

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

Cleber Lucena Torres

**INVESTIGAÇÃO INICIAL DA ESTIMATIVA
DE VAZÃO DE UMA TORNEIRA RESIDENCIAL
VIA VIBRAÇÃO MEDIDA NA VÁLVULA
REGISTRO**

Bauru

2022

Cleber Lucena Torres

**INVESTIGAÇÃO INICIAL DA ESTIMATIVA
DE VAZÃO DE UMA TORNEIRA RESIDENCIAL
VIA VIBRAÇÃO MEDIDA NA VÁLVULA
REGISTRO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Projetos Mecânicos, como parte dos requisitos necessários à obtenção de Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício César Lobato de Almeida

Bauru

2022

Torres, Cleber Lucena

Investigação inicial da estimativa de vazão de uma torneira residencial via vibração medida na válvula registro / Cleber Lucena Torres, 2022
80 p. : il., tabs.

Orientador: Fabrício César Lobato de Almeida

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2022

1. Medição de Vazão. 2. Vibração de Válvulas. 3. Vibração de Torneiras. 4. Técnicas não Intrusivas de Medição de Vazão.
5. Decomposição do Modo Variacional. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CLEBER LUCENA TORRES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de agosto do ano de 2022, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de CLEBER LUCENA TORRES, intitulada **INVESTIGAÇÃO DA ESTIMATIVA DE CONSUMO DE ÁGUA EM RESIDÊNCIAS VIA VIBRAÇÃO DE VÁLVULAS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã - UNESP, Prof. Dr. MARCOS SILVEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ALFREDO BONINI NETO (Participação Virtual) do(a) Coordenadoria do Curso de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã - UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO: **CLEBER LUCENA TORRES**

DE: "INVESTIGAÇÃO DA ESTIMATIVA DE CONSUMO DE ÁGUA EM RESIDÊNCIAS VIA VIBRAÇÃO DE VÁLVULAS"

PARA:

INVESTIGAÇÃO INICIAL DA ESTIMATIVA DE VAZÃO DE UMA TORNEIRA RESIDENCIAL VIA VIBRAÇÃO MEDIDA NA VÁLVULA REGISTRO

Bauru, 04 de agosto de 2022.



Prof. Dr. Fabrício César Lobato de Almeida
Orientador

*Dedico este trabalho à minha querida e amada
esposa Lorena Magalhães.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por iluminar meus pensamentos e me permitir alcançar mais esta conquista.

À minha esposa Lorena Magalhães por ser minha maior incentivadora, pelo apoio dado ao longo de todo o trabalho, pela parceira, dicas e orientações sempre precisas, pela paciência e escuta ativa nos momentos mais difíceis, por suportar minha ausência e ainda assim sempre estar com sorriso no rosto e acima de tudo por seguir rente, me amando.

Aos meus pais, minha querida irmã, cunhado e sobrinha por sempre acreditarem em mim e aos meus queridos sogros por todo incentivo, apoio e orientações.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabrício César Lobato de Almeida, por ter acreditado em mim, por toda orientação, apoio e incentivos para a elaboração deste trabalho, por todos os ensinamentos, por ter sempre se colocado à disposição, sem medir esforços e com muita humildade.

Aos professores, Dr. Paulo J. G. Paupitz e Dr. Marcos Silveira, por todos os ensinamentos durante as aulas e em todas as oportunidades e pelas orientações, sugestões e correções propostas no exame de qualificação e na defesa da dissertação. Agradeço também aos professores, Dr. Alfredo Bonini Neto e Dra. Camila P. C. Gabriel, que integraram a comissão examinadora para defesa da dissertação, pelas orientações, sugestões e correções propostas.

Aos amigos Pablo Ferreira e Maria Marinez pelo apoio, incentivo e por acreditarem em mim quando mais precisei, permitindo tornar possível este projeto.

Aos amigos que conheci durante o curso, Leandro Rodrigo de Oliveira e Matheus Prevelato de Andrade, pelas trocas de experiências, por toda parceria, apoio e incentivos.

Ao amigo Gabriel Biancolin Moimás por ter me ensinado tanto e ter sido tão importante nesta conquista, além de toda a parceria, apoio e incentivos.

A todos que fizeram parte desta jornada e que de certa forma fazem parte desta conquista.

A SABESP pelo apoio dado durante este projeto e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sob o número 88882.432819/2019-01, pelo suporte financeiro.

RESUMO

Atualmente, os métodos convencionais de medição de vazão são intrusivos, havendo a necessidade de instalação de medidores de vazão nas tubulações que transportam o fluido. Algumas investigações já foram conduzidas para desenvolver técnicas de medição de vazão não intrusivas, principalmente usando sinais vibroacústicos adquiridos diretamente na tubulação, onde a vibração induzida pelo escoamento pode ser utilizada para estimar a vazão. No entanto, tais técnicas são muito precisas para altos valores de vazão que estão relacionados ao nível de vibração, especialmente quando o escoamento é turbulento. Este não é o caso quando se considera a vibração do ruído de componentes geralmente encontrados em residências, como torneiras, onde o fluxo de água é muito menor do que nos casos industriais. Aqui, para ruído gerado pela passagem de água pela torneira, a vibração induzida é medida em uma válvula do tipo registro. Os sinais de vibração adquiridos, para diferentes vazões da torneira, são analisados por meio do processamento de sinais clássicos no domínio do tempo e no domínio da frequência, usando técnicas clássicas de vibração como *Root Mean Square* (RMS), Assimetria (*Skewness*), Curtose, Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density* - PSD) e Coerência, de forma a caracterizar o problema, verificar a influência de possíveis variações de pressão e vazão da rede de alimentação de água na residência onde se encontra o objeto de estudo, tanto para medições realizadas em pequenos intervalos de medições, quanto com medições realizadas em dias distintos, mantendo-se próximas, em ambos os casos, as condições de medições, para verificar a influência da localização (distância) da torneira ao ponto de medida (válvula), bem como, a influência do uso de acelerômetros com diferentes sensibilidades. Por fim, o método de Decomposição de Modo Variacional (*Variational Mode Decomposition* – VMD), associado a PSD, são então usados para fornecer uma estimativa das larguras de banda de frequência representativas da resposta de vibração da válvula, devido a excitação de ruído provocada pela passagem de água no mecanismo de abertura e fechamento da torneira. Um método é proposto, filtrando os sinais com as bandas de frequência determinadas para atenuar o ruído de fundo, calculando os valores RMS para estas bandas de frequência, assim como suas frequências centrais e frequências de pico. Verificou-se que o método proposto é eficaz para estimar a vazão das torneiras via vibração de válvulas em duas faixas distintas de vazão, faixa de baixa e alta vazão, atingindo um erro de estimativa, no geral, menor que 10% para a maioria das vazões estimadas. Não foi possível estimar as vazões para uma faixa intermediária de vazão, mas é possível dizer que se trata de vazão moderada em uma faixa de vazão específica. Além de estimar a vazão da torneira via vibração da válvula do tipo registro, os resultados desta pesquisa podem ser usados para outras aplicações, como, por exemplo, para detecção de vazamentos em tubulações e acessórios, uma vez que a energia vibratória relacionada a estes vazamentos se assemelha a energia vibratória de uma torneira em uso. Também é possível, talvez, aplicar nas indústrias, sendo uma alternativa viável de medição de vazão de baixo custo, não intrusiva e de fácil manutenção, quando comparado aos medidores existentes atualmente no mercado.

Palavras Chave: Medição de Vazão; Vibração de Válvulas; Vibração de Torneiras; Técnicas não Intrusivas de Medição de Vazão; Decomposição do Modo Variacional

ABSTRACT

Actually, conventional flow measurement methods are intrusive, and flow meters need to be installed in pipelines conveying fluid. Some investigations have already been conducted to develop non-intrusive flow measurement techniques, mainly via using vibroacoustic signals acquired straight on the pipe, where the flow induced vibration can be used to estimate the flow rate. However, such techniques are very accurate for high flow rate values which are related to the level of vibration specially when the flow is turbulent. This is not the case when considering water consumption in ordinary residential houses, such as via using a tap, where the vibration associated with the noise induced via the water flow is much smaller than for industrial cases. Hence, for the tap noise, the induced vibration is measured in a register valve. The vibration signals acquired for different flow rates of the tap are analyzed through classic signal processing techniques in the time domain and in the frequency domain, such as the Root Mean Square (RMS), Skewness, Kurtosis, Power Spectral Density (PSD) and Coherence, in order to characterize the problem, verify the influence of possible variations in pressure and flow rate of the water supply network in the residence where the object of study is located, both for measurements carried out in small time intervals between them, as well as with measurements carried out on different days, keeping similar measurement conditions in both cases, to verify the influence of the location (distance) from the tap to the measurement point (valve) and the results when accelerometers with different sensitivities are used. Besides, the Variational Mode Decomposition (VMD) method, associated with PSD, are then used to provide an estimate of frequency bandwidths representative of the valve's vibration response, due to the noise excitation caused by the passage of water in the opening and closing mechanism of the tap. A method is proposed, filtering the signals with the frequency bands determined to attenuate the background noise, calculating the RMS values for these frequency bands, as well as their central and peak frequencies. It was verified that the proposed method is effective in estimating the flow rate of the tap via valve vibration in two different flow ranges, low and high flow range, reaching an estimation error, in general, less than 10% for most of the estimated flows. It was not possible to estimate the flows rate for an intermediate flow range, but it is possible to say that it is a moderate flow in a specific flow range. In addition to estimating the flow rate of the tap via measuring the response of the gate valve connected to the system, the results of this research can be used for other applications, such as, to detect leaks in pipes and fittings, since the vibratory energy related to these leaks resembles the vibrating energy of a tap when used. It is also possible, perhaps, to have an industrial application, so being a viable alternative with low cost, non-intrusive and easy maintenance flow measurement, when compared to the existing methods on the market.

Key Words: Flow Rate Estimation; Valve Noise; Tap Noise; Non-Intrusive Flow Measurement Techniques; Variational Mode Decomposition

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Ilustração do problema, diferenciando o que é proposto pelas pesquisas atuais do que está sendo proposto nesta pesquisa.....	22
Figura 2.1: Desenho esquemático do objeto de estudo utilizado nesse trabalho.....	27
Figura 2.2: Etapas do estudo.	28
Figura 2.3: Acelerômetros triaxiais fixados na haste da válvula, no corpo da válvula e na parede, próximo a válvula. A válvula em questão é a válvula instalada na posição V1, mostrada na Figura 2.1.	29
Figura 2.4: Medições com o acelerômetro fixado (a) na haste da válvula, (b) no corpo da válvula, (c) na parede, próximo a válvula considerando a posição V1. Linha vermelha: direção axial, linha preta: direção longitudinal e linha cinza: direção transversal. (d) Comparação entre as direções com maior amplitude para cada um dos acelerômetros fixados nestas posições. Linha azul: direção axial medida na haste, linha verde: direção axial medida no corpo e linha magenta: direção transversal medida na parede.	30
Figura 2.5: Esquema da metodologia aplicada no estudo.	32
Figura 2.6: Visão geral do layout de medição para os experimentos realizados.....	33
Figura 3.1: Valores RMS medidos na válvula V1 para cada vazão medida na torneira, sendo (a) e (b), respectivamente experimentos 1 e 2, torneira instalada em T1 e (c) e (d), respectivamente experimentos 3 e 4, torneira instalada em T2. Todas as medições com acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g.	37
Figura 3.2: Valores RMS, Assimetria e Curtose dos sinais medidos na válvula V1, para cada uma das vazões medidas na torneira instalada em T1, além do ruído de fundo, sendo, respectivamente (a), (b) e (c) experimento 1 e (d), (e) e (f) experimento 2. Todas as medições com acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g.	39
Figura 3.3: Comportamento vibracional no domínio do tempo dos sinais medidos na válvula V1, para as vazões (a) 0,3 m ³ /h, (b) 0,65m ³ /h e (c) 0,85 m ³ /h medidas na torneira instalada em T1, experimentos 1 e 2. Todas as medições com acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g.....	40
Figura 3.4: Medições com acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g quando a torneira está em (a) T1 e em (b) T2, respectivamente experimentos 2 e 4.	41
Figura 3.5: Análise do comportamento no domínio do tempo, do sinal de vibração da válvula instalada em V1, para as três vazões medidas em cada faixa de vazão, quando a torneira estava instalada em (a) T1 e em (b) T2, respectivamente experimentos 2 e 4. Medições com acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g.	42

- Figura 3.6: Análise do comportamento no domínio da frequência, do sinal de vibração da válvula instalada em V1, para as três vazões medidas em cada faixa de vazão, quando a torneira estava instalada em T1 e em T2, sendo as faixas de vazões (a) 0,05 m³/h, (b) 0,65 m³/h e (c) 1,25 m³/h, experimento 2 e (d) 0,05 m³/h, (e) 0,65 m³/h e (f) 1,3 m³/h experimento 4. 43
- Figura 3.7: Análise no domínio do tempo comparando os sinais medidos quando a torneira estava instalada em a (T1) e em b (T2), respectivamente entre os experimentos 1, linha preta e 2, linha cinza e entre os experimentos 3, linha preta e 4, linha cinza. Medições com acelerômetro com sensibilidade de 500 mV/g. 45
- Figura 3.8: Análise no domínio da frequência, comparando as PSD dos sinais medidos em dias distintos quando a torneira estava instalada em T1, experimentos 1 e 2, faixas de vazões (a) 0,05 m³/h, (b) 0,65 m³/h e (c) 1,25 m³/h e quando a torneira estava instalada em T2, experimentos 3 e 4, faixas de vazões (d) 0,05 m³/h, (e) 0,65 m³/h e (f) 1,3 m³/h. Medições com acelerômetro com sensibilidade de 500 mV/g. 46
- Figura 3.9: Análise no domínio do tempo, verificando a influência da sensibilidade do acelerômetro nos sinais medidos quando a torneira estava instalada em (a) T1 e em (b) T2, respectivamente experimentos 2 e 4. Linha preta, sinais medidos com o acelerômetro de 500 mV/g e linha cinza, sinais medidos com o acelerômetro de 10 mV/g. 47
- Figura 3.10: Análise no domínio da frequência, verificando a influência de medição com acelerômetros de diferentes sensibilidades, sendo comparadas as PSD dos sinais medidos simultaneamente na válvula V1 com acelerômetros de 10 e 500 mV/g, para as faixas de vazões (a) 0,05 m³/h, (b) 0,65 m³/h e (c) 1,25 m³/h, experimentos 2 e faixas de vazões (d) 0,05 m³/h, (e) 0,65 m³/h e (f) 1,3 m³/h, experimento 4. 48
- Figura 3.11: Análise no domínio do tempo para verificar a influência da distância entre o ponto de consumo e o ponto onde as medições de vibração são realizadas. Linha preta refere-se aos sinais medidos na válvula instalada em V1, quando a torneira estava instalada em T1, experimento 2 e a linha cinza refere-se aos sinais medidos na válvula instalada em V1, quando a torneira estava instalada em T2, experimento 4. 49
- Figura 3.12: Análise no domínio da frequência para verificar a influência da distância entre o ponto de consumo e o ponto onde as medições de vibração são realizadas, sendo: (a) 0,05 m³/h, (b) 0,65 m³/h e (c) 1,25 m³/h. 50
- Figura 3.13: Coerência entre os sinais medidos na válvula V1 e na torneira, quando esta estava instalada próxima da válvula, experimento 2, faixas de vazões (a) 0,05 m³/h, (b) 0,65 m³/h e (c) 1,25 m³/h e quando estava instalada distante da válvula, experimento 4, faixas de vazões (d) 0,05 m³/h, (e) 0,65 m³/h e (f) 1,3 m³/h. 51
- Figura 3.14: Caracterização do tipo de sinal através da análise da PSD dos sinais medidos na válvula V1, quando a torneira estava instalada próxima da válvula, experimento 2, faixas de vazões (a) 0,05 m³/h, (b) 0,65 m³/h e (c) 1,25 m³/h e quando estava

instalada distante da válvula, experimento 4, faixas de vazões (d) 0,05 m ³ /h, (e) 0,65 m ³ /h e (f) 1,3 m ³ /h.	52
Figura 4.1: Esquema de análise usando <i>Variational Mode Decomposition</i> (VMD).	57
Figura 4.2: PSD normalizado e a faixa de frequência calculada para os (a) dados brutos (linha sólida cinza), (b) IMF1 (linha pontilhada vermelha), (c) IMF2 (linha sólida preta), (d) IMF3 (linha tracejada azul), considerando as vazões de “i” 0,05 m ³ /h, “ii” 0,65 m ³ /h e “iii” 1,25 m ³ /h. Experimento 1, acelerômetro 500 mV/g.	60
Figura 4.3: PSD normalizado e a faixa de frequência calculada para os (a) dados brutos (linha sólida cinza), (b) IMF1 (linha pontilhada vermelha), (c) IMF2 (linha sólida preta), (d) IMF3 (linha tracejada azul), considerando as vazões de “i” 0,05 m ³ /h, “ii” 0,65 m ³ /h e “iii” 1,25 m ³ /h. Experimento 2, acelerômetro 500 mV/g.	61
Figura 4.4: Análise no domínio do tempo dada pelo (a) valor RMS e análise do domínio da frequência dada pela (b) frequência central das faixas de frequência calculadas e (c) pico da PSD dos dados brutos e dos modos. Linha sólida cinza refere-se aos dados brutos, Linha pontilhada vermelha refere-se ao IMF1, linha sólida preta, refere-se ao IMF2 e linha tracejada azul refere-se ao IMF3..	63
Figura 4.5: RMS dos dados brutos, linhas grossas e média aritmética dos valores RMS das IMF, linhas pontilhadas. Linhas cinzas, experimento 1 e linhas pretas, experimento 2.	65
Figura 4.6: Definição das faixas de vazão possíveis de serem estimadas a partir dos valores RMS dos dados brutos (linha preta) e dos valores da frequência de pico das PSDs da IMF2 (linha vermelha), para (a) experimento 1 e (b) experimento 2. Linha tracejada azul refere-se ao valor RMS de 0,315 m/s ² . Áreas sombreadas em verde representa as faixas de baixa e alta vazão e área sombreada em vermelho representa a faixa de vazão intermediária.	65
Figura 4.7: Ajuste das curvas a partir dos valores RMS dos dados brutos dos experimentos 1 (linha cinza) e 2 (linha preta), para a partir destas curvas, estimar a vazão da torneira via vibração da válvula. Linha azul grossa e linha azul fina, respectivamente, curvas polinomiais de grau 4 e 5 ajustadas para a região de baixa vazão e linha verde grossa e linha verde fina, respectivamente, curvas polinomiais de grau 1 (reta) e 2 ajustadas para a região de alta vazão. Linha tracejada azul refere-se ao valor RMS de 0,315 m/s ²	66
Figura 4.8: Erro percentual da estimativa da vazão a partir dos valores RMS dos dados brutos dos experimentos 1 e 2, usando as curvas ajustadas para esta finalidade. Região de baixa vazão: linha tracejada azul escuro, erros calculados para a curva ajustada polinomial de grau 4, linha tracejada azul claro, grau 5, ambas experimento 1, linha sólida azul escuro, grau 4, linha sólida azul claro, grau 5, ambas experimento 2. Região de alta vazão: linha tracejada verde escuro, erros calculados para a curva ajustada polinomial de grau 1, linha tracejada verde claro, grau 2, ambas experimento 1, linha sólida verde escuro, grau 1, linha sólida verde claro, grau 2, ambas experimento 2.	67

- Figura 4.9: Ajuste das curvas a partir dos valores das médias das RMS das IMFs dos experimentos 1 (linha cinza) e 2 (linha preta), para a partir destas curvas, estimar a vazão da torneira via vibração da válvula. Linha azul grossa e linha azul fina, respectivamente, curvas polinomiais de graus 4 e 5 ajustadas para a região de baixa vazão e linha verde grossa e linha verde fina, respectivamente, curvas polinomiais de graus 1 (reta) e 2 ajustadas para a região de alta vazão. Linha tracejada azul refere-se ao valor RMS de $0,150 \text{ m/s}^2$ 69
- Figura 4.10: Erro percentual da estimativa da vazão a partir dos valores das médias das RMS das IMFs dos experimentos 1 e 2, usando as curvas ajustadas para esta finalidade. Região de baixa vazão: linha tracejada azul escuro, erros calculados para a curva ajustada polinomial de grau 4, linha tracejada azul claro, grau 5, ambas experimento 1, linha sólida azul escuro, grau 4, linha sólida azul claro, grau 5, ambas experimento 2. Região de alta vazão: linha tracejada verde escuro, erros calculados para a curva ajustada polinomial de grau 1, linha tracejada verde claro, grau 2, ambas experimento 1, linha sólida verde escuro, grau 1, linha sólida verde claro, grau 2, ambas experimento 2..... 69
- Figura A.1: Medições com o acelerômetro fixado (a) na haste da válvula instalada em V1, (b) no corpo da válvula instalada em V1, (c) na parede, próximo a válvula instalada em V1, sendo linha vermelha direção axial, linha preta direção longitudinal e linha cinza direção transversal. E comparação entre as direções com maior amplitude de vibração de cada um dos acelerômetros fixados nestas posições (d), sendo linha azul a direção axial medida na haste, linha verde a direção axial medida no corpo e linha magenta a direção transversal medida na parede, próximo a válvula.. ... 79
- Figura A.2: Medições com o acelerômetro fixado (a) na haste da válvula instalada em V1, (b) no corpo da válvula instalada em V1, (c) na parede, próximo a válvula instalada em V1, sendo linha vermelha direção axial, linha preta direção longitudinal e linha cinza direção transversal. E comparação entre as direções com maior amplitude de vibração de cada um dos acelerômetros fixados nestas posições (d), sendo linha azul a direção axial medida na haste, linha verde a direção axial medida no corpo e linha magenta a direção transversal medida na parede, próximo a válvula.. ... 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Equipamentos usados nas medições dos experimentos.....	27
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno, do inglês <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
ADMM	Método dos Multiplicadores de Direção Alternativa, do inglês <i>Alternating Direction Method of Multipliers</i>
bgn	ruído de fundo, do inglês <i>background noise</i>
CILAMCE	Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia
CPSD	Densidade Espectral Cruzada de Potência, do inglês <i>Cross Power Spectral Density</i> (dB)
DC	Corrente Contínua, do inglês <i>Direct Current</i>
EEMD	Decomposição do Modo Empírico do Conjunto, do inglês <i>Ensemble Empirical Mode Decomposition</i>
EMD	Decomposição do Modo Empírico, do inglês <i>Empirical Mode Decomposition</i>
EWT	Transformada Wavelet Empírica, do inglês <i>Empirical Wavelet Transform</i>
FIV	Vibração Induzida pela Vazão, do inglês <i>Flow Induced Vibration</i>
IMF	Função do Modo Intrínseco, do inglês <i>Intrinsic Mode Functions</i>
IoT	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
MLP	Perceptron Multicamadas, do inglês <i>Multilayer Perceptron</i>
PANACM	Congresso Pan-Americano de Mecânica Computacional
PCB	PicoCoulomB (fabricante dos acelerômetros usados nos experimentos – PCB Piezotronics)
PSD	Densidade Espectral de Potência, do inglês <i>Power Spectral Density</i>
PVC	Policloreto de Vinila
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno, do Inglês <i>Polyvinylidene Fluoride</i>
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo, do inglês <i>Lead Zirconate Titanate</i>
RMS	Raiz Quadrada Média, do inglês <i>Root Mean Square</i>
VMD	Decomposição do Modo Variacional, do inglês <i>Variational Mode Decomposition</i>
WPA	Análise de Pacotes Wavelet, do inglês <i>Wavelet Packet Analysis</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

$A_k(t)$	envelope não negativo
$C_{xy}(f)$	coerência
e	número de Euler
E	esperança
f	frequência (Hz)
F^{-1}	transformada inversa de Fourier
j	unidade imaginária
k	Curtose, do inglês <i>kurtose</i>
\mathcal{L}	lagrangeano aumentado
s	Assimetria, do inglês <i>skewness</i>
$S_{xx}(f)$	densidade espectral de frequência do sinal temporal $x(t)$ (dB)
$S_{xy}(f)$	espectro cruzado de frequência (dB)
$S_{yy}(f)$	densidade espectral de frequência do sinal temporal $y(t)$ (dB)
T	tempo de aquisição (segundos)
$T1$	posição 1 de instalação das torneiras usadas nos experimentos
$T2$	posição 2 de instalação das torneiras usadas nos experimentos
$u_k(t)$	representa k componentes após a decomposição, também chamado de modos
$V1$	posição 1 de instalação da válvula registro usada nos experimentos
X	direção de medição X do acelerômetro triaxial usado nos experimentos
$x(t)$	série temporal (segundos)
$X(f)$	sinal no domínio da frequência (ms^{-2}/Hz)
Y	direção de medição Y do acelerômetro triaxial usado nos experimentos
Z	direção de medição Z do acelerômetro triaxial usado nos experimentos

Letras Gregas

α	fator de penalidade
$\delta(t)$	função de impulso

λ	multiplicador de Lagrange
μ	valor médio
π	proporção numérica definida pela relação entre o perímetro de uma circunferência e seu diâmetro
σ	variância do sinal
$\phi_k(t)$	fase não decrescente
ω_k	frequências centrais dos componentes após a decomposição

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Revisão bibliográfica	18
1.2	Objetivos	23
1.3	Estrutura da dissertação	24
CAPÍTULO 2	METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO	26
2.1	Introdução	26
2.2	Descrição do objeto de estudo e instrumentação utilizada	26
2.3	Definição do ponto e direção da medição	28
2.4	Metodologia	31
2.5	Conclusões	34
CAPÍTULO 3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA VIA PROCESSAMENTO DE SINAIS CLÁSSICOS	35
3.1	Introdução	35
3.2	Análise dos sinais via utilização de técnicas de vibração clássicas	35
3.3	Análise dos sinais no domínio do tempo e da frequência	40
3.4	Conclusões	52
CAPÍTULO 4	UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE DECOMPOSIÇÃO DO MODO VARIACIONAL	54
4.1	Introdução	54
4.2	Método de decomposição de modo variacional	54
4.3	Aplicação do método de decomposição do modo variacional e análise dos resultados	56
4.4	Conclusões	70
CAPÍTULO 5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
5.1	Conclusões	71
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	72
CAPÍTULO 6	TRABALHOS REALIZADOS	73
REFERÊNCIA		74
APÊNDICE A	– Análise dos experimentos realizados nos dias 21/07/2020 e 05/08/2020 para definição do ponto e direção da medição dos sinais de vibração na válvula instalada em v1	78

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A vazão é definida de forma sucinta como o volume ou massa de um fluido, que escoar por unidade de tempo, através da área transversal de um conduto (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010). Ela está presente em diversas aplicações, sendo extremamente importante sua medição, monitoramento e controle. Grande parte dos controles dos processos industriais estão baseados na medição de vazão, permitindo controlar o carregamento de um determinado produto, ter precisão de uma determinada mistura em um processo produtivo, dentre outros.

Nas residências, é importante ter o conhecimento do volume de água consumido mensalmente, determinando por consequência a taxa cobrada pelas concessionárias responsáveis pelo fornecimento de água. Sabendo-se a vazão de cada ponto de consumo, é possível obter indiretamente o volume. A maioria dos apartamentos antigos não possui hidrômetro individualizado, onde cada unidade paga uma parte igualitária pelo consumo geral do prédio ou condomínio, independentemente se uma unidade consome mais ou menos que outras unidades. Assim, a medição da vazão (e do volume) individual poderia tornar esse processo mais justo.

Muitos são os tipos de medidores de vazão existentes, porém a maioria dos medidores precisa ser instalada nas seções por onde escoam os fluidos, ou seja, a medição de vazão ocorre de forma intrusiva.

Portanto, esta pesquisa tem por objetivo encontrar uma maneira de realizar a estimativa de vazão de forma não intrusiva, baseando-se na vibração gerada pela passagem do fluido nas tubulações e seus acessórios, como as válvulas, por exemplo. Como são várias as aplicações de medição de vazão, para fins desta pesquisa será considerado como objeto de estudo a medição de vazão de água de uma torneira comumente encontradas em residências, via vibração da válvula principal do tipo gaveta (registro) pertencente ao sistema hidráulico. Entretanto, ressalta-se aqui, que as medições foram realizadas em uma única residência, utilizando uma torneira específica, dentre as mais comuns utilizadas. Como nas residências normalmente as tubulações estão embutidas nas paredes, acredita-se que a presente pesquisa poderá contribuir

via estudo inicial do uso da resposta vibratória do sistema, devido interação fluido-estrutura, para estimativa da vazão utilizando medições não invasivas.

A delimitação do objeto de estudo tem razões práticas que estão relacionadas com a facilidade de acesso, controle para realização das medições, simulação de faixas distintas de vazão na torneira, alteração do local de instalação da torneira para verificar a influência da distância da fonte excitadora (torneira) em relação ao ponto de medição (válvula) e algum controle de ruídos externos realizando medições em horários em que ruídos nas redondezas da residência sejam muito menores. Mesmo com todos estes controles, ainda prevalece a condição de ser uma aplicação de campo em situação real de uso, entretanto visando um estudo inicial onde tal controle precisa ser realizado para obtenção de resultados.

Os aprendizados obtidos nesta pesquisa poderão, talvez, ser extrapolados para demais aplicações, como na indústria, sendo uma alternativa viável de medição de vazão de baixo custo, não intrusiva e de fácil manutenção, quando comparado aos medidores existentes atualmente no mercado, além de não haver necessidade de interrupção do processo produtivo para instalação dos medidores. Detecção de vazamentos em tubulações e acessórios é outra possível aplicação usando os resultados obtidos nesta pesquisa, uma vez que a torneira em uso apresenta uma energia de vibração que se assemelha a energia vibratória relacionada a estes tipos de vazamentos. Portanto, encontrar uma alternativa para medição de vazão de forma não intrusiva via vibração de válvulas, que permita de forma mais fácil e com menor custo obter uma estimativa da vazão de fluidos transportados em tubulações, é a principal motivação para a realização desta pesquisa, justificando-se sua importância para a ciência e contribuição para a sociedade como um todo.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem diversos tipos de medidores de vazão, desde os mais simples, até medidores com maior tecnologia embarcada e com grandes capacidades de medição, como aqueles utilizados em processos industriais. Porém, todos eles são instalados nos condutos por onde os fluidos são transportados, de forma que o fluido escoe através do medidor, permitindo, assim, a medição da vazão, ou seja, tal medição é feita de maneira intrusiva.

Outras pesquisas já foram realizadas com o objetivo de se medir vazão de forma não intrusiva, considerando a vibração ou o sinal de ruído (som) causado nas tubulações com a passagem dos fluidos, mas todas elas consideraram medições destes sinais nas tubulações ou diretamente no ponto de consumo, como por exemplo, na torneira. Não foram encontradas

pesquisas precedentes de medições em acessórios instalados distantes dos pontos de consumo, como no caso das válvulas, que é o foco desta pesquisa. Tais estudos baseiam-se na vibração ou o sinal de ruído (som) que são transmitidas para a parede do tubo devido as flutuações de pressão induzidas pela passagem do fluido através das tubulações. Esse fenômeno é conhecido como *Flow Induced Vibration* (FIV).

Medeiros *et al.* (2016), apresentam um método de medição de vazão em tubulações transportando água. Neste estudo foram utilizados dois acelerômetros de diferentes sensibilidades, um com 10 mV/g e outro com 100 mV/g, sendo os mesmos acoplados na superfície externa da tubulação, na direção horizontal, em um trecho reto. Uma tubulação fabricada de aço carbono com diâmetro de 4 polegadas foi o objeto de estudo. Com o auxílio de uma bomba, foi aplicado no experimento uma faixa de vazão de 10 m³/h a 110 m³/h, sendo realizadas três medidas do sinal de vibração a cada 10 m³/h. Os sinais foram processados através do software Matlab, transformando-os do domínio do tempo para o domínio da frequência. A partir dos sinais de vibração medidos, foi calculado o desvio padrão de cada faixa de vazão, associando o desvio padrão a taxa de fluxo, caracterizando uma relação quadrática entre eles. As taxas de fluxo encontradas foram comparadas com as taxas de fluxo medidas por um medidor de vazão calibrado, onde foram calculadas as incertezas da medição. A incerteza para a vazão estimada é próxima da faixa necessária para a calibração dos medidores de vazão de água, sendo que quanto maior a vazão, menor a incerteza encontrada.

Göksu (2018), apresenta um método de medição de vazão de água residencial por análise acústica via Análise de Pacotes *Wavelet* (WPA). As medições dos sons foram feitas na tubulação, sem contato com a mesma, a uma distância de 1,0 cm da parede do tubo, usando um gravador digital anexo a um microfone. Uma tubulação de aço com diâmetro de 45 mm foi utilizada. Variou-se a vazão de 0,0159 a 0,0526 l/s em 11 etapas incrementais uniformes. Os sinais adquiridos foram decompostos em sub sinais de pacotes de *wavelets*. Na sequência, os recursos foram extraídos destes sub sinais usando entropia de norma e, por fim, estes recursos foram inseridos em um Perceptron Multicamada para Previsão (MLP). O MLP é uma rede de nós organizada em camadas, onde seu aprendizado de reprogramação é o ajuste dos parâmetros de peso para mapear a entrada, obtendo uma saída com erro mínimo, onde um erro relativo de 1,38% é alcançado.

Lannes, Gama e Bento (2018), apresentam um método de medição de vazão de água usando sensores piezoelétricos incorporados perto da superfície interna do próprio tubo (trecho reto e curvas), que medem as vibrações causadas pela passagem do fluido, devido ao fenômeno *Flow Induced Vibration* (FIV). Foi usado neste estudo uma cerâmica piezoelétrica de Titânio

de Zirconato de Chumbo (PZT) como sensor piezoelétrico, com 20 mm de comprimento, 6 mm de largura e 0,5 mm de espessura. Estes sensores poderiam ser incorporados aos tubos e curvas durante o processo de fabricação, porém nesta pesquisa eles foram incorporados através de um processo de usinagem, ficando os mesmos bem próximos da superfície interna (do tubo e das curvas). O experimento foi realizado em um circuito fechado de teste que possuía um reservatório de água, uma bomba centrífuga, uma seção de desvio com válvulas de controle de vazão operadas manualmente e dois rotômetros separados (medidor de vazão de área variável) para diferentes faixas de vazão (0,03 a 0,3 l/s e 0,3 a 3,0 l/s, respectivamente). Neste circuito foi instalado um tubo reto fabricado de acrílico, com 25,4 mm de diâmetro, 700 mm de comprimento e 3,2 mm de espessura, onde foi incorporado um sensor piezoelétrico PZT próximo a superfície interna do tubo, na direção vertical, e acoplado na superfície externa um acelerômetro piezoelétrico, também na direção vertical, com sensibilidade de 1000 mV/g. Também foram instalados neste circuito duas curvas de 90°, uma de raio curto ($r/d = 0,5$) e outra de raio longo ($r/d = 2,1$), ambas fabricadas de PVC, com diâmetro de 29 mm e espessura de 4 mm. Em ambas as curvas foram incorporados sensores piezoelétricos PZT próximos à superfície interna. Próximo a cada curva também foi acoplado um acelerômetro piezoelétrico, com sensibilidade de 1000 mV/g, sendo na curva de raio curto acoplado a montante e na curva de raio longo acoplado a jusante, ambos na direção vertical. Os acelerômetros piezoelétricos foram usados para comparar os sinais adquiridos em diferentes posições ao longo do tubo (trecho reto e curvas) com os sinais adquiridos pelos sensores piezoelétricos PZT incorporados próximo a superfície interna do tubo (trecho reto e curvas).

Os resultados demonstraram que os sensores piezoelétricos PZT possuem uma boa sensibilidade à taxa de vazão, sendo maior nas curvas, em especial na curva de raio curto, quando comparado com o trecho reto. Isso também foi observado com os acelerômetros piezoelétricos e a explicação é que na curva de raio curto ocorre maior turbulência, que induz uma maior vibração que é captada pelos sensores.

Medeiros *et al.* (2019), apresentam um método de medição de vazão de água usando o próprio tubo como um medidor intrínseco de vazão. Um tubo de PVDF – fluoreto de polivinilideno, que é um material cristalino, um polímero, de notável resistência química foi utilizado. Este polímero tem uma propriedade piezoelétrica obtida durante o processo de extrusão relacionado a sua fabricação, sem a necessidade de qualquer tratamento específico. Ou seja, é um tubo comum fabricado para compor sistemas de tubulação. O estudo foi realizado em um laboratório, onde o tubo de PVDF com 3.250 mm de comprimento, 55,08 mm de diâmetro e 3,41 mm de espessura foi instalado em um circuito fechado de teste que possuía um

reservatório de água com capacidade de 1.500 l, uma bomba alimentada por um inversor de frequência, permitindo aplicar uma faixa de vazão de 19 l/min a 115 l/min, variada em 11 etapas incrementais uniformes durante os testes e um medidor de vazão eletromagnético. Na superfície do tubo de PVDF foram acoplados eletrodos para adquirir o sinal de vibração medido pelo próprio tubo, causada pela passagem do fluido, devido ao fenômeno *Flow Induced Vibration* (FIV). Para comparação com o sinal gerado pelo tubo de PVDF, adicionalmente foram acoplados na superfície do mesmo, próximo dos eletrodos, acelerômetros piezoelétricos nas direções horizontal e vertical, ambos com mesma sensibilidade, 10,21 mV/g, e um filme de PVDF piezoelétrico, processado especificamente para ser um sensor. Os sinais foram processados através do software Matlab, transformando-os do domínio do tempo para o domínio da frequência e permitindo o cálculo dos desvios padrão dos dados, e a partir disso, estimar a taxa de vazão medida pelo sinal gerado pelo tubo PVDF, pelos acelerômetros e pelo filme PVDF.

Os resultados demonstraram que a taxa de vazão estimada pela medição de vibração usando o próprio tubo PVDF é muito próximo das taxas de vazão estimadas pela medição de vibração com os acelerômetros e com o filme de PVDF. A estimativa de incerteza das taxas de vazão pela medição de vibração usando o próprio tubo PVDF, demonstram um comportamento mais instável para faixas de vazão menores, com incerteza atingindo um valor expressivo de 14,5%, mas que diminui significativamente com o aumento da taxa de vazão.

Estes estudos apresentados e outros que seguem essa linha, forneceram conceitos e base científica para a condução desta pesquisa, que também apresenta uma alternativa de medição de vazão não intrusiva, porém via vibração de uma válvula instalada distante da fonte excitadora, que no caso é uma torneira, de uma residência, que possui vazão variando de 0,05 m³/h a 1,30 m³/h, bem abaixo das relatadas nos estudos acima citados. Portanto, tais sinais devem possuir menor energia de vibração além de atenuação dos sinais em função da distância entre o ponto de medição de vibração e o ponto de consumo (torneira), tornando a investigação mais desafiadora. A Figura 1.1 ilustra o problema em questão, diferenciando este dos demais estudos apresentados.

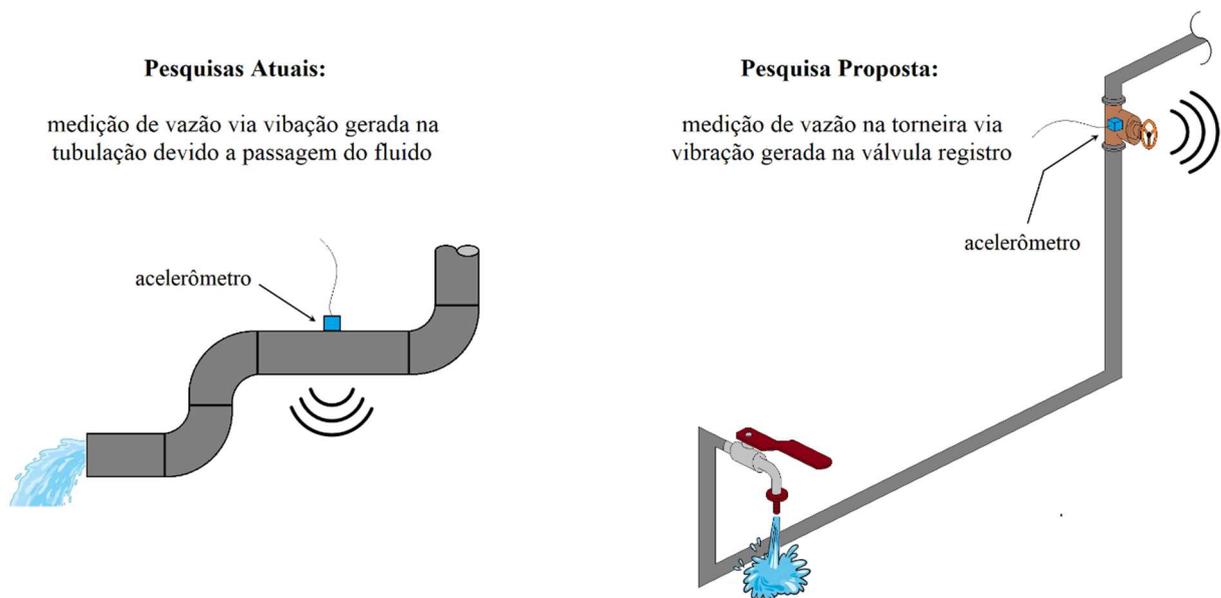


Figura 1.1: Ilustração do problema, diferenciando o que é proposto pelas pesquisas atuais do que está sendo proposto nesta pesquisa.

Ressalta-se também que o método aqui investigado utiliza acelerômetros piezoelétricos para medidas de vibração e os sinais adquiridos são processados no domínio do tempo e da frequência. O método desenvolvido por Dragomiretskiy e Zosso (2014), denominado *Variational Mode Decomposition* (VMD) também é utilizado em conjunto, como ferramenta de seleção automática de bandas de filtragem utilizadas no pré-processamento de sinais. Por fim, todo o processamento foi realizado no ambiente Matlab e serão detalhados ao decorrer dos próximos capítulos.

O VMD é um método de decomposição auto adaptativa por meio da construção e solução de problemas variacionais restritos. O processo de decomposição do VMD é feito por meio de solução ótima. O método decompõe um sinal em modos e determina suas frequências centrais e a largura de banda de cada componente, de modo que a soma dos modos reconstrói o sinal de entrada. Outros autores desenvolveram estudos propondo adaptações ao método desenvolvido por Dragomiretskiy e Zosso (2014), porém nesta pesquisa optou-se por seguir o método original.

Existe uma gama de literatura sobre VMD aplicada a máquinas rotativas e a problemas envolvendo detecção de vazamentos, que se assemelha ao objeto de estudo desse projeto. Xiao *et al.* (2016), Xiao *et al.* (2018) e Hao *et al.* (2019) utilizam o VMD para eliminação de ruído no sinal, objetivando com isso identificar vazamento em tubulação de gás natural. Diao *et al.* (2020) utilizam o VMD para redução do ruído de fundo dos sinais, objetivando identificar a existência e o tamanho do vazamento em dutos transportando água. Isham *et al.* (2018) utilizam o *Empirical Mode Decomposition* (EMD) e o VMD para decompôr sinais de vibração de

máquinas rotativas e, a partir dos modos, transformá-los para o domínio da frequência usando a transformada rápida de Fourier, permitindo, assim, identificar as frequências de falhas de rolamentos e engrenagens destas máquinas, comprovando que o desempenho do VMD foi melhor que o do EMD. Zheng e Zhang (2019) utilizam o VMD para eliminação de ruído no sinal de vazamento de fluxo magnético, permitindo, assim, desenvolver um dispositivo de teste não destrutivo para cabo de aço por excitação magnética não saturada, classificando fios quebrados. Sharma e Parey (2019) utilizam EMD e VMD para detectar vazamento em uma válvula de um compressor alternativo e comparam os resultados, comprovando que o desempenho do VMD foi melhor do que o do EMD. Bao *et al.* (2020) utilizam o VMD para extrair as características do domínio do tempo e do domínio da frequência de cada função modal do sinal de intrusão em sistemas de segurança perimetral de fibra óptica, melhorando a taxa de reconhecimento destes sinais de intrusão. Wang *et al.* (2015) utilizam o *Empirical Wavelet Transform* (EWT), *Ensemble Empirical Mode Decomposition* (EEMD), EMD e VMD, para identificar falhas por atrito entre o rotor e estator de um Rotor de Jeffcott, assim como para identificar falhas por atrito de uma turbina a gás, cuja unidade é composta pela turbina a gás de combustão, um ventilador, uma caixa de engrenagens, um motor, dois acoplamentos e vários rolamentos. O atrito existia entre o cubo (girando com o rotor da turbina) e a vedação a gás (elemento estático). A falha por atrito foi identificada através dos espectros dos sinais decompostos pelos métodos investigados, comprovando que o método VMD apresentou o melhor resultado.

Nos estudos supracitados, o VMD foi aplicado como uma alternativa para eliminar ruídos de sinais e/ou extrair características dos sinais decompostos para as mais diversas aplicações. Na presente pesquisa, este método será aplicado para determinar automaticamente a largura de banda de frequência e sua respectiva frequência central, onde a amplitude de vibração da válvula é mais sensível, repetindo este processo para diferentes valores de vazão medidos na torneira. Essa proposta objetiva identificar características que permitam determinar a vazão da torneira, via vibração da válvula.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral estimar a vazão de água de uma torneira encontrada comumente em residências, sendo as medições realizadas em uma residência específica, via vibração gerada na válvula do tipo gaveta (registro), devido a passagem do fluido pela fonte excitadora (torneira).

Algumas etapas deverão ser realizadas para o alcance do objetivo geral, sendo tais etapas os objetivos específicos da pesquisa, que são:

- Caracterizar o problema por meio do processamento de sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência;
- Verificar a influência nas medições de possíveis variações de pressão e vazão da rede de alimentação de água na residência, influência da localização da torneira ao ponto de medida e a influência de medir com acelerômetros de diferentes sensibilidades;
- Investigar o uso do método *Variational Mode Decomposition* (VMD), em conjunto com a Densidade Espectral de Potência (PSD), para definir as características que permitam estimar a vazão de uma torneira via medição da vibração de uma válvula registro do sistema hidráulico.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Os próximos capítulos deste trabalho estão organizados como se seguem:

O Capítulo 2 apresenta a metodologia utilizada na pesquisa e descreve o objeto de estudo onde as medições e simulações foram efetuadas, bem como, a instrumentação utilizada para realizar os experimentos e a definição do ponto e direção de medição dos sinais de vibração na válvula registro.

O Capítulo 3 usa as técnicas de vibração clássicas, por meio do processamento de sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência, para caracterizar o problema, buscando identificar características nos sinais analisados que permitam estimar a vazão de torneiras, de forma não intrusiva, via vibração de válvulas. É verificada a influência de possíveis variações de pressão e vazão da rede de alimentação de água na residência onde se encontra o objeto de estudo, tanto quando as medições são realizadas no mesmo dia, com pequenos intervalos de tempo entre elas, como quando as medições são realizadas em dias distintos, sendo, em ambos os casos, mantidas todas as condições de medições. É verificada a influência da distância entre o ponto de consumo (torneira) e o ponto de medição dos sinais de vibração (válvula). É verificada a influência de se medir com acelerômetros de diferentes sensibilidades.

O Capítulo 4 aplica o método VMD, juntamente com a PSD, para selecionar automaticamente faixas de frequência representativas da resposta de vibração da válvula do tipo registro, devido a excitação de ruído provocada pela passagem de água no mecanismo de abertura e fechamento da torneira, para a partir disso identificar características que permitam estimar a vazão da torneira, onde um método é proposto com esta finalidade.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões do estudo e fornece uma sugestão para trabalhos futuros como uma alternativa de continuidade desta pesquisa.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as atividades e trabalhos que foram realizados durante o projeto de pesquisa.

CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o objeto de estudo com suas principais características e dimensões, além da instrumentação utilizada durante os experimentos, será descrita a metodologia utilizada para realização dos experimentos. Em seguida será descrito como foi definido o ponto e direção de medição dos sinais de vibração na válvula, de maneira não intrusiva, sinais estes usados para estimativa da vazão de uma torneira.

2.2 DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO E INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

As medições foram realizadas em uma área residencial comum na cidade de Tupã, interior do Estado de São Paulo. O objetivo era obter condições reais semelhantes às encontradas em casas residenciais comuns, como ruído de fundo, sistemas de tubulação e características das torneiras e válvulas do tipo registro que são utilizadas para permitir o fluxo de água para o sistema de tubulação da casa e que geralmente controlam o abastecimento de água para diferentes cômodos, banheiros, torneiras e outros. O objeto de estudo está localizado na área externa da residência, mais especificamente na lavanderia.

A Figura 2.1 mostra um esquema para melhor visualização do objeto de estudo, onde as principais dimensões e identificações que serão usadas para descrição dos experimentos são enfatizadas.

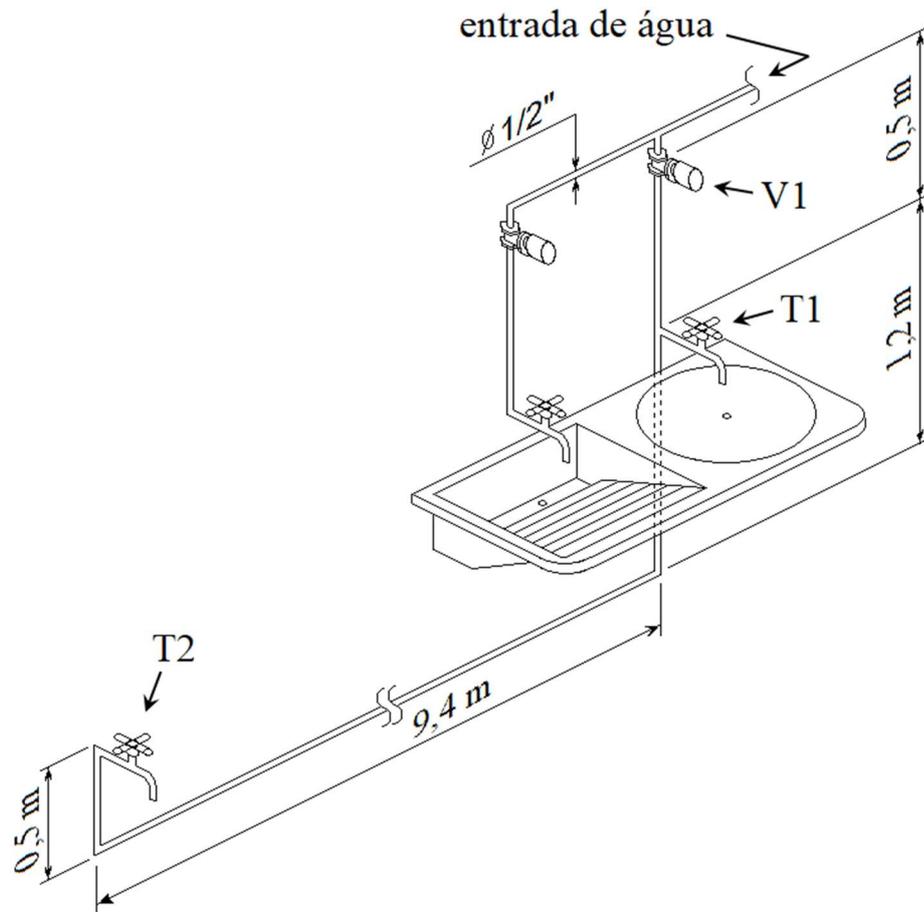


Figura 2.1: Desenho esquemático do objeto de estudo utilizado nesse trabalho.

O material da tubulação é PVC e possui o diâmetro de $\frac{1}{2}$ ". A válvula da posição chamada de V1, de onde foram realizadas as medições dos experimentos, é uma válvula comumente chamada de registro, do tipo gaveta, material latão e diâmetro $\frac{1}{2}$ ". A torneira instalada na posição T1 e depois na posição T2 é do tipo esfera, material latão e alumínio, com assento interno em nylon, de diâmetro $\frac{1}{2}$ ". Esta torneira é a fonte de vibração de certa maneira controlada do sistema, e foco de investigação deste trabalho.

Os equipamentos usados para realização das medições dos experimentos estão descritos na Tabela 2.1, por conveniência. Sua aplicação será mais bem detalhada nas seções seguintes.

Tabela 2.1: Equipamentos usados nas medições dos experimentos.

Descrição	Fabricante	Tipo	Sensibilidade
Sistema de aquisição de dados	SIEMENS	SCADAS XS	-
Medidor de vazão ultrassônico	DIEHL	HYDRUS	$1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$
Sensor triaxial (acelerômetro)	PCB	356A17	500 mV/g
Sensor unidirecional (acelerômetro)	PCB	352C22	10 mV/g

2.3 DEFINIÇÃO DO PONTO E DIREÇÃO DA MEDIÇÃO

Os experimentos foram divididos basicamente em duas etapas, como mostra a Figura 2.2. Uma etapa inicial a fim de definir qual o ponto e direção de medida a ser considerado durante o estudo, e uma segunda etapa para uma investigação mais apurada, verificando a influência de possíveis variações de pressão e vazão da rede de alimentação de água, a influência da localização (distância) da torneira ao ponto de medida (V1) e os resultados quando acelerômetros com diferentes sensibilidades são utilizados. A primeira etapa envolve três medições em épocas distintas onde o principal foco foi determinar o melhor ponto de medida na válvula V1 de maneira não intrusiva. A segunda etapa também foi baseada em medições em dias distintos, totalizando quatro medições.

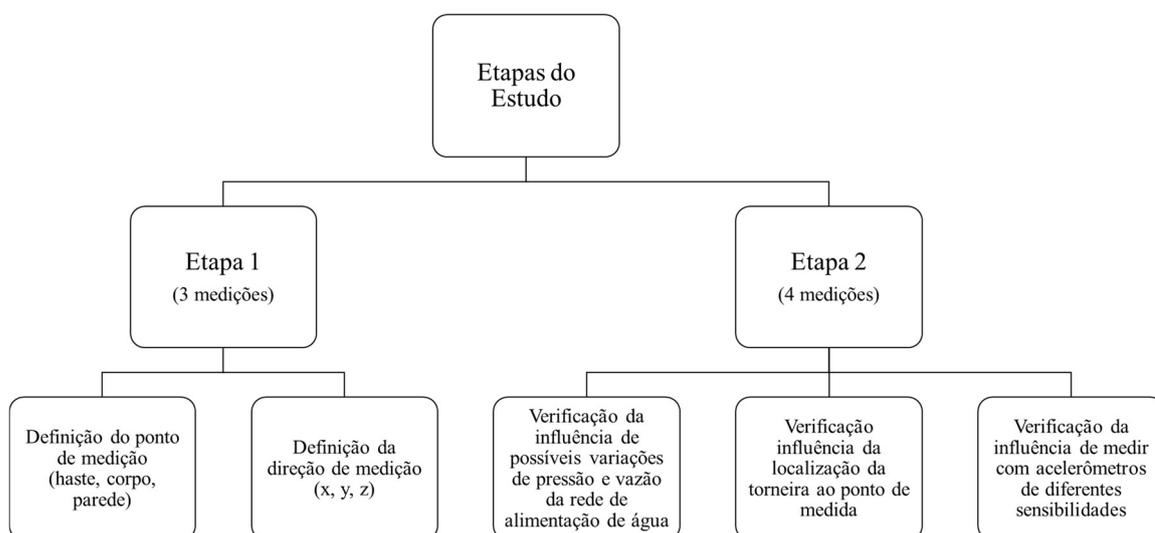


Figura 2.2: Etapas do estudo.

Para aquisição dos sinais de vibração na válvula registro foram considerados três locais possíveis para a fixação do acelerômetro, sendo eles, na haste ou no corpo da válvula e na parede, próximo a válvula. Tanto a manopla de abertura e fechamento, quanto o acabamento da válvula foram retirados para permitir acesso a estrutura rígida da válvula, ou o mais próximo possível disso. Para chegar na posição ótima, três sensores triaxiais são montados nos três pontos distintos conforme mostrado na Figura 2.3, onde as respectivas direções de medição são enfatizadas.

Além da definição do melhor local, também foi necessário definir a melhor direção de medição (transversal, longitudinal ou axial), sempre em relação a válvula. A direção transversal da válvula coincide com direção X dos acelerômetros fixados na haste e no corpo da válvula, assim como na parede, próximo a válvula. A direção longitudinal da válvula coincide com a direção Z dos acelerômetros fixados na haste e no corpo da válvula e com a direção Y do

acelerômetro fixado na parede, próximo a válvula. A direção axial da válvula coincide com a direção Y dos acelerômetros fixados na haste e no corpo da válvula e com a direção Z do acelerômetro fixado na parede, próximo a válvula. O critério adotado para definir o melhor local de medição e direção, é aquele que se mostre mais sensível a excitação de vibração, ou seja, onde a energia de vibração é maior para cada faixa de vazão medida na torneira.

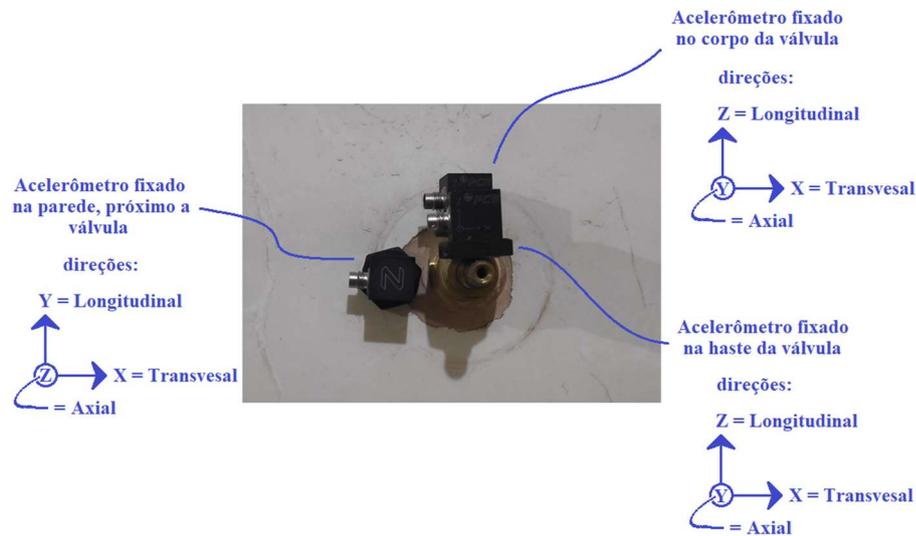


Figura 2.3: Acelerômetros triaxiais fixados na haste da válvula, no corpo da válvula e na parede, próximo a válvula. A válvula em questão é a válvula instalada na posição V1, mostrada na Figura 2.1.

Para garantir assertividade na seleção do local de fixação do acelerômetro e da direção de medição, foram utilizados os dados de três experimentos, como mencionado anteriormente, sendo o primeiro realizado em 06/07/2020, o segundo em 21/07/2020 e o terceiro em 05/08/2020. Nos três experimentos, os sinais de vibração foram adquiridos simultaneamente, através dos três acelerômetros fixados na válvula registro instalada na posição V1, nas três direções (transversal, longitudinal e axial), conforme mostrado na Figura 2.3. Os sinais foram adquiridos para diferentes valores de vazão medidos na torneira instalada na posição T1. Todas as informações experimentais serão detalhadas na seção seguinte.

Inicialmente foi analisada qual a direção, para cada acelerômetro fixado nos três locais mostrados na Figura 2.3, possuía a maior amplitude de vibração no domínio do tempo, conforme mostrado nas Figuras 2.4 (a), (b) e (c), considerando os sensores triaxiais montados na haste da válvula, no corpo da válvula e na parede, respectivamente. A linha vermelha está relacionada com a direção axial, a linha preta com a direção longitudinal e a linha cinza com a direção transversal. Esses gráficos plotados estão relacionados com o experimento realizado no dia 06/07/2020. No Apêndice A estão apresentadas as análises para os experimentos realizados nos dias 21/07/2020 e 05/08/2020, mas o resultado é o mesmo apresentado aqui, nessa seção. Nota-se que todos os gráficos da Figura 2.4 possuem um intervalo de dados contendo 1 (um)

segundo de cada sinal medido na válvula V1, relacionado as medidas de vazão feitas na torneira instalada em T1, além dos ruídos de fundo (bgn – *background noise*) medidos no início e fim das medições. Dessa maneira é possível “compactar” todas as medidas feitas para cada direção, de cada sensor. Lembrando que os dados foram adquiridos por 10 segundos, mas somente 1 segundo é mostrado por conveniência. A vibração na direção axial foi a que registrou maior amplitude nos sensores montados na haste e corpo da válvula V1, mas para o sensor montado na parede ao lado da válvula V1 a maior amplitude foi obtida na direção transversal.

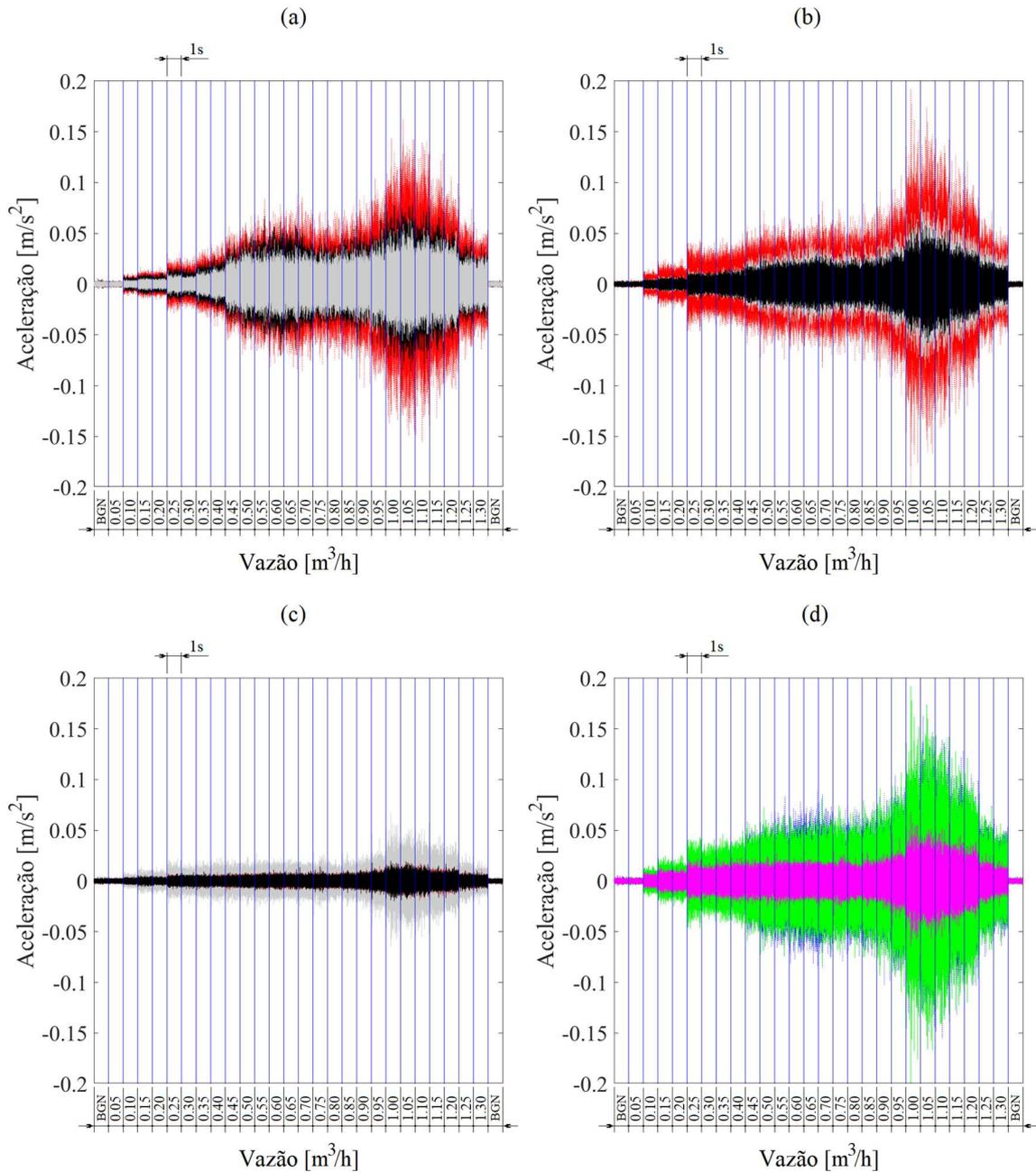


Figura 2.4: Medições com o acelerômetro fixado (a) na haste da válvula, (b) no corpo da válvula, (c) na parede, próximo a válvula considerando a posição V1. Linha vermelha: direção axial, linha preta: direção longitudinal e linha cinza: direção transversal. (d) Comparação entre as direções com maior amplitude para cada um dos acelerômetros fixados nestas posições. Linha azul: direção axial medida na haste, linha verde: direção axial medida no corpo e linha magenta: direção transversal medida na parede.

A Figura 2.4 (d) mostra os sinais com maior amplitude em cada um dos três sensores triaxiais, sendo a linha azul a direção axial medida na haste, a linha verde a direção axial medida no corpo e a linha magenta a direção transversal medida na parede, próximo a válvula, selecionando assim, tanto o local de fixação do acelerômetro, quanto a direção de medição que apresentou maior amplitude de vibração. Para os três experimentos analisados, nas três datas de medição, constata-se que a direção axial, do acelerômetro fixo na haste da válvula, é a que apresenta maior amplitude de vibração para a maioria das vazões medidas. O corpo da válvula também poderia ser utilizado, por apresentar sinais com amplitudes próximas, mas optou-se pela haste como ponto de medida. Portanto, essa é a justificativa na qual os experimentos da etapa 2, que serão descritos na seção seguinte, foram adquiridos com o acelerômetro fixo na haste da válvula instalada na posição V1, na direção axial, visando caracterização do sistema.

2.4 METODOLOGIA

A etapa 2 envolve quatro experimentos distintos, onde adicionou-se à válvula V1 um sensor unidirecional de sensibilidade de 10 mV/g, na haste da válvula, direção axial. Por conveniência estes quatro experimentos serão designados de experimento 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Para descrever os quatro experimentos será usado como referência as identificações V1, T1 e T2 do desenho esquemático do objeto de estudo mostrado na Figura 2.1.

Os experimentos 1 e 2 foram realizados respectivamente nos dias 15 e 19/10/2020 e os experimentos 3 e 4, realizados respectivamente nos dias 01 e 02/11/2020. Os 4 experimentos possuíam a mesma configuração, mudando apenas a instalação da torneira do tipo esfera da posição T1 (experimentos 1 e 2), para a posição T2 (experimentos 3 e 4). A Figura 2.5 mostra um esquema da metodologia aplicada no estudo, que descreve resumidamente os experimentos da etapa 2. A descrição mais detalhada será apresentada na sequência.

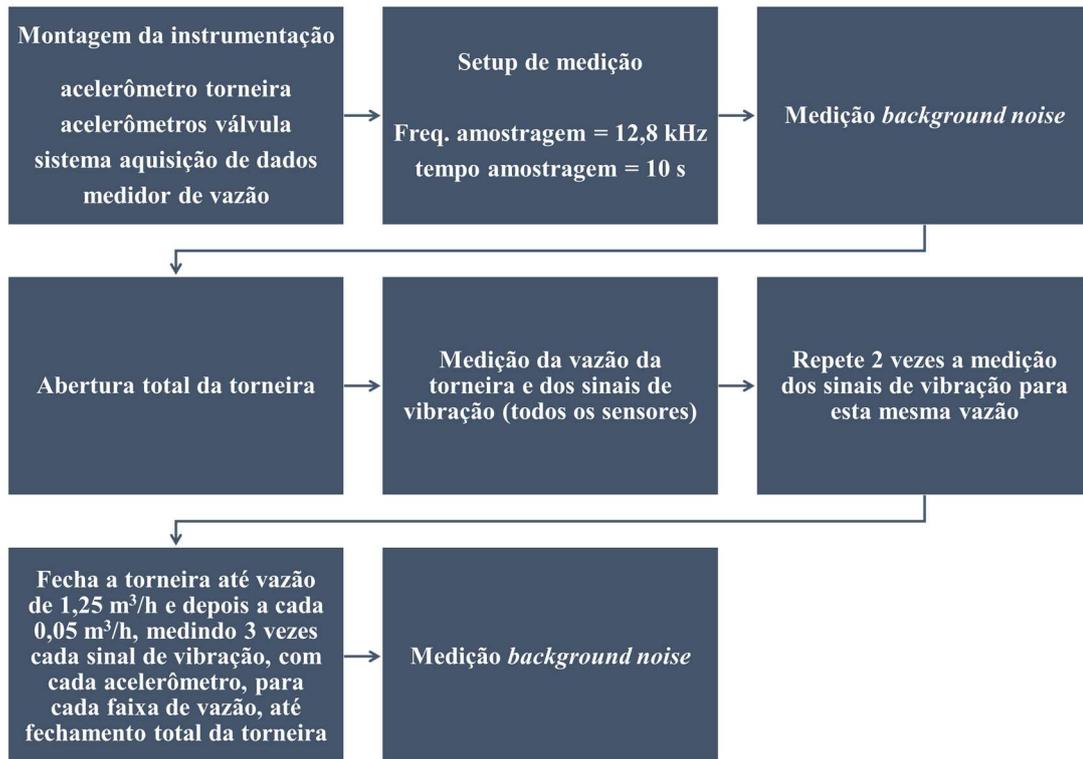


Figura 2.5: Esquema da metodologia aplicada no estudo.

Todos os sinais são aquisitados com o sistema de aquisição de dados da Siemens, com frequência de amostragem de 12,8 kHz, por 10 segundos, para cada vazão medida. Na saída da torneira foi instalado o medidor de vazão para controlar a vazão, por consequência, a excitação de vibração proveniente da torneira na válvula do tipo registro, instalada na posição V1. O layout de montagem dos sensores, sistema de aquisição, medição de vazão e cabos é mostrado na Figura 2.6.

Vale ressaltar que todas as medições ocorreram no período noturno, por volta das 22 h, sem que houvesse outros pontos de consumo em uso na residência. Estes cuidados foram adotados para evitar interferências nas medições que gerassem maior dificuldade de análise e por consequência, minimizassem as dúvidas para as conclusões do estudo. A análise foi realizada no ambiente Matlab, onde todos os sinais aquisitados foram primeiramente filtrados utilizando um filtro passa-banda, do tipo Butterworth, com limites de banda entre 10 Hz e 3 kHz e número de ordem 5. A escolha do limite inferior de 10 Hz é justificada por duas razões: Primeiro porque o condicionamento de sinais dos acelerômetros piezoelétricos é ruim abaixo dessa frequência. Segundo porque geralmente a região de baixa frequência é dominado por ruídos espúrios e por vibrações estruturais causadas, por exemplo, pela passagem de carros na rua que gera uma vibração na casa, sendo ruídos que não interessam para o estudo em questão.

Já para o limite superior, sua escolha de 3 kHz é justificada pela faixa linear de resposta dos sensores utilizados, visto que esse é o limite superior dado pelo fabricante.

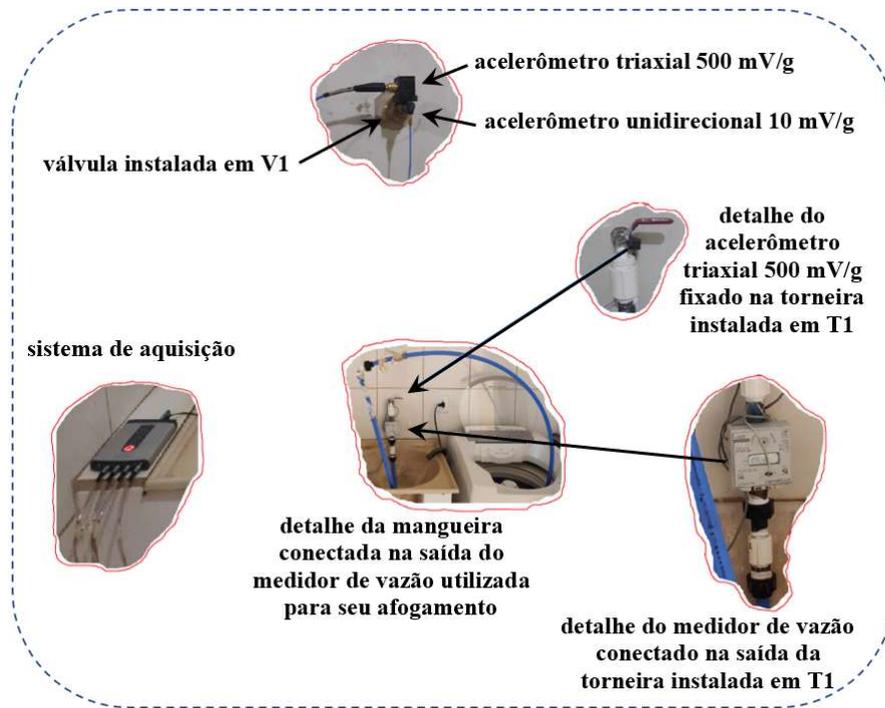


Figura 2.6: Visão geral do layout de medição para os experimentos realizados.

A etapa de pré-processamento do sinal ainda conta com a eliminação dos níveis DC de todos os sinais e transformação da grandeza de tensão (Volts) para aceleração (m/s^2), considerando a sensibilidade dos acelerômetros usados nos experimentos (10 e 500 mV/g) e a aceleração da gravidade ($9,81 m/s^2$).

Vazões entre $0,05 m^3/h$ até aproximadamente $1,4 m^3/h$ com incremento de $0,05 m^3/h$ foram realizadas, bem como medição do ruído de fundo (torneira fechada). As medições iniciaram com a torneira totalmente fechada, ou seja, pela medição do ruído de fundo, que é adquirido simultaneamente pelo acelerômetro fixado na torneira e pelos acelerômetros fixados na válvula registro V1. Em seguida a torneira é totalmente aberta (máxima vazão), aguardando alguns segundos até que o medidor de vazão estabilize o valor medido, quando então é feita a aquisição dos sinais de vibração simultaneamente na torneira e na válvula registro, neste último caso, com os dois acelerômetros, de maior e menor sensibilidade.

Ainda com a torneira totalmente aberta, sem acionar a manopla de abertura e fechamento, são realizadas mais duas medições de 10 segundos cada para garantir um *backup* da medição, bem como, verificação de possíveis variações de pressão e vazão do sistema de abastecimento de água na residência. Na sequência a torneira é fechada de forma controlada, até obter o valor de vazão na faixa de aproximadamente $1,25 m^3/h$. Com a vazão estabilizada

muito próximo deste valor, são aquisitados mais três medições, conforme já exposto anteriormente. Este procedimento é repetido para cada faixa de vazão controlada na torneira, sempre com variação em torno de $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$. Este controle das faixas de vazão se faz necessário para efeito de comparação entre os experimentos realizados, permitindo análises mais precisas e conclusivas a respeito de medições realizadas em dias distintos. Por fim, com a torneira totalmente fechada, o ruído de fundo é novamente medido. Portanto, tem-se três medições para cada vazão (total de 26 faixas diferentes) juntamente com o ruído de fundo no início e fim das medições.

2.5 CONCLUSÕES

O objeto de estudo e a instrumentação utilizada para realização dos experimentos são apresentados. Uma descrição detalhada da metodologia aplicada no estudo é realizada, explicando o procedimento experimental, o setup de medição e todas as etapas de pré-processamentos dos sinais. A haste da válvula registro, na direção axial, é a escolhida para aquisição dos sinais, por apresentar maior intensidade de vibração quando comparado com a intensidade dos sinais medidos em outras direções e com acelerômetros fixados em outras posições.

CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA VIA PROCESSAMENTO DE SINAIS CLÁSSICOS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será abordado o uso de técnicas de vibração clássicas para análise dos sinais medidos nos experimentos, tais como RMS (*Root Mean Square*), Assimetria (*Skewness*) e Curtose. Também serão realizadas análises no domínio do tempo e da frequência, como a Densidade Espectral de Potência (PSD) e Coerência, a fim de verificar a influência de possíveis variações de pressão e vazão da rede de alimentação de água na residência onde se encontra o objeto de estudo. Dessa maneira medições foram realizadas em um mesmo dia, bem como, em dias distintos, mantendo-se fixo as vazões pré-estabelecidas, posição do sensor e torneira utilizada conforme descrito no capítulo anterior. Acrescenta-se aqui, entretanto, uma investigação inicial da influência da utilização de sensores de diferentes sensibilidades, da distância da fonte excitadora (torneira) à válvula onde são aquisitados os sinais de vibração, além da caracterização dos sinais. Todas estas análises realizadas através do uso das técnicas clássicas de processamento de sinais no domínio do tempo e da frequência, objetivam caracterizar o problema e identificar comportamentos que auxiliem na estimativa da vazão de torneiras, de forma não intrusiva, via vibração de válvulas. Por fim, serão apresentadas as principais conclusões do capítulo.

3.2 ANÁLISE DOS SINAIS VIA UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE VIBRAÇÃO CLÁSSICAS

As análises aqui realizadas estão divididas em duas etapas. A primeira, apresentada nesta seção, utiliza técnicas de vibração clássicas como RMS, Assimetria e Curtose, com objetivo de caracterizar o problema e identificar comportamentos que auxiliem na identificação da vazão de torneiras via vibração de válvulas. A segunda etapa, apresentada na seção seguinte, aprofunda tais análises verificando o comportamento dos sinais no domínio do tempo e da frequência.

São usadas em ambas as etapas os sinais aqusitados nos experimentos 1 e 2, quando a torneira está instalada em T1, ou seja, próximo da válvula V1 e experimentos 3 e 4, quando a torneira está instalada em T2, ou seja, distante da válvula V1 (ver Figura 2.1 para identificação das posições V1, T1 e T2). O procedimento experimental é o mesmo apresentado e detalhado no capítulo anterior, inclusive com relação ao sistema de aquisição, taxa de amostragem, tempo de aquisição, seleção de filtros, dentre outros.

Inicialmente utiliza-se o cálculo do valor RMS, que, segundo Doebelin (2003) é uma maneira de quantificar a intensidade do sinal de vibração e geralmente aplicado à manutenção preditiva de máquinas rotativas (ARATO Jr., 2004), calculada para um sinal temporal contínuo como

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} \quad , \quad (3.1)$$

onde T é o tempo de aquisição e $x(t)$ a série temporal. Utilizando a técnica RMS, verificou-se o comportamento da intensidade de vibração na válvula instalada em V1, para cada vazão medida na torneira, quando esta estava instalada em T1, conforme mostrada nas Figuras 3.1 (a) e (b) para os experimentos 1 e 2, respectivamente. Para os experimentos 3 e 4, onde a torneira em uso foi instalada em T2, o valor RMS é mostrado nas Figuras 3.1 (c) e (d), respectivamente.

Analisando os gráficos, é possível afirmar que, apesar de um certo controle sobre as condições externas entre os experimentos 1 e 2 e entre os experimentos 3 e 4, os valores RMS na válvula, para cada vazão medida na torneira, não são exatamente os mesmos, ou seja, a intensidade de vibração não é a mesma, embora os comportamentos sejam similares. Quando a torneira está instalada em T1, Figuras 3.1 (a) e (b), observa-se que a intensidade de vibração na válvula aumenta com o aumento da vazão na torneira, até uma vazão de aproximadamente 0,45 a 0,65 m³/h e após esta vazão até a vazão de máxima abertura da torneira, a intensidade de vibração é decrescente. Quando a torneira está instalada mais distante, ou seja, em T2, Figuras 3.1 (c) e (d), a intensidade de vibração na válvula é bem menor, em todas as vazões, quando comparada com a torneira instalada mais próxima da válvula V1, em T1 (note a diferença de escala dos valores RMS entre os gráficos das Figuras 3.1 (a) e (b) com os gráficos das Figuras 3.1 (c) e (d)). Embora existam algumas diferenças, o comportamento é similar no que diz respeito a relação de intensidade de vibração na válvula para cada vazão medida na torneira, ou seja, há aumento de intensidade de vibração na válvula conforme se aumenta a vazão da torneira e a partir de determinado valor de abertura da torneira até sua abertura total, a intensidade de vibração diminui. O que difere é que, tanto o aumento quanto a diminuição de intensidade de

vibração não ocorrem de maneira gradativa, comparada com a torneira instalada próxima da válvula, ou seja, a intensidade de vibração aumenta ou diminui por faixas de vazões.

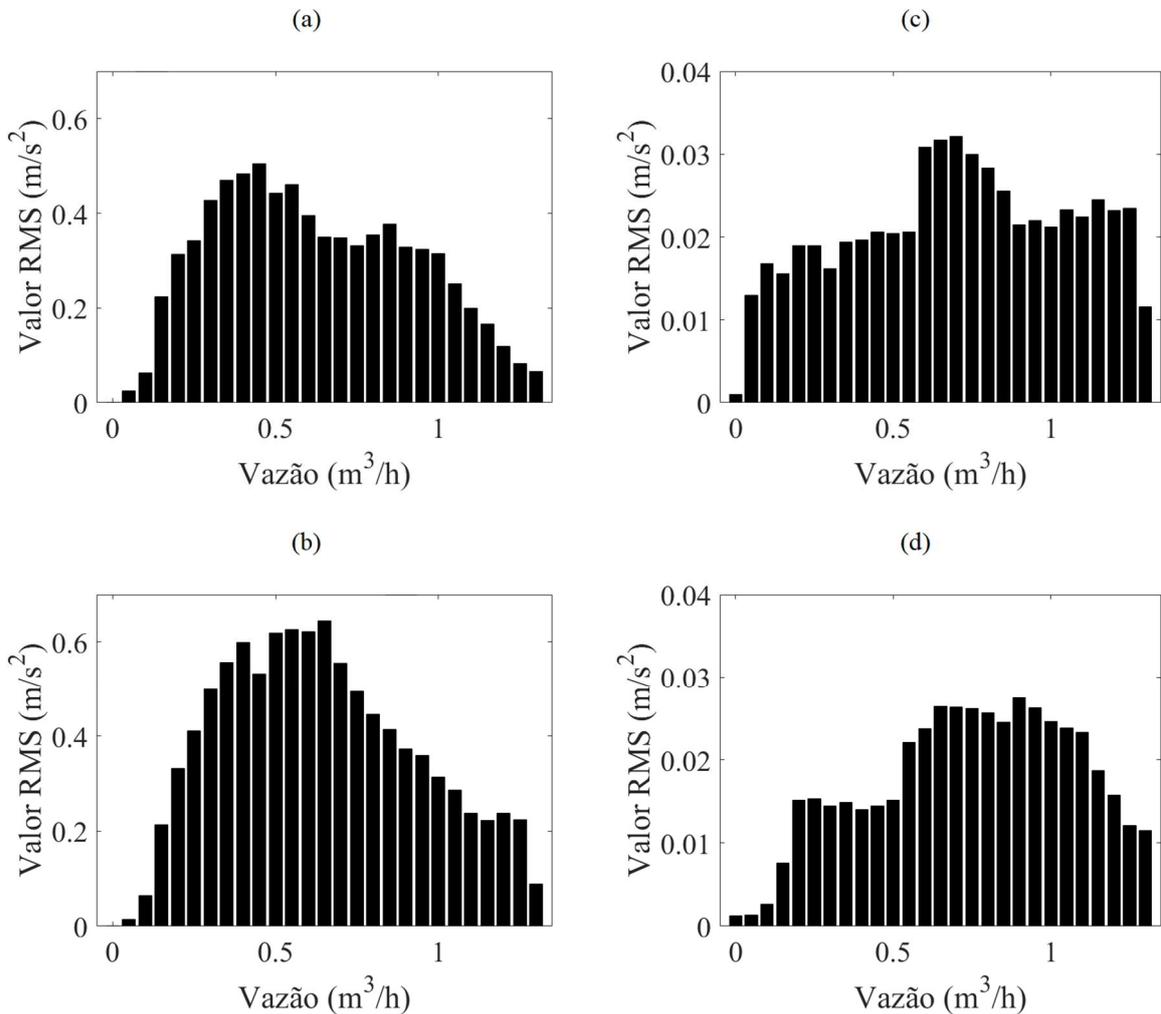


Figura 3.1: Valores RMS medidos na válvula V1 para cada vazão medida na torneira, sendo (a) e (b), respectivamente experimentos 1 e 2, torneira instalada em T1 e (c) e (d), respectivamente experimentos 3 e 4, torneira instalada em T2. Todas as medições com acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g.

Como será visto mais a diante através da análise no domínio da frequência, para determinadas faixas de frequência nota-se que há tendência de repetibilidade entre as medições realizadas em dias distintos, mantendo-se semelhantes todas as condições de medições, ou seja, os valores de intensidade de vibração, valores RMS, se repetem, o que traz a luz algo a ser investigado para estimar a vazão de uma torneira via vibração de válvulas. Porém, considerando toda a faixa de frequência em que os sinais brutos foram filtrados (10 Hz a 3 kHz), não há repetibilidade dos valores RMS entre as medições de dias distintos, além disso, devido a intensidade de vibração decrescer a partir de um determinado valor de vazão, alguns valores RMS se repetem ou ficam muito próximos para vazões distintas. A conclusão é que não seria possível usar a técnica RMS para estimar precisamente a vazão da torneira via vibração da

válvula, mas associando o RMS com outras técnicas, talvez seja possível estimar faixas de vazões como, baixa, moderada e alta, o que será avaliado na sequência analisando Assimetria e Curtose, assim como no próximo capítulo, associando com a técnica VMD (*Variational Mode Decomposition*).

A investigação das técnicas clássicas Assimetria e Curtose, associada a RMS e até mesmo aos sinais no domínio do tempo, para verificar se de alguma forma há algum padrão de comportamento que pudesse ser usado para estimar a vazão via vibração da válvula, seguirá usando os dados dos experimentos 1 e 2, expandindo para os experimentos 3 e 4, se os resultados forem promissores. A medida de Assimetria, ou *Skewness*, é o terceiro momento estatístico e pode ser calculado por

$$s = \frac{E[x(t) - \mu]^3}{\sigma^3} \quad , \quad (3.2)$$

onde $E[]$ é a esperança, $\mu = E[x(t)]$ é o valor médio e $\sigma = E[x(t) - \mu]^2$ é a variância do sinal. De maneira similar, a Curtose é o quarto momento estatístico central dado por

$$k = \frac{E[x(t) - \mu]^4}{\sigma^4} \quad , \quad (3.3)$$

A Assimetria e a Curtose foram calculadas e plotadas para os sinais medidos na válvula V1, para cada uma das vazões medidas na torneira instalada em T1, além do ruído de fundo, para os experimentos 1 e 2, com objetivo de comparação. A Figura 3.2 (a), (b) e (c) referem-se ao experimento 1 e a Figura 3.2 (d), (e) e (f) referem-se ao experimento 2, ambas, respectivamente, valores de RMS, Assimetria e Curtose.

Analisando os gráficos, observa-se que não há padrão nos valores apresentados, como mostrado para as vazões destacadas. A vazão 0,30 m³/h apresenta valor de RMS próximo entre os dois experimentos, já os valores de Assimetria e Curtose são bem distintos. Este comportamento é semelhante para a vazão de 0,85 m³/h. Já para a vazão de 0,65 m³/h ocorre o contrário, ou seja, valores de RMS distintos e valores de Assimetria e Curtose próximos. Para complementar a análise foi plotado o comportamento no domínio do tempo destes mesmos sinais, comparando os dois experimentos. Além do mais, nota-se que alguns valores de Assimetria e Curtose se sobressaem quando comparado com a maioria dos valores encontrados. Não está claro o motivo dessa variação, mas talvez relacionado com componentes externos ao qual o controle fino aplicado ao experimento não tenha sido efetivo.

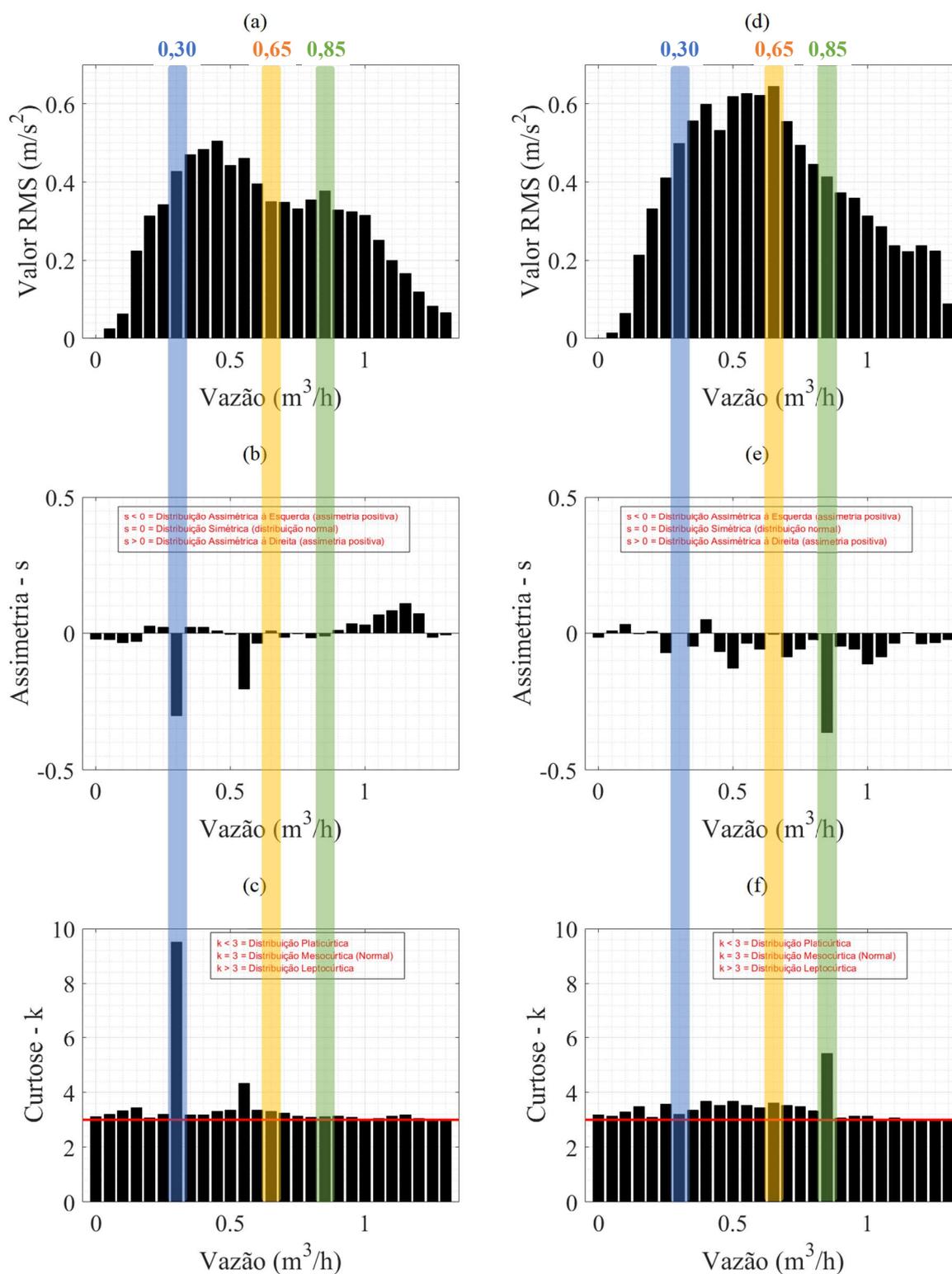


Figura 3.2: Valores RMS, Assimetria e Curtose dos sinais medidos na válvula V1, para cada uma das vazões medidas na torneira instalada em T1, além do ruído de fundo, sendo, respectivamente (a), (b) e (c) experimento 1 e (d), (e) e (f) experimento 2. Todas as medições com acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g.

O comportamento vibracional no domínio do tempo entre os experimentos 1 e 2 é próximo para as vazões 0,30 e 0,85 m³/h, o que justifica a proximidade entre os valores RMS e

é diferente para a vazão $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$, também justificando as diferenças entre os valores RMS. Tais observações podem ser vistas na Figura 3.3.

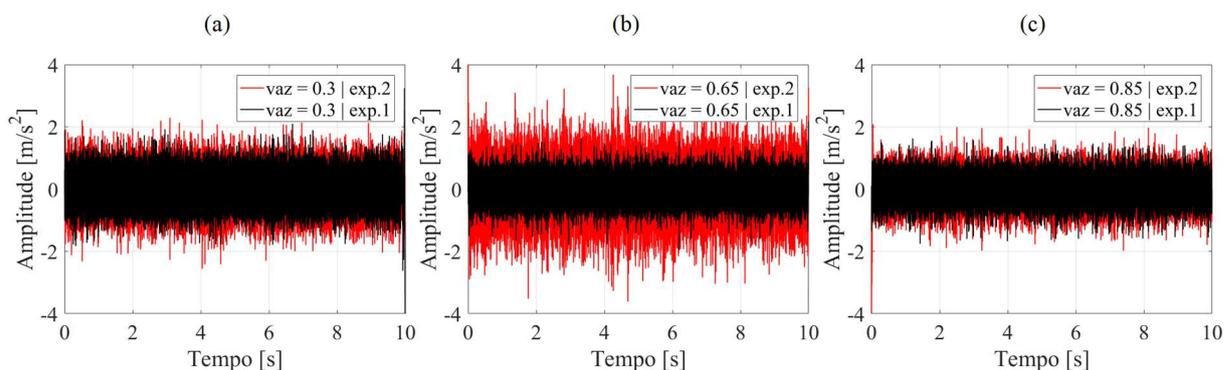


Figura 3.3: Comportamento vibracional no domínio do tempo dos sinais medidos na válvula V1, para as vazões (a) $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$, (b) $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$ e (c) $0,85 \text{ m}^3/\text{h}$ medidas na torneira instalada em T1, experimentos 1 e 2. Todas as medições com acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g .

Com estes resultados, conclui-se que não há possibilidade de usar isoladamente as técnicas clássicas de Assimetria e Curtose, para estimar as vazões das torneiras via vibração de válvulas, tampouco associando-as com os valores RMS, uma vez que não há padrão de resultado entre as medições de dias diferentes, mesmo mantendo semelhantes todas as condições destas medições. No Capítulo 4 será investigado o uso do VMD, em conjunto com a PSD, na tentativa de identificar uma possibilidade de estimar a vazão das torneiras via vibração de válvulas.

3.3 ANÁLISE DOS SINAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

Nesta etapa, apresentada nesta seção, será caracterizado o problema por meio do processamento dos sinais no domínio do tempo e da frequência e serão verificadas a influência de possíveis variações de pressão e vazão da rede de alimentação de água na residência, influência da localização da torneira ao ponto de medida e a influência de medir com acelerômetros de diferentes sensibilidades. Para as análises no domínio do tempo optou-se por apresentar graficamente as repostas vibracionais dos sinais e não seu envelope, uma vez que o cálculo do RMS, apresentado na seção 3.2, indiretamente representa o envelope. A primeira análise, realizada no domínio do tempo, diz respeito ao comportamento da intensidade de vibração na válvula instalada em V1, para cada vazão medida na torneira instalada tanto em T1, quanto em T2, que é mostrado nas Figuras 3.4 (a) e (b), respectivamente. Estas Figuras são gráficos que mostram 1 (um) segundo de cada sinal medido na válvula instalada em V1, para

cada uma das vazões medidas na torneira instalada em T1 e em T2, além do ruído de fundo inicial e final (bgn).

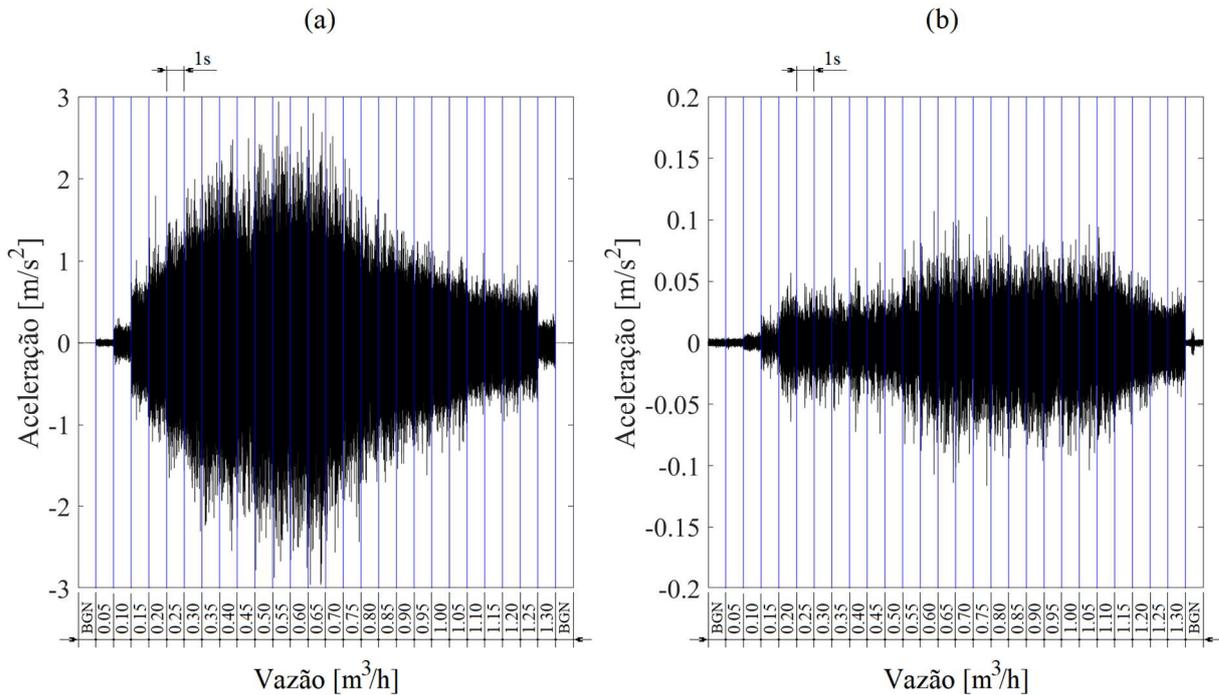


Figura 3.4: Medições com acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g quando a torneira está em (a) T1 e em (b) T2, respectivamente experimentos 2 e 4.

A intensidade de vibração na válvula instalada em V1, para cada vazão medida na torneira instalada em T1, não apresenta o mesmo comportamento quando a torneira está instalada em T2, embora seja possível afirmar que nos dois casos, a intensidade de vibração é crescente com o aumento da vazão na fase inicial de abertura da torneira e a partir de determinado valor de abertura até sua abertura total, a intensidade de vibração passa a ser decrescente. Especificamente, analisando tal comportamento quando a torneira está próxima da válvula, é possível observar que a intensidade de vibração deixa de ser crescente e passa a ser decrescente aproximadamente entre as vazões 0,55 e 0,65 m^3/h . É possível notar alguns saltos de intensidade de vibração entre as primeiras e últimas faixas de vazão, isso ocorre, muito provavelmente, por alguma folga entre a esfera da torneira e sua vedação, em que aumentando a pressão ocorre deslocamento da esfera, gerando os saltos nas faixas iniciais de vazão e ocorre o contrário com o fechamento da torneira, em que diminui a pressão, também gera este deslocamento da esfera, provocando os saltos nas faixas finais de vazão.

Usando os sinais de vibração para a menor vazão medida (faixa de 0,05 m^3/h), maior vazão medida (faixa de 1,3 m^3/h) e para a vazão que apresenta a maior intensidade de vibração (faixa de 0,65 m^3/h), analisou-se no domínio do tempo e da frequência a influência de possíveis variações de pressão e vazão da rede de alimentação de água na residência, para as medições

realizadas em mesmo dia, mantendo-se muito próximas todas as condições de medições. Considerando que, para cada uma destas faixas de vazão foram realizadas três medições de vazão sem que a manopla de abertura e fechamento da torneira fosse movida, conforme descrito no Capítulo 2, a análise consiste em verificar se há alteração do comportamento vibracional da válvula instalada em V1, diante das ligeiras mudanças nos valores da vazão, mesmo sem alterar a posição de abertura e fechamento da torneira. Para a análise no domínio do tempo, foi plotado um gráfico mostrando 1 (um) segundo de cada sinal medido na válvula instalada em V1, para as três vazões medidas em cada posição de abertura e fechamento da torneira instalada em T1 e em T2, respectivamente Figura 3.5 (a) e (b), para as 3 faixas de vazões mencionadas.

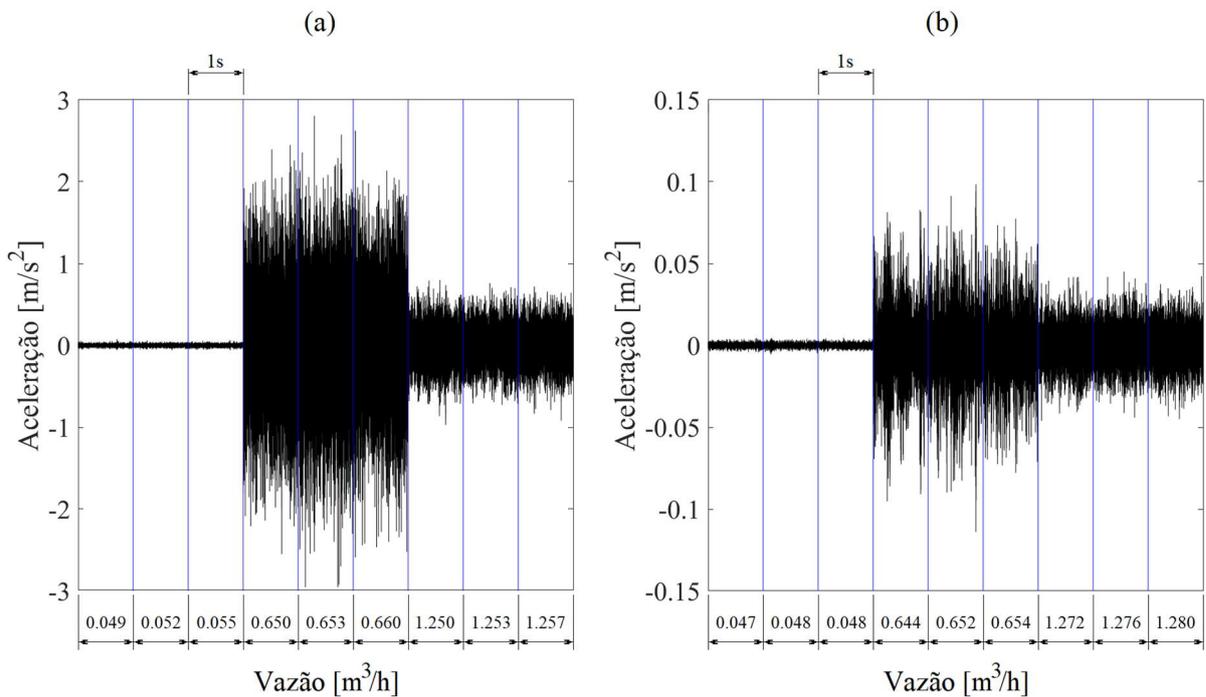


Figura 3.5: Análise do comportamento no domínio do tempo, do sinal de vibração da válvula instalada em V1, para as três vazões medidas em cada faixa de vazão, quando a torneira estava instalada em (a) T1 e em (b) T2, respectivamente experimentos 2 e 4. Medições com acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g.

Para o experimento 2, dois dos três sinais de vibração para a maior vazão medida foram corrompidos, por isso, neste caso, foi considerando para esta análise os três sinais para a faixa de vazão imediatamente anterior, ou seja, faixa de 1,25 m³/h, sem prejuízo nos resultados das análises.

Para a análise no domínio da frequência, foram plotadas em um mesmo gráfico as PSDs dos três sinais medidos na válvula V1, com acelerômetro de 500 mV/g, para as três vazões medidas em cada faixa de vazão mencionada anteriormente. Por definição, a PSD é calculada como

$$S_{xx}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X(f)|^2, \quad (3.4)$$

onde $X(f)$ é o sinal no domínio da frequência e f é a frequência em Hz. Entretanto, em termos práticos, as PSDs foram calculadas utilizando o método de Welch, utilizando uma janela tipo Hanning, uma resolução em frequência de 10 Hz e sobreposição de 50%. As Figuras 3.6 (a), (b) e (c) referem-se ao experimento 2, quando a torneira está instalada próxima da válvula V1 e as Figuras 3.6 (d), (e) e (f) referem-se ao experimento 4, quando a torneira está instalada distante da válvula V1.

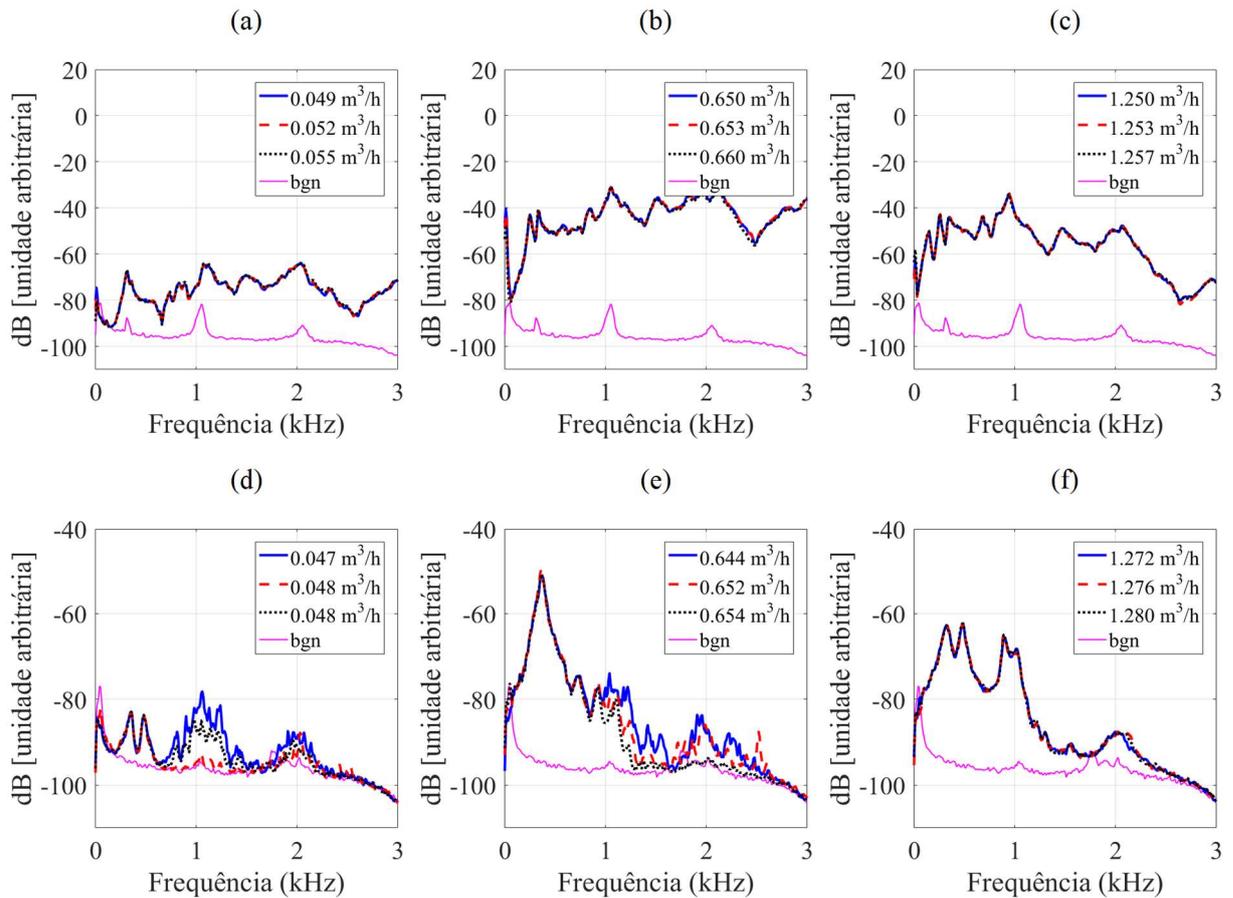


Figura 3.6: Análise do comportamento no domínio da frequência, do sinal de vibração da válvula instalada em V1, para as três vazões medidas em cada faixa de vazão, quando a torneira estava instalada em T1 e em T2, sendo as faixas de vazões (a) 0,05 m³/h, (b) 0,65 m³/h e (c) 1,25 m³/h, experimento 2 e (d) 0,05 m³/h, (e) 0,65 m³/h e (f) 1,3 m³/h experimento 4.

Como pode ser observado nos gráficos das Figuras 3.5 (a) e (b), análise no domínio do tempo, os três sinais permaneceram com intensidade de vibração bem próxima, nas três faixas de vazões, nos dois experimentos. Para a análise no domínio da frequência, Figura 3.6 (a) a (f), o resultado observado foi diferente entre os dois experimentos, ou seja, quando a torneira está instalada próxima da válvula, experimento 2, verifica-se que as PSDs dos três sinais, nas três faixas de vazões, permaneceram praticamente idênticas em toda a faixa de frequência analisada

e quando a torneira está instalada distante da válvula, experimento 4, verifica-se que as PSDs dos três sinais, nas três faixas de vazões, permaneceram muito próximas em uma faixa de frequência abaixo de 1 kHz, esta é uma análise subjetiva que leva em consideração a sobreposição das PSDs dos sinais analisados. Portanto, pode-se supor que as variações de pressão e vazão da rede de alimentação de água, considerando as medições realizadas em mesmo dia e com pequenos intervalos entre as medições, não provocaram variações relevantes de intensidade nos sinais de vibração, mas que a distância da fonte excitadora de vibração (torneira) em relação a válvula, causa influência na intensidade de vibração dos sinais e será investigada melhor a diante. Baseado nestes resultados, nas próximas análises serão considerados os sinais de vibração apenas da vazão intermediária entre as três medidas em cada faixa de vazão.

Como visto, possíveis variações de pressão e vazão na rede de alimentação de água na residência não causam severa influência nos sinais medidos com pequenos intervalos entre medições, porém foi investigado que causa influência quando os sinais são medidos em dias distintos, mantendo-se semelhantes todas as condições de medições. De mesma forma, foi realizada uma análise no domínio do tempo e no domínio da frequência. O gráfico da Figura 3.7 (a) compara as medições entre os experimentos 1 e 2, quando a torneira está instalada próximo da válvula e o gráfico da Figura 3.7 (b) compara as medições entre os experimentos 3 e 4, quando a torneira está instalada longe da válvula. Para esta análise no domínio do tempo, foram plotados gráficos que mostram 1 (um) segundo de cada sinal medido na válvula instalada em V1, para cada uma das vazões medidas na torneira instalada em T1 e T2, além do ruído de fundo inicial e final (bgn).

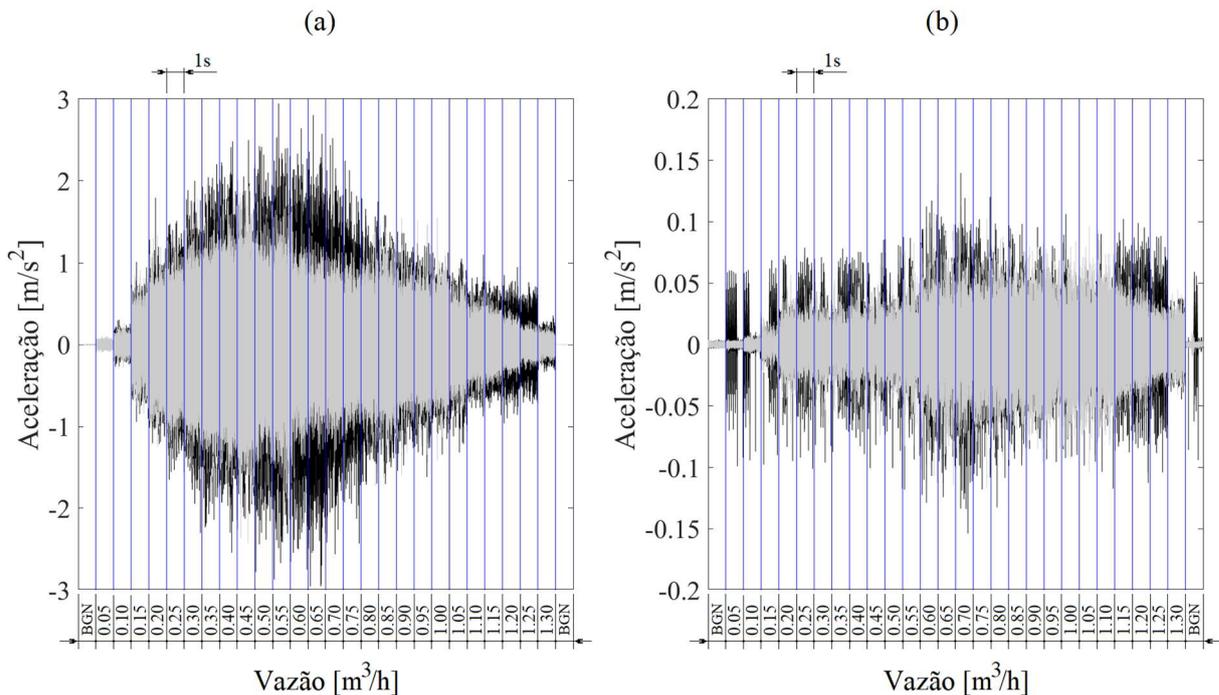


Figura 3.7: Análise no domínio do tempo comparando os sinais medidos quando a torneira estava instalada em a (T1) e em b (T2), respectivamente entre os experimentos 1, linha preta e 2, linha cinza e entre os experimentos 3, linha preta e 4, linha cinza. Medições com acelerômetro com sensibilidade de 500 mV/g.

Para as análises no domínio da frequência, foram consideradas três faixas distintas de vazões, ou seja, faixa de menor vazão medida (0,05 m^3/h), faixa de maior vazão medida (1,30 m^3/h) e faixa de vazão que apresenta a maior intensidade de vibração (0,65 m^3/h). No experimento 2, pelas mesmas razões explicadas anteriormente (sinais corrompidos), foram utilizados os sinais da faixa de vazão imediatamente inferior (1,25 m^3/h), sem prejuízo nos resultados das análises.

As Figuras 3.8 (a), (b) e (c) compara as PSDs dos sinais medidos na válvula V1, entre os experimentos 1 e 2, ou seja, quando a torneira está instalada próximo da válvula e as Figuras 3.8 (d), (e) e (f) compara as PSDs dos sinais medidos na válvula V1, entre os experimentos 3 e 4, ou seja, quando a torneira está instalada longe da válvula. Todos os sinais medidos com o acelerômetro de 500 mV/g. De maneira subjetiva, analisando a sobreposição das PSDs dos sinais dos experimentos 1 e 2, verifica-se boa similaridade, tanto em intensidade dos sinais, quanto em forma, especialmente considerando faixas de vazões específicas, o que permite afirmar que há tendência de repetibilidade entre estas medições, o que também foi confirmado através da análise no domínio do tempo, observando a Figura 3.7 (a).

Já entre os experimentos 3 e 4, esta análise ficou prejudicada, pois os sinais do experimento 3 sofreram interferência externa no momento das medições, provavelmente da cerca elétrica, pela característica dos sinais, que contêm frequências harmônicas a 60 Hz.

Embora isso tenha ocorrido, é possível observar, também de maneira subjetiva, avaliando a sobreposição das PSDs, que entre os sinais para a faixa de vazão $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$, Figura 3.8 (e), houve tendência de repetibilidade entre as duas medições para a faixa de frequência abaixo de 1 kHz e para a máxima vazão, faixa de $1,30 \text{ m}^3/\text{h}$, Figura 3.8 (f), houve tendência de repetibilidade dos sinais entre as duas medições, em toda a faixa de frequência analisada. Por meio da análise no domínio do tempo, Figura 3.7 (b), é possível observar também a tendência de repetibilidade entre os sinais medidos em dias distintos, embora tenha o prejuízo das interferências no sinal, citadas anteriormente. Desta forma é provável que também haja tendência de repetibilidade entre os sinais medidos na válvula quando a torneira está instalada mais distante, podendo concluir com isso, que não é severa a interferência na intensidade dos sinais, provocada pela variação de pressão e vazão da rede de alimentação de água na residência.

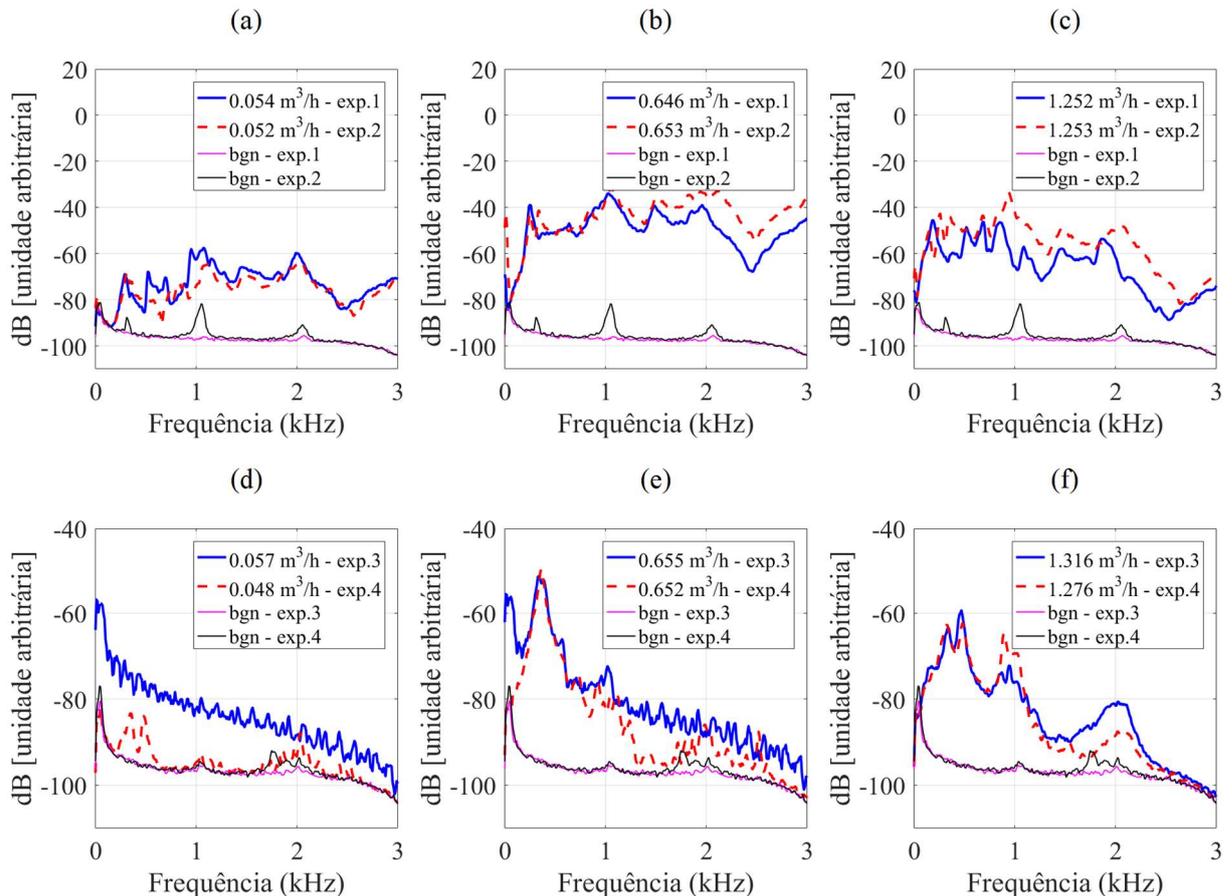


Figura 3.8: Análise no domínio da frequência, comparando as PSD dos sinais medidos em dias distintos quando a torneira estava instalada em T1, experimentos 1 e 2, faixas de vazões (a) $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$, (b) $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$ e (c) $1,25 \text{ m}^3/\text{h}$ e quando a torneira estava instalada em T2, experimentos 3 e 4, faixas de vazões (d) $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$, (e) $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$ e (f) $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$. Medições com acelerômetro com sensibilidade de 500 mV/g .

Também foi analisada a influência da sensibilidade dos acelerômetros nos sinais medidos, comparando os sinais adquiridos simultaneamente por dois acelerômetros de sensibilidades diferentes, mantendo similares condições de medições, inclusive relativo ao local

de fixação dos acelerômetros e a direção de medição, ambos na haste da válvula, na direção axial, como pode ser observado na Figura 2.6. Para que fossem avaliados todos os sinais medidos na válvula instalada em V1, para cada vazão medida na torneira instalada em T1 e depois em T2, para a análise no domínio do tempo, Figura 3.9 (a) e (b), foram plotados dois gráficos que mostram 1 (um) segundo de cada sinal medido, além do ruído de fundo inicial e final (bgn).

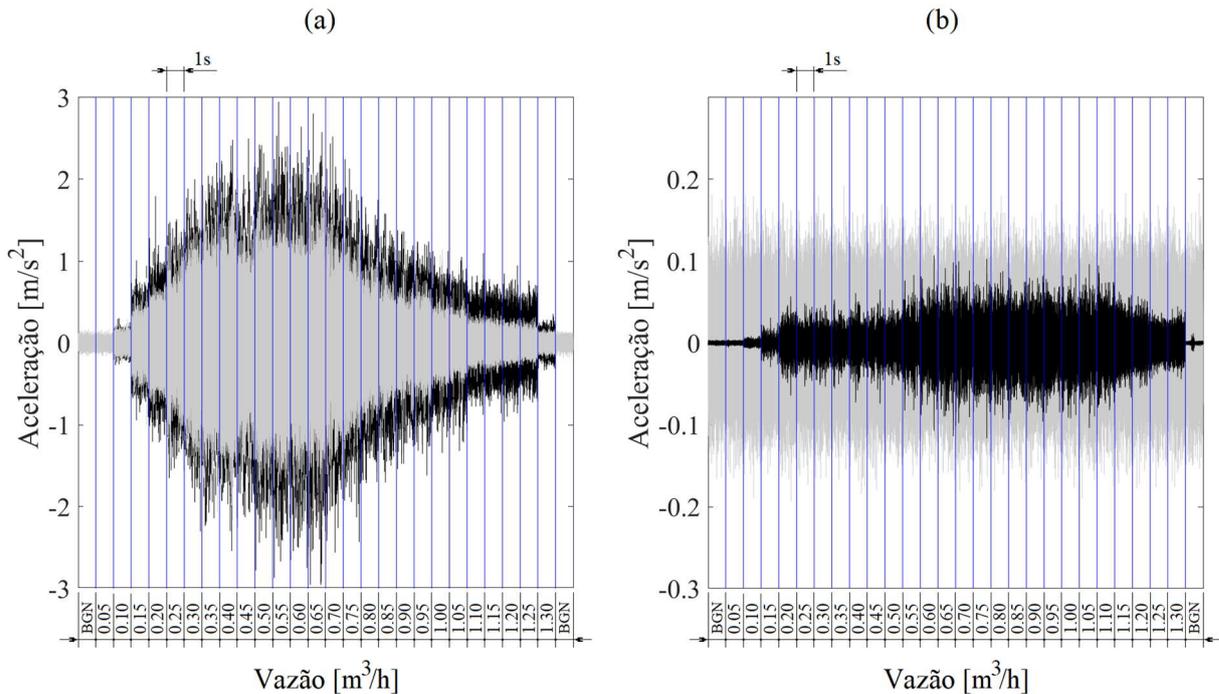


Figura 3.9: Análise no domínio do tempo, verificando a influência da sensibilidade do acelerômetro nos sinais medidos quando a torneira estava instalada em (a) T1 e em (b) T2, respectivamente experimentos 2 e 4. Linha preta, sinais medidos com o acelerômetro de 500 mV/g e linha cinza, sinais medidos com o acelerômetro de 10 mV/g.

A análise no domínio da frequência foi realizada, plotando em um mesmo gráfico, para comparação, as PSDs dos sinais das três faixas de vazões já mencionadas anteriormente e para as duas condições de instalação da torneira, próxima e distante da válvula. As Figuras 3.10 (a), (b) e (c) referem-se a análise quando a torneira está instalada próxima da válvula, sendo cada figura para uma faixa de vazão e as Figuras 3.10 (d), (e) e (f) repete a mesma análise para quando a torneira está instalada distante da válvula.

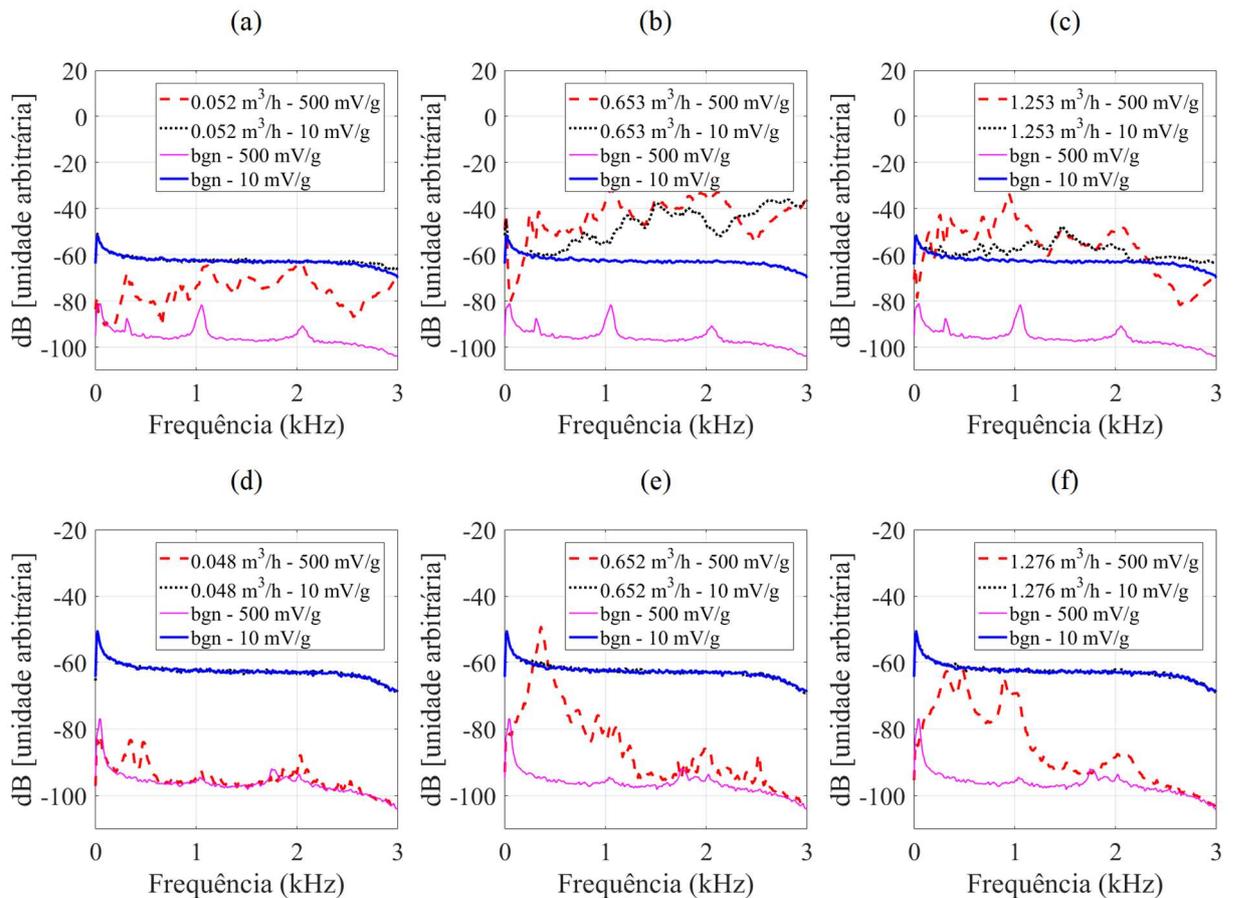


Figura 3.10: Análise no domínio da frequência, verificando a influência de medição com acelerômetros de diferentes sensibilidades, sendo comparadas as PSD dos sinais medidos simultaneamente na válvula V1 com acelerômetros de 10 e 500 mV/g, para as faixas de vazões (a) 0,05 m³/h, (b) 0,65 m³/h e (c) 1,25 m³/h, experimentos 2 e faixas de vazões (d) 0,05 m³/h, (e) 0,65 m³/h e (f) 1,3 m³/h, experimento 4.

A análise no domínio da frequência foi mais conclusiva do que a análise no domínio do tempo. Avaliando os gráficos da Figura 3.10 (a) a (f), observa-se claramente que o ruído de fundo do acelerômetro de maior sensibilidade é mais baixo que o ruído de fundo do acelerômetro de menor sensibilidade, devido isso, alguns sinais podem ter intensidade de vibração acima do ruído de fundo do acelerômetro de 500 mV/g, sendo então medidos por este, mas não o suficiente para superar o ruído de fundo do acelerômetro de 10 mV/g e neste caso, são medidos como ruído de fundo.

Avaliando os resultados a partir do domínio da frequência, Figura 3.10 (a), (b) e (c), quando a torneira está instalada próxima da válvula, o acelerômetro de 10 mV/g somente foi sensível o suficiente na obtenção da faixa de vazão de 0,65 m³/h e ainda assim acima da frequência de 500 Hz, para faixa de vazão de 0,05 m³/h ele só mediu ruído de fundo e para a faixa de vazão de 1,25 m³/h ele mediu o sinal na banda de frequência entre 500 e 2.200 Hz, fora desta faixa de frequência foi medido apenas ruído de fundo. Com o acelerômetro de 500 mV/g foram medidos todos os sinais. Quando a torneira está instalada distante da válvula,

Figura 3.10 (d), (e) e (f), o acelerômetro de 10 mV/g somente mediu ruído de fundo, nas três faixas de vazões e o acelerômetro de 500 mV/g foi capaz de medir os sinais para as faixas de vazões de 0,65 e 1,3 m³/h, porém abaixo de 1.800 Hz. Para a faixa de vazão de 0,05 m³/h o acelerômetro de 500 mV/g mediu, praticamente, somente ruído de fundo. A partir destes resultados analisados no domínio da frequência, é possível também concluir pela análise no domínio do tempo, Figura 3.9 (a) e (b), que o acelerômetro de 10 mV/g não funciona quando a torneira está instalada distante da válvula e funciona com limitações quando a torneira está instalada próxima da válvula e o acelerômetro de 500 mV/g funciona bem quando a torneira está instalada próxima da válvula e funciona com limitações quando a torneira está instalada distante da válvula.

Como visto, a distância entre a torneira e a válvula causa influência no sinal adquirido e para tornar isso ainda mais claro, foi plotado em um mesmo gráfico 1 (um) segundo de cada sinal de vibração medido na válvula instalada em V1, para cada vazão medida na torneira, quando ela estava instalada em T1 e quando estava instalada em T2. A Figura 3.11 mostra a análise no domínio do tempo, onde a linha preta refere-se aos sinais medidos na válvula instalada em V1, quando a torneira estava instalada em T1, experimento 2 e a linha cinza refere-se aos sinais medidos na válvula instalada em V1, quando a torneira estava instalada em T2, experimento 4. Os sinais foram medidos com acelerômetro com sensibilidade de 500 mV/g.

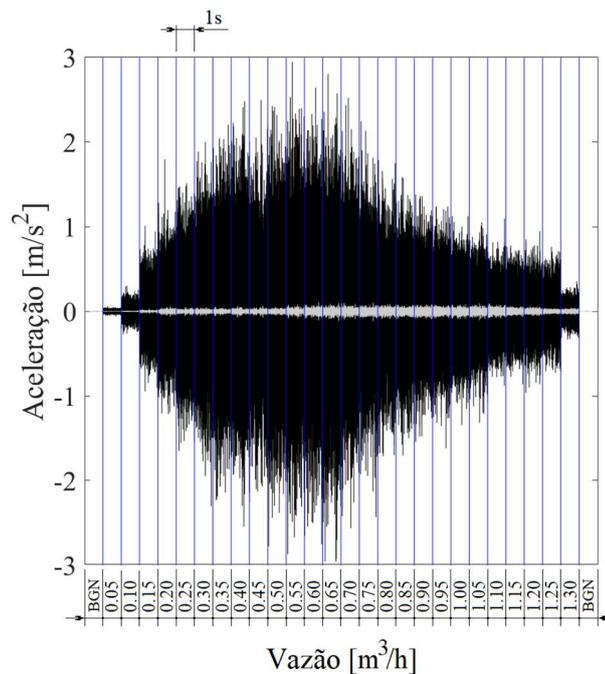


Figura 3.11: Análise no domínio do tempo para verificar a influência da distância entre o ponto de consumo e o ponto onde as medições de vibração são realizadas. Linha preta refere-se aos sinais medidos na válvula instalada em V1, quando a torneira estava instalada em T1, experimento 2 e a linha cinza refere-se aos sinais medidos na válvula instalada em V1, quando a torneira estava instalada em T2, experimento 4.

Também foram plotadas as PSDs dos sinais medidos na válvula V1, quando a torneira estava instalada próxima da válvula, experimento 2, e quando a torneira estava instalada distante da válvula, experimento 4, permitindo a comparação entre os resultados. As Figuras 3.12 (a), (b) e (c), respectivamente faixas de vazões 0,05, 0,65 e 1,25 m³/h mostram estas comparações das PSDs destes sinais adquiridos com o acelerômetro de 500 mV/g.

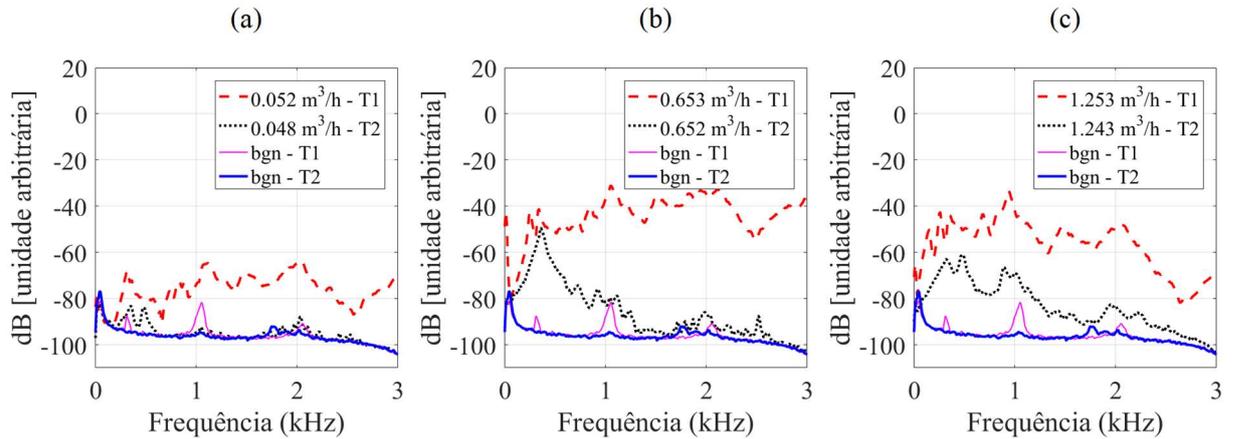


Figura 3.12: Análise no domínio da frequência para verificar a influência da distância entre o ponto de consumo e o ponto onde as medições de vibração são realizadas, sendo: (a) 0,05 m³/h, (b) 0,65 m³/h e (c) 1,25 m³/h.

Tanto com a análise no domínio do tempo, quanto a análise no domínio da frequência, claramente observa-se a influência da distância do local de instalação da torneira na intensidade dos sinais medidos na válvula V1, e isso ocorre devido a atenuação dos sinais através da estrutura da instalação. Com as análises apresentadas até este ponto, já é possível concluir que a torneira é a fonte de excitação de vibração na válvula V1, pois alterando o local de instalação da torneira, altera-se a intensidade de vibração na válvula V1. Essa fonte de excitação é provavelmente devida a interação fluido estrutura que ocorre quando a água escoar pelo mecanismo de abertura e fechamento da torneira. Para reforçar ainda mais esta questão, foi calculada e plotada a coerência entre os sinais adquiridos na torneira e na válvula. A coerência é definida como

$$C_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}, \quad (3.5)$$

onde $S_{xy}(f)$ é o espectro cruzado de frequência, ou do inglês, *Cross Power Spectral Density* (CPSD) e, $S_{xx}(f)$ e $S_{yy}(f)$ as auto densidades espectrais (PSDs) dos sinais temporais $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente. Assim como para as PSDs, os sinais são calculados utilizando enjanelamento Hanning, resolução em frequência de 10 Hz e sobreposição de 50%. As Figuras 3.13 (a), (b) e (c) mostram a coerência entre os sinais medidos na válvula V1 e na torneira,

quando esta estava instalada próxima da válvula, experimento 2, e as Figuras 3.13 (d), (e) e (f) mostram a coerência entre os sinais medidos na válvula V1 e na torneira, quando esta estava instalada distante da válvula, experimento 4. Todos os sinais foram medidos utilizando o acelerômetro de 500 mV/g.

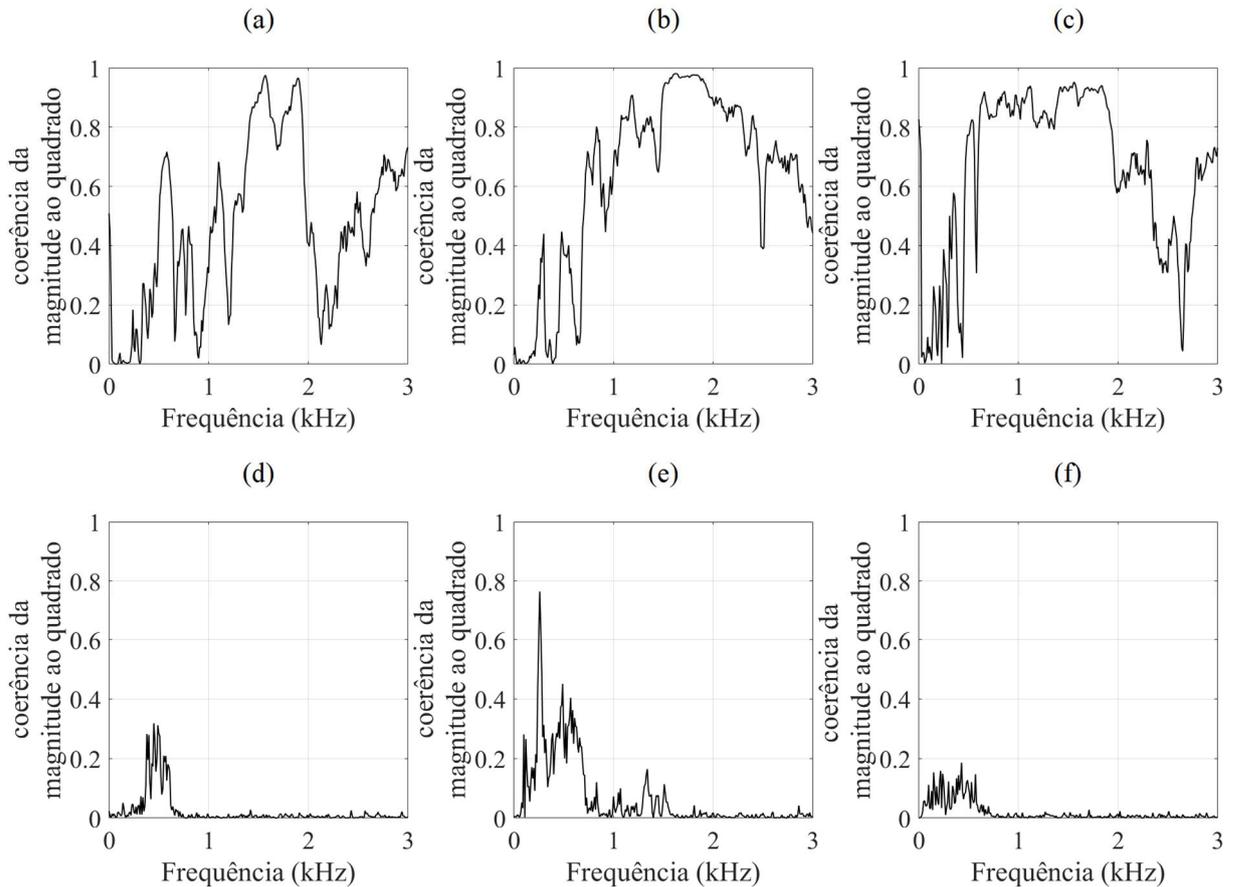


Figura 3.13: Coerência entre os sinais medidos na válvula V1 e na torneira, quando esta estava instalada próxima da válvula, experimento 2, faixas de vazões (a) $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$, (b) $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$ e (c) $1,25 \text{ m}^3/\text{h}$ e quando estava instalada distante da válvula, experimento 4, faixas de vazões (d) $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$, (e) $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$ e (f) $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$.

Analisando os resultados apresentados na Figura 3.13 (a) a (f), observa-se boa coerência entre os sinais medidos na válvula V1 e na torneira, quando esta está instalada próxima da válvula, o resultado da coerência quando a torneira está instalada distante da válvula já não é tão boa, mas isso se dá pela atenuação do sinal ao longo da estrutura da instalação e pela menor interação fluido estrutura que ocorre na torneira quando o fluxo é muito baixo, Figura 3.13 (d) e quando a torneira está totalmente aberta, Figura 3.13 (f).

Por fim, com objetivo de analisar o tipo de sinal, foram plotadas as PSDs dos sinais medidos na válvula V1, para as faixas de vazões em análise, vazões estas medidas quando a torneira estava instalada próxima da válvula, experimento 2, e quando a torneira estava instalada distante da válvula, experimento 4. Os resultados estão apresentados na Figura 3.14 (a) a (f). Segundo Scussel *et al.* (2021), mecanismos que simulam vazamentos possuem uma

característica de vibração randômica em um faixa de frequência limitada e decai com o aumento da frequência. Tais mecanismos se assemelham ao mecanismo de uma torneira, ou seja, interação fluido estrutura. Diante disso e analisando a Figura 3.14 (a) a (f), é possível concluir que o sinal estudado possui características de sinais estacionário aleatórios (randômicos) em uma determinada faixa de frequência e decaimento em função da frequência.

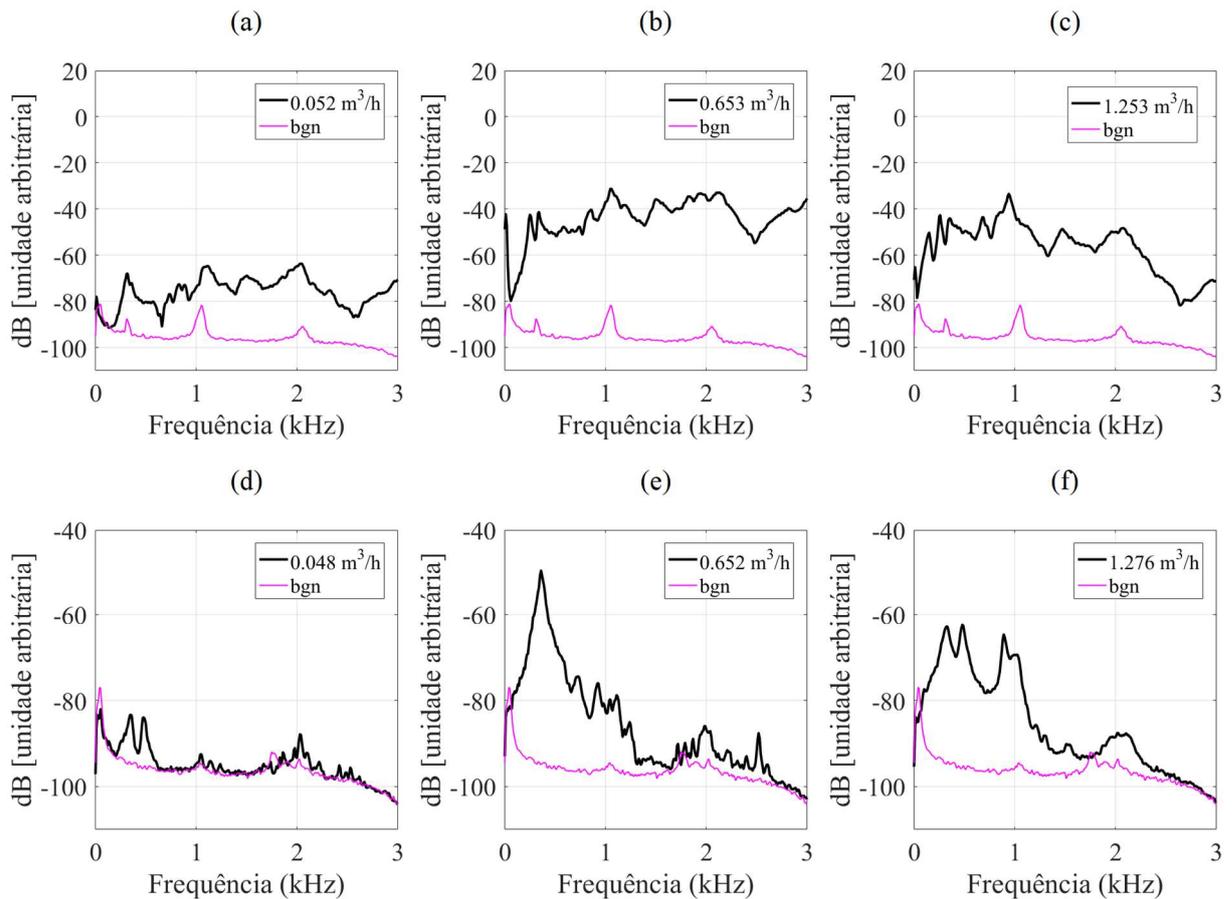


Figura 3.14: Caracterização do tipo de sinal através da análise da PSD dos sinais medidos na válvula V1, quando a torneira estava instalada próxima da válvula, experimento 2, faixas de vazões (a) $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$, (b) $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$ e (c) $1,25 \text{ m}^3/\text{h}$ e quando estava instalada distante da válvula, experimento 4, faixas de vazões (d) $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$, (e) $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$ e (f) $1,3 \text{ m}^3/\text{h}$.

3.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram usadas técnicas clássicas de vibração e análise no domínio do tempo e da frequência para caracterizar o problema e identificar padrões que auxiliem na estimativa da vazão de torneiras via vibração de válvulas, de forma não intrusiva. As principais conclusões estão apresentadas a seguir.

Comparando dois experimentos realizados em dias distintos, mantendo-se similares as condições de medições, não foi possível observar padrões através dos resultados das técnicas

clássicas RMS, Assimetria e Curtose, nem quando comparados os resultados de cada técnica individualmente, nem associando os resultados entre as técnicas, usando para isso, adicionalmente, a análise temporal. Os valores RMS são diferentes comparando os resultados entre os dois experimentos, considerando toda a faixa de frequência em que os sinais brutos foram filtrados (10 Hz a 3 kHz), mas o fato de possuírem comportamentos semelhantes em faixas específicas de frequência, será mais bem investigado no próximo capítulo, associando com a técnica VMD, objetivando buscar uma alternativa para a estimativa da vazão via vibração de válvulas.

Com as análises realizadas no domínio do tempo e da frequência, foi possível concluir que as variações de pressão e vazão na rede de alimentação de água na residência não interferem severamente nos resultados dos sinais medidos, considerando as medições realizadas em mesmo dia e com pequenos intervalos entre as medições, que existe tendência de repetibilidade dos sinais medidos em dias distintos, mantendo-se similares as condições de medições e considerando que tal tendência de repetibilidade ocorre em faixas específicas de frequência, que a torneira é a fonte de excitação de vibração na válvula e que os sinais são do tipo estacionário aleatórios (randômicos) em uma determinada faixa de frequência e decaimento em função da frequência. Também foi possível concluir que a sensibilidade dos acelerômetros tem forte influência no sinal medido e que a distância da fonte de excitação de vibração à válvula V1 tem também grande influência nos resultados das medições, devido a atenuação do sinal ao longo da estrutura da instalação.

O escoamento do fluido e a interação fluido estrutura, causada pela passagem de água no mecanismo de abertura e fechamento da torneira, é um ponto importante a ser considerado nos resultados das análises, pois com a torneira pouco aberta, há grande interação fluido estrutura, já com a torneira totalmente aberta, a interação fluido estrutura é baixa, explicando alguns comportamentos apresentados nas análises. Essa pode ser a explicação para o fato da máxima intensidade de vibração na válvula não ocorrer quando a torneira está totalmente aberta, em sua máxima vazão, mas sim quando a torneira está cerca de 50% aberta, com valor aproximado de $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo crescente a intensidade de vibração até este valor e decrescente a partir disso até a abertura total da torneira, ou seja, quando a torneira está 50% aberta ocorre a maior interação fluido estrutura, sendo esta a razão da maior intensidade de vibração.

CAPÍTULO 4 – UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE DECOMPOSIÇÃO DO MODO VARIACIONAL

4.1 INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores, foi caracterizado o problema analisando os sinais dos experimentos através dos domínios do tempo e frequência juntamente com técnicas de vibração clássicas, como uma alternativa de estimar a vazão da torneira via vibração de válvulas, o que até então não se demonstrou eficaz. Neste capítulo será utilizado o método de decomposição do modo variacional, traduzido do inglês *Variational Mode Decomposition* (VMD), em conjunto com a Densidade Espectral de Potência (técnica de processamento de sinais clássica), como uma forma alternativa de definir automaticamente as larguras de banda de frequência representativas da resposta de vibração de uma válvula do tipo registro, devido a uma excitação de ruído provocada pela passagem de água no mecanismo de abertura e fechamento da torneira. Uma vez definidas estas bandas de frequência, serão calculadas as respectivas frequências centrais e as frequências de pico, além dos valores RMS correspondente ao nível de energia contida nestas bandas de frequência e estas informações servirão de base para o método proposto para estimar a vazão da torneira via vibração de válvulas.

4.2 MÉTODO DE DECOMPOSIÇÃO DE MODO VARIACIONAL

O método *Variational Mode Decomposition* (VMD) foi desenvolvido por Dragomiretskiy e Zosso (2014) com base na teoria relacionada ao *Empirical Mode Decomposition* (EMD) desenvolvida por Huang *et al.* (1998). O EMD é um método adaptativo que decompõe um sinal em modos, chamados de *Intrinsic Mode Functions* (IMF), usado para analisar sinais não lineares e não estacionários. Este algoritmo detecta recursivamente mínimos e máximos locais em um sinal, estima os envelopes inferiores e superiores por interpolação destes extremos, determina a média como linha central e para cada instante de tempo subtrai a amplitude do sinal “original” da linha central determinada e assim tem-se o modo. Portanto, é um método altamente dependente da localização e interpolação de pontos extremos dados pelos

envelopes de portadora, bem como dos critérios de parada impostos. Para cada IMF é aplicada a transformada de Hilbert, gerando assim as componentes de frequências e os resultados é uma distribuição de energia-frequência-tempo, designada como espectro de Hilbert.

O VMD é um método de decomposição autoadaptativo através da construção e solução de problemas variacionais restritos em que o sinal é decomposto simultaneamente em modos, também chamados de IMFs, e são determinadas suas frequências e largura de banda para cada componente IMF, de modo que a soma dos modos reconstrua o sinal de entrada. Qualquer sinal $x(t)$, pode ser escrito como $x(t) = \sum_k u_k(t)$, onde $u_k(t)$ são sinais modulados em frequência e modulados em amplitude escritos como

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\phi_k(t)) \quad (4.1)$$

onde k é o modo, $A_k(t)$ é o envelope não negativo, ou seja, $A_k(t) \geq 0$ e $\phi_k(t)$ é a fase não decrescente, ou seja, $\phi_k(t) \geq 0$. O VMD usa os procedimentos de otimização para um processo variacional restrito, cuja expressão matemática é

$$\min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (4.2)$$

$\{u_k\} = \{u_1, \dots, u_k\}$ representa k componentes após a decomposição, também chamado de modos, e $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \dots, \omega_k\}$ representa as frequências centrais dos componentes após a decomposição; $\delta(t)$ é a função de impulso; a notação $\| \cdot \|_2$ refere-se a norma euclidiana, ou simplesmente norma L^2 . O método Lagrangeano Aumentado (BERTSEKAS, 1976; NOCEDAL; WRIGHT, 2006) é introduzido para transformar o problema de variação restrita em um problema de variação irrestrita, e sua equação é

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = & \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \|x(t) - \sum_k u_k(t)\|_2^2 + \\ & \langle \lambda(t)x(t) - \sum_k u_k(t) \rangle \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde α é o fator de penalidade e λ é o multiplicador de Lagrange.

Baseado no estudo apresentado por BOYD *et al.* (2011), o problema de otimização é resolvido usando o *Alternating Direction Method of Multipliers* (ADMM) para calcular o ponto de sela da função Lagrangeana Aumentada, que é a solução ótima da equação de variação restrita. O problema do ponto de sela é resolvido pela renovação iterativa de u_k^{n+1} , ω_k^{n+1} e λ^{n+1} , ou seja, resolvendo o problema de otimização do problema variacional. As equações matemáticas de u_k^{n+1} e ω_k^{n+1} são

$$u_k^{n+1} = \underset{u_k \in X}{\operatorname{argmin}} \left\{ \alpha \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| x(t) - \sum_i u_i(t) + \frac{\lambda(t)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (4.4 \text{ a})$$

$$\omega_k^{n+1} = \underset{\omega_k}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (4.4 \text{ b})$$

A transformação isométrica Parseval/Plancherel Fourier (OPPENHEIM; SCHAFER, 1999) é usada para transformar as equações de u_k^{n+1} e ω_k^{n+1} no domínio da frequência, atualizando assim o domínio da frequência e as frequências centrais dos modos. Suas equações matemáticas são dadas por:

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{x}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4.5 \text{ a})$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (4.5 \text{ b})$$

A equação $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ é similar ao filtro Wiener (WIENER, 1949) de $\hat{x}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega)$. Além disso, os modos podem ser dados no domínio do tempo usando a transformada de Fourier inversa da Eq. (4.6 a), ou seja, $F^{-1}\{\hat{u}_k^{n+1}(\omega)\}$, de modo que qualquer métrica clássica de processamento de sinal pode ser aplicado a ele, como *Root Mean Square* (RMS) e Densidade Espectral de Potência (PSD).

4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DECOMPOSIÇÃO DO MODO VARIACIONAL E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção serão usados para análise os sinais medidos na haste da válvula V1, na direção axial, usando o acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g, quando a torneira está instalada em T1, ou seja, próximo de V1, para isso serão usados os sinais medidos nos experimentos 1 e 2. O procedimento experimental é o mesmo apresentado e detalhado no Capítulo 2, inclusive com relação ao sistema de aquisição, taxa de amostragem, tempo de aquisição, dentre outros. A análise será realizada usando estes sinais citados, por serem os que apresentaram melhor resposta de vibração devido a excitação da passagem de água pelo mecanismo de abertura e fechamento da torneira, como visto nos capítulos anteriores. A Figura 4.1 mostra o fluxograma da metodologia desenvolvida neste trabalho, objetivando condensar as informações e facilitar o entendimento. No decorrer do texto serão apresentados mais detalhes da análise que complementam o esquema.

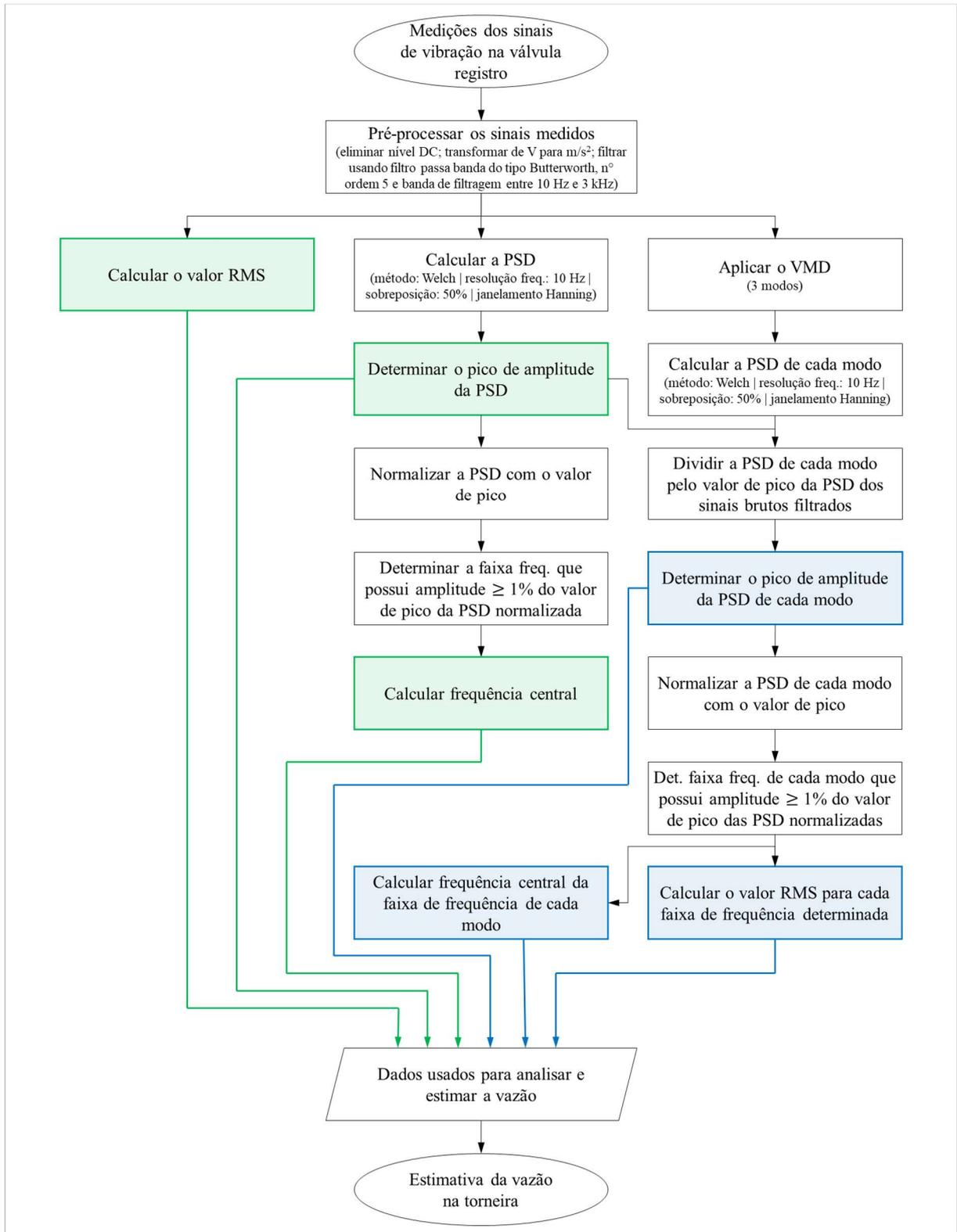


Figura 4.1: Esquema de análise usando *Variational Mode Decomposition* (VMD).

Para aplicar o VMD, foi utilizada a função VMD do Matlab, que se baseia na teoria apresentada na seção 4.2, desenvolvida por Dragomiretskiy e Zosso (2014). Conforme visto nos capítulos anteriores, existem faixas de frequência nas quais a resposta de vibração na válvula, para diferentes taxas de fluxo na torneira, tem características diferentes, portanto, o

método VMD é aplicado nos sinais brutos pré-processados e filtrados, para selecionar automaticamente três faixas de frequência, na tentativa de selecionar conteúdos de baixa, média e alta frequência, para isso, na sintaxe do Matlab foi definido o número de IMF como 3, ou seja, os sinais foram decompostos em três modos. Ainda foi definido na sintaxe, o valor 100 (adimensional) como parâmetro de entrada para o fator de penalidade que determina a fidelidade da reconstrução do sinal de entrada. A filtragem dos sinais brutos pré-processados é a mesma detalhada no Capítulo 2, referente ao projeto do filtro e a definição e justificativa da banda de filtragem, sendo então calculados os valores RMS dos sinais brutos filtrados.

Após a decomposição dos sinais medidos na válvula, para cada faixa de vazão medida na torneira, foi calculada a PSD de cada modo, de todos os sinais decompostos, usando o método de Welch, aplicando uma janela do tipo Hanning, resolução em frequência de 10 Hz e sobreposição de 50%. As PSDs dos três modos, de cada faixa de vazão, foram então divididas pelo valor de pico da PSD do sinal bruto, pré-processado e filtrado, da respectiva faixa de vazão, sendo as PSDs dos sinais brutos calculadas de mesma forma que as PSDs dos modos. Esta razão foi um artifício utilizado para permitir plotar as PSDs dos modos e a PSD dos sinais brutos em um mesmo gráfico, em escala linear, para enfatizar os picos apresentados nos sinais e para facilitar a visualização das três regiões (faixas de frequência) estimadas pelo método VMD, sendo que, desta forma, os picos das PSDs dos modos assumiriam no máximo o valor um (1), uma vez que, na sequência, foram normalizadas as PSDs pelos seus respectivos valores de pico, tal que

$$\bar{S}_{xx}(\omega) = \frac{S_{xx}(\omega)}{\max(S_{xx}(\omega))}, \quad (4.6)$$

onde $S_{xx}(\omega)$ é a PSD e $\max(S_{xx}(\omega))$ é sua amplitude máxima (pico). Em seguida, foram calculadas as faixas de frequência de cada modo, seguindo os critérios usados por Almeida (2013) ao lidar com problemas de detecção de vazamentos. O cálculo é basicamente uma verificação da intensidade do sinal na PSD, onde a faixa de frequência deve possuir intensidade superior ao valor limite de 0,01, a partir da frequência que ocorre o pico de amplitude, ou seja, $\bar{S}_{xx}(\omega) \geq 0,01$. As Figuras 4.2 e 4.3 mostram as PSDs normalizadas dos sinais brutos, linha grossa cinza, e dos modos, linha pontilhada vermelha (IMF1), linha sólida preta (IMF2) e linha tracejada azul (IMF3). Os rótulos “i”, “ii” e “iii” estão relacionados à vazão de 0,05 m³/h, menor vazão, 0,65 m³/h, vazão de maior intensidade de vibração e 1,25 m³/h, maior vazão (torneira totalmente aberta), respectivamente. A faixa de frequência calculada, conforme descrito anteriormente, é representada pela área sombreada em verde. É possível observar que a largura de banda de frequência dos dados brutos cobre a região sobre a qual o método VMD calcula

seus três componentes para a menor vazão. Além disso, também é possível observar que a largura de banda da frequência também muda sua posição de frequência (frequência central) em função da vazão, podendo ser usado como informação adicional para estimar a vazão da torneira. Do mesmo modo foram calculadas as faixas de frequência a partir do pico de amplitude das PSDs dos sinais brutos para obter um comparativo entre os diferentes cenários, bem como os valores RMS.

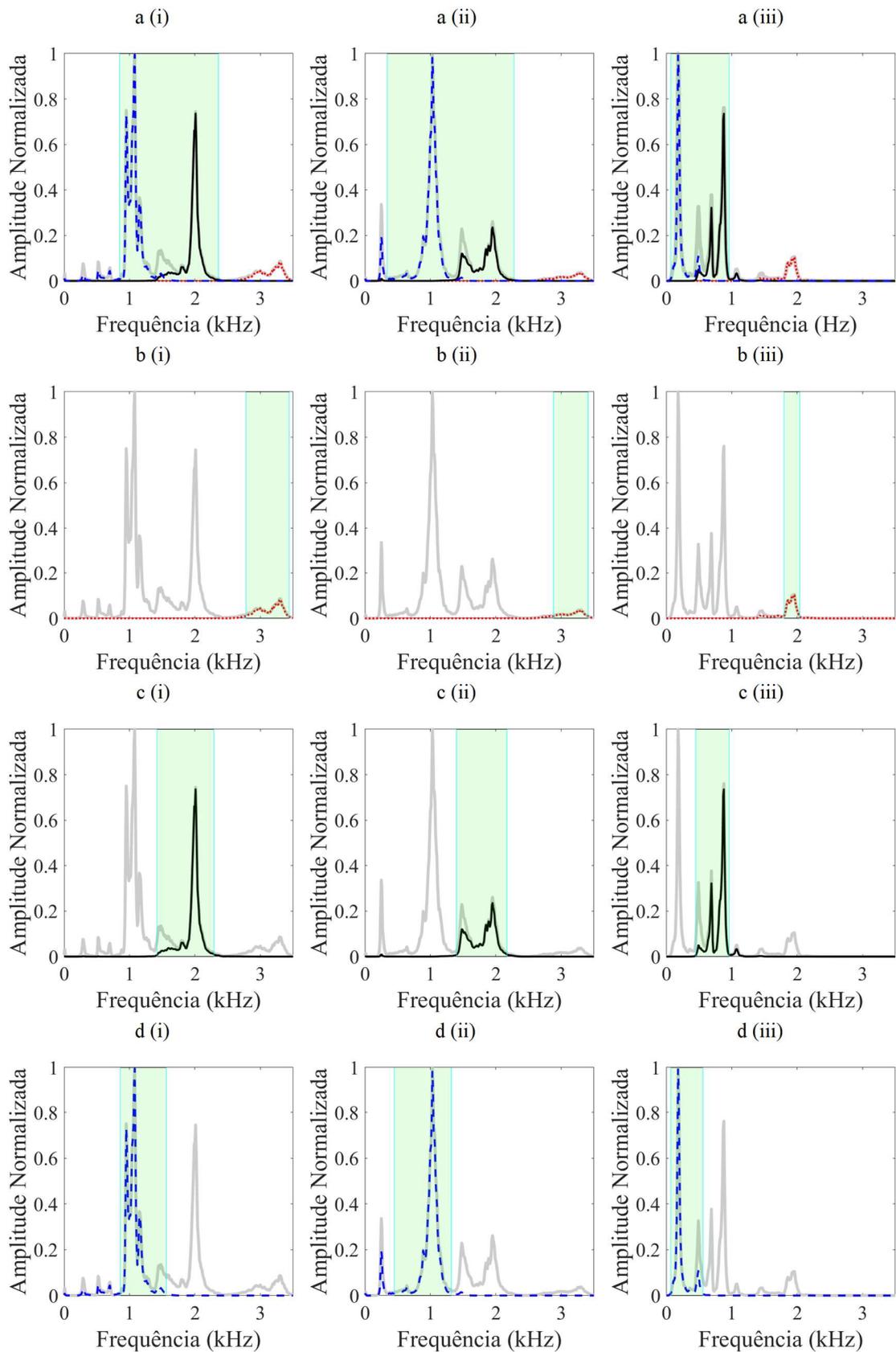


Figura 4.2: PSD normalizado e a faixa de frequência calculada para os (a) dados brutos (linha sólida cinza), (b) IMF1 (linha pontilhada vermelha), (c) IMF2 (linha sólida preta), (d) IMF3 (linha tracejada azul), considerando as vazões de “i” 0,05 m³/h, “ii” 0,65 m³/h e “iii” 1,25 m³/h. Área sombreada em verde, refere-se a faixa de frequência onde a intensidade de vibração é superior ao valor limite de 0,01, a partir da frequência que ocorre o pico de amplitude. Experimento 1, acelerômetro 500 mV/g.

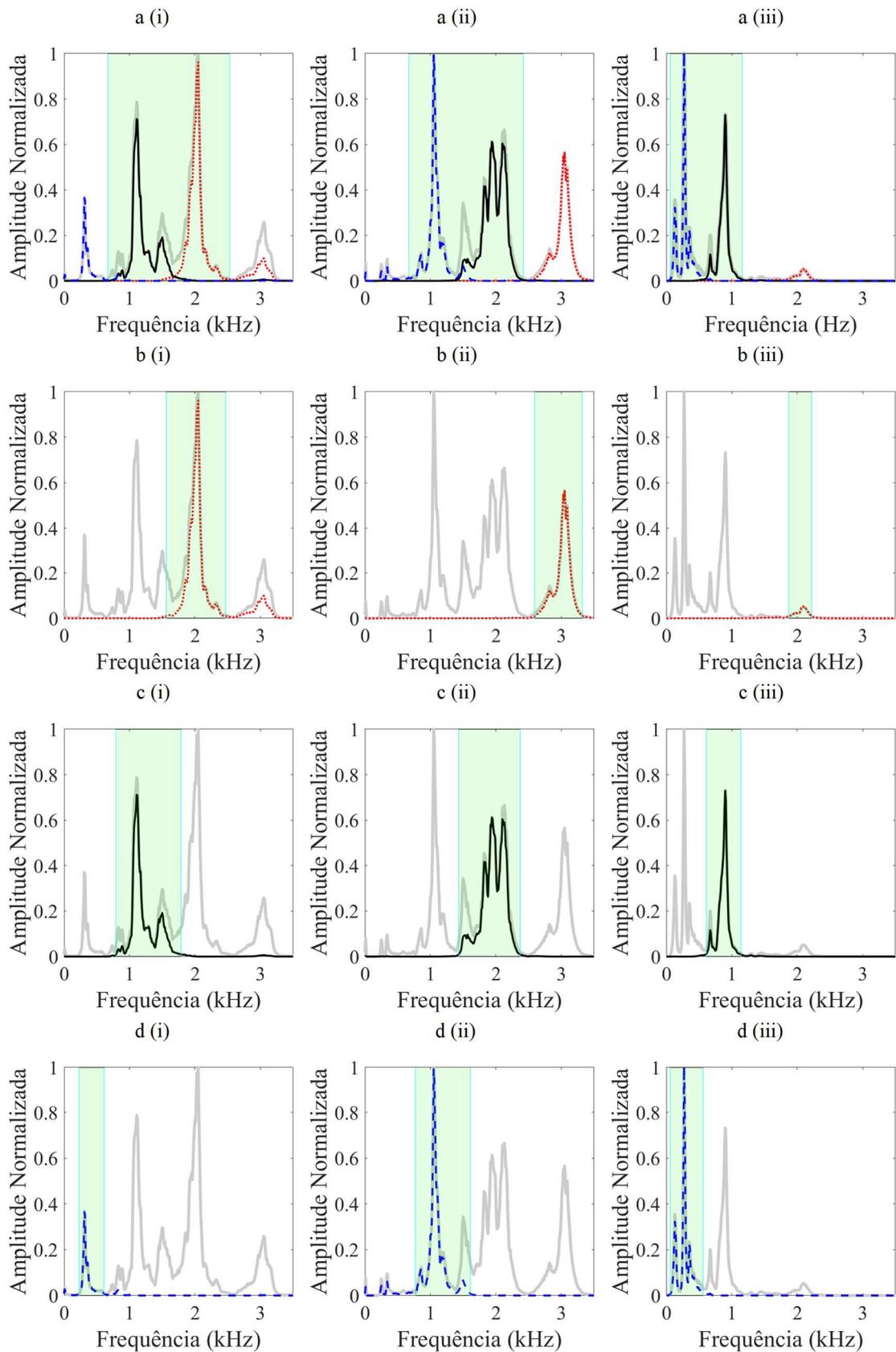


Figura 4.3: PSD normalizado e a faixa de frequência calculada para os (a) dados brutos (linha sólida cinza), (b) IMF1 (linha pontilhada vermelha), (c) IMF2 (linha sólida preta), (d) IMF3 (linha tracejada azul), considerando as vazões de “i” 0,05 m³/h, “ii” 0,65 m³/h e “iii” 1,25 m³/h. Área sombreada em verde, refere-se a faixa de frequência onde a intensidade de vibração é superior ao valor limite de 0,01, a partir da frequência que ocorre o pico de amplitude. Experimento 2, acelerômetro 500 mV/g.

A Figura 4.4 (a) mostra os valores RMS para cada faixa de frequência definida e as Figuras 4.4 (b) e (c), mostram, respectivamente, as frequências centrais e frequência de pico contidas nestas faixas de frequência dadas pelas IMFs. Os valores RMS, frequências centrais e frequências de pico são apresentados para cada taxa de fluxo medida na torneira. A linha grossa cinza refere-se aos dados brutos, a linha pontilhada vermelha refere-se ao IMF1, linha sólida preta refere-se ao IMF2 e linha tracejada azul refere-se ao IMF3. Os rótulos “i” e “ii” referem-se, respectivamente, aos experimentos 1 e 2. Os valores RMS das IMFs são calculados na largura de banda de frequência dada nas Figuras 4.2 e 4.3, representada pela área sombreada em verde. Os valores RMS para as IMFs têm comportamento semelhante aos valores RMS dos dados brutos, especialmente para IMF2.

Nota-se que foi preciso conhecer as vazões medidas na torneira para determinar, via VMD e PSD, as faixas de frequência onde se encontram as frequências de pico e frequências centrais apresentadas na Figura 4.4 (b) e (c), bem como calcular os valores RMS para cada uma destas faixas (Figura 4.4 (a)). Isso é necessário como forma de calibração para estimar a vazão da torneira via vibração da válvula. Tão logo tenha o objeto de estudo calibrado e o proposto nesta seção aplicado, será possível estimar a vazão tendo apenas os sinais de vibração medidos na válvula.

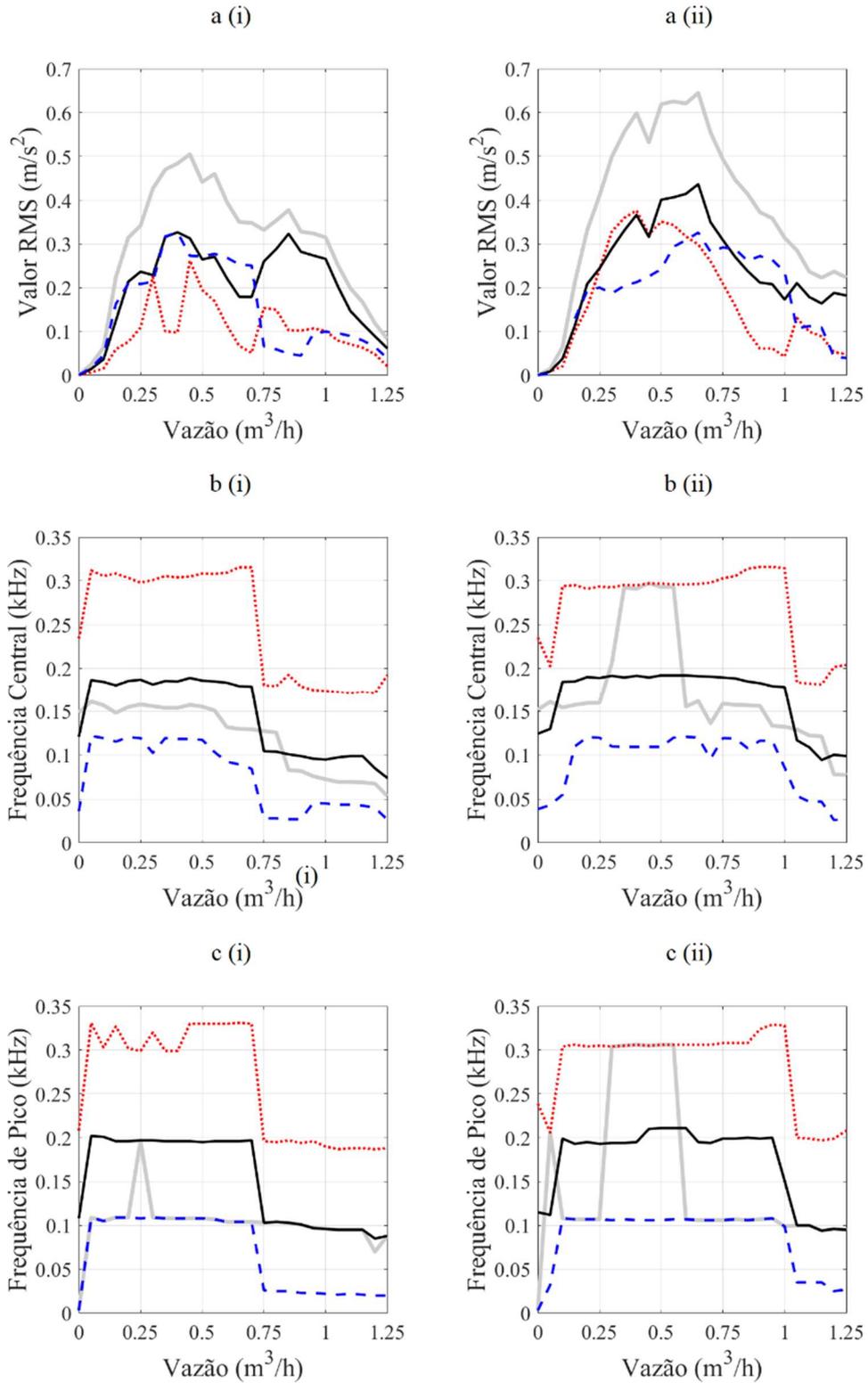


Figura 4.4: Análise no domínio do tempo dada pelo (a) valor RMS e análise do domínio da frequência dada pela (b) frequência central das faixas de frequência calculadas e (c) pico da PSD dos dados brutos e dos modos. Linha sólida cinza refere-se aos dados brutos, Linha pontilhada vermelha refere-se ao IMF1, linha sólida preta, refere-se ao IMF2 e linha tracejada azul refere-se ao IMF3.

Nota-se que o valor RMS calculado via IMF2 possui uma tendência similar ao RMS calculado utilizando o dado bruto. Nota-se também que a frequência dada pelo pico entre os

limites das bandas das IMFs, bem como a frequência central da banda das IMFs tem uma componente de alta frequência para valores relacionados a baixa e média vazão (abaixo de 0,75 m³/h para o experimento 1 e abaixo de 1,00 m³/h para o experimento 2), independente da IMF. O dado bruto possui um comportamento similar para a frequência central para o experimento 1, mas possui um comportamento errático para o experimento 2, demonstrando não ser muito robusto e susceptível a variações. Esse comportamento não é tão proeminente nas IMFs, portanto as mesmas podem ser utilizadas para definir duas bandas de frequência de análise, ou seja, uma banda em alta frequência relacionada com vazões consideradas baixas e intermediárias e outra banda em baixa frequência relacionada com vazões consideradas elevadas. Entretanto, para a análise a ser realizada nesse estudo será utilizado uma média entre os valores RMS das IMFs calculadas, devido à similaridade entre as “curvas” de RMS do dado bruto. Além do mais, a frequência de pico será utilizada como base de cálculo para a estimativa da banda de frequência relacionadas as baixas/moderadas e altas vazões medidas. No caso das IMFs, foi escolhida a IMF 2 devido similaridade com o dado bruto, pelo menos em relação a tendência do valor RMS.

Comparando os valores RMS dos dados brutos com os dados da IMF2, para os dois experimentos, nota-se que há um valor aproximado de RMS em que a vazão é, simultaneamente 0,20 e 1,00 m³/h independente do uso do dado bruto ou das médias das IMFs, ou seja, as curvas dos experimentos são coincidentes para estas vazões. A Figura 4.5 mostra estes resultados, facilitando a visualização de tal fato. A linha grossa cinza é utilizada para valores RMS dos dados brutos do experimento 1, e a linha grossa preta para os valores RMS dos dados brutos do experimento 2. A linha pontilhada cinza é relacionada com a média aritmética das RMS das IMFs do experimento 1 e linha pontilhada preta relacionado com a média das RMS das IMFs do experimento 2. Com o objetivo de investigar se havia tal semelhança para os valores de RMS das IMF, foi calculada a média aritmética dos valores RMS dos três modos, para cada experimento e comparado os resultados, identificando a ocorrência de mesmo fato (mesmo ponto coincidente para as vazões citadas anteriormente), para um nível menor de RMS, mas para mesmos valores de vazão (curvas coincidentes).

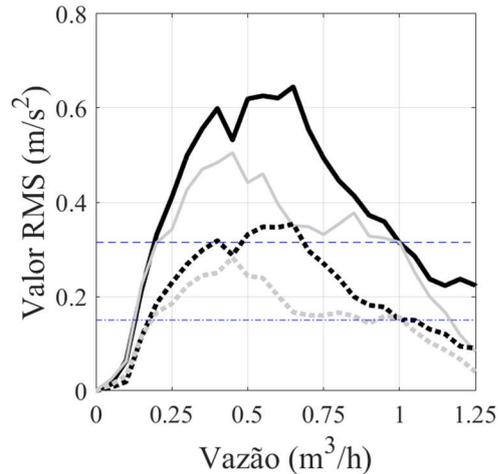


Figura 4.5: RMS dos dados brutos, linhas grossas e média aritmética dos valores RMS das IMF, linhas pontilhadas. Linhas cinzas, experimento 1 e linhas pretas, experimento 2. Linha traço e ponto refere-se ao valor RMS de 0,150 m/s² e linha tracejada azul refere-se ao valor RMS de 0,315 m/s².

Como mencionado anteriormente e é possível observar na figura 4.4, os valores RMS da IMF2 têm comportamento semelhante aos valores RMS dos dados brutos, para os dois experimentos. Portanto, usando os valores da frequência de pico da PSD da IMF2 de cada experimento e o nível RMS dos dados brutos em que a vazão é, simultaneamente, 0,20 e 1,00 m³/h, nos dois experimentos, é possível definir faixas distintas de vazão. A Figura 4.6 ilustra o que foi exposto e permite analisar melhor tais informações. As linhas pretas, valores RMS dos dados brutos e linhas vermelhas, valores da frequência de pico das PSDs da IMF2 para o experimento 1 (Fig. 4.6(a)) e para o experimento 2 (Fig. 4.6(b)).

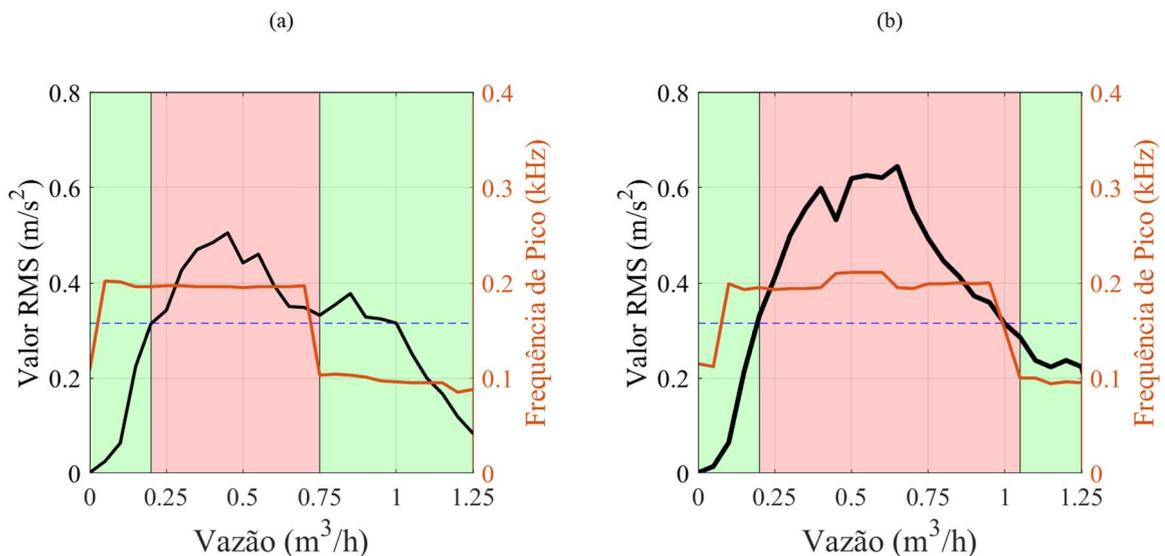


Figura 4.6: Definição das faixas de vazão possíveis de serem estimadas a partir dos valores RMS dos dados brutos (linha preta) e dos valores da frequência de pico das PSDs da IMF2 (linha vermelha), para (a) experimento 1 e (b) experimento 2. Linha tracejada azul refere-se ao valor RMS de 0,315 m/s². Áreas sombreadas em verde representa as faixas de baixa e alta vazão e área sombreada em vermelho representa a faixa de vazão intermediária.

Para os dois experimentos, quando a frequência de pico da PSD da IMF2 é menor ou igual a 104 Hz, é possível afirmar que se trata de alta vazão, sendo, para o experimento 1, valores acima de 0,75 m³/h e para o experimento 2, valores acima de 1,05 m³/h. Quando os valores RMS dos dados brutos é menor ou igual a 0,315 m/s² e a frequência de pico das PSDs da IMF2 é maior ou igual a 108 Hz, é possível afirmar que se trata de baixa vazão, ou seja, vazão menor ou igual a 0,20 m³/h, isso para os dois experimentos. Tais faixas de vazão, baixa e alta, que podem ser determinadas pelos valores RMS dos dados brutos e pelos valores das frequências de pico das PSDs da IMF2, estão representadas pelas áreas sombreadas pela cor verde nos gráficos da Figura 4.6. As vazões moderadas dos dois experimentos, estão representadas nos gráficos da Figura 4.6 pela área sombreada pela cor vermelha.

Considerando as condições apresentadas que são possíveis determinar as áreas sombreadas pela cor verde nos gráficos da Figura 4.6, foram determinadas curvas que melhor se ajustem aos valores RMS dos dados brutos dos dois experimentos, para as duas áreas, baixa e alta vazão, sendo possível, a partir destas curvas ajustadas determinar a vazão da torneira, com certo erro percentual, a partir do valor RMS dos dados brutos filtrados nas faixas de frequência determinadas pelo VMD. Para facilitar o entendimento, e sabendo que a vazão é a incógnita a ser estimada via valor RMS e frequência de pico, plota-se o gráfico do valor RMS para cada faixa de vazão. A Figura 4.7 mostra a vazão em função dos valores RMS dos dados brutos para os dois experimentos 1 (linha preta) e 2 (linha cinza). Os pontos vermelhos são as vazões medidas em função dos valores RMS calculados utilizando os dados brutos dos dois experimentos, pertencentes as faixas de baixa e alta vazão, regiões sombreadas em verde dos gráficos da Figura 4.6.

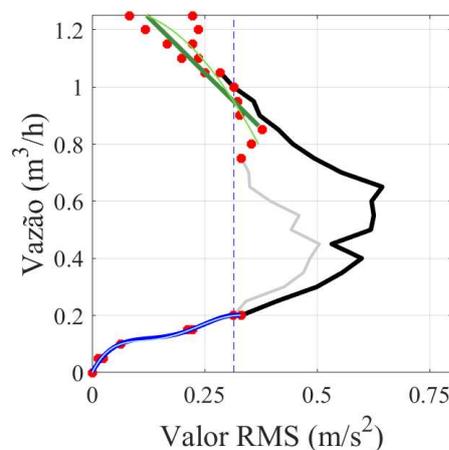


Figura 4.7: Ajuste das curvas a partir dos valores RMS dos dados brutos dos experimentos 1 (linha cinza) e 2 (linha preta), para a partir destas curvas, estimar a vazão da torneira via vibração da válvula. Linha azul grossa e linha azul fina, respectivamente, curvas polinomiais de graus 4 e 5 ajustadas para a região de baixa vazão e linha verde grossa e linha verde fina, respectivamente, curvas polinomiais de graus 1 (reta) e 2 ajustadas para a região de alta vazão. Linha tracejada azul refere-se ao valor RMS de 0,315 m/s².

Ressalta-se mais uma vez que os eixos vazão e valores RMS foram invertidos aqui, pois a vazão seria a variável a ser estimada e que está em função da vibração (valores RMS). Na região de baixa vazão foram ajustadas duas curvas polinomiais de graus 4 e 5, representadas, respectivamente, pela linha azul grossa e linha azul fina. Na região de alta vazão foram ajustadas também duas curvas, sendo uma reta (grau 1) e uma curva polinomial de grau 2, representadas, respectivamente, pela linha verde grossa e linha verde fina.

Outras curvas polinomiais de graus diferentes foram ajustadas, mas as apresentadas aqui são as que apresentaram menor valor do coeficiente de determinação (R^2) e por consequência geraram menores erros percentuais para os dois experimentos. Os erros percentuais calculados a partir destas curvas ajustadas, estão apresentados na Figura 4.8. Na faixa de baixa vazão, as linhas azuis escuros mostram os erros relativos aos valores estimados a partir da curva ajustada polinomial de grau 4 e as linhas azuis claros mostram os erros relativos aos valores estimados a partir da curva ajustada polinomial de grau 5. Na faixa de alta vazão, as linhas verdes escuros mostram os erros relativos aos valores estimados a partir da reta (grau 1) e as linhas verdes claros mostram os erros relativos aos valores estimados a partir da curva ajustada polinomial de grau 2. Em ambas as faixas de vazão, as linhas tracejadas mostram os erros de estimativa comparando aos valores do experimento 1 e as linhas cheias mostram os erros de estimativa comparando os valores do experimento 2.

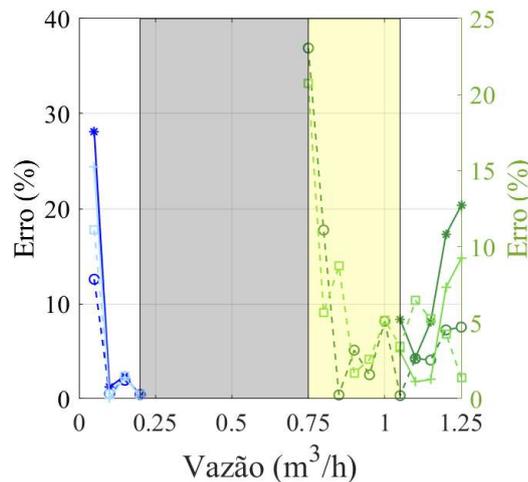


Figura 4.8: Erro percentual da estimativa da vazão a partir dos valores RMS dos dados brutos dos experimentos 1 e 2, usando as curvas ajustadas para esta finalidade. Região de baixa vazão: linha tracejada azul escuro, erros calculados para a curva ajustada polinomial de grau 4, linha tracejada azul claro, grau 5, ambas experimento 1, linha sólida azul escuro, grau 4, linha sólida azul claro, grau 5, ambas experimento 2. Região de alta vazão: linha tracejada verde escuro, erros calculados para a curva ajustada polinomial de grau 1, linha tracejada verde claro, grau 2, ambas experimento 1, linha sólida verde escuro, grau 1, linha sólida verde claro, grau 2, ambas experimento 2.

Analisando os resultados para a faixa de baixa vazão, observa-se que os erros de estimativa são menores para as vazões entre 0,10 e 0,20 m³/h, ficando abaixo de 3%, independente do grau do polinômio usado para ajustar as curvas para estimativa de vazão, este erro aumenta consideravelmente, atingindo valores de quase 28%, quando é estimada a vazão de 0,05 m³/h, isso porque, quando se tem valores muito baixos de vazão para serem estimados, a mínima diferença entre o valor real e o valor estimado já é representativo para o cálculo do erro, além de serem facilmente corrompidos por ruídos espúrios do ambiente, porém, se considerados os erros brutos ao invés dos erros relativos apresentados na Figura 4.8, tais erros são muito pequenos.

Observando a faixa de alta vazão, onde há mais dispersão entre os pontos para ajuste das curvas de estimativa de vazão, pontos estes que representam os valores RMS dos dados brutos para as vazões compreendidas nesta faixa, para os dois experimentos, o erro de estimativa foi maior, em torno de 4% para a maioria dos valores estimados, independente do grau do polinômio usado para ajustar as curvas para estimativa de vazão. Quanto maior a dispersão dos pontos para ajuste das curvas de estimativa, maior é o erro estimado de vazão, caso que ocorre para as vazões 0,75 e 0,80 m³/h, onde o erro atingiu valor de 23% e para as vazões 1,20 e 1,25 m³/h, onde o erro atingiu valor de 13%. O fato é que foi possível estimar a vazão a partir das curvas ajustadas e que os graus dos polinômios usados para ajustá-las, ora é melhor para um dado de um experimento e ora é melhor para o dado do outro experimento. Havendo mais experimentos, ou seja, mais dados, é provável que se encontre curvas que melhor se ajustem aos dados e, portanto, é possível que se tenha menores erros de estimativa.

O mesmo raciocínio foi aplicado para analisar os resultados usando a média das RMS das IMFs dos dois experimentos, ao invés de usar os valores RMS dos dados brutos destes experimentos. A Figura 4.9 mostra as médias das RMS das IMFs dos dois experimentos. A linha cinza refere-se ao experimento 1 e a linha preta refere-se ao experimento 2. Os pontos vermelhos são os valores das médias das RMS das IMFs dos dois experimentos, pertencentes as faixas de baixa e alta vazão, regiões sombreadas em verde dos gráficos da Figura 4.6.

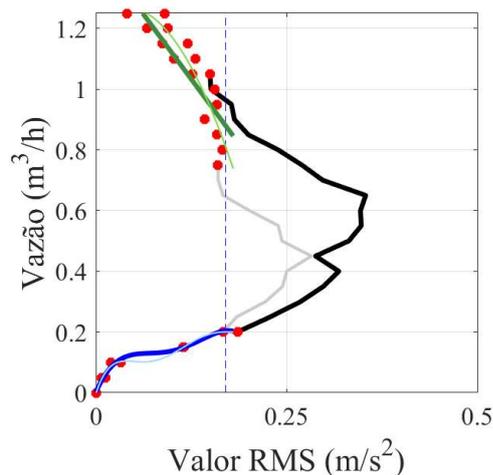


Figura 4.9: Ajuste das curvas a partir dos valores das médias das RMS das IMFs dos experimentos 1 (linha cinza) e 2 (linha preta), para a partir destas curvas, estimar a vazão da torneira via vibração da válvula. Linha azul grossa e linha azul fina, respectivamente, curvas polinomiais de graus 4 e 5 ajustadas para a região de baixa vazão e linha verde grossa e linha verde fina, respectivamente, curvas polinomiais de graus 1 (reta) e 2 ajustadas para a região de alta vazão. Linha tracejada azul refere-se ao valor RMS de 0,150 m/s².

O raciocínio para gerar as informações plotadas no gráfico da Figura 4.9 é exatamente o mesmo usado para gerar as informações plotadas no gráfico da Figura 4.7, apresentado anteriormente, inclusive com relação aos graus dos polinômios usados para ajuste das curvas de estimativa de vazão e as cores e espessuras das linhas usadas para representar tais curvas. Da mesma forma, foram calculados os erros percentuais de estimativa de vazão usando as curvas ajustadas e os valores reais da média das RMS das IMFs dos experimentos 1 e 2, os resultados são mostrados no gráfico da Figura 4.10.

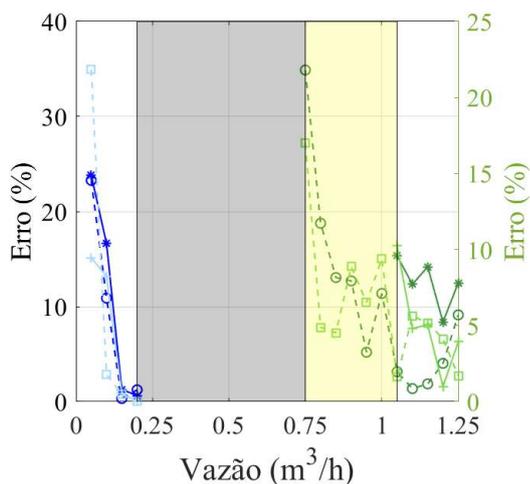


Figura 4.10: Erro percentual da estimativa da vazão a partir dos valores das médias das RMS das IMFs dos experimentos 1 e 2, usando as curvas ajustadas para esta finalidade. Região de baixa vazão: linha tracejada azul escuro, erros calculados para a curva ajustada polinomial de grau 4, linha tracejada azul claro, grau 5, ambas experimento 1, linha sólida azul escuro, grau 4, linha sólida azul claro, grau 5, ambas experimento 2. Região de alta vazão: linha tracejada verde escuro, erros calculados para a curva ajustada polinomial de grau 1, linha tracejada verde claro, grau 2, ambas experimento 1, linha sólida verde escuro, grau 1, linha sólida verde claro, grau 2, ambas experimento 2.

Comparando os resultados dos erros percentuais da estimativa da vazão a partir dos valores RMS dos dados brutos, Figura 4.8, e a partir dos valores das médias das RMS das IMFs, Figura 4.10, ambos dos experimentos 1 e 2, nota-se que no segundo caso houve um ligeiro aumento percentual dos erros, com um comportamento geral parecido com a análise feita para o primeiro caso. Entretanto, os resultados a partir das médias das RMS das IMFs apresentam tendência similar e também poderiam ser utilizados para a estimativa da vazão da torneira, assim como os dados brutos.

4.4 CONCLUSÕES

O *Variational Mode Decomposition* (VMD) é usado para auxiliar na estimativa da taxa de fluxo da torneira, selecionando automaticamente três bandas de frequência sobre as quais a intensidade da vibração e a frequência central podem ser estimadas. As larguras de banda de frequência são calculadas usando a PSD normalizada por seu pico, de modo que a faixa de frequência seja definida quando o módulo da PSD for superior ao valor limite de 0,01. Filtrando os sinais de cada modo pelas faixas de frequência definidas e calculando seus valores RMS, obtêm-se informações que tratadas e correlacionadas com a intensidade de vibração ou frequência central, podem ser usadas para definir as taxas de fluxo da torneira via vibração da válvula registro.

Os resultados demonstraram que foi possível estimar as vazões, com certo erro percentual, para duas faixas distintas de vazões, ou seja, para vazões baixas, até 0,20 m³/h, para os dois experimentos realizados, e para vazões altas, a partir de 0,75 m³/h no caso do experimento 1 e 1,05 m³/h para o experimento 2. Para a faixa de vazão intermediária a estes valores não foi possível estimar as vazões, mas é possível dizer que se trata de uma vazão moderada. De maneira geral, é possível estimar a vazão com erros inferiores a 10% para a maioria das faixas de vazões medidas.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Neste projeto de pesquisa foi investigada a possibilidade de medir a vazão de uma torneira via vibração de válvula, do tipo registro. O problema foi caracterizado, onde ficou evidenciado que a vibração causada pela passagem de água através mecanismo de abertura e fechamento da torneira, é a fonte de excitação na válvula registro e que os sinais medidos na válvula possuem características de um sinal de vibração randômico que decai ao longo da frequência, característica notada principalmente para aqueles de baixa intensidade.

Foi verificada a influência, nos sinais medidos, de possíveis variações da pressão e vazão da rede de distribuição e alimentação de água na residência. Para isso foram realizadas repetidas medições, com intervalos de medição bem próximos, no mesmo dia, e a conclusão é que a interferência não é severa. Quando o intervalo entre as medições é grande, como por exemplo em medições realizadas em dias distintos, mesmo mantendo-se semelhantes todas as condições de medição, verifica-se que esta influência é maior que no caso anterior, embora seja possível observar uma tendência de repetição das características dos sinais, para faixas específicas de frequência.

A distância entre a torneira e a válvula causa influência na intensidade dos sinais de vibração, ou seja, quando a fonte excitadora de vibração está mais distante da válvula, a intensidade do sinal de vibração diminui, pois o sinal é atenuado ao longo da estrutura da instalação. Isso foi confirmado modificando o local de instalação da torneira e comparando a intensidade de vibração dos sinais medidos quando a torneira estava instalada próxima e quando a torneira estava instalada distante da válvula.

Acelerômetros de sensibilidades diferentes foram testados, e conclui-se que o acelerômetro de sensibilidade 10 mV/g não funciona adequadamente quando a fonte excitadora de vibração estava mais distante da válvula, pois este mediu apenas o ruído de fundo proveniente da instrumentação. Quando a torneira estava instalada próxima a válvula, ele funciona com limitações. O acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g funcionou bem quando a torneira estava instalada próxima a válvula e funciona com limitações quando a fonte excitadora de vibração está distante da válvula.

Usando técnicas clássicas de vibração RMS, Assimetria e Curtose, isoladamente ou correlacionando-as, não foi possível identificar padrões que permitisse usá-las para estimar a vazão da torneira via vibração de válvulas. O método VMD, associado ao PSD, foi então utilizado para encontrar automaticamente as bandas de frequência representativas da intensidade dos sinais de vibração, para cada faixa de vazão medida na torneira. Um método foi proposto, usando informações a partir destas faixas de frequência determinadas pelo método VMD em conjunto com as PSDs, sendo então possível estimar a vazão da torneira para duas faixas distintas de vazão, consideradas faixas de baixa vazão, até 0,20 m³/h, para os dois experimentos realizados, e faixas de alta vazão, acima de 0,75 m³/h para o experimento 1 e acima de 1,05 m³/h para o experimento 2. A estimativa de vazão nestas faixas se deu, de maneira geral, com erro inferior a 10% para a maioria dos valores estimados. Não foi possível estimar a vazão para os valores intermediários a estas faixas de vazão, podendo apenas assumir que se trata de uma vazão moderada. Esta conclusão considera as medições feitas com o acelerômetro de sensibilidade 500 mV/g e com a torneira instalada próxima a válvula.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente estudo conclui-se que é possível estimar a vazão da torneira usando os sinais de vibração medidos na válvula, para faixas de baixa e alta vazão, com erro inferior a 10% para a maioria dos valores estimados, para uma faixa intermediária de vazão é possível afirmar que se trata de vazão moderada, sem ser possível estimar seu valor, portanto como sugestão para trabalhos futuros é possível avançar este estudo para refinar esta estimativa, definindo ainda uma alternativa para conseguir estimar as vazões intermediárias, permitindo com isso determinar com mais precisão os valores de vazão da torneira.

Com os avanços tecnológicos, especialmente relativo à capacidade de transmissão, processamento e armazenamento de dados, as tomadas de decisões serão cada vez mais rápidas e embasadas e o uso de técnicas como inteligência artificial, *machine learning*, *Internet of Things* (IoT), *big data* entre outras, estarão cada vez mais presentes em nosso dia a dia, podendo certamente, com o avanço desta pesquisa, usar tais tecnologias para propor soluções de aquisição de sinais de vibração de baixo custo e maior acuracidade das medições.

CAPÍTULO 6 – TRABALHOS REALIZADOS

Durante o projeto de pesquisa, as seguintes atividades e trabalhos foram realizados:

1. Apresentação oral do trabalho “Investigação da estimativa de consumo de água em residências via vibração de válvulas” no XIII seminário do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, realizado no dia 28 de novembro de 2019, na Faculdade de Engenharia Bauru.
2. Submetido o artigo “*On the investigation of flow rate measurements using tap noise and Variational Mode Decomposition*”, sendo apresentado oralmente e publicado nos anais do 42° Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia (XLII CILAMCE) e 3° Congresso Pan-Americano de Mecânica Computacional (III PANACM), realizado de 9 a 12 de novembro de 2021, desenvolvido inteiramente no formato online.
3. Apresentação oral do trabalho “Investigação de medições de taxa de fluxo usando ruído de torneira e Decomposição de Modo Variacional” no XIV seminário do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, realizado entre os dias 29 de novembro e 2 de dezembro de 2021, desenvolvido inteiramente no formato online.

REFERÊNCIA

- ALMEIDA, F.C.L. *et al.* An Illustration of Some Methods to Detect Faults in Geared Systems Using a Simple Model of Two Meshed Gears. *In: EKWARO-OSIRE, S., GONÇALVES, A. C., ALEMAYEHU, F. M. (editors). Probabilistic Prognostics and Health Management of Energy Systems*. 1. ed. Switzerland: Springer, Cham, 2017. p. 221-239.
- ALMEIDA, Fabrício C. L. **Improved Acoustic Methods for Leak Detection in Buried Plastic Water Distribution Pipes**. 2013. Thesis (Doctor of Philosophy) – Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, Southampton, March 2013.
- ARATO Jr., A. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. 1st ed. São Paulo, Brasil: Editora Manole, 1994.
- BALKEMA, A. A. Hydraulics and Hydraulic Research: A Historical Review. International Association for Hydraulic Research 1935-1985. **Journal of Fluids Mechanics**, United Kingdom, v. 192, p. 596–599, July 1987.
- BAO, J. *et al.* VMD-based vibrating fiber system intrusion signal recognition. **Optik**, Amsterdam, v. 205, March 2020.
- BERTSEKAS, D. P. Multiplier methods: A survey. **Automatica**, United Kingdom, v. 12, Issue 2, p. 133–145, March 1976.
- BOYD, S. *et al.* Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers. **Foundations and Trends in Machine Learning**, United States, v. 3, n. 1, p. 1-122, July 2011.
- DIAO, X. *et al.* An improved variational mode decomposition method based on particle swarm optimization for leak detection of liquid pipelines. **Mechanical Systems and Signal Processing**, United States, v.143, September 2020.
- DINARDO, G. *et al.* Vibrational Signal Processing for Characterization of Fluid Flows in Pipes. **Measurement**, Netherlands, v. 113, p. 196-204, January 2018.
- DINARDO, G.; FABBIANO, L.; VACCA, G. Fluid Flow Rate Estimation Using Acceleration Sensors. *In: International Conference on Sensing Technology (ICST), 7., 2013, Wellington, New Zealand. Proceedings [...].* New Zealand: IEEE, 3–5 December 2013. p. 221–225.
- DOEBELIN, E. O. **Measurement Systems: Application & Design**, 5. ed. United States: McGraw-Hill Science, Engineering and Math, 2003.
- DOGARIU, L. M.; BENESTY, J.; PALEOLOGU, C.; CIOCHINA, S. An Insightful Overview of the Wiener Filter for System Identification. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 11, Issue 17, August 2021.
- DRAGOMIRETSKIY, K.; ZOZZO, D. Variational Mode Decomposition. **IEEE Transactions on Signal Processing**, United States, v. 62, n. 3, February 2014.

DUTTA, P.; NANDI, N. Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends. **Mechanics and Mechanical Engineering**, Poland, v. 19, n. 1, p. 5–16, January 2015.

EVANS, R. P.; BLOTTER, J. D.; STEPHENS, A. G. Flow Rate Measurements Using Flow-Induced Pipe Vibration. **Journal of Fluids Engineering**, United States, v. 126, Issue 2, p. 280-285, March 2004.

FARIA, Regis R. A. **Aplicação de Wavelets na análise de gestos musicais em timbres de instrumentos acústicos tradicionais**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 7. ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2010.

GÖKSU, H. Flow Measurement by Wavelet Packet Analysis of Sound Emissions. **Measurement and Control**, United Kingdom, v. 51(3-4), p. 104-112, April 2018.

HAO, Y. *et al.* Leakage Signal Analysis of Urban Gas Pipeline Based on Improved Variational Mode Decomposition. **International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence**, Singapore, v. 34, Issue 13, December 2020.

HUANG, N. E. *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of **The Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, United Kingdom, v. 454, Issue 1971, p. 903-995, March 1998.

ISHAM, M. F. *et al.* Variational mode decomposition: mode determination method for rotating machinery diagnosis. **Journal of Vibroengineering**, Lithuania, v. 20, Issue 7, p. 2604-2621, November 2018.

JACOBS, H. E.; SKIBBE, Y.; BOOYSEN, M. J.; MAKWIZA, C. Correlating sound and flow rate at a tap, **Procedia Engineering**, United Kingdom, v. 119, p. 864-873, 2015.

JANZEN, Ryan E. **Hydraulophones: Acoustic musical instruments and expressive user interfaces**. 2008. Thesis (Master of Applied Science) – Graduate Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Toronto, 2008.

JOSEPH, K. M.; WATTEYNE, T.; KERKEZ, B. Awa: Using Water Distribution Systems to Transmit Data. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, United States, v. 29, Issue 1, e3219, January 2018.

KAEWAEWNOI, W.; PRATEEPASEN, A.; KAEWTRAKULPONG, P. Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage, **Measurement**, Netherlands, v. 43, Issue 2, p. 274-282, February 2010.

LANNES, D. P.; GAMA, A. L.; BENTO, T. F. B. Measurement of Flow Rate Using Straight Pipes and Pipe Bends with Integrated Piezoelectric Sensors. **Flow Measurement and Instrumentation**, United Kingdom, v. 60, p. 208-216, April 2018.

LI, S.; KARNEY, B. W.; LIU, G. FSI Research in Pipeline Systems – A review of the Literature. **Journal of Fluids and Structures**, United Kingdom, v. 57, p. 277-297, August 2015.

LIAN, J. *et al.* Adaptive variational mode decomposition method for signal processing based on mode characteristic. **Mechanical Systems and Signal Processing**, United States, v. 107, p. 53-77, July 2018.

MEDEIROS, K. A. R. *et al.* Flowmeter Based on a Piezoelectric PVDF Tube. **Measurement**, Netherlands, v. 138, p. 368-378, May 2019.

MEDEIROS, K. A. R. *et al.* Optimization of Flow Rate Measurement using Piezoelectric Accelerometers: Application in Water Industry. **Measurement**, Netherlands, v. 91, p. 576-581, September 2016.

MIAO, Y.; ZHAO, M.; LIN, J. Identification of mechanical compound-fault based on the improved parameter-adaptive variational mode decomposition, **ISA Transactions**, United States, v. 84, p. 82-95, January 2019.

NAZARI, M.; SAKHAEI, S. M. Successive variational mode decomposition, **Signal Processing**, Netherlands, v. 174, 107610, September 2020.

NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. **Numerical Optimization**, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2006.

OLIVEIRA, E. C.; AGUIAR, P. F. Validação da metodologia da avaliação de incerteza em curvas de calibração melhor ajustadas por polinômios de segundo grau. **Química Nova**, Brasil, v. 32, n. 6, p. 1571-1575, setembro 2009.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-time Signal Processing**, 2nd ed. United States: Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 1999.

PAPASTEFANOU, A. S.; JOSEPH, P. F.; BRENNAN, M. J. Experimental Investigation into the Characteristics of In-Pipe Leak Noise in Plastic Water Filled Pipes. **Acta Acustica united with Acustica**, Germany, v. 98, n. 6, p. 847-856, November / December 2012.

PAPASTEFANOU, Anastasia. **An experimental investigation of leak noise from water filled plastic pipes**. 2011. Thesis (Doctor of Philosophy) – Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, Southampton, April 2011.

ROCHA, Vanessa Bueno da. **Uma abordagem de Wavelets aplicada à combinação de previsões: uma análise teórica e experimental**. 2008. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Área de Concentração em Matemática, Setores de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

Rojek, I.; Studzinski, J. Detection and Localization of Water Leaks in Water Nets Supported by an ICT System with Artificial Intelligence Methods as a Way Forward for Smart Cities. **Sustainability**, Switzerland v. 11, n. 2: 518, January 2019.

SCUSSEL, O. *et al.* Estimating the spectrum of leak noise in buried plastic water distribution pipes using acoustic or vibration measurements remote from the leak. **Mechanical Systems and Signal Processing**, United States, v. 147, January 2021.

SHARMA, V.; PAREY, A. Performance Evaluation of Decomposition Methods to Diagnose Leakage in a Reciprocating Compressor under Limited Speed Variation. **Mechanical Systems and Signal Processing**, United States, v. 125, p. 275-287, July 2019.

SILVA, Marcelo Araújo da. **Aplicação do lagrangeano aumentado em otimização estrutural com restrições dinâmicas**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Engenharia de Estruturas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

STOLLNITZ, E. J.; DEROSE, T. D.; SALESIN, D. H. Wavelets for computer graphics: A primer, part 1. **IEEE Computer Graphics and Applications**, United States, v. 15, n. 3, p. 76–84, May 1995.

SURADKAR, A.; SURYAWANSHI, S. R. Numerical Analysis of Fluid Flow Induced Vibration of Pipes – A Review. **International Journal of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER)**, India, v. 3 Issue 4, p. 1058-1062, April 2016.

TORREALBA, Elvis Rodriguez. **Uma classe de métodos de lagrangeano aumentado: convergência e testes numéricos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

WANG, Y. *et al.* Research on variational mode decomposition and its application in detecting rub-impact fault of the rotor system. **Mechanical Systems and Signal Processing**, United States, v. 60-61, p. 243-251, August 2015.

WANG, Y.; MARKERT, R. Filter bank property of variational mode decomposition and its applications. **Signal Processing**, Netherlands, v. 120, p. 509-521, March 2016.

Wiener, N. **Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series**, 1st ed. United States: MIT and John Wiley & Sons, 1949.

XIAO, Q. *et al.* A Small Leak Detection Method Based on VMD Adaptive De-Noising and Ambiguity Correlation Classification Intended for Natural Gas Pipelines. **Sensors**, China, v. 16, Issue 12, December 2016.

XIAO, Q. *et al.* Natural-gas Pipeline Leak Location using Variational Mode Decomposition Analysis and Cross-Time-Frequency Spectrum. **Measurement**, Netherlands, v. 124, p. 163-172, April 2018.

ZHENG, P.; ZHANG, J. Application of Variational Mode Decomposition and k-Nearest Neighbor Algorithm in the Quantitative Nondestructive Testing of Wire Ropes. **Shock and Vibration**, United Kingdom, v. 2019, Article ID 9828536, 14 pages, February 2019.

APÊNDICE A – ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS NOS DIAS 21/07/2020 E 05/08/2020 PARA DEFINIÇÃO DO PONTO E DIREÇÃO DA MEDIÇÃO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO NA VÁLVULA INSTALADA EM V1

A seguir são mostrados os gráficos plotados para análise e definição do melhor local de fixação do acelerômetro na válvula instalada em V1, assim como da melhor direção de medição. A Figura A.1 (a), (b), (c) e (d) mostra a análise e resultado para o experimento realizado no dia 21/07/2021 e a Figura A.2 (a), (b), (c) e (d), mostra a análise e resultado para o experimento realizado no dia 05/08/2021. Para dos gráficos das Figuras A.1 (a), (b) e (c) e A.2 (a), (b) e (c), a linha vermelha está relacionada com a direção axial, a linha preta com a direção longitudinal e a linha cinza com a direção transversal. Para os gráficos das Figuras A.1 (d) e A.2 (d), a linha azul a direção axial medida na haste, a linha verde a direção axial medida no corpo e a linha magenta a direção transversal medida na parede, próximo a válvula.

O melhor local, e direção, é aquele que se mostre mais sensível a excitação de vibração, ou seja, onde a energia de vibração é maior para cada faixa de vazão medida na torneira. Os sinais do experimento realizado no dia 05/08/2020 sofreram alguma interferência externa durante suas medições, tais como, por exemplo, acionamento de cerca elétrica, uso de algum eletrodoméstico na residência, eventuais oscilações da rede de energia elétrica, entre outros.

Essas interferências são percebidas pelo comportamento dos sinais vistos nos gráficos da Figura A2, que muito embora tenham sido eliminados os níveis DC, se mostram deslocados do eixo central que passa pelo valor zero de aceleração, especificamente dos sinais medidos a partir da 13ª vazão. Ainda que tenha ocorrido tal evento, isso não impossibilitou concluir que, também neste experimento, o acelerômetro fixado na haste da válvula, na direção axial, foi o que apresentou maior amplitude de vibração.

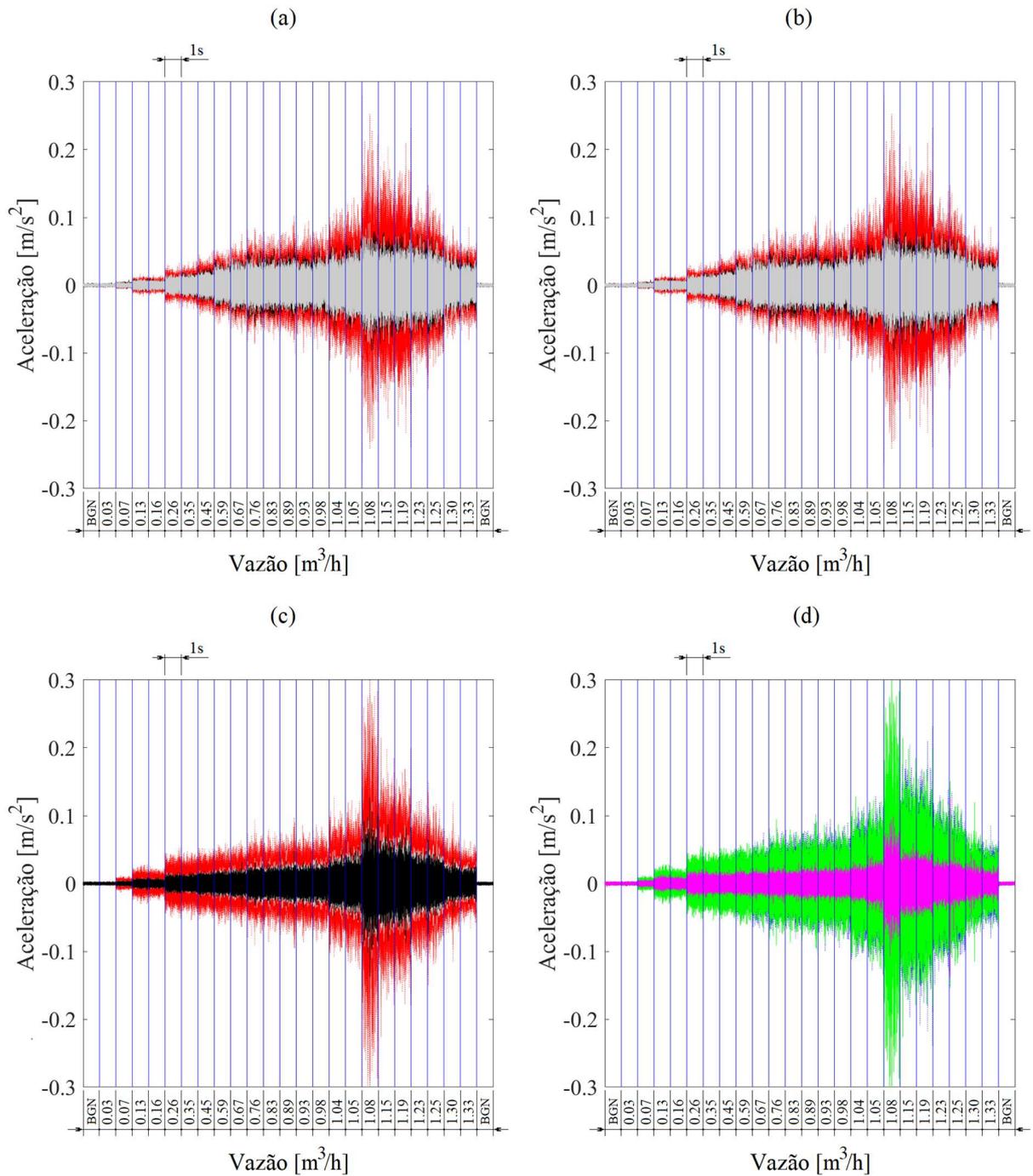


Figura A.1: Medições com o acelerômetro fixado (a) na haste da válvula instalada em V1, (b) no corpo da válvula instalada em V1, (c) na parede, próximo a válvula instalada em V1, sendo linha vermelha direção axial, linha preta direção longitudinal e linha cinza direção transversal. E comparação entre as direções com maior amplitude de vibração de cada um dos acelerômetros fixados nestas posições (d), sendo linha azul a direção axial medida na haste, linha verde a direção axial medida no corpo e linha magenta a direção transversal medida na parede, próximo a válvula.

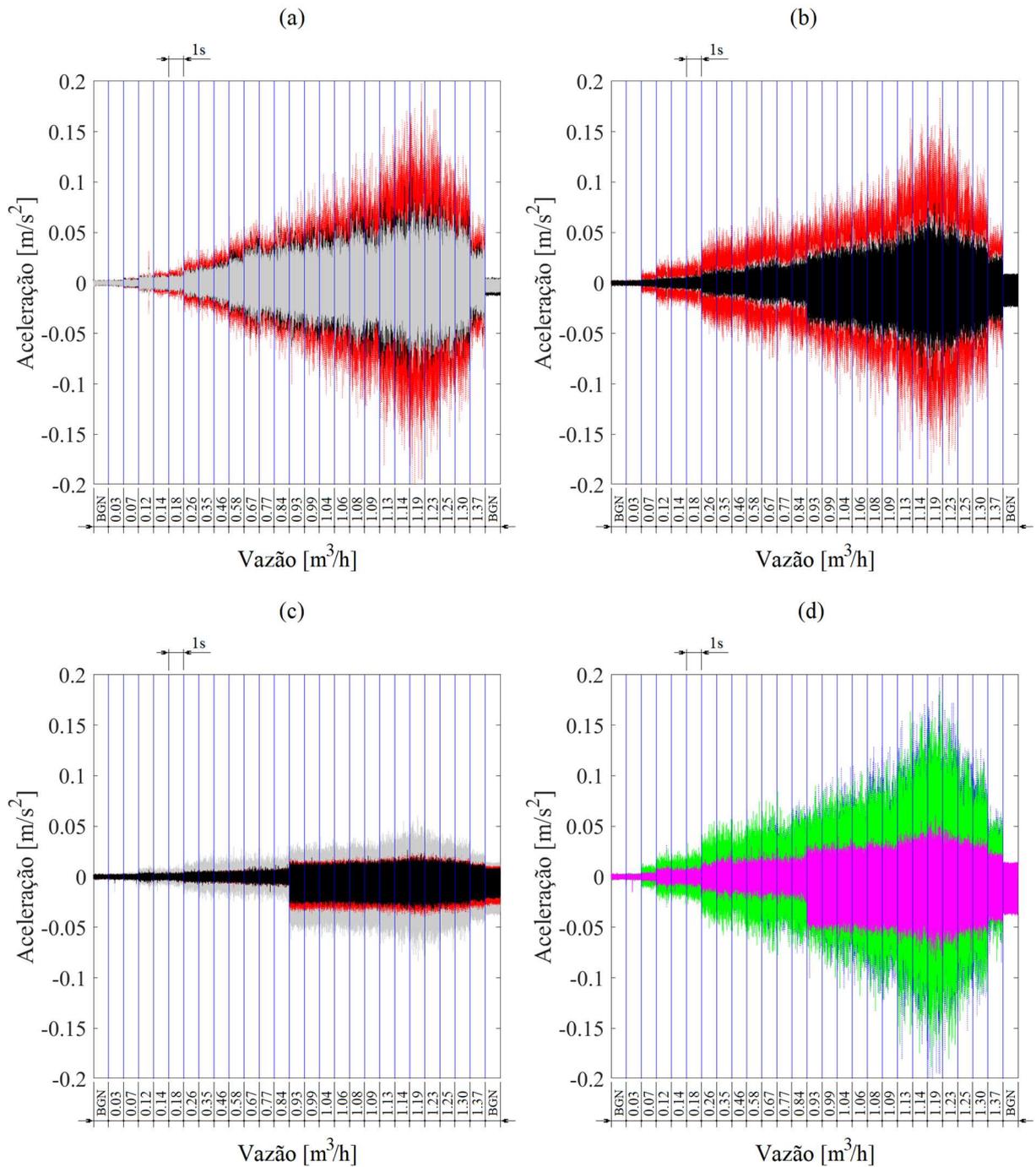


Figura A.2: Medições com o acelerômetro fixado (a) na haste da válvula instalada em V1, (b) no corpo da válvula instalada em V1, (c) na parede, próximo a válvula instalada em V1, sendo linha vermelha direção axial, linha preta direção longitudinal e linha cinza direção transversal. E comparação entre as direções com maior amplitude de vibração de cada um dos acelerômetros fixados nestas posições (d), sendo linha azul a direção axial medida na haste, linha verde a direção axial medida no corpo e linha magenta a direção transversal medida na parede, próximo a válvula.