referência para analisar o ruído do motor e da lavadora.

A Figura 12 mostra um gráfico do SWL em bandas de 1/3 de oitava do motor em 1200 RPM considerando a montagem na bancada de testes. Conforme pode ser observado, a energia do ruído do motor está distribuída em várias bandas. De forma geral, o ruído radiado pelo motor apresenta características similares as de fontes que radiam ruído de banda larga sobrepostas aos tons puros resultantes da excitação magnética. Dos gráficos anteriores do SWL global, verifica-se que em 1200 RPM o motor está fora da região crítica. Por meio das análises realizadas nas regiões críticas é nítida a predominância de componentes espectrais de maior energia em banda estreita, resultantes da excitação magnética do motor. Essas componentes de frequências consistem em múltiplos inteiros dos números de polos do rotor e bobinas do estator e correspondem às linhas inclinadas no diagrama da Figura 10, já na Figura 11 as ordens estão

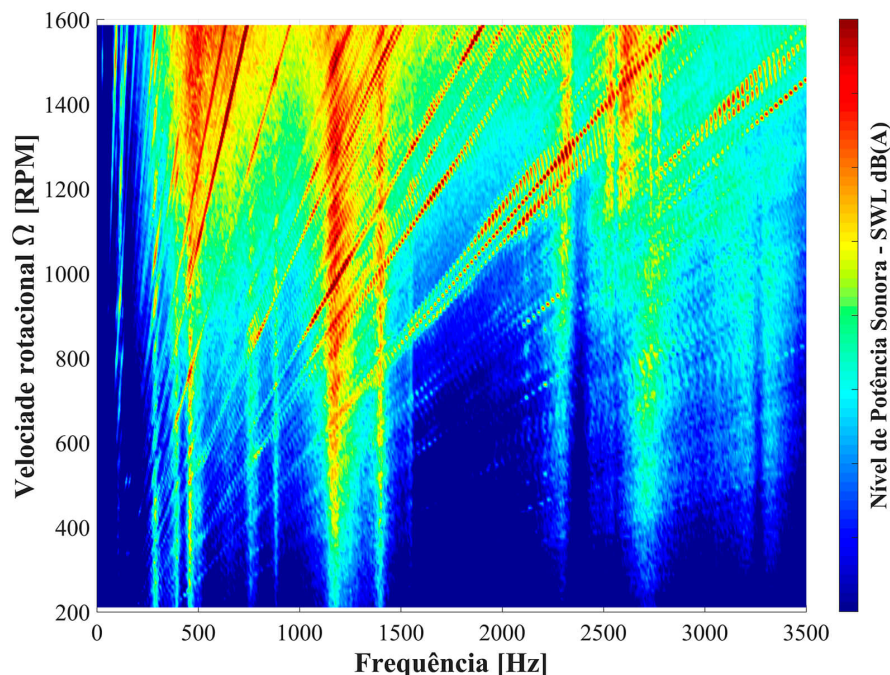


Figura 10: Mapa de cores do SWL em função da frequência e da velocidade rotacional do motor elétrico montado na bancada de testes (5 dB/divisão).

localizadas nas linhas verticais.

4.2 Lavadora de roupas

Esta seção descreve testes nos quais o motor elétrico foi fixado ao tanque da lavadora. Os experimentos foram desenvolvidos em um gabinete normal padrão e em um gabinete modificado. Diferentes configurações foram adotadas visando a caracterização aprimorada das fontes de ruído da lavadora; estas são apresentadas na Figura 13.

4.2.1 Configuração A

Trata-se do gabinete sem os painéis de enclausuramento, totalmente “aberto”, conforme Figura 13 (a). Os experimentos com o motor montado nesse gabinete modificado foram executados e o resultados obtidos para o SWL globais são mostrados na Figura 14, na qual também é apresentado o SWL global radiado pelo motor quando montado na bancada de testes. Na Figura 15 são comparados os espectros em bandas de 1/3 de oitava do SWL do motor em relação à lavadora com gabinete modificado na velocidade rotacional de 1200 RPM. A partir dos

dados apresentados, verifica-se que o tanque tem maior contribuição ao ruído radiado pela lavadora na faixa limitada a 1,6 kHz e, acima desse valor, há atenuação nos níveis de potência sonora radiada. Esse resultado é condizente com que foi encontrado no trabalho de Wang et al. [2].

Conforme pode ser observado, o SWL radiado pela lavadora com gabinete modificado é superior ao SWL radiado pelo motor isoladamente. Esse efeito era esperado, tendo em vista que o motor transmite parcela da energia vibratória ao tanque e tambor. A área do tanque é consideravelmente maior que a área do motor; consequentemente, a capacidade de radiar energia sonora também será maior, especialmente nas baixas frequências (inferiores a 1,6 kHz).

4.2.2 Configuração B

Neste caso, com exceção à parte traseira, fez-se o isolamento do tanque da lavadora com uma espessa camada de material Sonex [17] (50 mm de espessura por placa, aproximadamente), conforme Figura 13 (b). Os resultados experimentais obtidos com essa configuração de monta-

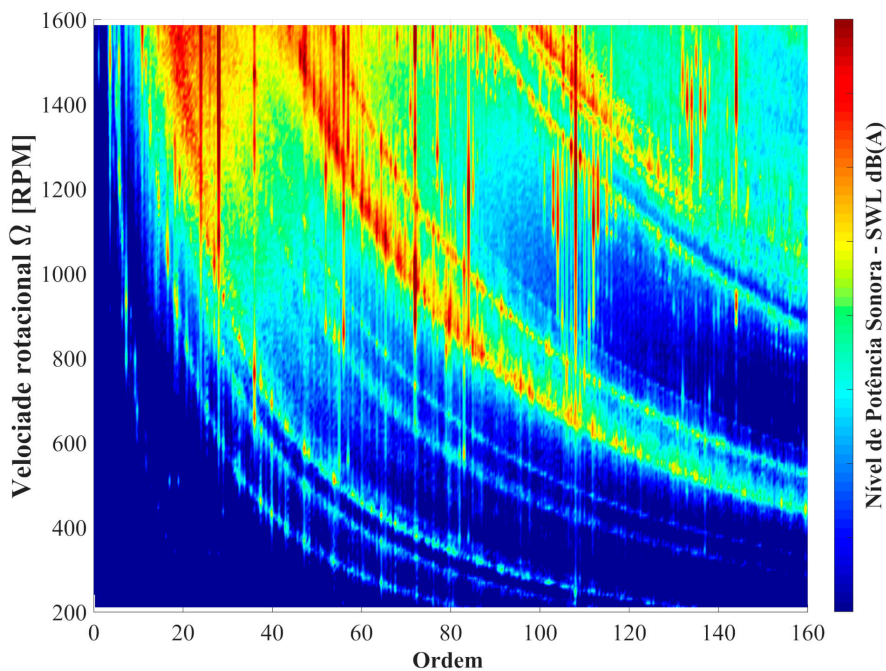


Figura 11: Mapa de cores do SWL em função da frequência e das ordens do motor elétrico montado na bancada de testes (5 dB/divisão).

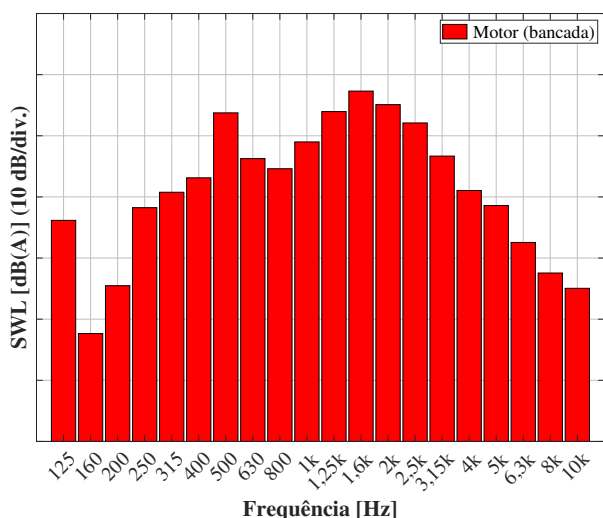


Figura 12: SWL do motor em bandas de 1/3 de oitava.

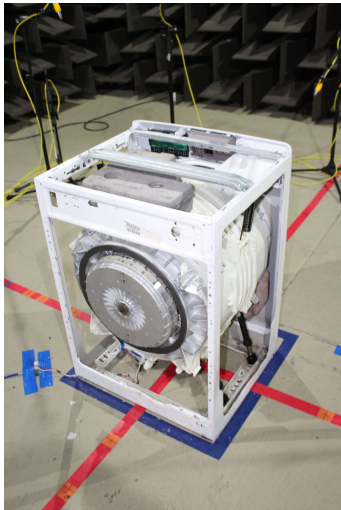
gem para os SWL globais são apresentados na Figura 16.

A partir da análise dos resultados apresentados, observa-se reduções de 1,0 dB a 2,5 dB no ruído global radiado entre as faixas de 700 RPM e 1400 RPM. Embora tenham sido utilizadas as camadas de material de elevada absorção sonora na tentativa isolar parcela da energia sonora radiada pelo tanque da lavadora, as atenuações observadas nos SWL globais foram pequenas.

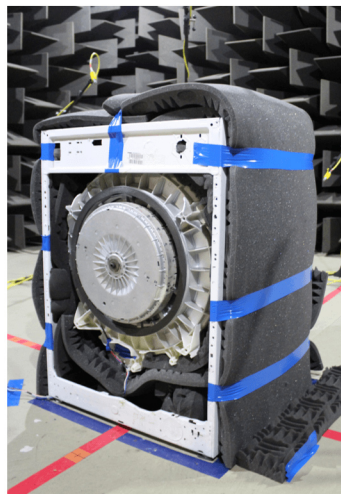
Por meio da análise comparativa dos resultados obtidos entre as Configurações A e B, verifica-se que o ruído do motor tem maior contribuição em relação ao valor do ruído global radiado pela lavadora.

4.2.3 Configuração C

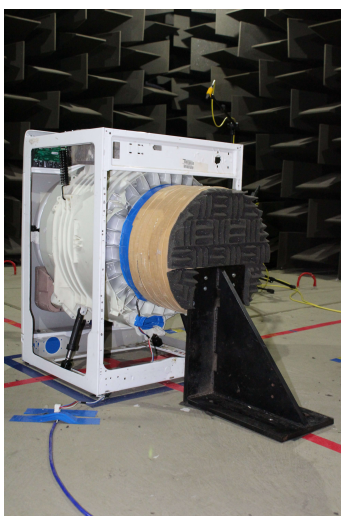
Tendo em vista que o isolamento do tanque, por si só, não garantiu adequada redução nos SWL da lavadora, e prosseguindo com o processo de investigação das fontes de ruído, optou-se por isolar o motor elétrico. O isolamento acústico do motor elétrico foi dado por meio de uma clausura circular fabricada em MDF com espessura dos segmentos constituintes de 18mm internamente selada com silicone. No interior desta clausura foi inserido material Sonex [17] de elevada absorção. Uma fita de borracha foi utilizada para reduzir a energia vibratória transmitida pelo tanque à clausura e para minimizar os vazamentos de ar entre a cavidade e o tanque da lavadora. Por fim, uma vez acoplada a cavidade acústica, fez-se o isolamento da união entre o tanque da lavadora e a clausura com o auxílio de uma fita de alta aderência. Essa



(a)



(b)



(c)

Figura 13: Configurações de montagem para testes da lavadora.

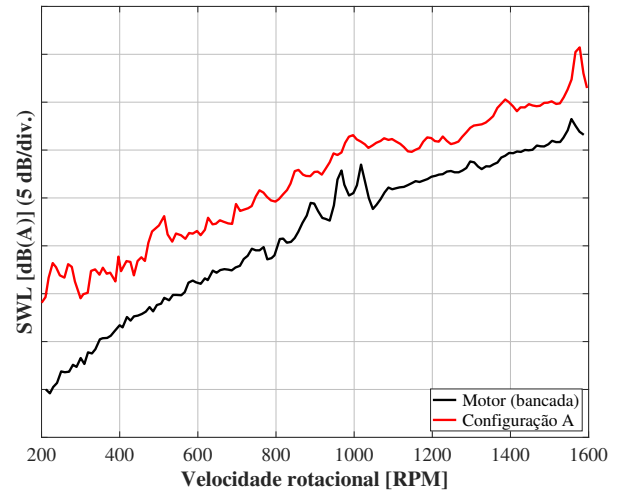


Figura 14: Resultados obtidos para a Configuração A e para o motor testado em bancada.

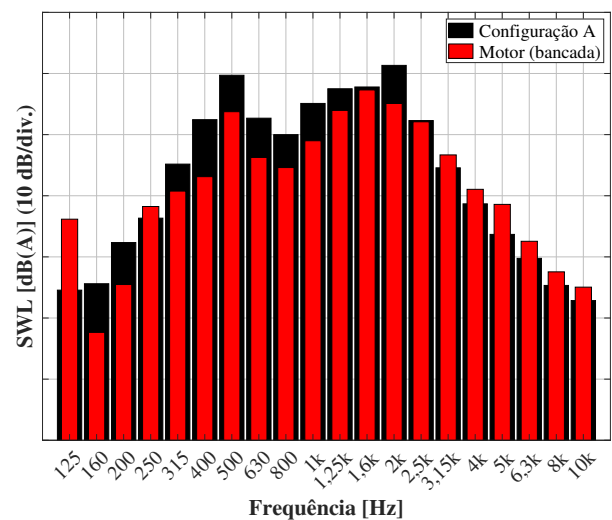


Figura 15: Comparação entre os SWL (1/3 oitava) do motor e do gabinete modificado.

configuração está apresentada na Figura 13 (c). Utilizou-se uma cantoneira de aço para o suporte da clausura. Entre a cantoneira e o piso da câmara foram inseridos calços de material elastomérico para reduzir a energia vibratória transmitida ao piso da câmara.

Os resultados obtidos com os experimentos acústicos para o motor enclausurado são apresentados na Figura 16. Observam-se reduções no SWL radiado pela lavadora de até 5 dB nas velocidades rotacionais inferiores a 900 RPM e, acima dessa velocidade, tem-se reduções de até 10 dB. Em uma análise comparativa, o enclausuramento do motor elétrico causa reduções significativamente maiores que o isolamento do tanque, descrito anteriormente. Portanto, em

termos dos valores globais do SWL, o motor elétrico radia uma parcela de energia acústica significativamente maior, se comparada à energia radiada pelo tanque da lavadora.

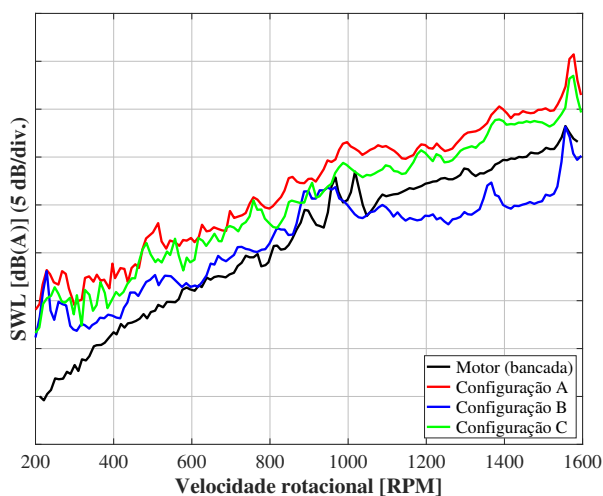


Figura 16: Resultados obtidos para a Configuração A, para a Configuração B, para a Configuração C e para o motor testado em bancada

De modo alternativo, além dos gráficos do SWL global, tem-se interesse em analisar os espectros de ruído da lavadora na condição de referência, ou seja, 1200 RPM. O gráfico da Figura 17 apresenta os espectros dos SWL em bandas de 1/3 de oitava referentes ao gabinete modificado, com o tanque isolado e com o motor isolado. Com base na análise dos espectros apresentados, conclui-se que o isolamento do motor reduziu significativamente as amplitudes das componentes de alta frequência. Por sua vez, o isolamento do tanque teve maior contribuição na faixa de 315 Hz a 1,6 kHz.

O estudo baseado na Configuração C demonstrou o potencial de redução nos SWL globais radiado pela lavadora. Embora o isolamento acústico do motor tenha levado à reduções significativas, deve-se destacar que em funções de limitações térmicas de aquecimento do rotor e do estator não se recomenda enclausurar o motor dentro de uma cavidade de pequenas dimensões. Atenuações do ruído radiado pelo motor poderiam ser obtidas pela adição de barreiras acústicas, construídas com material de elevada absorção sonora, entre o painel traseiro da lavadora e do tanque.

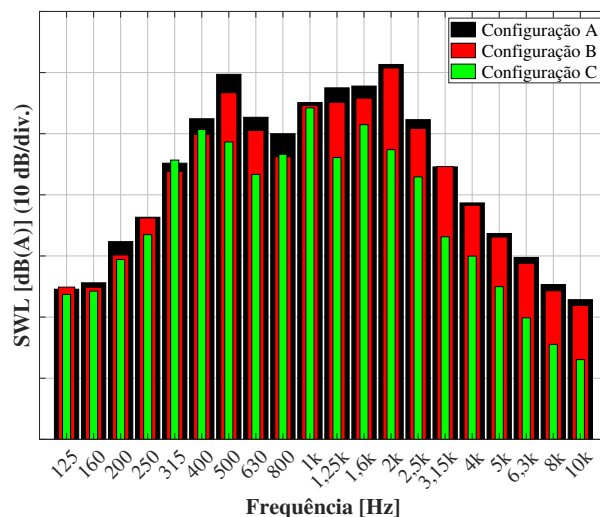


Figura 17: Comparação entre os SWL (1/3 oitava) dos gabinetes modificados.

4.2.4 Gabinete normal

Nesta seção, os SWL radiado pela lavadora com gabinete normal, sem fitas ou tratamento acústico (similar à Figura 5b), são comparados ao ruído radiado pelo gabinete modificado conforme Configuração A (Figura 13 (a)). Os resultados obtidos para o SWL global da lavadora com gabinete normal e com o gabinete modificado são apresentados na Figura 18.

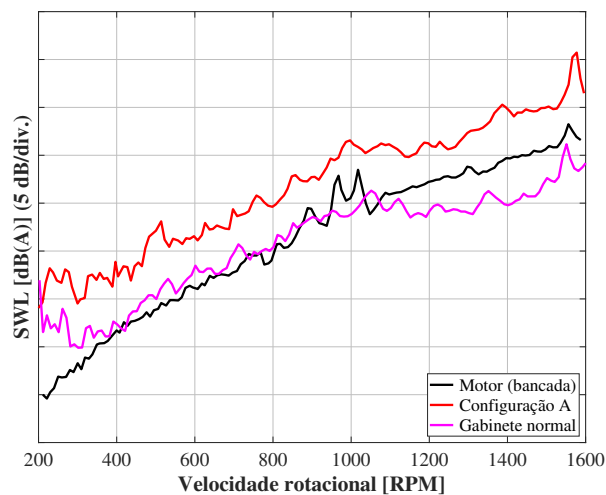


Figura 18: Resultados obtidos para a Configuração A, para a lavadora com gabinete normal e para o motor testado em bancada.

Conforme descrito na seção anterior, o motor elétrico é a principal fonte de ruído da lavadora de roupas. No entanto, o ruído radiado pelo conjunto motor e tanque é maior que o ruído radiado somente pelo motor. Considerando que o gabinete da lavadora de roupas envolve seus

elementos internos, é esperado que o gabinete enclausure estas fontes de ruído, reduzindo o ruído total radiado. Nos gráficos das Figuras 19 e 20, são comparados, respectivamente, os espectros do SWL em bandas de 1/3 de oitava e em banda estreita da Configuração A e da lavadora com gabinete normal na velocidade rotacional de referência. De modo consistente, são observadas atenuações superiores a 10 dB nas frequências superiores a 1 kHz, região na qual a clausura do gabinete da lavadora é mais efetiva na atenuação do ruído radiado pelo conjunto motor e tanque. Nas regiões de médias frequências, entre 500 Hz e 1 kHz, ocorrem atenuações do SWL entre 4 dB e 7 dB. Nas baixas frequências, especificamente próximo a 125 Hz se observam ampliações de até 10 dB no SWL. Tais ampliações resultam da menor capacidade de atenuação do gabinete nas baixas frequências e pela influência da maior eficiência de radiação sonora dos painéis do gabinete da lavadora.

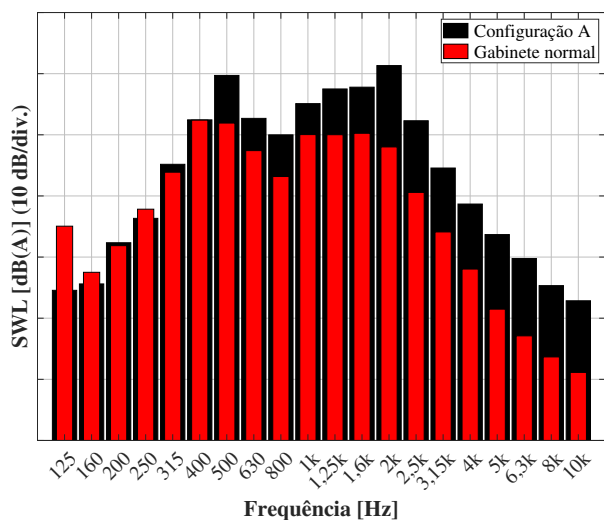


Figura 19: Comparação entre os SWL (1/3 de oitava) do gabinete modificado (Configuração A) em relação à lavadora com gabinete normal.

4.3 Tratamento acústico do gabinete

O ruído radiado pela lavadora objeto de estudo do presente trabalho foi considerado elevado, tendo em vista que até 950 RPM as diferenças entre os SWL globais do motor e da lavadora com gabinete normal eram pequenas. O trabalho apresentado por Liu et al. [3] demonstrou maiores níveis de intensidade sonora localiza-

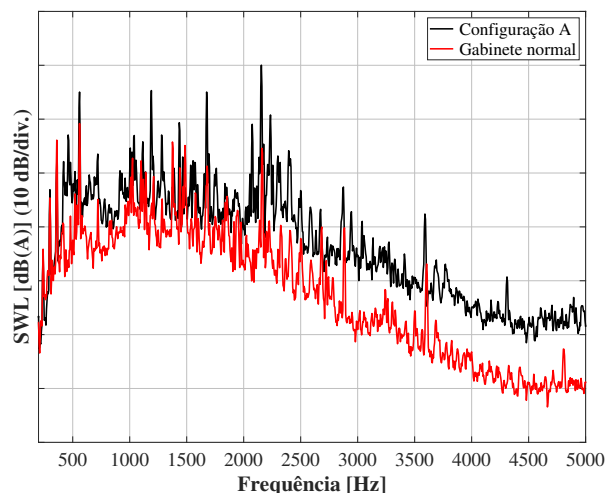


Figura 20: Comparação dos espectros do SWL do gabinete modificado (Configuração A) em relação à lavadora com gabinete normal.

dos na parte inferior do gabinete da lavadora. Os maiores níveis nessa região indicam uma deficiência à atenuação do gabinete em relação ao ruído radiado pelos elementos internos da lavadora. Diante deste fato e em busca da atenuação do ruído radiado foram realizadas modificações no gabinete da lavadora. Primeiramente, foram vedadas as aberturas do gabinete (Configuração D), resultantes do encaixe de um ou mais painéis, por meio de fitas de alta aderência. Após fez-se a vedação das aberturas da região inferior do gabinete (Configuração E) com material elevada absorção sonora (mesmo utilizado no isolamento do tanque, Configuração B).

A vedação inferior é realizada na região próxima do gabinete da lavadora ao piso da câmara e não se prolonga ao interior do gabinete. Na Figura 21 é apresentada uma foto registrada durante a preparação dos experimentos acústicos, sendo possível visualizar nitidamente as fitas utilizadas para vedar as aberturas do gabinete e o material de absorção utilizado na vedação inferior.

Para melhor compreender a contribuição de cada modificação, analisaram-se os efeitos da vedação das aberturas do gabinete separadamente e também em conjunto (Configuração F). Os resultados obtidos para cada configuração de vedação são mostrados no gráfico da Figura 22. Na Figura 23 são apresentados os espectros em bandas de 1/3 de oitava obtidos na condição

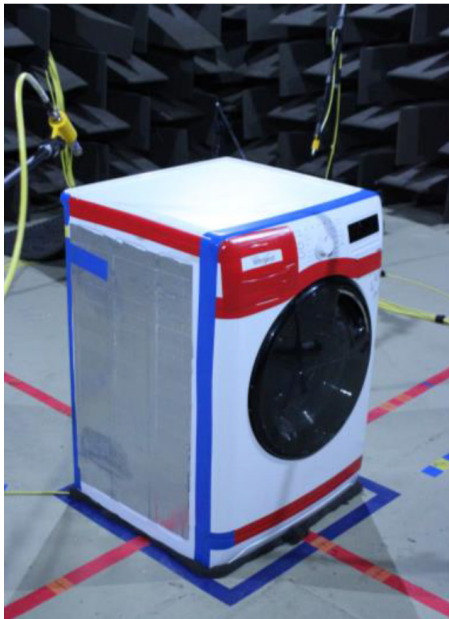


Figura 21: Foto da lavadora com as aberturas do gabinete isoladas por fitas e abertura inferior isolada por material de elevada absorção sonora.

operacional de referência com a lavadora normal, com a vedação das aberturas dos painéis (Configuração D) e vedação da abertura inferior do gabinete (Configuração E).

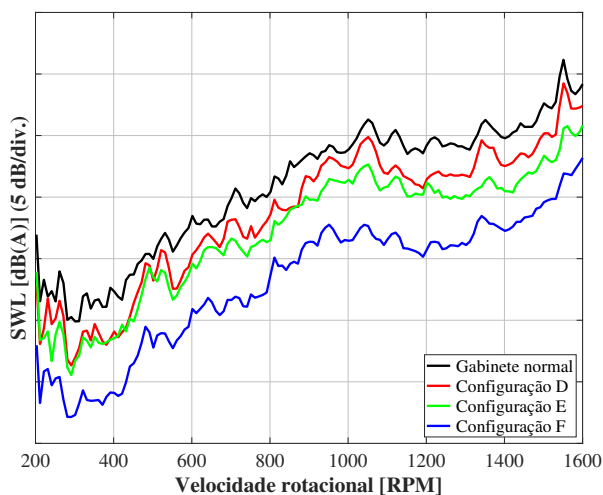


Figura 22: Resultados obtidos para os SWL globais para a lavadora com gabinete normal e após o tratamento acústico do gabinete da lavadora.

A análise dos dados processados permite concluir que reduções de até 3 dB foram obtidas considerando a vedação das aberturas do gabinete (Configuração D), e próximas a 4 dB, considerando a vedação inferior do gabinete (Configuração E). Em torno de 1370 RPM as diferenças observadas entre os resultados obtidos com o gabinete vedado por fitas em relação

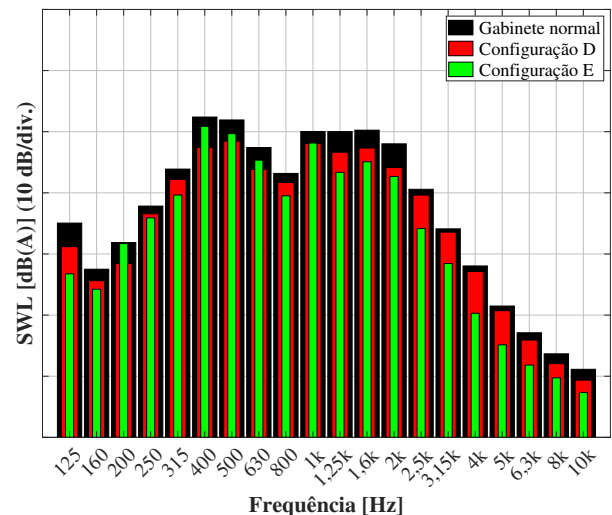


Figura 23: Resultados obtidos para os SWL em bandas de 1/3 de oitava em 1200 RPPM após o tratamento acústico do gabinete da lavadora.

ao gabinete com vedação inferior são da ordem de 3,2 dB. Nas demais regiões as mesmas diferenças são inferiores a 2 dB. Analisando-se os espectros da Figura 23, observa-se que as reduções nos SWL causadas pela vedação das aberturas do gabinete estão concentradas nas médias e baixas frequências. Por sua vez, as reduções originadas da vedação na região inferior do gabinete são mais evidentes nas regiões das médias e altas frequências.

Os resultados obtidos para os SWL globais da lavadora com vedação nas aberturas dos painéis e na parte inferior do gabinete indicam que as melhorias no isolamento acústico do gabinete da lavadora se mostraram eficazes. De modo geral, obtiveram-se reduções entre 6 dB e 8 dB em toda faixa operacional da lavadora. Vale destacar que atenuações da ordem de 7,2 dB haviam sido reportadas no estudo apresentado por Barpanda et al. [1]. Considerando os níveis das atenuações obtidas, é evidente o grande potencial em termos de redução do ruído radiado pela lavadora, desde que seja melhorado o enclausuramento dos componentes internos da lavadora.

Nas Figuras 24 e 25 são comparados os espectros em banda de terço de oitava e banda estreita, respectivamente, obtidos para a lavadora com gabinete normal em relação à lavadora com gabinete tratado acusticamente (Configuração F). Comparando-se os espectros proces-

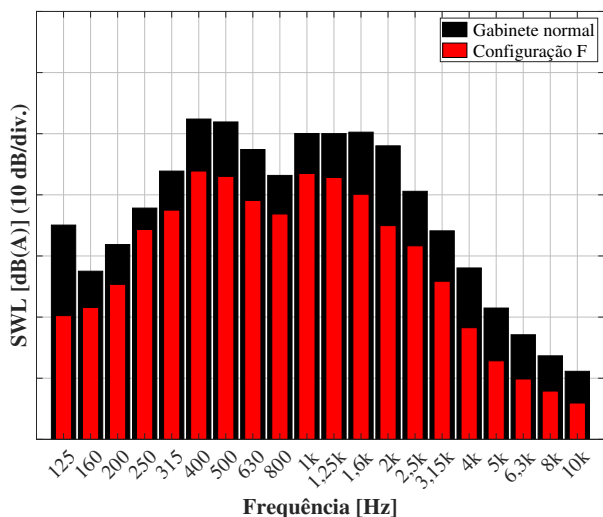


Figura 24: Espectros dos SWL em bandas de 1/3 de oitava em 1200 RPPM da lavadora com gabinete normal em relação ao gabinete com isolamento acústico aprimorado.

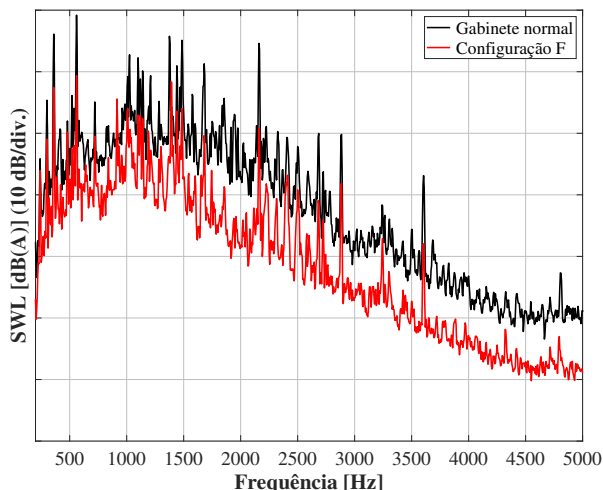


Figura 25: Espectros dos SWL em 1200 RPPM da lavadora com gabinete normal em relação ao gabinete com isolamento acústico aprimorado.

sados obtém-se que as atenuações ocorrem consistentemente ao longo de toda faixa de frequências analisada, inclusive nas componentes tonais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram realizados experimentos acústicos visando caracterizar a contribuição do ruído radiado pelo motor, tanque e gabinete da lavadora. Como resultado dessas análises, ficou evidente que o motor é a principal fonte de ruído.

O motor, que é acoplado ao tanque e ao tam-

bor da lavadora, é uma fonte ativa de vibrações e ruído. Uma parcela da energia vibratória do motor é transmitida aos outros componentes da lavadora através desses acoplamentos. Como resultado, esses componentes passam a vibrar passivamente, aumentando o SWL radiado. A análise dos resultados obtidos permite concluir que o tanque tem maior contribuição no ruído de baixa frequência (menor que 1,6 kHz). Por sua vez, o motor tem maior contribuição no ruído de alta frequência (maior que 1 kHz), em especial, nas frequências relativas às ordens magnéticas principais, que correspondem aos múltiplos do número de polos do rotor e de bobinas do estator.

Com base nos testes realizados com a lavadora, observou-se que o gabinete proporciona, nas velocidades rotacionais inferiores a 950 RPM, atenuações da ordem de 5 dB no ruído global radiado pelos componentes internos. Nas velocidades rotacionais superiores a 950 RPM as atenuações do ruído global são da ordem de 10 dB. As maiores atenuações resultantes do enclausuramento dos componentes internos da lavadora pelo gabinete são observadas nas frequências superiores a 1,25 kHz, em que predomina o ruído do motor. Nas baixas frequências o gabinete proporciona menor atenuação.

Em síntese, o enclausuramento dos elementos internos, motor e tanque, reduz consistentemente o SWL radiado pela lavadora, entretanto, uma atenção especial deve ser dada às aberturas dos elementos que compõem o gabinete da lavadora. A energia acústica tende a se propagar por aberturas e frestas do gabinete, reduzindo os níveis de atenuação proporcionados pela clausura, conseqüentemente um produto potencialmente mais ruidoso do ponto de vista do usuário.

REFERÊNCIAS

1. BARPANDA, D.; TUDOR, J. M. Solutions-based approach for reduction noise in washing machines. In: *27th International Modal Analysis Conference*. Michigan: [s.n.], 2009. Disponível em: <http://www.sandv.com/downloads/0911barp.pdf>.

2. WANG, S.; NERSE, C.; KIM, H. W. Vibroacoustic noise analysis of a washing machine. In: SIT, E. Wee; WALBER, C.; WALTER, P.; SEIDLITZ, S. (Ed.). *Sensors and Instrumentation, Volume 5*. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 47–53. ISBN 978-3319549866. doi: [10.1007/978-3-319-54987-3_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54987-3_6).
3. LIU, Bin; FENG, Tao; WU, Xue; LI, Nan. Noise radiation characteristics of the washing machine based on sound intensity measurement. In: *Advanced Composite Materials*. [S.l.]: Trans Tech Publications Ltd, 2012. (Advanced Materials Research, v. 482), p. 1406–1409. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.1406](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.482-484.1406).
4. PARIS, J. L.; TABUENCA, B. S. Acoustic analysis of the drainage cycle in a washing machine. In: *Dyna*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
5. WHIRLPOOL Washing Machines Catalogue. Disponível em: http://www.whirlpool.co.uk/digitalassets/Picture/web2000x2000/WWDC-8220-1_859203515010_2000x2000.png. Acesso em: 22 de maio de 2015.
6. UK Whitegoods: Direct drive versus belt-pulley drive washing machines. Disponível em: <http://www.ukwhitegoods.co.uk/images/articles/lg-direct-drive-vs-belt-and-pulley.jpg>. Acesso em: 22 de maio de 2015.
7. BRANDT, Anders. *Noise and vibrations analysis: signal analysis and experimental procedures*. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
8. GADE, S.; TUDOR, J. M.; KONSTATIN-HANSEN, H.; WISMER, N. *Order Tracking Analysis (Technical Review)*. Denmark, 1995. N. 2. Disponível em: <https://www.bksv.com/media/doc/bv0047.pdf>.
9. GIERAS, J. F.; WANG, C.; LAI, J. C. *Noise of Polyphase Electric Motors (Electrical and Computer Engineering)*. USA: Taylor & Francis Group, 2006.
10. BERANEK, Leo L.; VER, I. *Noise and Vibration Control Engineering*. Massachusetts: Wiley Interscience, 1992. 709–733 p. ISBN 978-0471449423.
11. CHEN, H. S.; TSAI, M. C. Design considerations of electromagnetic force in a direct drive permanent magnet brushless motor. *Journal of Applied Physics*, v. 103, n. 7, p. 07F117–1–07F117–3(3), 2008. doi: [10.1063/1.2835480](https://doi.org/10.1063/1.2835480).
12. ZUO, Shuguang; LIN, Fu; WU, Xudong. Noise analysis, calculation, and reduction of external rotor permanent-magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 62, n. 10, p. 6204–6212, 2015. doi: [10.1109/TIE.2015.2426135](https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2426135).
13. KROTSCH, Jens; PIEPENBREIER, Bernhard. Radial forces in external rotor permanent magnet synchronous motors with non-overlapping windings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 59, n. 5, p. 2267–2276, 2012. doi: [10.1109/TIE.2011.2151827](https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2151827).
14. ISO 3745:2012. *Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure— Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms*. [S.l.], 2012.
15. GOMES, Carlos Henrique. *Caracterização do isolamento acústico de painéis metálicos, utilizando Análise Estatística Energética (SEA)*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102850>.
16. ISO 3744:2010 – International Organization for Standardization. *Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane*. 2010. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/52055.html>.
17. PLACAS SONEX ILLTEC 3D – PYRAMID. Disponível em: <https://owa.com.br/produutos/sonex-3d-pyramid/>. Acesso em: 27 de Julho de 2021.
18. SOUZA, Marcos Ricardo. *Modelo Vibroacústico de Motores Elétricos de Ímãs Per-*

manentes para Lavadoras. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/129409>.

19. SOUZA, Marcos Ricardo. *Identificação das Principais Ordens Harmônicas num Motor Elétrico e suas Contribuições para o Ruído*. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2012.