

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos**

Filipe Augusto Resende Mota

**TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO: estudo  
experimental e computacional de vazamentos em tubulações**

Belo Horizonte  
2026

Filipe Augusto Resende Mota

**TRANSITÓRIOS HIDRÁULICOS COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO: estudo experimental e computacional de vazamentos em tubulações**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e recursos hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem física e matemática em hidráulica

Orientador: Prof. Dr. Bruno Melo Brentan

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Meirelles Lima

M917t

Mota, Filipe Augusto Resende.

Transitórios hidráulicos como ferramenta de diagnóstico [recurso eletrônico]: estudo experimental e computacional de vazamentos em tubulações / Filipe Augusto Resende Mota. - 2026. 1 recurso online (145 f.: il., color.): pdf.

Orientador: Bruno Melo Brentan.

Coorientador: Gustavo Meirelles Lima.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui Bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia Sanitária – Teses. 2. Recursos Hídricos – Teses.
3. Transitórios hidráulicos – Teses. 4. Hidrologia – Teses.
5. Água – Distribuição – Teses. 6. Detectores de vazamento – Teses.
- I. Brentan, Bruno Melo. II. Lima, Gustavo Meirelles.
- III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
- IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Escola de Engenharia  
Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

"Transitórios Hidráulicos como Ferramenta de diagnóstico: estudo experimental e computacional de vazamentos em tubulações"

**FILIPE AUGUSTO RESENDE MOTA**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos(as) Senhores(as):

Prof. Dr. Bruno Melo Brentan - Orientador

Prof. Dr. Gustavo Meirelles Lima

Prof. Dr. Edna Maria de Faria Viana

Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares

Aprovação da Versão Final da Dissertação por:

Coordenação do PPG-SMARH

Professor Bruno Melo Bentrán (Orientador).

Belo Horizonte, 23 de fevereiro de 2026



Documento assinado eletronicamente por **Edna Maria de Faria Viana, Professora do Magistério Superior**, em 24/02/2026, às 11:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Meirelles Lima, Professor do Magistério Superior**, em 24/02/2026, às 11:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Kepler Soares, Usuário Externo**, em 24/02/2026, às 16:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Melo Brentan, Professor do Magistério Superior**, em 25/02/2026, às 19:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Coutinho de Paula, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 04/03/2026, às 16:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4972670** e o código CRC **D7A139CB**.

---

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço profundamente à minha mãe, Elisabete, e ao meu pai, Anderson, por todo o apoio inestimável aos meus estudos desde a infância. Sua dedicação, incentivo constante e suporte foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha namorada, Laramy, agradeço por todo o carinho, paciência e compreensão ao longo desta jornada. Seu apoio incondicional foi essencial nos momentos de dificuldade e motivação nos períodos mais desafiadores que a caminhada do mestrado proporcionou.

Expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Dr. Bruno Brentan, por todo o conhecimento compartilhado, pela ótima orientação, desde tempos de iniciação científica, e por estar sempre disposto a ajudar. Agradeço também ao meu coorientador, Dr. Gustavo Meirelles, pela disponibilidade, dedicação e por todo o auxílio nas atividades de laboratório, contribuindo para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço aos amigos e colegas do mestrado e do grupo de pesquisa Hydro\_UAI, que sempre se mostraram solícitos e colaborativos, tornando o processo de aprendizado mais enriquecedor.

Estendo meus agradecimentos a todos os professores do SMARH, pelo empenho e pelos valiosos ensinamentos transmitidos nas diversas disciplinas, que ampliaram minha formação acadêmica.

A todos os familiares e amigos, que direta ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse onde estou, deixo aqui o meu sincero agradecimento.

Por fim, agradeço ao apoio financeiro recebido da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo suporte concedido ao desenvolvimento desta pesquisa por meio do projeto APQ-00199-22.

## RESUMO

A perda de água devido a vazamentos é um dos principais desafios enfrentados pelos sistemas de abastecimento, ocasionando impactos econômicos e ambientais significativos. Diversas técnicas têm sido desenvolvidas e aprimoradas nas últimas décadas para mitigar esse problema, destacando-se os métodos baseados em escoamentos transitórios, que se apresentam como uma alternativa promissora para a detecção de vazamentos. Com isso este trabalho investiga a ocorrência de vazamentos em tubulações de abastecimento de água por meio da análise de transitórios hidráulicos, utilizando dados experimentais e simulações computacionais nos domínios do tempo e da frequência. O objetivo principal é avaliar a capacidade dos transitórios em detectar vazamentos sob diferentes condições de operação, analisando a influência de parâmetros como a magnitude e a localização do vazamento, bem como as condições iniciais do escoamento. A metodologia foi estruturada em três etapas principais. Desenvolveu-se um modelo computacional simplificado, destinado a ilustrar o comportamento dos transitórios e das ondas de pressão. Elaborou-se um modelo representativo do sistema laboratorial, buscando reproduzir as condições experimentais. E realizaram-se ensaios experimentais variando-se a vazão inicial, o tamanho e a posição dos vazamentos, além das condições de manobra, permitindo a comparação direta entre os resultados numéricos e laboratoriais. Os resultados evidenciaram que o comportamento das ondas de pressão é sensível tanto à magnitude quanto à localização do vazamento, permitindo identificar padrões característicos associados às diferentes condições de operação. No domínio da frequência, observou-se variação nos espectros associada à presença e à posição do vazamento, reforçando o potencial da análise espectral como ferramenta complementar de diagnóstico. Entretanto, algumas limitações foram identificadas. As diferenças entre os modelos computacional e experimental estão relacionadas a fatores físicos do arranjo laboratorial, como as curvas de 180° e a posição dos sensores no ponto de vazamento. O arranjo adotado também gerou variações significativas nas métricas e nos gráficos dos sensores próximos ao vazamento, refletindo o impacto local, mas reduzindo a eficácia da detecção. As curvas de 180° provocaram aumento na amplitude e maior dispersão nos espectros de frequência experimentais, evidenciando a influência da geometria da tubulação na propagação e reflexão das ondas. Apesar dessas restrições, as análises apresentaram resultados consistentes, possibilitando compreender de forma mais ampla o comportamento do sistema e contribuindo para o aprimoramento de futuras modelagens e interpretações de sinais transitórios em condições reais.

Palavras-chave: Detecção de vazamento; Análise experimental; Transiente hidráulico; Domínio do tempo; Domínio da frequência.

## ABSTRACT

Water loss due to leaks is one of the main challenges faced by water supply systems, leading to significant economic and environmental impacts. Several techniques have been developed and improved over the past decades to mitigate this problem, with transient flow-based methods standing out as a promising alternative for leak detection. In this context, this study investigates the occurrence of leaks in water supply pipelines through the analysis of hydraulic transients, using experimental data and computational simulations in both the time and frequency domains. The main objective is to evaluate the ability of transients to detect leaks under different operating conditions, analyzing the influence of parameters such as leak magnitude and location, as well as the initial flow conditions. The methodology was structured into three main stages. A simplified computational model was developed to illustrate the behavior of transients and pressure waves. A representative model of the laboratory system was built to reproduce the experimental conditions. And experimental tests were carried out by varying the initial flow rate, leak size and position, and maneuver conditions, allowing direct comparison between numerical and laboratory results. The findings showed that the behavior of pressure waves is sensitive to both the magnitude and location of leaks, enabling the identification of characteristic patterns associated with different operating conditions. In the frequency domain, variations in the spectra were observed in relation to the presence and position of leaks, reinforcing the potential of spectral analysis as a complementary diagnostic tool. However, some limitations were identified. The differences between the computational and experimental models were mainly related to physical aspects of the laboratory setup, such as 180° bends and the position of sensors near the leak point. The adopted configuration also caused significant variations in the metrics and plots of sensors located close to the leak, reflecting local effects but reducing detection efficiency. The 180° bends increased the amplitude and dispersion in the experimental frequency spectra, highlighting the influence of pipeline geometry on wave propagation and reflection. Despite these constraints, the analyses yielded consistent results, providing a broader understanding of system behavior and contributing to the improvement of future modeling approaches and transient signal interpretation under real-world conditions.

Keywords: Leak detection; Experimental analysis; Hydraulic transient; Time domain; Frequency domain.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perdas no sistema de distribuição de água.....	20
Figura 2: Perdas de água por país .....	21
Figura 3: Perdas de água por região no brasil .....	22
Figura 4: Métodos para a detecção de vazamentos.....	24
Figura 5: Método da vazão mínima noturna.....	32
Figura 6: Primeiros momentos do escoamento transitório em uma tubulação conectada a um reservatório .....	38
Figura 7: Variação gráfica da carga hidráulica na válvula durante um transiente sem e com perda de carga .....	40
Figura 8: Malha das retas características no plano x-t.....	45
Figura 9: Pressões em tubulação com e sem vazamentos .....	48
Figura 10: Variação da pressão sem (a) e com (b) vazamentos com ITA.....	49
Figura 11: Gráficos com a resposta ao impulso com e sem vazamento .....	50
Figura 12: Domínio do tempo e da frequência .....	56
Figura 13: Assimetrias negativas e positivas.....	64
Figura 14: Curtose positiva e negativa .....	65
Figura 15: Cenários realizados no estudo.....	68
Figura 16: Esquema do cenário 1 .....	69
Figura 17: Esquema do cenário 2 .....	70
Figura 18: Representações da bancada experimental .....	73
Figura 19: Exemplo do ponto de coleta de pressão e simulação de vazamentos .....	74
Figura 20: Ilustração dos vazamentos em diferentes magnitudes.....	75
Figura 21: Manobras hidráulicas realizadas em laboratório .....	76
Figura 22: Manobras realizadas variando vazão e vazamento em P1 .....	77
Figura 23: Manobra rápida e lenta no cenário 1 sem vazamento.....	81
Figura 24: Manobra rápida e lenta no ponto P1 e P2 no modelo padrão sem vazamento .....	82
Figura 25: Manobra rápida em ambos os domínios no ponto P1 e P2 no cenário 1 sem e com vazamento em V1.....	83
Figura 26: Manobra lenta e rápida no ponto P2-3 no cenário 2 sem e com vazamento em P1 .....	84

Figura 27: Manobra lenta no ponto P2-3 no cenário 2 sem e com vazamento em pontos distintos (P1 e P4).....	85
Figura 28: Manobras no domínio da frequência no cenário 2 sem vazamento .....	86
Figura 29: Manobras no domínio da frequência no cenário 2 .....	87
Figura 30: Exemplo de um ciclo de manobras no domínio do tempo com vazamento em P1 .....	89
Figura 31: Manobras D com vazão inicial máxima e variação da magnitude dos vazamentos .....	91
Figura 32: Manobras D no cenário 3 (a) e cenário 2 (b) com vazamento médio e em P1 .....	93
Figura 33: Manobras D no cenário 3 (a) e cenário 2 (b) com vazamento médio e em P4.....	94
Figura 34: Manobras E com vazão máxima e vazamento médio em P1 (a) e P4 (b).....	95
Figura 35: Manobras D com vazão máxima e vazamento máximo em P4.....	96
Figura 36: Manobra D no sensor P3 no laboratório sem e com vazamento em pontos distintos (P1 e P4).....	97
Figura 37: Exemplo de um gráfico no domínio da frequência (Cenário 3) .....	98
Figura 38: Manobras D sem vazamento com variação da vazão inicial.....	99
Figura 39: Manobra rápida sem vazamento no cenário 2 .....	100
Figura 40: Manobras A com vazão máxima e variação da magnitude de vazamento .....	101
Figura 41: Manobras A com vazamento máximo .....	102
Figura 42: Manobras D com vazão máxima e variação da magnitude de vazamento .....	104
Figura 43: Manobras lentas no cenário 2 com vazamento mínimo e máximo.....	105
Figura 44: Manobras rápidas no cenário 2 com vazamento mínimo e máximo.....	106
Figura 45: Manobras D com vazão máxima e vazamento médio em P1 e P4 .....	107
Figura 46: Manobras E com vazão máxima e vazamento médio em P1 e P4 .....	108
Figura 47: Manobras D experimentais com vazamentos em P1 (esquerda) e em P4 (direita) no domínio da frequência.....	110
Figura 48: Manobras do cenário 2 no sensor 2-3 com vazamentos em P4 no domínio da frequência (Lenta e Rápida).....	111
Figura 49: Manobras D com vazão inicial média em cada sensor para cada magnitude de vazamento (Vazamento em P1).....	112

Figura 50: Métrica amplitude total no modelo computacional do laboratório.....	123
Figura 51: Métrica RMS no cenário 2.....	124
Figura 52: Métrica RMS no cenário 1.....	125
Figura 53: Comparação entre o RMS no cenário 2 (Manobra lenta) e cenário 3 com vazamento máximo em P1.....	126
Figura 54: Métrica fator de crista no sensor P2-3 para o cenário 2.....	128
Figura 55: Métrica fator de margem para o cenário 2 e 3 (Manobra D).....	130
Figura 56: Diagrama de corpo livre da seção do fluido.....	146

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Magnitudes de vazamento realizados em cada cenário .....	71
Quadro 2: Valores médio de pressão em manobras com vazamento máximo nos cenários 1 e 2 e manobras D do cenário 3 em m.c.a. ....	116
Quadro 3: Entropia nos cenários 2 e 3.....	117
Quadro 4: Coeficiente de assimetria em manobras com vazamento máximo nos cenários 1 e 2 e manobras D do cenário 3.....	119
Quadro 5: Valores de curtose no cenário 3 para manobras D com vazão inicial máxima .....	121
Quadro 6: Curtose para a manobra E com vazamento máximo.....	122
Quadro 7: Resumo dos resultados das métricas e seu nível de aplicabilidade.....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Divisão da detecção de vazamentos .....	25
Tabela 2: Vazões dos vazamentos no modelo do laboratório .....	71
Tabela 3: Vazões iniciais do sistema .....	75
Tabela 4: Medições dos vazamentos no laboratório .....	76
Tabela 5: Tempo de análise de cada manobra para cada vazão inicial .....	78
Tabela 6: Métricas RMS e energia total para o cenário 3 com vazão máxima e manobra D.....	127

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

- ADB - Asian Development Bank (Banco Asiático de Desenvolvimento)
- ANN - Artificial neural networks (Redes neurais artificiais)
- DFT - Discrete Fourier transform (Transformada discreta de Fourier)
- FFT - Fast Fourier transform (Transformada rápida de Fourier)
- FRM - Frequency domain response analysis (Análise no domínio da frequência)
- IRA - Impulse response analysis (Análise de resposta ao impulso)
- ITA - Inverse transient analysis (Análise inversa de transitórios hidráulicos)
- LRM - Leak reflection method (Método de reflexão de vazamento)
- NBR - Norma brasileira registrada
- PIG - Pipeline inspection gauge (Aparelho de inspeção de tubos)
- SINISA - Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico
- SWM - Smart water methods (Métodos inteligentes para sistemas de água)
- TCV - Throttle control valve (Válvula reguladora de vazão)
- TDM - Transient damping method (Método de amortecimento transitório)
- VMN - Vazões mínimas noturnas

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	16
2	OBJETIVOS .....	18
2.1	Objetivo Geral .....	18
2.2	Objetivos Específicos .....	18
3	REVISÃO DA LITERATURA .....	19
3.1	Perdas de Água nas Redes de Abastecimento .....	19
3.1.1	Cenário mundial .....	20
3.1.2	Cenário brasileiro .....	21
3.1.3	Perdas de Água por Vazamentos .....	22
3.2	Técnicas de detecção de vazamento .....	24
3.2.1	Métodos baseados em hardware .....	25
3.2.2	Métodos baseados em software .....	28
3.3	Escoamento Transitório .....	35
3.3.1	Introdução ao escoamento transitório .....	35
3.3.2	Modelagem matemática do escoamento transiente .....	36
3.3.3	Modelos Matemáticos para resolução das equações parciais do transitório 42	
3.3.4	Método das Características .....	43
3.4	Detecção de vazamentos a partir da análise da resposta transitória .....	47
3.5	Processamento de sinais .....	54
3.5.1	Transformada de Fourier .....	56
3.6	Métricas de análise .....	61
4	METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS .....	68
4.1	Modelo computacional padrão (Cenário 1) .....	68
4.2	Modelo computacional do experimento (Cenário 2) .....	70
4.2.1	Modelo experimental (Cenário 3) .....	71
4.3	Tratamento de dados .....	78
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	79
5.1	Modelo computacional padrão (Cenário 1) .....	81
5.2	Modelo computacional do experimento (Cenário 2) .....	83
5.3	Modelo experimental (Cenário 3) .....	87
5.3.1	Domínio do tempo: comparação com os cenários simulados .....	91
5.3.2	Domínio da frequência: comparação com os cenários simulados .....	97
5.4	Métricas .....	114
5.4.1	Domínio do tempo .....	114

5.4.2	Domínio da frequência.....	127
5.4.3	Síntese das métricas .....	130
5.5	Discussão sobre as Limitações.....	132
6	CONCLUSÕES.....	134
7	RECOMENDAÇÕES.....	135
	REFERÊNCIAS.....	136
	APÊNDICE A – Equações do escoamento transiente.....	146
	APÊNDICE B – Métricas calculadas .....	150

## 1 INTRODUÇÃO

Toda a civilização moderna convive com o desafio da manutenção sustentável dos seus recursos. A água, em especial, se faz presente com sua essencialidade e traz consigo inúmeros desafios na conservação e constância do abastecimento em todo o meio urbano.

A busca por alternativas e inovações tecnológicas que promovam a sustentabilidade dos recursos hídricos é fundamental para assegurar a disponibilidade de água para as atuais e futuras gerações. Um dos principais desafios nesse contexto é a redução das perdas nos sistemas de abastecimento, o que exige um gerenciamento eficiente e baseado em um conhecimento aprofundado tanto da infraestrutura quanto das próprias perdas de água. A identificação e quantificação precisa dessas perdas são etapas essenciais para a implementação de estratégias eficazes de mitigação, contribuindo para a conservação da água e a melhoria da eficiência operacional dos sistemas de distribuição (HELLER e PÁDUA, 2010).

A média global de perdas de água é estimada em aproximadamente 126 bilhões de metros cúbicos por ano (LIEMBERGER e WYATT, 2019). Do ponto de vista econômico, essas perdas têm um impacto significativo, elevando os custos operacionais, reduzindo a receita e limitando a capacidade das empresas de abastecimento de água de expandirem seus serviços à população (ARREGUI *et al.*, 2018).

A variação percentual das perdas de água entre os países é substancial. De acordo com o relatório do instituto Trata Brasil de 2025, que se baseia em variadas fontes de informação (como no Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA) de 2023 e no *International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities* (IBNET) de 2022) nos países com melhores indicadores ainda são vistas perdas de quase 10% da água produzida. Já em países menos desenvolvidos, surgem índices de mais de 50%, chegando a 80%.

Um fator relevante nas perdas de água são os vazamentos nas tubulações. Em média, mais de 20% da água distribuída se perde devido a esses vazamentos. (EL-ZAHAB e ZAYED, 2019).

Para mitigar as perdas por vazamentos nos sistemas de abastecimento de água, diversas soluções têm sido propostas na literatura ao longo das últimas décadas. NEGM *et al.* (2023) classificou os métodos de detecção de vazamentos em dois grupos principais: métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos envolvem inspeções visuais e o uso de sensores acústicos ou equipamentos para identificar vazamentos. Já os métodos indiretos analisam variáveis hidráulicas, como variações de pressão e vazão, para inferir a presença de vazamentos. Dentre os variados métodos tem-se aqueles que se baseiam no uso do escoamento transitório para a detecção dos vazamentos.

Esse tipo de escoamento surge devido à uma alteração das condições hidráulicas em uma tubulação de água (normalmente causada pela manobra de uma válvula ou bomba), gerando uma onda de pressão (CHAUDHRY, 2014). Essa propagação de onda transitória é afetada por anomalias, como vazamentos, obstruções ou irregularidades. Especificamente, a presença de um vazamento aumenta a taxa de amortecimento ou provoca reflexões na curva de pressão do sinal transitório (MENICONI *et al.*, 2010 *apud* FARAH e SHAHROUR, 2024, p. 8).

Sendo assim, este estudo tem como objetivo avaliar os sinais de pressão durante eventos transitórios, nos domínios do tempo e da frequência, a fim de investigar a potencialidade dessa abordagem na detecção e quantificação de vazamentos em sistemas hidráulicos. Para isso, a metodologia será baseada na análise do fenômeno transitório, sendo avaliada por meio de experimentos laboratoriais e de modelagem computacional. Diferentes condições operacionais serão consideradas, incluindo variações da vazão inicial, distintas localizações de vazamentos ao longo do sistema e diferentes dimensões de abertura dos vazamentos.

A análise dos dados será realizada nos domínios do tempo e da frequência, permitindo uma compreensão detalhada do comportamento das variações de pressão e suas correlações com a presença de vazamentos. Ao trabalhar com ambos os domínios de análise, torna-se característico utilizar métricas específicas para cada um, a fim de interpretar adequadamente os sinais e extrair informações relevantes.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Investigar a ocorrência de vazamentos em tubulações de abastecimento de água por meio da análise de transitórios hidráulicos, integrando dados experimentais e simulações computacionais, com ênfase nas abordagens nos domínios do tempo e da frequência com o auxílio de análise gráfica e de métricas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Explorar, nos domínios do tempo e da frequência, a influência da magnitude dos vazamentos no padrão de propagação dos transitórios hidráulicos, avaliando sua sensibilidade em diferentes condições de abertura;
- Avaliar o impacto da posição do vazamento ao longo da tubulação na resposta dos transitórios, destacando o efeito da localização espacial para o diagnóstico das perdas em diferentes domínios;
- Identificar e caracterizar, a partir de análises temporais e espectrais, padrões consistentes de comportamento dos transitórios hidráulicos diante de variações nas condições iniciais experimentais.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Perdas de Água nas Redes de Abastecimento

Em todo o mundo o abastecimento de água nas cidades é um dos objetivos principais para o desenvolvimento econômico e da qualidade de vida. HELLER e PÁDUA (2010) ditam que do ponto de vista dos recursos hídricos existentes no planeta, tanto os superficiais quanto os subterrâneos, verificam-se diversos usos demandados pelas populações e pelas atividades econômicas, alguns deles resultando em perdas entre o volume de água captado e o volume que retorna ao curso de água (usos consuntivos) e outros em que essas perdas não se verificam (usos não consuntivos).

O abastecimento de água por meio de tubulações apresenta diversas perdas ao longo do sistema, que podem ser classificadas em duas categorias principais (Figura 1). A primeira delas corresponde às perdas aparentes, que incluem fraudes, irregularidades cadastrais e erros de medição. A segunda categoria refere-se às perdas físicas (também chamadas de perdas reais), predominantemente causadas por vazamentos ao longo do processo de captação, adução e distribuição até os domicílios (AL-WASHALI *et al.* 2020). Essas perdas representam não apenas um desperdício de recurso hídrico, mas também um impacto econômico significativo, especialmente quando envolvem água já tratada. Nesse caso, além das questões de sustentabilidade, há um custo adicional associado ao tratamento e à energia empregada no bombeamento, tornando a detecção e a mitigação dessas perdas essenciais para a eficiência operacional do sistema de abastecimento.

**Figura 1: Perdas no sistema de distribuição de água**

Água que entra no sistema (inclui água importada)	Consumo autorizado	Consumo autorizado faturado	Consumo faturado medido (inclui água exportada)	Água faturada	
			Consumo faturado não medido (estimado)		
	Perdas de água	Consumo autorizado não faturado		Consumo não faturado medido (uso próprio, caminhão pipa, entre outros)	Água não faturada
				Consumo não faturado não medido	
		Perdas aparentes (comerciais)		Uso não autorizado (fraudes e falhas de cadastro)	
				Erros de medição (macro e micromedição)	
		Perdas reais (físicas)		Vazamentos e extravasamentos nos reservatórios (de adução e/ou distribuição)	
				Vazamentos nas adutoras e/ou redes (de distribuição)	
	Vazamentos nos ramais até o ponto de medição do cliente				

Fonte: TRATA BRASIL (2025), adaptado

Essas perdas de água somadas com o consumo autorizado não faturado apresentam a água que não é faturada (Figura 1). Um elevado índice de água não faturada devido as perdas reais indica que grandes volumes são desperdiçados e não são cobrados dos consumidores. Isso pode comprometer gravemente a sustentabilidade financeira das empresas de abastecimento de água, devido à perda de receita e ao aumento dos custos operacionais.

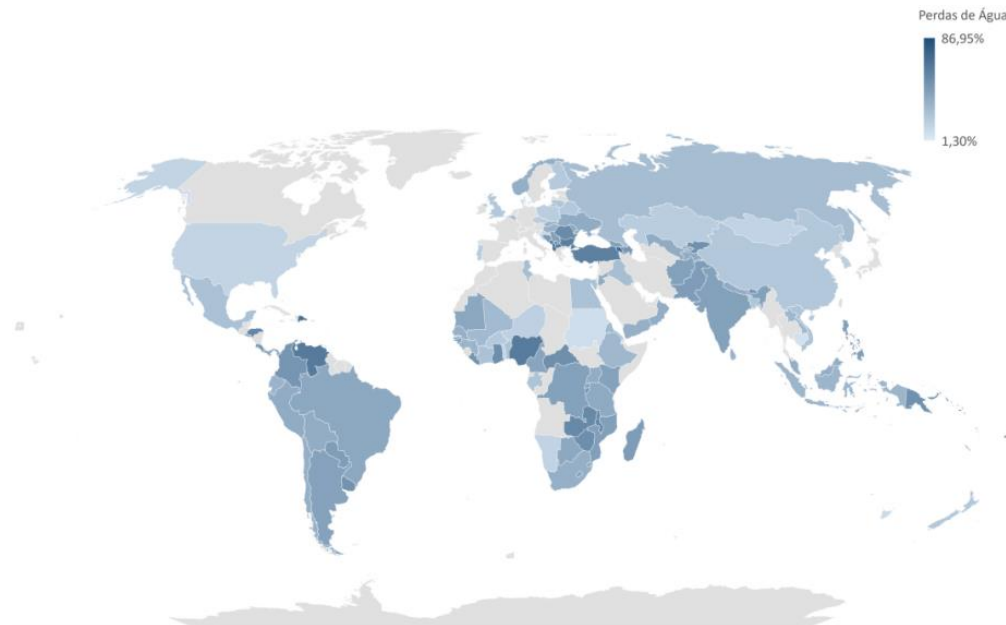
Isso pode impactar no principal objetivo de um sistema de distribuição de água que visa entregar água de qualidade ao consumidor, com pressão adequada, em quantidade suficiente, garantindo continuidade e cobertura máxima a um custo acessível (HELLER e PÁDUA, 2010). Esse desafio das perdas no abastecimento de água se estende por todos os países e se apresenta como um incômodo até para países mais desenvolvidos.

### 3.1.1 Cenário mundial

Comparar o cenário de perdas mundialmente é desafiante visto as diversas maneiras que cada país avalia e calcula os valores. Entretanto o estudo realizado pelo instituto TRATA BRASIL em 2025 com dados do SINISA e do IBNET apresentou dados de diversas nações e expôs os mais atualizados de cada país. O IBNET é a principal fonte mundial de informações sobre água não faturada, ressalta-se que a

periodicidade dos dados varia entre os países, havendo registros recentes e outros do início dos anos 2000. Na Figura 2, são vistos os registros mais atualizados por país, retratados em um mapa global de água não faturada.

**Figura 2: Perdas de água por país**



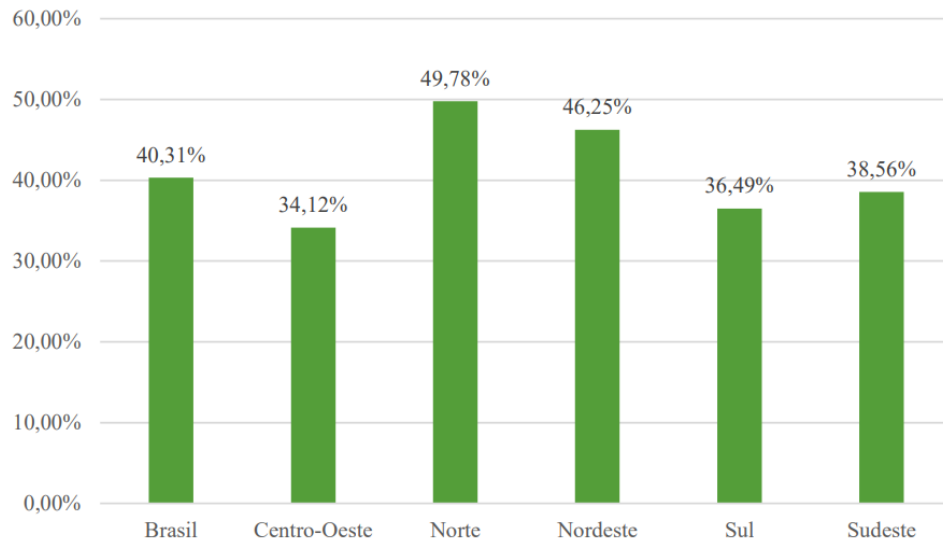
Fonte: TRATA BRASIL (2025)

O Brasil<sup>1</sup> possui um nível de perdas não faturadas maior que a média, apesar de estar melhor do que alguns países em desenvolvimento, tais como Venezuela e Turquia. Comparando com os países melhor classificados, nota-se uma diferença percentual elevada, próxima aos 30%. É notório que as perdas nos sistemas de abastecimento de água afligem todos os países pelo mundo e mesmo nos mais desenvolvidos o nível de perda ainda pode ser considerado um problema econômico e sustentável.

### 3.1.2 Cenário brasileiro

O tamanho continental do Brasil gera uma grande heterogeneidade ao se tratar de parâmetros como as perdas nos sistemas de abastecimento de água. Analisando a Figura 3, que apresenta a água perdida na distribuição com relação ao total produzido, fica evidente essa variação regional.

<sup>1</sup> No caso brasileiro, foi considerado o Índice de Perdas na Distribuição do SINISA de 2023, no valor de 40,31%.

**Figura 3: Perdas de água por região no Brasil**

Fonte: TRATA BRASIL (2025)

A região Norte e Nordeste do país apresentam os maiores índices de perdas e podem ter maiores desafios para conseguirem a redução devido a infraestrutura mais deficitária, no geral, na região. Percebe-se que o Sudeste, com a maior população, possui a perda mais próxima a média do país, enquanto o Centro-Oeste é a região com a menor taxa. Assim como a análise de diferentes países, a observação das distintas regiões do Brasil demonstra a importância da mitigação das perdas nos sistemas de abastecimento de água. Mesmo as regiões com menores índices de perda no país apresentam valores médios superiores a 30%, o que ainda é considerado elevado.

### 3.1.3 Perdas de Água por Vazamentos

Como visto, um componente importante da água não faturada envolve os vazamentos nas tubulações (perdas reais). Esse tipo de perda se estende até mesmo para o interior de residências e indústrias. Segundo El-zahab e Zayed (2019), em média entre 20% e 30% da água distribuída se perde por vazamentos resultando em elevados prejuízos em receitas, considerando danos diretos e indiretos. O estudo de Serafein *et al.* (2024) apresentou que em redes de distribuição de água com obsolescência e manutenção insuficiente, as taxas de vazamento podem atingir níveis tão elevados quanto 70 a 80% do volume de entrada do sistema. Contudo, em redes cuidadosamente mantidas e monitoradas, o volume de água perdida é

consideravelmente reduzido, correspondendo a apenas 7% do volume total que entra na rede.

Os vazamentos em sistemas de distribuição de água podem ser decorrentes de uma variedade de fatores. Puuts *et al.* (2010) destacam algumas das principais causas, como conexões defeituosas entre tubos, corrosão interna e externa, e danos mecânicos provocados por cargas excessivas, como o tráfego intenso sobre a tubulação. Além disso, os autores ressaltam outros fatores frequentemente associados ao surgimento de vazamentos, incluindo o movimento do solo, pressão elevada no sistema, danos causados por escavações, envelhecimento da tubulação, temperaturas extremamente baixas no inverno, defeitos de fabricação, condições adversas do solo e deficiências na execução dos serviços de instalação e manutenção.

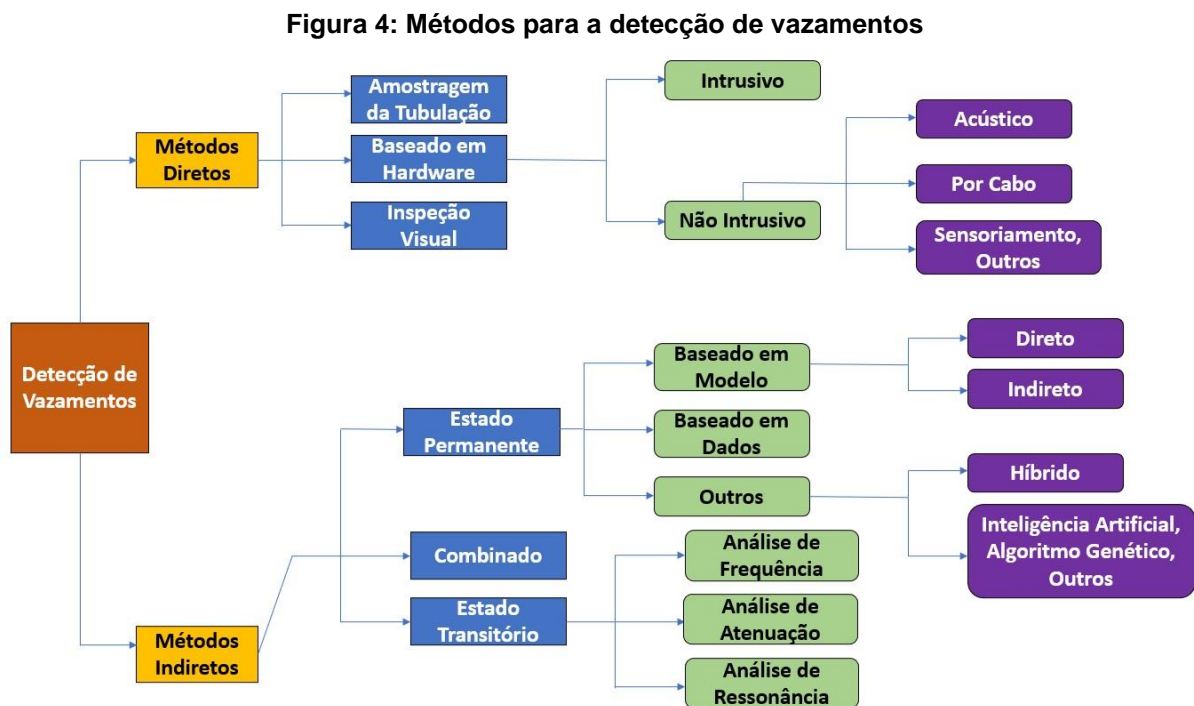
Ao se considerar o tema dos vazamentos, é comum que se associe a ocorrência a rompimentos de tubulações de grande magnitude. Embora esses eventos causem danos consideráveis, o volume de água perdida por eles é relativamente insignificante quando comparado a vazamentos que permanecem ocultos sob a superfície. Estima-se que aproximadamente 90% da água perdida devido a vazamentos não seja visível. Em alguns casos, esses vazamentos podem ser bastante expressivos, como aqueles que fluem diretamente para um esgoto ou dreno, pois podem durar anos ou décadas até que fiquem detectáveis visualmente. (ADB, 2010).

Um exemplo descrito no estudo do *Asian Development Bank* (ADB) em 2010, calcula que um grande rompimento em uma tubulação principal, com vazão de 10 m<sup>3</sup>/h (240 m<sup>3</sup>/dia ou 2,78 l/s), seria frequentemente reparado no mesmo dia e o volume total de água perdida seria de 240 m<sup>3</sup>. Em comparação, um pequeno vazamento em uma conexão simples com vazão de apenas 10 m<sup>3</sup>/dia (0,12 l/s) pode ocorrer durante todo o ano. Nesse caso, o volume de água perdida seria de 3.650 m<sup>3</sup>.

Portanto, ficam evidentes os prejuízos causados pelos vazamentos à distribuição de água para a população. Em muitos casos, a sua identificação é complexa, o que tem motivado, nos últimos anos, o desenvolvimento e a expansão de técnicas e metodologias específicas voltadas à detecção de vazamentos.

### 3.2 Técnicas de detecção de vazamento

Para tentar mitigar as perdas nos sistemas de abastecimento de água despontaram na literatura variadas soluções nas últimas décadas. Negm *et al.* (2023) comentam da diversidade de pesquisas para esse fim e a variedade de estratégias diferentes. Os autores apresentaram, como visto na Figura 4, os diversos métodos mais comumente observados na literatura.



Fonte: NEGM *et al.* (2023), adaptado

De forma simplificada, pode-se dividir os métodos de detecção de vazamentos em dois grupos: os que são diretos e aqueles que são indiretos. A detecção de vazamentos direta é, em sua ampla maioria, feita através dos métodos baseados em hardware. Eles se destacam por diferentes métodos de sensoriamento para identificar e localizar vazamentos em uma rede, explorando características como acústica, pressão, vazão, temperatura, entre outras. Já a detecção indireta é mais ampla e se utiliza de técnicas baseadas em software, análise computacional e de dados dos parâmetros da rede para extrair informações sobre vazamentos (NEGM *et al.*, 2023).

Cada método investiga o vazamento de uma maneira, sendo possível também classificá-los pelo seu grau de precisão, Hamilton (2009) dividiu a detecção de vazamentos em fases, podendo ser resumidas em três: identificar (*Identify*), localizar

(*Localise*) e localizar com precisão (*Pinpoint*). Cada fase representa uma maior especificação da localização do vazamento, aumentando a precisão (Tabela 1).

**Tabela 1: Divisão da detecção de vazamentos**

<b>Fase</b>	<b>Definição</b>
Identificar	Determinar a existência de um vazamento
Localizar	Restringir a localização de um vazamento em uma área ou segmento
Localizar com Precisão	Determinar a localização de um vazamento em um raio de 20 cm

FONTE: EL-ZAHAB e ZAYED (2019), adaptado

Nota-se, portanto, uma ampla gama de classificações quanto às características e métodos de detecção de vazamentos. Nesse contexto, é importante a investigação das principais metodologias descritas na literatura, bem como suas vantagens e limitações. Os métodos diretos serão abordados com foco no uso de hardware, enquanto os indiretos exigem uma análise mais detalhada devido à sua maior diversidade.

### 3.2.1 Métodos baseados em hardware

Segundo Li *et al.* (2015) os métodos baseados em hardware usufruem da vantagem de precisão na detecção e localização de vazamentos. Todavia esses métodos apresentam desvantagens, como seu alto custo, exigem muita mão de obra, são lentos para operar e podem requerer a interrupção das operações da tubulação por longos períodos. Esses métodos podem ser subdivididos em intrusivos e não intrusivos.

#### 3.2.1.1 Intrusivos

Dispositivos intrusivos são uma subseção dos métodos de detecção de hardware, que envolvem dispositivos de inspeção que entram nas redes de tubulação para explorar vazamentos. Os dispositivos de inspeção variam bastante dependendo de suas características, que incluem seu método de locomoção, sua tecnologia de sensoriamento e seu nível de autonomia. (NEGM *et al.*, 2023).

De modo geral, os mecanismos de movimentação desses dispositivos podem ser definidos como passivos ou ativos, o primeiro se utiliza da vazão de água para a sua locomoção enquanto o segundo possui meios de locomoção próprio.

Segundo Guan *et al.* (2019) *apud* Negm *et al.* (2023) os dispositivos que agem passivamente são frequentemente chamados de PIGs (*Pipeline Inspection Gauge*). Eles são altamente eficazes, seguros e econômicos devido à sua natureza simples. Os autores comentam que devido aos desafios de design e as diferentes redes de água, encontrar um dispositivo de inspeção intrusivo completo é difícil. Guan *et al.* (2019) demonstraram que PIGs podem ter dificuldade em tubulações que possuam somente um local para entrada e saída. Além disso apresentaram que em situações com maior perturbação, como próximos a estradas, se faz necessário um dispositivo com maior precisão.

#### 3.2.1.2 Não Intrusivos

Diferentemente dos métodos intrusivos, os não intrusivos dependem de sensores montados que coletam dados para inferir vazamentos, tornando-se uma abordagem estática. As pesquisas têm se concentrado nessas estratégias de detecção de vazamentos devido aos seus benefícios mais tangíveis e à sua capacidade de gerenciamento em tempo real (EL-ZAHAB e ZAYED, 2019).

Essa classe de métodos é mais abrangente na literatura e apresenta variadas soluções cada qual com suas particularidades. Um primeiro tipo envolve os chamados métodos acústicos, que utilizam dispositivos que captam o som gerado devido ao vazamento de água na tubulação, tornando possível a localização do vazamento (GUPTA e KULAT, 2018 *apud* NEGM *et al.*, 2023, p.4). Essa tecnologia é versátil e oferece detecção rápida de vazamentos, porém elas dependem fortemente dos sentidos humanos e da interpretação, sendo suscetíveis a imprecisões devido ao ruído externo (EL-ZAHAB e ZAYED, 2019).

Outro método não intrusivo é o da fibra óptica, que se baseia na identificação de anomalias de temperatura inerentes a vazamentos em toda a tubulação (NEGM *et al.*, 2023). Suas principais vantagens são o seu baixo custo e o fato dos cabos de fibra óptica serem inertes a distúrbios elétricos. Entretanto o método é prejudicado com a baixa variação de temperatura ocasionada por vazamentos de água e com as

mudanças diárias e sazonais de temperatura que aumentam a dificuldade na detecção dos vazamentos (JACOBSZ e JAHNKE, 2019). Além disso, o alto custo inicial e operacional para o uso do método o torna menos atrativo para as concessionárias de água (CHAN *et al.*, 2017).

Semelhante ao uso de fibras ópticas, outro ramo de métodos corresponde ao uso da termografia infravermelha. Eles também exploram os efeitos térmicos de vazamentos em tubulações, partindo do princípio de que uma superfície do solo acima de um vazamento pode parecer mais fria ou mais quente do que a superfície mais distante dele em uma imagem de radiação infravermelha (HUNAIDE *et al.*, 2000).

A termografia pode oferecer uma forma eficiente, econômica e não destrutiva de monitorar grandes áreas de redes de abastecimento de água. Entretanto essa tecnologia apresenta algumas ressalvas: é recomendado o uso em momentos em que as temperaturas ambientes estão mais próximas do equilíbrio, aumentando assim a visibilidade térmica. Além disso, a umidade do solo tende a dificultar a investigação, o que pode ser problemático em países com climas mais chuvosos (BACH e KODIKARA, 2017 *apud* NEGM *et al.*, 2023; HUANG *et al.*, 2010).

Ademais são vistos na literatura os métodos de radar de penetração no solo. Eles têm semelhanças com os métodos acústicos, pois ambos visam identificar vazamentos por meio de anomalias nas ondas sonoras que podem viajar através de tubulações e/ou da superfície ao redor quando a água vaza por um orifício (ASLAM *et al.*, 2018). Essas técnicas conseguem detectar até pequenos vazamentos, mas possuem desvantagens, como o elevado tempo necessário para sua aplicação, a dificuldade em cobrir grandes áreas, a dispersão do sinal acústico, entre outras (KHULIEF *et al.*, 2012 *apud* NEGM *et al.*, 2023; GOULET *et al.*, 2013).

Como descrito os métodos não intrusivos são demasiados abrangentes. Foram citadas as principais tecnologias vistas atualmente na literatura para os métodos baseados em hardware, com suas vantagens e limitações. O outro grande ramo que é comumente utilizado para análise de vazamentos são aqueles métodos que se utilizam de softwares.

### 3.2.2 Métodos baseados em software

Dentre os métodos de detecção de vazamentos, um grande grupo é composto pelos baseados em software, que, em sua maioria, utilizam abordagens indiretas. Essas metodologias são diversas e podem ser classificadas em três categorias principais: diretas, indiretas e híbridas, conforme ilustrado na Figura 4. Além disso, a literatura apresenta diferentes classificações para algumas dessas técnicas baseadas em software, variando conforme os critérios adotados em cada estudo.

De acordo com Farah e Shahrour (2024) as abordagens baseadas em software coletam dados relevantes dos sistemas de distribuição de água, como vazão, temperatura e pressão. Já Negm *et al.* (2023) comentam que esses métodos, apesar do alto custo para instalação de um sistema de sensores para as análises, é conhecido pela sua economia a longo prazo. Os autores classificam essas metodologias dividindo-as em baseadas em modelos e em dados.

#### 3.2.2.1 Metodologias baseadas em modelos

A detecção baseada em modelos depende fortemente da semelhança do modelo com a rede real, dos dados analisados e das técnicas empregadas. Portanto, construir um modelo realista e preciso é importante para o sucesso dessa técnica, geralmente incluindo uma etapa de calibração separada para comparar o modelo com a rede (NEGM *et al.*, 2023).

Com o modelo calibrado diversas técnicas podem ser utilizadas para detectar os vazamentos. Um método simples é aplicar o cálculo de conservação de massa ou balanço hídrico. O balanceamento da massa que entra e sai nos nós pode revelar perdas não contabilizadas, indicando um possível vazamento. Newell e Greenwood (1996) *apud* Farah e Shahrour (2024) explicam que a precisão da técnica de balanço hídrico depende da medição exata da massa que entra e sai de uma tubulação. A principal limitação da técnica é sua dependência da suposição de regime permanente. Isso significa que os volumes analisados devem ser calculados em um intervalo de tempo maior para evitar alarmes falsos. Além disso, embora o método de balanço hídrico seja eficaz na quantificação das perdas totais de água, ele apresenta limitações na identificação exata da localização dos vazamentos na rede (MISIUNAS, 2005 *apud* FARAH e SHAHROUR, 2024, p.12).

Além do balanço hídrico, outras metodologias baseadas em software foram citadas por Farah e Shahrour (2024), classificadas em outros cinco grupos: variação de vazão, análise de pontos de pressão, métodos numéricos, inteligência artificial e reconhecimento de padrões.

Os autores explicam que a técnica de variação de vazão baseia-se na premissa de que um aumento significativo na vazão na entrada ou saída do sistema de distribuição de água indica a presença de um vazamento. No entanto, essa abordagem apresenta limitações devido à sua sensibilidade a pequenas variações e ao risco de alarmes falsos causados pelo uso cotidiano da água.

Já o método de análise de pontos de pressão conceitua-se na ideia de que a pressão em uma tubulação diminui quando um vazamento ocorre. Para detectar um vazamento, podem ser realizadas medições de pressão para monitorar a taxa de variação da pressão, identificar níveis anormalmente baixos ou comparar as leituras atuais com uma análise estatística contínua baseada em dados anteriores (STAFFORD *et al.*, 1996). O uso desse método apresenta vantagens em termos de simplicidade e baixo custo. No entanto, ele não é eficaz na detecção de vazamentos pequenos, pois estes não causam uma variação significativa na pressão. Além disso, quedas de pressão na rede podem ser provocadas por outros fatores além de vazamentos, aumentando o risco de alarmes falsos (FARAH e SHAHROUR, 2024).

O uso de técnicas de reconhecimento de padrões é realizado com base em características de entrada, como pressão, vazão e sinais acústicos. A principal vantagem do seu uso na detecção de vazamentos está na sua forte capacidade de classificação, mesmo quando os dados são ruidosos ou quando as relações entre as variáveis são não lineares. No entanto, as limitações incluem sua dependência de dados de treinamento de alta qualidade e sua sensibilidade à configuração de parâmetros (MASHFORD *et al.*, 2012).

Outra metodologia citada por Farah e Shahrour (2024) é o uso da inteligência artificial. Um exemplo é a utilização das Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Networks*, ANNs), que podem detectar e localizar vazamentos em redes de abastecimento de água. A ANN estabelece uma relação entre os dados de entrada e saída. No caso das redes de água, os dados de entrada caracterizam os estados normais e anormais do

sistema, com e sem vazamentos. A ANN atua como um classificador, estimando o estado atual do sistema e identificando vazamentos com base nos dados disponíveis (DE SILVA *et al.*, 2011).

Embora as ANNs tenham demonstrado grande potencial na detecção de vazamentos, algumas limitações devem ser destacadas. Essas incluem a necessidade de conjuntos extensos e de alta qualidade para treinamento, dificuldades na interpretabilidade do modelo e altos requisitos computacionais.

### 3.2.2.2 Metodologias baseadas em dados

Negm *et al.* (2023) citam as metodologias que são baseadas em dados, as quais alguns autores as englobam em conjunto com as baseadas em modelos. Separar entre as técnicas de modelo e dados pode ser complicado, devido ao uso simultâneo de ambas em muitos casos. Por isso, alguns exemplos podem apresentar a mesma classificação.

A abordagem focada em dados é especialmente promissora para sistemas de distribuição de água que possuem um grande número de sensores, pois dispensa a necessidade de construção de modelos hidráulicos complexos, tornando-a menos sensível a complexidades estruturais ou operacionais (WU e LIU, 2017 *apud* HU *et al.*, 2021).

Segundo El-zahab e Zayed (2019) as técnicas empregadas nessas metodologias são diversas, variando de abordagens estatísticas a abordagens baseadas em inteligência artificial. Na maioria dos casos, uma técnica orientada por dados é executada em duas etapas: uma primeira de aquisição, pré-processamento e transformação de dados e outra que engloba a estratégia de detecção de vazamentos.

A primeira etapa se faz necessária já que a base de dados pode diferir em termos de fonte de coleta, passos de tempo e duração da série temporal, que são aspectos cruciais a se considerar (CASSILAS *et al.*, 2013 *apud* NEGM *et al.*, 2023). Sendo assim os dados obtidos requerem pré-processamento antes que possam ser implementados na detecção de vazamento.

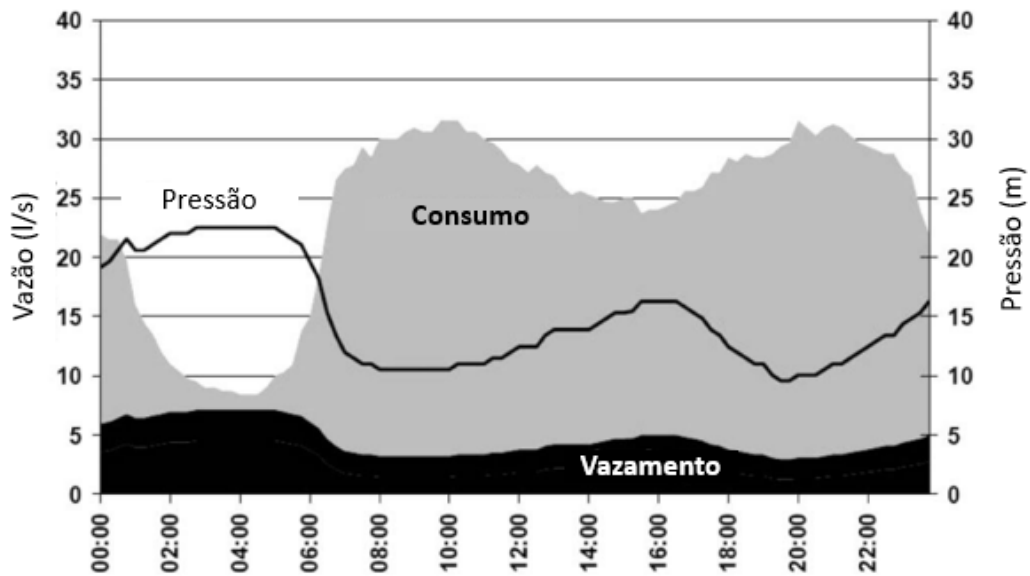
O pré-processamento de dados frequentemente envolve classificação, filtragem e transformação dos dados recebidos. Essa etapa é essencial para filtrar dados errôneos, preenchendo lacunas nas séries temporais e organizar os resultados para avaliação, tornando-se uma etapa crítica na detecção de vazamento orientada por dados.

Hu *et al.* (2021) avaliaram diversos estudos de detecção de vazamento que foram baseados em dados e concluíram que elas apresentam altas taxas de falsos positivos. Além disso, não são eficazes para lidar com variações anômalas causadas por demandas inesperadas de água. Já segundo Negm *et al.* (2023) a dependência de dados reais torna essas técnicas mais confiáveis, embora aumente a sensibilidade a problemas com sensores.

Com o desenvolvimento tecnológico essas metodologias de detecção de vazamentos que se basearam em dados puderam ser otimizadas e automatizadas. Liu e Kleiner (2013) *apud* Farah e Shahrour (2024) comentam sobre o que chamam de métodos inteligentes para sistemas de água (*Smart Water Methods, SWMs*), nos quais a implementação de tecnologias da informação e comunicação em redes urbanas de água tornam a infraestrutura mais inteligente, interconectada e eficiente. Esse conceito baseia-se em equipar as tubulações com sensores capazes de monitorar o desempenho e as condições da rede de abastecimento de água. Contudo, raramente, especialmente em países menos desenvolvidos, há recursos orçamentários suficientes para um monitoramento mais abrangente da rede.

Um exemplo do uso de dados para a detecção de vazamentos é a técnica que analisa as vazões mínimas noturnas (VMN). Ela se baseia na variação do consumo nos sistemas de abastecimento de água ao longo do dia. A vazão correspondente ao consumo mínimo, normalmente ocorre à noite, e por isso é denominada vazão mínima noturna, que pode ser medida através do uso de equipamentos de medição de vazão e pressão (TSUTIYA, 2006). A Figura 5 traz a variação de vazão, pressão e dos vazamentos que caracterizam o método.

Figura 5: Método da vazão mínima noturna



Fonte: PUUTS *et al.* (2013), adaptado.

O uso da Vazão Mínima Noturna para determinar as perdas reais é útil porque, nesse período, há baixo consumo e as vazões permanecem estáveis, ou seja, uma parte substancial da vazão medida pode ser atribuída aos vazamentos (GHIDETTI *et al.*, 2013). Contudo a análise das VMN, conforme dito por Al-washali *et al.* (2016), requer boa precisão na calibração de dois parâmetros: pressão média, que raramente é precisa, e a estimativa do consumo noturno.

Heller e Pádua (2010) afirmam que o monitoramento contínuo das vazões mínimas noturnas representa uma boa ferramenta para quantificação das perdas reais. Entretanto os autores ressaltam que, nos locais onde há intermitência no fornecimento de água, normalmente o abastecimento ocorre à noite e, portanto, nesse caso, o consumo noturno não fornece dados confiáveis sobre perdas. Além disso em zonas industriais ou com grande demanda de água durante o período noturno, o método torna-se mais impreciso devido a menor estabilidade das vazões noturnas.

Dentro da análise de dados pode-se incluir aquelas metodologias que se utilizam da análise de sinais em diferentes domínios para detectar vazamentos. Wang *et al.* (2024) utilizou do domínio do tempo e da frequência para analisar dados acústicos de vazamentos e assim detectá-los. Os resultados do estudo mostram que o sinal no domínio do tempo varia e a energia do sinal no domínio da frequência aumenta após o vazamento na tubulação. O aumento do diâmetro do vazamento também aumenta

a energia do sinal, e a energia do vazamento se desloca de altas frequências para baixas frequências. Contudo, os sinais gerados por ruídos, como tráfego, construção e vento, são mais complexos, o que pode dificultar a identificação e localização de vazamentos em ambos os domínios.

Já o estudo desenvolvido por Campos (2025) realizou uma análise no domínio da frequência a partir da observação das vibrações em tubulações de abastecimento de água, permitindo a sua caracterização quanto à presença ou ausência de vazamentos. Os resultados indicaram uma relação entre a intensidade do sinal captado e a pressão na tubulação. Na presença de vazamentos, a análise das faixas de frequência e das amplitudes evidenciou padrões vibracionais distintos, com picos mais pronunciados e amplitudes superiores. Entretanto, o trabalho também apontou limitações, como a dificuldade de equilibrar a precisão da análise com o consumo de energia e a capacidade computacional, além dos desafios associados à aplicação da metodologia em ambientes com elevados níveis de ruído.

Uma outra estratégia baseada em dados, apresentada por Barros *et al.* (2025), utilizou uma metodologia com análise de grafos e monitoramento de dados para detectar anomalias na pressão da rede, sendo capaz de indicar a presença de vazamentos em até 15 minutos. No entanto, os autores perceberam que a eficácia da detecção e localização de vazamentos varia dependendo da natureza dos vazamentos. Vazamentos com aumento gradual de vazão apresentam desafios adicionais, pois as mudanças nos dados ao longo do tempo são menores, resultando em detecção tardia e localização menos precisa.

Para viabilizar a detecção e a localização eficazes de vazamentos com base em dados monitorados, o posicionamento estratégico de sensores ao longo da rede é fundamental, pois assegura cobertura adequada dos eventos de vazamento e a obtenção de informações confiáveis para o controle e o gerenciamento do sistema. Um arranjo eficiente dos sensores contribui diretamente para a redução do tempo de detecção e para o aumento da precisão na localização dos vazamentos (BARROS, 2024).

Sendo assim, mesmo técnicas consideradas mais avançadas apresentam limitações e dificuldades de implementação em determinadas circunstâncias. No entanto, todas

as técnicas de detecção de vazamentos possuem relevância para diferentes cenários, sendo, em muitos casos, necessário o uso combinado de múltiplos métodos para aumentar a eficácia da detecção.

Por fim, uma última categoria de técnicas de detecção de vazamentos pode ser apresentada. Conforme já mencionado, os métodos baseados em dados estão agrupados juntamente com aqueles baseados em modelos, ambos frequentemente classificados, de forma geral, como técnicas orientadas por software por alguns autores (LI *et al.*, 2015; FARAH e SHAHROUR, 2024). Aliado a isso os autores incorporam a essa classificação as metodologias que utilizam regimes transitórios para a detecção de vazamentos, abordagem que também é amplamente explorada na literatura.

Li *et al.* (2024) descreve que, nos últimos anos, o campo de detecção de vazamentos tem recebido um foco significativo nessas técnicas baseadas em transientes devido à natureza promissora e versátil do uso dos transientes hidráulicos. Os autores comentam que esses métodos envolvem a introdução de ondas hidráulicas em tubulações, para assim obter a medição da resposta de pressão em locais específicos e realizar a análise dos sinais para identificar e caracterizar os vazamentos.

O uso de técnicas baseadas em transientes apresentam várias vantagens: não são invasivas, custo acessível e uma ampla faixa operacional (TORRES, 2014). Contudo, com as técnicas transitórias atuais, a estimativa precisa do tamanho e da localização do vazamento pode ser comprometida por complexidades decorrentes de redes de tubulação com múltiplos componentes. Adicionalmente, a dependência de métodos computacionais, como transformadas de Fourier para a análise de sinais introduz a necessidade de calibração e validação mais rigorosas (FARAH e SHAHROUR, 2024).

Como visto os métodos baseados em transientes destacam-se pelo seu amplo potencial de desenvolvimento e aplicação, além de apresentarem um custo relativamente baixo. Para uma compreensão mais aprofundada de seu funcionamento, torna-se essencial estudar com maior detalhe o fenômeno físico dos transitórios e suas implicações para as tubulações.

### 3.3 Escoamento Transitório

Para incorporar o escoamento transiente na detecção de vazamentos, é fundamental compreender o conceito, as manobras que geram os transitórios e os potenciais impactos que podem ocasionar nas tubulações.

#### 3.3.1 Introdução ao escoamento transitório

De acordo com Chaudhry (2014), o escoamento transitório, ou transiente, ocorre entre dois regimes permanentes, um inicial e outro final. É possível destacar alguns dos fatores mais comuns que desencadeiam transientes em sistemas de condutos forçados (CHAUDHRY (2014); TULLIS (1989)):

- a) Abertura e fechamento de válvulas nas tubulações;
- b) Partida ou parada de bombas nos sistemas de bombeamento;
- c) Partida em uma turbina hidráulica;
- d) Vibração das peças de um rotor ou das pás da turbina;
- e) Ruptura da tubulação;
- f) Retenção de ar na tubulação.

Segundo Tullis (1989), o regime transitório pode acontecer em todos os sistemas de condutos forçados. Além disso o acréscimo ou diminuição da pressão associado ao processo pode causar danos na tubulação dependendo da magnitude e da habilidade das tubulações em suportar as variações.

Os efeitos negativos que o escoamento transiente pode gerar são preconizados no Brasil pela NBR12215-1, tais como sobrepressões, subpressões, ocorrência de pressões negativas e variações na velocidade da água. Essa norma dita recomendações para análise dos transitórios hidráulicos, apresentando a necessidade de estudos em diferentes etapas para um projeto ser executado, verificando a necessidade de dispositivos de proteção além de estabelecer diretrizes para o cálculo com utilização de softwares.

Tullis (1989) descreveu estratégias para evitar ou ao menos atenuar os efeitos do transiente nas tubulações:

- a) Aumentar o tempo de abertura e fechamento das válvulas;

- b) Projetar tubulações que suportem maiores pressões;
- c) Limitar a velocidade do fluido na tubulação;
- d) Usar válvulas de alívio de pressão, tanques de compensação ou dispositivos semelhantes que amenizem a onda do transitório.

### 3.3.2 Modelagem matemática do escoamento transiente

De acordo com Chaudhry (2014), os primeiros estudos relacionados aos fenômenos próximos aos transitórios foram inspirados pela propagação de ondas sonoras no ar e pelo fluxo de sangue nas veias do corpo humano. No entanto, foi somente com o avanço das teorias da elasticidade e do cálculo que esses fenômenos puderam ser compreendidos de forma mais aprofundada.

No início do século XX, Joukowsky e Allievi apresentaram estudos com a demonstração do equacionamento fundamental dos transientes hidráulicos. Com isso foi equacionado o pulso de Joukowsky que corresponde ao aumento súbito de carga hidráulica gerado por uma variação abrupta da velocidade do escoamento em uma tubulação. Quando ocorre, por exemplo, um fechamento instantâneo de uma válvula, a redução da velocidade é compensada por um acréscimo de pressão a montante, dando origem a uma onda de pressão. Essa onda se propaga ao longo da tubulação com a velocidade acústica do meio, associada às propriedades do fluido e à elasticidade da parede do tubo. O aumento de pressão provoca simultaneamente a compressão do líquido e a expansão da tubulação, caracterizando o mecanismo físico fundamental do regime transitório e do fenômeno conhecido como golpe de aríete (TULLIS, 1889).

O equacionamento do pulso de Joukowsky está apresentado na equação (1). Tullis (1989) comenta que as seguintes condições iniciais foram adotadas para seu equacionamento: atrito desprezível, tubulação rígida e fluido incompressível.

$$\Delta H = -\frac{a \cdot \Delta V}{g} \quad (1)$$

$\Delta H$  (m) = Variação da carga hidráulica;

$\Delta V$  (m/s) = Variação da velocidade do fluido;

$a$  (m/s) = Velocidade de propagação da onda de pressão (celeridade);

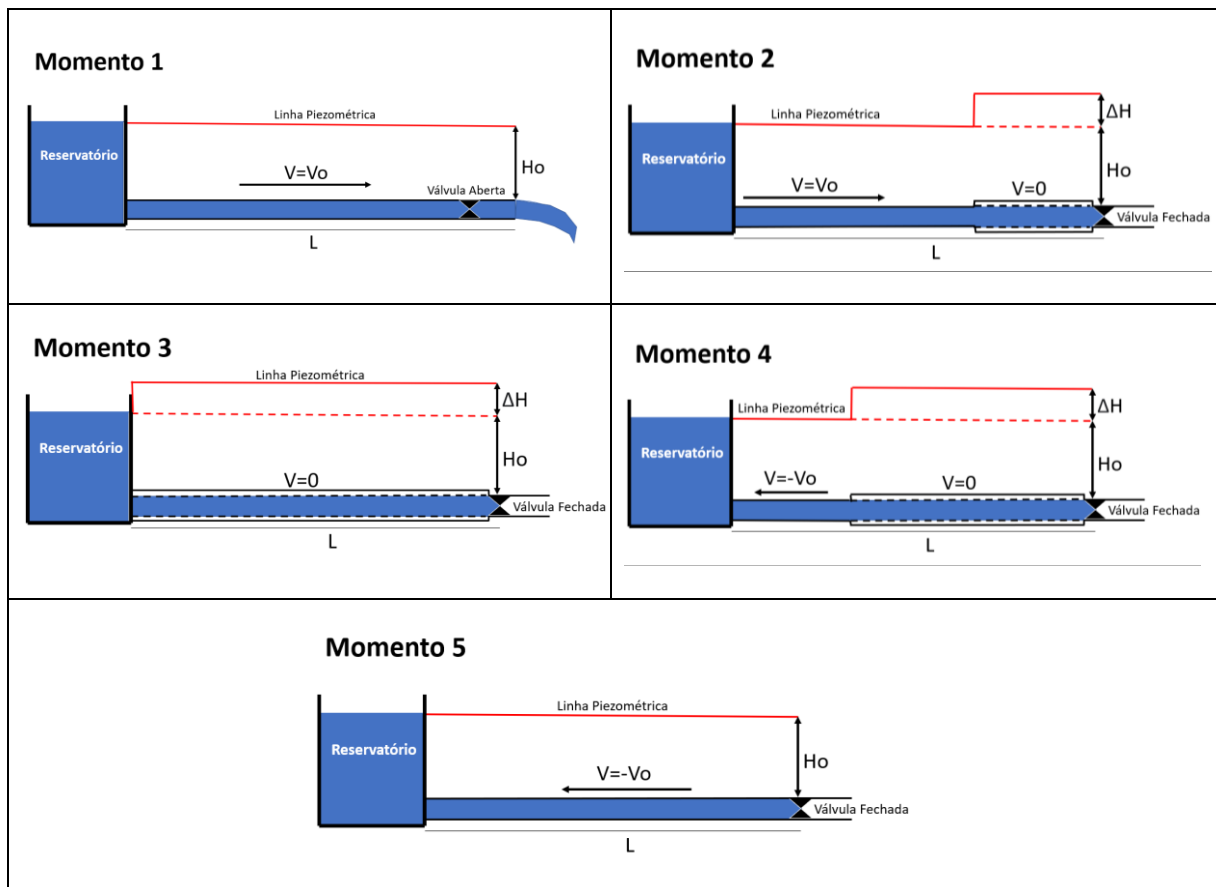
$g$  (m/s<sup>2</sup>) = Aceleração da gravidade.

Segundo Chaudhry (2014) o sinal negativo no lado direito da equação do pulso de Joukowski indica que a pressão aumenta (ou seja,  $\Delta H$  é positivo) para uma redução na velocidade (ou seja, para  $\Delta V$  negativo) e vice-versa. Além disso o autor comenta que a equação foi derivada para o caso de mudanças de velocidade ocorrendo na extremidade a jusante de um tubo e para a frente de onda se movendo na direção a montante. Procedendo de forma semelhante, pode-se provar que, se a velocidade fosse alterada na extremidade a montante e a onda estivesse se movendo na direção a jusante, então a fórmula não teria o sinal negativo.

Para demonstrar os passos de tempo e a propagação das ondas de pressão no transitório, Chaudhry (2014) apresenta um cenário semelhante, com um reservatório e uma tubulação de saída, além da presença de uma válvula em sua parcela final. Ao se fechar a válvula de maneira instantânea a vazão que percorria a tubulação cessa, e gera a transformação da energia cinética do fluxo em energia elástica ocasionando o pulso de Joukowski.

Os passos de tempo após o fechamento da válvula podem ser discretizados apresentando o comportamento da tubulação e da pressão em momentos específicos. Seguindo a explicação do autor, pode-se dividir esses momentos em nove cenários, sendo os cinco primeiros apresentados na Figura 6.

**Figura 6: Primeiros momentos do escoamento transitório em uma tubulação conectada a um reservatório**



Fonte: AUTOR

No primeiro momento, tem-se a válvula em seu estado inicial, ou seja, aberta. Nesse caso a água sai do reservatório e percorre a tubulação de comprimento  $L$  com uma velocidade  $V_0$ , mantendo uma pressão constante, igual a carga do reservatório, durante todo o trajeto, como pode ser visto pela linha piezométrica apresentada. Em todos os momentos a perda de carga na tubulação é desprezada. Como esse é o momento inicial adotamos o tempo ( $t$ ) igual a 0.

Com o fechamento da válvula o sistema atinge o momento 2 e em sequência o 3. No momento em que a velocidade cessa gera-se o pulso de Joukowski. Embora a derivação clássica do pulso seja realizada sob hipóteses simplificadoras, como fluido incompressível, tubulação rígida e atrito desprezível, tais hipóteses têm caráter matemático e visam facilitar a aplicação da equação da quantidade de movimento no instante inicial do evento transitório, assim a equação é válida desde que a onda de pressão não atinja o extremo oposto (reservatório) e retorne ao ponto de origem (válvula) (TULLIS, 1989).

Essa sobrepressão produz uma expansão da tubulação e um aumento da densidade do líquido, esse efeito viaja como uma onda rumo ao reservatório. Anteriormente a essa onda a velocidade se torna nula e toda energia cinética é transformada em elástica. Considerando  $a$  e  $L$  (comprimento da tubulação) pode-se estabelecer que o tempo ( $t$ ) gasto para a onda percorrer toda a tubulação e atingir o momento 3 é o apresentado na equação (2).

$$t = \frac{L}{a} \quad (2)$$

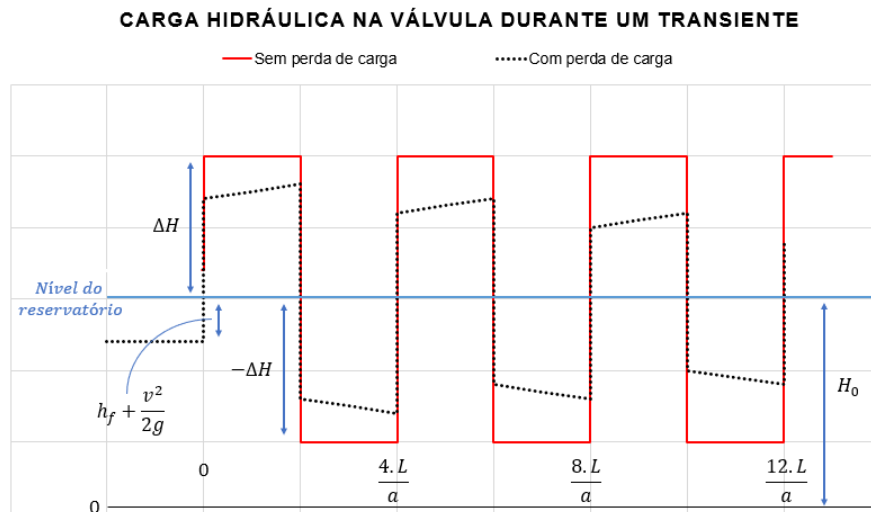
No momento 3 toda a tubulação está expandida, com isso a água presente nela começa a se mover com velocidade  $-V_0$  rumo ao reservatório que está com menor pressão. Esse passo pode ser visto no momento 4, nesse caso existe uma onda inversa ao momento 2 e a pressão vai voltando ao mesmo valor da pressão do reservatório.

Já no momento 5 toda a tubulação voltou ao seu estado inicial e a pressão se igualou a do reservatório. O tempo até esse momento pode ser dado pela equação (3), também chamada de tempo característico da onda.

$$t_{car} = \frac{2.L}{a} \quad (3)$$

Observa-se, assim, como o sinal da onda é gerado pelo escoamento transitório nesse exemplo simplificado, sendo positivo para sobrepressões e negativo para subpressões. A sequência de momentos pode ser ilustrada graficamente na Figura 7, exemplificando a variação da carga hidráulica na válvula conectada ao reservatório. Para a situação com perda de carga, observa-se uma dissipação gradual da energia, com as sobrepressões e subpressões reduzindo progressivamente a cada ciclo, até que a onda se extinga por completo.

**Figura 7: Variação gráfica da carga hidráulica na válvula durante um transiente sem e com perda de carga**



As variações de pressão proporcionadas pelo escoamento transiente podem ter diferentes magnitudes dependendo do quão rápida for a manobra hidráulica inicial que gerou o transitório (CHAUDHRY, 2014).

Dado o tempo o tempo característico de propagação da onda ( $t_{car}$ ) visto na equação (3), pode-se classificar as manobras como instantâneas, rápidas, lentas ou graduais dependendo de sua relação com o tempo de duração da manobra ( $t_{man}$ ) (PEZESHK, 2024).

Em resumo:

- a) Manobra instantânea: ocorre quando  $t_{man} \cong 0$ ;
- b) Manobra rápida: ocorre quando  $t_{man} \leq t_{car}$ ;
- c) Manobra gradual: ocorre quando  $t_{man} \geq t_{car}$ ;
- d) Manobra lenta: ocorre quando  $t_{man} = t_{car}$ .

Karney (1990) demonstra que se as manobras hidráulicas forem lentas ou graduais, as mudanças de pressão resultantes são pequenas e não ameaçam a tubulação. No entanto, se a manobra for rápida, grandes pressões podem ser geradas e frequentemente de magnitude suficiente para estourar tubulações e danificar equipamentos.

Sendo assim diferentes padrões de manobras vão resultar em diferentes magnitudes de transitório, ou seja, em modelos de estudo e análise de vazamento por transientes hidráulicos é importante se manter um padrão de manobra ou considerar as diferentes velocidades de manobra que poderiam ocorrer, caso distintas. Além disso sempre deve-se atentar a magnitude de pressão que determinada velocidade de manobra pode causar na tubulação, sendo necessário manter até limites que não prejudiquem o sistema.

Ao explorar o regime transitório, surge também a necessidade de determinar os valores da carga hidráulica e da vazão em uma posição e em um instante de tempo específico. Para isso, utilizam-se as equações fundamentais da mecânica dos fluidos: a equação de quantidade de movimento e a equação da continuidade.

A equação de quantidade de movimento estabelece que a soma de todas as forças atuantes sobre uma massa de fluido, em uma determinada direção, é igual ao produto da massa pela aceleração nessa mesma direção, considerando as forças de pressão, o peso do fluido e as forças de cisalhamento associadas ao atrito na parede da tubulação. Já a equação da continuidade é derivada da aplicação da lei da conservação da massa a um volume de controle, assumindo que o fluido é contínuo e que as variações de massa no interior desse volume decorrem exclusivamente das diferenças entre as vazões de entrada e saída, além de considerar que o alongamento axial do tubo é desprezível (TULLIS, 1989).

Dessa forma, o fenômeno dos transitórios hidráulicos é descrito por meio do modelo elástico, que considera simultaneamente a elasticidade da tubulação e a compressibilidade do fluido, resultando em um sistema de duas equações diferenciais parciais. A equação (4) é derivada da equação quantidade de movimento, enquanto a equação (5) decorre da equação da continuidade, sendo o desenvolvimento completo dessas equações apresentado no APÊNDICE A.

$$g \cdot \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{f \cdot V \cdot |V|}{2 \cdot D} + \frac{V \cdot \partial V}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$V \cdot \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial X} = 0 \quad (5)$$

em que:

$H$  (m) = Carga hidráulica;

$V$  (m/s) = Velocidade de fluxo do fluido;

$f$  (adimensional) = Fator de atrito do conduto;

$D$  (m) = Diâmetro interno do conduto;

$X$  (m) = Distância ao longo do conduto;

$t$  (s) = Tempo.

Com o equacionamento obtido deve-se utilizar modelos matemáticos que resolvam o sistema de duas equações parciais gerado, e para isso, diversas metodologias foram desenvolvidas na literatura.

### 3.3.3 Modelos Matemáticos para resolução das equações parciais do transitório

Todos os modelos de análise do escoamento transitório derivam das equações de movimento, da continuidade ou de energia, além de outras relações físicas (WYLIE e STREETER, 1978). A partir destas equações básicas, evoluíram diferentes métodos, empregando diferentes pressupostos restritivos. Esses modelos ou métodos podem ser resumidos nas seguintes classificações:

- a) Aritmético;
- b) Gráfico;
- c) Características;
- d) Algébrico;
- e) Implícito;
- f) Análise linear;
- g) Outros métodos.

Wylie e Streeter (1978) comentam sobre cada um dos métodos. Os aritméticos e gráficos foram mais utilizados até aproximadamente o ano de 1960, ambos não

consideravam a perda de carga e eram mais fáceis de se obter solução antes da era computacional.

Já o método das características é amplamente utilizado atualmente. Ele converte as duas equações diferenciais parciais obtidas anteriormente em quatro equações diferenciais totais. Essas equações são então expressas na forma de diferenças finitas, utilizando o método de intervalos de tempo especificados, e as soluções são realizadas computacionalmente.

O método algébrico considera as duas equações características em um trecho de tubulação. Uma vantagem particular é que as equações podem ser aplicadas em vários trechos, mas usam o incremento do tempo apropriado para um único trecho. Outra vantagem importante é o fato de serem facilmente resolvidos para etapas anteriores no tempo.

O método implícito é um procedimento de diferenças finitas que pode ser usado com sucesso para a solução de uma classe de problemas de fluxo de fluidos instáveis. Sua aplicação mais ampla é em cálculos de escoamento de superfície livre.

Por último se tem o método de análise linear, no qual ao linearizar o termo de atrito e descartar outros termos não lineares na equação de movimento, uma solução analítica para as equações pode ser encontrada para oscilações de ondas senoidais. Estas análises podem ser consideradas em duas categorias: flutuações oscilatórias estacionárias e vibrações livres de um sistema de tubulação.

Portanto, existem diversas formas de se resolver as equações parciais que envolvem o escoamento transitório, e a escolha do estudo perpassa pela escolha com o melhor auxílio computacional disponível.

#### 3.3.4 Método das Características

Como visto, o escoamento transitório envolve uma matemática muito complexa para ser tratada com simples cálculos manuais, dada a natureza das duas equações resultantes para o fenômeno (TULLIS, 1989). Com isso surge a necessidade do uso de algum método matemático, como o método das características, que é até os dias de hoje um dos métodos mais utilizados para a resolução.

O uso desse método, segundo descrito por Wylie e Streeter (1978), tem muitas vantagens além das já comentadas: os critérios de estabilidade estão bem estabelecidos, termos menores podem ser mantidos, sistemas muito complexos podem ser manipulados, tem a melhor precisão do que qualquer um dos métodos de diferenças finitas, e por fim, é um método detalhado que permite a obtenção de resultados tabulares completos.

Segundo Tullis (1989), ao analisar os termos  $\frac{V \cdot \partial V}{\partial X}$  na equação (4) e  $V \cdot \frac{\partial H}{\partial X}$  na equação (5), é observado que ambos correspondem a termos convectivos não lineares, numericamente inferiores aos demais termos das equações em escoamentos transitórios. Isso ocorre porque, em condutos fechados, a celeridade da onda de pressão é significativamente maior que a velocidade média do escoamento. Assim, para a aplicação do Método das Características na sua forma clássica, esses termos podem ser desprezados, resultando em uma formulação linearizada adequada para a modelagem de transitórios hidráulicos.

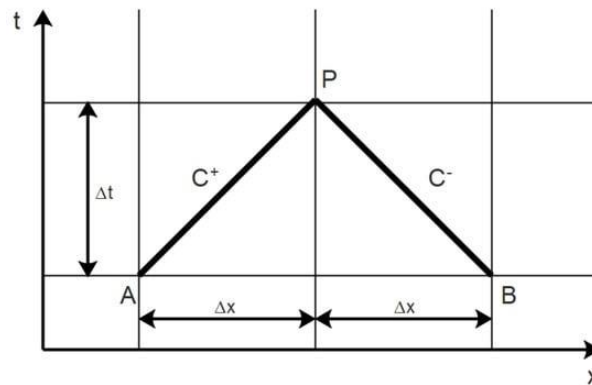
Em suma, essas equações diferenciais parciais obtidas na análise do escoamento transiente, ao serem resolvidas pelo método das características, são transformadas em equações diferenciais ordinárias de mais fácil solução. Com artifícios matemáticos Wylie e Streeter (1978) definiram as equações anteriores em uma reta positiva e uma negativa para a solução (equações (6) e (7)).

$$\frac{g}{a} \cdot \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f \cdot V \cdot |V|}{2 \cdot D} = 0; \frac{dx}{dt} = +a \rightarrow C^+ \quad (6)$$

$$-\frac{g}{a} \cdot \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{f \cdot V \cdot |V|}{2 \cdot D} = 0; \frac{dx}{dt} = -a \rightarrow C^- \quad (7)$$

Continuamente, os autores, demonstraram que as equações podem ser integradas ao longo da linha característica, como a reta positiva mostrada pela linha AP e a negativa em BP conforme a Figura 8. Dessa maneira as equações podem ser escritas em termos de variáveis desconhecidas de velocidade e carga no ponto P.

**Figura 8: Malha das retas características no plano x-t**



Fonte: JENSEN *et al.* (2018)

Uma solução simultânea produzida de ambas as retas gera resultados iguais no plano x(espaco) - t(tempo) designado pelo ponto P.

Por fim, nota-se que essas duas equações de compatibilidade são relações algébricas básicas que descrevem a propagação transitória da carga de pressão e vazão em uma tubulação. Ao resolver para a carga no ponto P ( $H_P$ ), essas equações podem ser escritas conforme as equações (8) e (9).

$$C^+: H_P = H_A - B \cdot (Q_P - Q_A) - R \cdot Q_A \cdot |Q_A| \quad (8)$$

$$C^-: H_P = H_B + B \cdot (Q_P - Q_B) - R \cdot Q_B \cdot |Q_B| \quad (9)$$

Em que:

$$B \text{ (s/m}^2\text{)} = a/g \cdot A;$$

$$R \text{ (s}^2\text{/m}^5\text{)} = f \cdot \Delta x / 2 \cdot g \cdot D \cdot A^2;$$

$$Q_P \text{ (m}^3\text{/s)} = \text{Vazão desconhecida no ponto P no passo de tempo } t+\Delta t;$$

$$H_P \text{ (m)} = \text{Carga desconhecida no ponto P no tempo } t+\Delta t;$$

$$Q_A, Q_B \text{ (m}^3\text{/s)} = \text{Vazão nos pontos A e B no tempo inicial};$$

$$H_A, H_B \text{ (m)} = \text{Carga nos pontos A e B no tempo inicial.}$$

Para a realização do método, portanto, necessita-se conhecer os valores de vazão e carga no tempo inicial e assim utilizar das relações advindas da dedução anterior. De maneira mais geral pode-se descrever as relações conforme as equações (10) e (11), em que a equação (12) determina o valor de  $H_P$ , e  $Q_P$  é encontrado pela substituição dessa carga obtida em uma das equações.

$$C^+: H_P = C_P - B \cdot Q_P \text{ em que } C_P = H_{x-1} + B \cdot Q_{x-1} - R \cdot Q_{x-1} \cdot |Q_{x-1}| \quad (10)$$

$$C^-: H_P = C_M + B \cdot Q_P \text{ em que } C_M = H_{x+1} - B \cdot Q_{x+1} + R \cdot Q_{x+1} \cdot |Q_{x+1}| \quad (11)$$

$$H_P = \frac{(C_P + C_M)}{2} \quad (12)$$

As equações foram desenvolvidas para calcular a carga e a vazão em qualquer passo de tempo para todos os pontos internos da malha espaço e tempo. Entretanto, nos nós iniciais e finais, ainda há duas incógnitas, mas apenas uma equação da reta característica disponível (negativa à montante e positiva à jusante). Sendo assim informações adicionais nesses limites da malha são necessárias.

Essas informações adicionais são chamadas de condições de contorno, e devem ser modeladas através de uma equação que relacione a carga e vazão a cada passo de tempo tanto para a seção inicial quanto para a final. De acordo com Streeter e Wylie (1975) essas condições podem ser um reservatório, uma válvula, uma conexão entre tubulações ou um tipo diferente de elemento, por exemplo, uma bomba ou um volume de armazenamento.

Cada condição de contorno possui sua própria característica e assim seu próprio equacionamento. Com essa nova relação, juntamente com a reta característica existente (positiva ou negativa), são gerados os valores de vazão e carga para cada passo de tempo necessário.

Nos variados métodos de detecção de vazamento que se baseiam no uso do fenômeno transitório o entendimento do processo é importante para sua validação e caracterização. O método das características, utilizado por muitos softwares de cálculo de transitório, nos oferece uma solução prática para calcular o regime o que

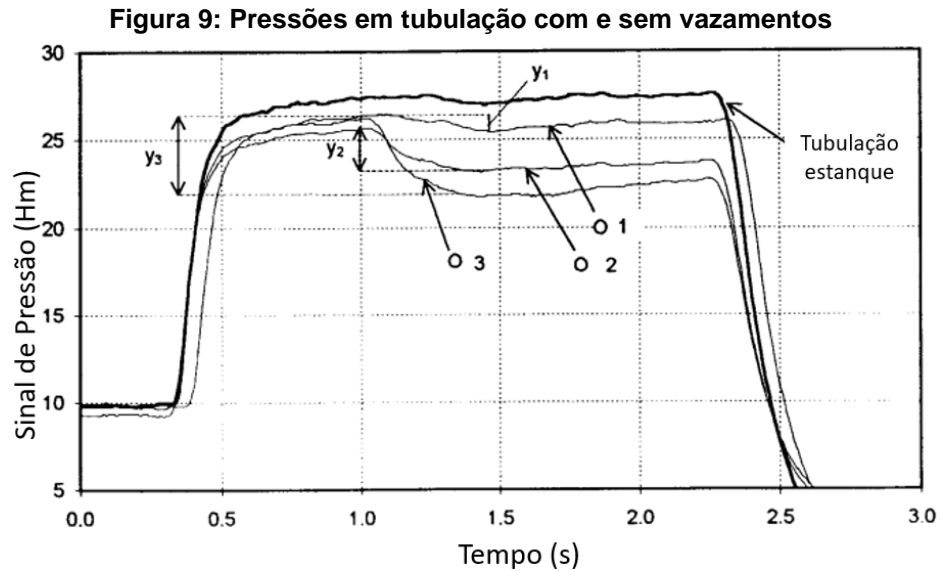
agrega no entendimento do escoamento transiente e conseqüentemente na detecção de vazamentos.

### 3.4 Detecção de vazamentos a partir da análise da resposta transitória

A propagação de uma onda de pressão transitória em um sistema gera reflexões devido a anomalias, como vazamentos, obstruções, irregularidades ou qualquer outra singularidade presente. Especificamente, a existência de um vazamento aumenta a taxa de amortecimento ou provoca reflexões na curva de pressão do sinal transitório (MENICONI *et al.*, 2010 *apud* FARAH e SHAHROUR, 2024, p. 8). Por isso a indução de ondas transitórias hidráulicas, frequentemente por meio de uma manobra hidráulica no sistema, tornou-se um método amplamente utilizado para a detecção de vazamentos (BRUNONE *et al.*, 2022; WAQAR *et al.*, 2025; MENICONI *et al.*, 2021; GONG *et al.*, 2013).

Ao classificar as diferentes técnicas de detecção de vazamentos com o uso do escoamento transitório, Puuts *et al.* (2010) engloba diversos estudos, simplificando em cinco principais grupos: método de reflexão de vazamento (*leak reflection method*, LRM), análise inversa de transitórios hidráulicos (*inverse transient analysis*, ITA), análise de resposta ao impulso (*impulse response analysis*, IRA), método de amortecimento transitório (*transient damping method*, TDM) e análise no domínio da frequência (*frequency domain response analysis*, FRM).

Brunone *et al.* (2001) afirmam que o método de reflexão de vazamento é baseado nas propriedades de transmissão e reflexão de ondas de pressão que surgem no escoamento transitório. Parte da onda de pressão que se propaga ao longo do tubo é refletida de volta em um vazamento, com mudança de sinal, enquanto a parte restante passa pelo vazamento. Os autores complementam explicando que a onda refletida pelo vazamento é responsável por gerar um degrau no sinal de pressão. Na Figura 9 são vistos diferentes experimentos realizados com um vazamento de formato circular. Nota-se a diferença gráfica na tubulação estanque e naquelas com vazamentos, na tubulação estanque a pressão é estável em um determinado valor, enquanto nos casos com a existência do vazamento, tem-se uma queda de pressão no sinal após a passagem da onda pelo próprio vazamento.



Variações do sistema podem influenciar na percepção das ondas, pois a magnitude da reflexão no vazamento depende da relação entre a intensidade da onda transiente gerada e o tamanho do orifício do vazamento (PUUTS *et al.*, 2010).

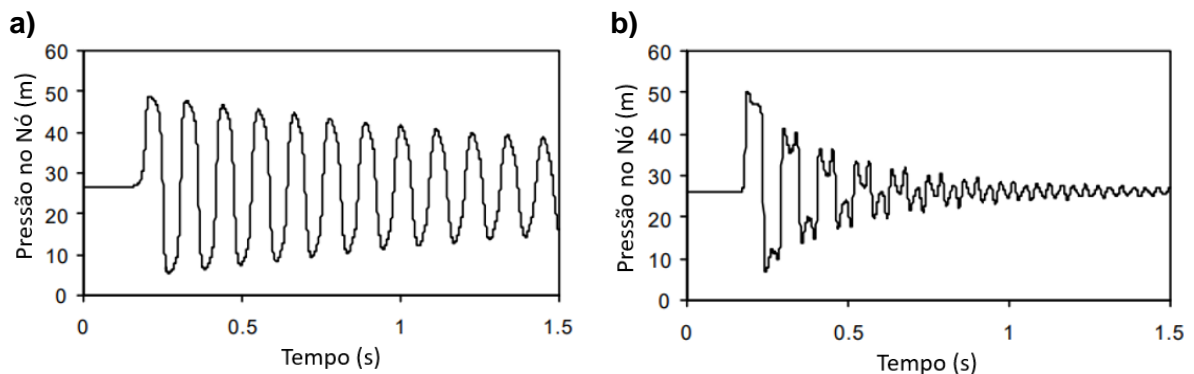
Uma análise desenvolvida por Misiunas *et al.* (2006) apresentou resultados em que o limite inferior do diâmetro do vazamento detectável foi estimado em apenas 0,31% do diâmetro da tubulação. Já a precisão observada na localização do vazamento foi inferior a 0,3% do comprimento total da tubulação. Contudo Che *et al.* (2021) explicam que o método é, no geral, ruim em aplicações práticas, já que as ondas refletidas são facilmente interferidas pelo ruído de fundo e outros dispositivos presentes na tubulação, dificultando a identificação do tempo de chegada da onda e as variações causadas pelo vazamento.

O método da análise inversa de transitórios hidráulicos consiste na minimização da soma dos erros quadráticos entre as variáveis medidas (pressões ou vazões) e as variáveis calculadas utilizando um modelo matemático de transientes hidráulicos (SOARES *et al.*, 2011). Para a detecção de vazamentos, o método tem sido utilizado devido à sua capacidade de detectar simultaneamente as características do vazamento e calibrar os parâmetros desconhecidos do sistema (como a velocidade da onda de pressão), sendo possível utilizá-lo tanto no domínio do tempo quanto no da frequência (CHOURA *et al.*, 2021).

Vítkovský *et al.* (2001) demonstraram em laboratório que o método da análise inversa de transitórios hidráulicos pode ser eficaz tanto na detecção e localização quanto na determinação da magnitude de vazamentos em uma única tubulação. Na Figura 10 é visto graficamente a diferença da pressão em um nó específico do sistema com (b) e sem vazamentos (a). Nota-se visualmente a distinção entre ambos os casos. Além disso Vítkovský *et al.* (2007) observaram uma melhora do método em transientes mais rápidos e de pequena magnitude.

Os autores citaram também desvantagens do método, explicando que todas as condições de contorno, propriedades do sistema e o modelo transiente utilizado devem estar bem definidos para uma boa resposta nos resultados. Em alguns casos, essas propriedades podem não ser conhecidas com precisão suficiente, o que pode afetar o sucesso do método.

**Figura 10: Variação da pressão sem (a) e com (b) vazamentos com ITA**



Fonte: VÍTKOVSKÝ *et al.* (2001)

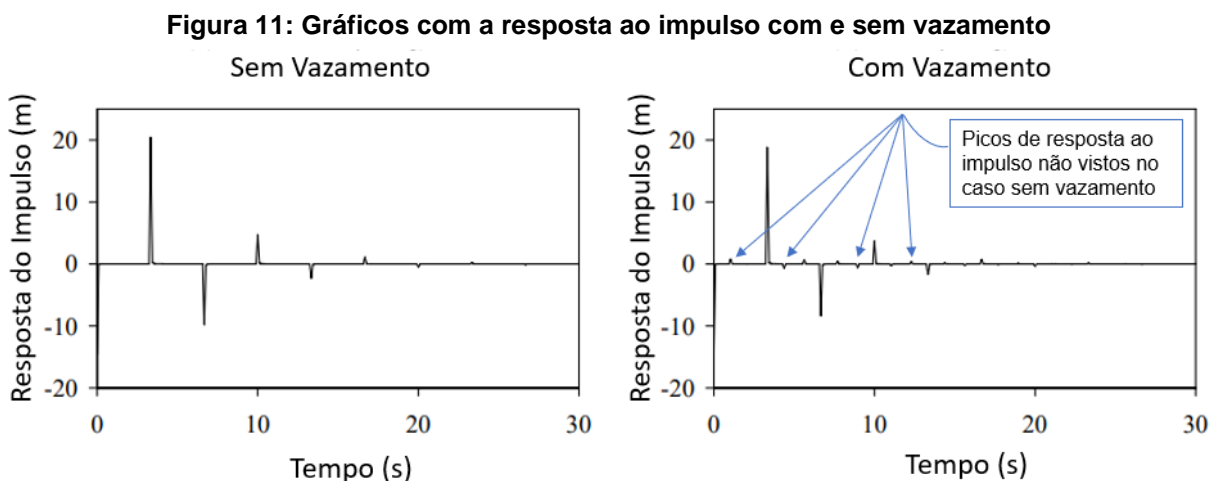
Ao longo da literatura diversos trabalhos buscaram otimizar o método. Rahmanshahi *et al.* (2017) investigaram técnicas com análise do método e os resultados indicaram que a localização do vazamento é encontrada com maior precisão usando um tamanho de amostra igual para os dados coletados e simulados. O erro na estimativa da localização de um vazamento variou entre 0,17% e 2,17% do comprimento da tubulação.

Souza (2025) utilizou da análise inversa de transitórios hidráulicos para a detecção e localização de vazamentos de pequena magnitude, com análise em três estudos de caso. O diferencial do trabalho é a adoção de manobras lentas para proteção do sistema hidráulico e simplificação do modelo matemático, sendo adotado o modelo

dinâmico inercial rígido. O estudo demonstrou que a sensibilidade nas variáveis pressão e vazão podem ser explorados tanto na avaliação de manobras e alocação de sensores quanto na localização dos vazamentos. Foi visto que mesmo em situações com erros de calibração de até 10%, vazamentos de pequena magnitude puderam ser encontrados. Como limitação, o método apresenta a dependência de manobras transitórias controladas, e elevado esforço computacional em certas situações, aspectos que podem restringir sua aplicação direta em redes reais de grande porte.

Já a detecção de vazamentos com o método de análise de resposta ao impulso baseia-se no princípio da onda de propagação do transiente ao longo da tubulação ser afetada pelo atrito na parede do tubo e por outros elementos de perda, tal como os vazamentos. Esses efeitos geram amortecimentos da onda transiente, resultando na detecção do vazamento ao comparar essas ondas amortecidas pelos vazamentos com as ondas sem vazamento (PUUTS *et al.*, 2010).

As características da resposta de uma tubulação estanque e as mudanças características na resposta ao impulso advindo de um vazamento são coletadas e analisadas (LIOU, 1998). Vítkovský *et al.* (2003) demonstram a função de resposta ao impulso para os casos com e sem vazamento experimentalmente (Figura 11). A primeira reflexão induzida pelo vazamento determina a localização e o tamanho correto do vazamento, já as reflexões secundárias são desprezíveis em comparação com a principal reflexão.



Fonte: VÍTKOVSKÝ *et al.* (2003), adaptado

O método é eficaz para a detecção, localização e dimensionamento simultâneos de vazamentos e obstruções em sistemas de tubulação. Além disso, o método de análise de resposta ao impulso é independente da forma do transiente, de modo que qualquer movimento de válvula é suficiente para fornecer as informações necessárias para a detecção do vazamento (VÍTKOVSKÝ *et al.*, 2003).

Entretanto essa metodologia tem dificuldade quando o sistema possui muitos elementos de perdas de carga, e por esse motivo estudos mais recentes buscaram minimizar efeitos que causavam interferência na resposta do impulso. Zeng *et al.* (2020) apresentaram uma técnica com o uso de sinais contínuos para reduzir os impactos do ruído hidráulico. Os autores validaram a abordagem experimentalmente e conseguiram localizar os vazamentos com precisão mesmo com mais interferência.

Um outro método semelhante é o de amortecimento transitório. Enquanto o método anterior analisa a resposta do sistema a um impulso específico, focando nas reflexões geradas, esse método monitora a dissipação de energia ao longo do tempo, baseada na redução da amplitude do sinal. Wang *et al.* (2002) explicam que todos os componentes do sistema são amortecidos uniformemente pelo atrito da tubulação, mas cada componente é amortecido de maneira diferente na presença de um vazamento quando analisados no domínio da frequência. Dessa forma, a técnica permite estimar o tamanho do vazamento por meio da magnitude do amortecimento e localizar sua posição analisando as diferenças nas taxas de amortecimento. Contudo o trabalho apresentou um sistema experimental simples, com poucas perdas de cargas localizadas ou outras variáveis que poderiam influenciar no resultado do sistema, o que apresenta uma limitação a sua utilização.

Testes em laboratório demonstraram uma detecção bem-sucedida de vazamentos com o uso do método de amortecimento transitório, mas em uma situação real, o atrito não é a única causa de amortecimento transitório. Esse amortecimento pode ser causado por outros elementos físicos, como juntas, conexões, hidrantes e produtos de deterioração da parede da tubulação. Arelado a isso a modelagem desses elementos pode ser complicada e, em alguns casos, até impossível. Portanto, pode ser difícil estimar o amortecimento em uma tubulação real sem vazamentos (PUUTS *et al.*, 2010).

Assim como os demais métodos é visto na literatura tentativas de melhoria e aperfeiçoamento do uso do método. Asada *et al.* (2020), apresentou estudo em que o amortecimento induzido pelo vazamento é modelado teoricamente para a localização do vazamento, considerando a dissipação de energia devido ao vazamento e ao atrito na tubulação. O erro na precisão de localização do vazamento foi reduzido de aproximadamente 30% para menos de 10%, e foi revelado que a localização do vazamento estimada apresentou um erro absoluto aproximado de 2% a 5% do comprimento da tubulação. Os autores sugerem que essa abordagem seja adequada para restringir a área do vazamento, mas não para determinar sua localização exata.

Por fim os métodos classificados como análise no domínio da frequência, segundo Puuts *et al.* (2010), utilizam somente da análise da resposta transitória no domínio da frequência. As transformadas de Fourier são usadas para transformar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência. Dessa maneira a localização do vazamento pode ser obtida quando as frequências de tubulações sem vazamento e com vazamento são comparadas.

Mpesha *et al.* (2001) demonstram em ensaios que essa estratégia pode ser utilizada em uma variedade de situações práticas com poucas limitações. Embora o valor do fator de atrito do tubo possa afetar o sucesso da detecção e localização de vazamentos, este método pode ser usado para tubulações típicas encontradas em sistemas de abastecimento reais.

Os autores demonstram que o método é capaz de detectar e localizar vazamentos individuais de até 0,5% da vazão média quando as incertezas nos parâmetros do sistema não são consideradas. Vazamentos menores que isso, distribuídos ao longo de um tubo, não puderam ser detectados.

Ferrante *et al.* (2007) utilizaram duas ferramentas de análise harmônica no método e ambas auxiliaram no diagnóstico dos sistemas ao expor melhor as discontinuidades dos sinais de pressão e determinar com precisão o tempo de chegada das ondas de pressão refletidas pelos vazamentos, localizando assim o próprio vazamento.

Analisar o domínio da frequência considerando não apenas sua localização e magnitude, mas também o número de vazamentos como parâmetro de incerteza foi

proposto por Ferrante *et al.* (2016). Os autores comentaram que os resultados contribuem para a compreensão dos efeitos dos vazamentos sobre o amortecimento dos transitórios e sobre a resposta em frequência do sistema, ajudando na detecção dos vazamentos. Entretanto, a abordagem baseia-se exclusivamente em modelagens numéricas, sem validação experimental, o que pode limitar a aplicação direta dos resultados a sistemas reais.

O uso do domínio da frequência com aprendizagem profunda para a detecção de vazamentos também é visto na literatura. Liao *et al.* (2021) apresenta essa abordagem, destacando como vantagem a robustez frente a incertezas hidráulicas. Os resultados mostram elevada taxa de acerto, inclusive em redes maiores, indicando bom potencial de aplicação prática. Entretanto, a metodologia depende fortemente de um modelo hidráulico pré-calibrado para geração dos dados de treinamento e foi validada somente computacionalmente.

Foram vistas variadas técnicas do potencial uso do escoamento transiente na detecção de vazamentos. Nota-se que diversas delas passaram por aprimoramentos e atualizações ao longo dos últimos anos, com pesquisas recentes aperfeiçoando suas abordagens e aplicações. Além disso, novas técnicas têm emergido na literatura, ampliando as possibilidades para a detecção de vazamentos e reforçando a importância do fenômeno transitório como ferramenta para esse fim, como será visto a seguir.

Um exemplo é apresentado por Keramat *et al.* (2020). Os autores apresentaram um estudo que ofereceu uma nova abordagem de detecção de vazamento em uma tubulação viscoelástica. Foi possível concluir que a inclusão dos efeitos de interação fluido-estrutura pode permitir uma localização mais precisa dos vazamentos. Os autores concluíram que considerar tais interações é mais crucial em tubulações viscoelásticas do que em tubulações elásticas, devido aos maiores efeitos de Poisson na estrutura.

Já Manzi *et al.* (2019) avaliaram métodos que exploram os sinais transientes, os quais são posteriormente utilizados para treinar redes neurais artificiais (ANNs) com o objetivo de identificar vazamentos. O uso das ANNs como reconhecedores de padrões permitiu a identificação de padrões hidráulicos de diversos vazamentos em duas redes

de abastecimento de água testadas. A detecção foi realizada com a análise das características dos sinais transientes em ambas redes consideradas de pequeno e médio porte pelos autores. Contudo, o efeito de uma perda de água provavelmente não será detectado por um sensor distante do ponto de medição. Isso se deve ao processo de atenuação da onda de pressão causado pelos efeitos do atrito, o que pode exigir uma maior cobertura de sensores de pressão na rede.

Waqar *et al.* (2025) também demonstraram o uso de aprendizado de máquina para a detecção de vazamentos quando aliado à análise de transientes hidráulicos. Um modelo baseado em ANNs foi desenvolvido para processar sinais de pressão e identificar múltiplos vazamentos sem a necessidade de reconfiguração para diferentes cenários. A abordagem foi validada numericamente e experimentalmente, demonstrando boa precisão mesmo em redes complexas. No entanto, a escalabilidade do modelo apresenta desafios, exigindo ajustes na arquitetura da ANN para manter a precisão em sistemas maiores.

De forma geral Farah e Shahrour (2024) resumiram que o uso do escoamento transitório na detecção de vazamentos ainda apresenta certos desafios, futuras pesquisas devem priorizar o desenvolvimento de algoritmos e modelos mais robustos, capazes de acomodar diferentes configurações de tubulações. Além disso, utilizar técnicas de fusão de dados pode aumentar a precisão e a confiabilidade da detecção de vazamentos baseada em transitórios.

Uma característica recorrente nas metodologias avaliadas é o uso da análise no domínio da frequência para a detecção de vazamentos em transitórios, sendo essa uma ferramenta amplamente empregada. Para uma compreensão mais aprofundada dessa abordagem, é fundamental entender os princípios do processamento de sinais envolvidos nesse método, pois eles permitem a identificação de padrões e características que indicam a presença de vazamentos no sistema.

### **3.5 Processamento de sinais**

No contexto da engenharia e do processamento de sinais, um sinal pode ser definido como uma representação matemática de uma grandeza física que varia em função de uma ou mais variáveis independentes. Exemplos típicos incluem sinais de

telecomunicações, como telefonia e televisão, bem como os dados de pressão obtidos durante um escoamento transitório em sistemas hidráulicos. Nesses casos, os sinais são usualmente tratados como funções da variável independente tempo, permitindo sua análise por meio de técnicas de processamento de sinais no domínio do tempo, da frequência ou tempo-frequência (OPPENHEIM *et al.*, 2010; LATHI, 1998).

Como apresentado por Lathi *et al.* (1998) os sinais podem ter variadas classificações, são citadas algumas delas:

- a) Sinais de tempo contínuo e discreto;
- b) Sinais analógicos e digitais;
- c) Sinais periódicos e aperiódicos;

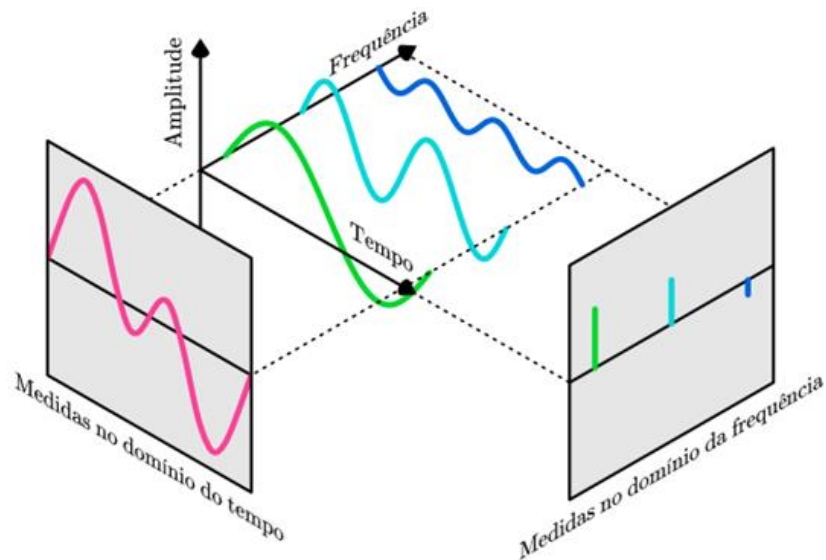
Quanto ao domínio do tempo, um sinal de tempo contínuo é definido para todos os valores contínuos da variável tempo, enquanto um sinal de tempo discreto é definido apenas em instantes discretos, normalmente obtidos por meio do processo de amostragem de um sinal contínuo. Em relação à amplitude, um sinal analógico é aquele cuja amplitude pode assumir qualquer valor dentro de um intervalo contínuo. Por outro lado, um sinal digital é caracterizado por apresentar amplitudes que assumem apenas um número finito de valores discretos. Por fim, quanto ao comportamento temporal, um sinal é dito periódico quando se repete identicamente após um intervalo constante, denominado período. Caso contrário, o sinal é classificado como aperiódico (LATHI *et al.*, 1998).

Dada a natureza de onda do escoamento transiente pode-se utilizar de técnicas de processamento de sinais para lidar com análise, modificação e manipulação desses sinais de pressão (CHANAKA, 2024). Uma coleta de dados de pressão no fenômeno transitório pode ser classificada como um sinal discreto e digital.

Sendo assim, as estratégias de detecção de vazamentos baseadas em sinais transitórios podem ser classificadas em dois domínios principais, a saber: no domínio do tempo e no domínio da frequência (Figura 12).

Os valores do domínio da frequência podem ser obtidos a partir de dados do domínio do tempo por meio de processamento de sinais, tal como a transformada rápida de Fourier (BRUNONE e FERRANTE, 2004 *apud* FARAH e SHAHROUR, 2024, p. 9).

**Figura 12: Domínio do tempo e da frequência**



Fonte: ANTENNA, s.d.

### 3.5.1 Transformada de Fourier

A análise de Fourier é uma família de métodos matemáticos, baseados na decomposição de sinais em ondas senoidais (SMITH, 1999). Em outras palavras, ela possibilita identificar a intensidade de cada frequência presente em um sinal do domínio do tempo.

Para sequências de duração finita, como o caso de dados de pressão de um escoamento transitório, existe uma representação de Fourier em tempo discreto, denominada Transformada Discreta de Fourier (DFT). A DFT corresponde a amostras igualmente espaçadas no tempo. Além de sua importância teórica, como uma representação no domínio da frequência para sequências, a DFT desempenha um papel central na implementação de uma ampla variedade de algoritmos de processamento digital de sinais, uma vez que existem algoritmos eficientes para o seu cálculo (OPPENHEIM e SCHAFER, 2010).

Para chegar na DFT, primeiramente, Oppenheim e Schafer (2010) comentam que uma sequência de valores discretos pode ser representada por uma série de Fourier,

correspondendo a uma soma de sequências exponenciais complexas harmonicamente relacionadas, isto é, exponenciais complexas com frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental  $(\frac{2\pi}{N})$  associada à sequência periódica. Essas exponenciais complexas periódicas são da forma vista na equação (13).

$$e_k(n) = e^{j \cdot (\frac{2\pi}{N}) \cdot k \cdot n}; k = f_k \cdot N \cdot \Delta t \quad (13)$$

Em que:

$e_k(n)$  = k-ésima exponencial complexa discreta;

$n$  = Índice de tempo discreto;

$k$  = Índice da harmônica (ou da frequência discreta);

$f_k$  = Frequência discreta;

$\Delta t$  = Passo de tempo;

$N$  = Número de amostras em um período;

$j = \sqrt{-1}$  (unidade imaginária).

Com isso, os autores demonstram que é possível obter a série de Fourier discreta a partir de uma sequência de sinal discreto no domínio do tempo com a equação de análise apresentada na equação (14).

$$\tilde{X}(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n) \cdot e^{-j \cdot (\frac{2\pi}{N}) \cdot k \cdot n} \quad (14)$$

$\tilde{x}(n)$  = A sequência de sinal discreto no domínio do tempo;

$\tilde{X}(k)$  = Coeficientes da série de Fourier discreta.

Esse equacionamento representa a base teórica da DFT, considerando apenas um período do sinal. Ou seja, os coeficientes dessa representação constituem a série de Fourier discreta, que fornece a base conceitual da Transformada Discreta de Fourier.

De forma complementar, Proakis e Manolakis (1996) destacam que, ao se considerar um sinal discreto definido em um intervalo finito e assumindo sua extensão periódica implícita, obtém-se uma formulação equivalente à Série de Fourier discreta. Essa abordagem conduz naturalmente à definição da Transformada Discreta de Fourier.

Após o desenvolvimento matemático Oppenheim e Schafer (2010) apresentaram essa definição, resultando na equação da análise da DFT (Equação (15)).

$$X(n) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot W_N^{k \cdot n}, 0 \leq n \leq N - 1 \quad (15)$$

O fator  $W_N = e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N}}$  representa o fator rotacional complexo. Essa expressão é formalmente semelhante à equação de síntese da série de Fourier discreta, pois ambas utilizam a mesma base de exponenciais complexas discretas igualmente espaçadas no domínio da frequência.

Conforme observado por Lyons (2011), essa semelhança decorre do fato de que a Transformada Discreta de Fourier pode ser interpretada como um caso particular da série de Fourier discreta aplicada a um único período de um sinal finito. A diferença fundamental está na interpretação do sinal: enquanto a série pressupõe periodicidade explícita, a DFT assume periodicidade implícita como consequência da formulação matemática.

Portanto, o objetivo dessa equação é realizar a projeção do sinal no domínio do tempo sobre um conjunto finito de exponenciais complexas discretas, cada uma associada a uma frequência discreta. De acordo com Proakis e Manolakis (1996), cada coeficiente descreve a contribuição de amplitude e fase da respectiva componente espectral, permitindo caracterizar o conteúdo em frequência do sinal analisado. Valores elevados nessa frequência indicam que o transitório hidráulico contém contribuições significativas dessa escala temporal, associadas à dinâmica do sistema e às reflexões das ondas de pressão.

No contexto desta dissertação, essa formulação possibilita a análise dos sinais de pressão obtidos durante transitórios hidráulicos no domínio da frequência, permitindo identificar alterações no que possam ser associadas à detecção de vazamentos.

#### 3.5.1.1 Transformada rápida de Fourier

Na prática, a Transformada Discreta de Fourier é amplamente empregada por meio de sistemas computacionais e bibliotecas numéricas. Contudo, uma questão que surge na computação digital é quanto esforço computacional é necessário para executar uma operação de processamento de sinais. Essa consideração se traduz no número de etapas computacionais básicas exigidas para realizar o processamento necessário. Esse número de etapas, nomeado de complexidade, torna-se equivalente ao tempo que a computação leva, isto é, quanto tempo se deve esperar pelo resultado (HKMU, 2015).

A complexidade está relacionada à quantidade de etapas exigidas em qualquer computador. Para calculá-la preocupa-se apenas com o comportamento à medida que o tamanho dos dados aumenta. Analisando a DFT, nota-se que ela é um procedimento computacional de ordem  $N$  (número de dados) ao quadrado. Ou seja, se o comprimento dos dados for duplicado, espera-se que o tempo de computação aumente aproximadamente quatro vezes (HKMU, 2015).

Oppenheim e Schafer (2010) afirmam que o cálculo direto da DFT pode ser computacionalmente proibitivo para sinais longos. Para contornar essa limitação, foram desenvolvidos algoritmos conhecidos como Transformada Rápida de Fourier (FFT), que exploram simetrias e periodicidades da DFT para reduzir drasticamente o número de operações necessárias. Proakis e Manolakis (2007) reforçam que essa eficiência é alcançada por meio da decomposição do sinal em subsequências menores, permitindo o reaproveitamento de cálculos intermediários.

Oppenheim e Schafer (2010) também apresentam duas classes de FFT para exemplificar como a eficiência computacional da DFT pode ser alcançada. A primeira classe, denominada dizimação no tempo, recebe esse nome porque, no processo de organizar o cálculo em transformações menores, a sequência analisada (geralmente uma sequência no tempo) é decomposta em subsequências progressivamente menores. Na segunda classe, a sequência dos coeficientes da DFT é que é

decomposta em subsequências menores, razão pela qual essa abordagem é chamada de dizimação na frequência.

Por fim, os autores resumem que a eficiência computacional significativa no cálculo da DFT resultante do uso FFT é obtida pela exploração simultânea da simetria e da periodicidade das exponenciais complexas dadas pelo fator  $W_N^{kn}$ .

Utilizar a FFT agrega diminuição da complexidade de cálculo da DFT, e com isso a velocidade de cálculo aumenta e a aplicação em maiores conjuntos de dados se torna mais prática. Por esse motivo, grande parte das bibliotecas computacionais adota algoritmos baseados na FFT, uma vez que esses preservam integralmente o resultado matemático da DFT, tornando seu uso computacionalmente mais eficiente e, portanto, vantajoso.

#### 3.5.1.2 Teorema de Nyquist

Um ponto que deve ser analisado, conforme comentado por Wright (2022), ao se realizar a transformada para o domínio da frequência é considerar o teorema de Nyquist (ou Nyquist-Shannon) (NYQUIST, 1928; SHANNON, 1949). Ele estabelece que, para reconstruir com precisão um sinal contínuo a partir de suas amostras digitais, a taxa de amostragem deve ser, no mínimo, o dobro da maior frequência presente no sinal. Esse limite é denominado frequência de Nyquist. De maneira análoga, ao se estabelecer um passo de tempo na amostragem só se deve analisar frequências até determinado valor.

Caso essa condição não seja atendida, ocorre o fenômeno conhecido como *aliasing* (ou sobreposição espectral), no qual componentes de alta frequência do sinal original são incorretamente representados como frequências mais baixas, comprometendo a fidelidade da reconstrução do sinal. Esse efeito pode introduzir distorções significativas na análise, especialmente em sistemas onde a precisão dos dados é crítica. Para mitigar esse problema, utiliza-se um filtro antes da etapa de amostragem, com o objetivo de atenuar ou eliminar componentes acima da frequência de Nyquist (OPPENHEIM e SCHAFER, 2010).

Na análise de escoamentos transitórios em sistemas hidráulicos, a aplicação do Teorema de Nyquist é importante para garantir a precisão na detecção de eventos

como vazamentos ou variações de pressão. Ao amostrar sinais de pressão com uma taxa adequada ou considerar um limite espectral de análise, assegura-se que todas as informações do fenômeno transitório sejam capturadas com menores distorções.

A utilização combinada dos domínios do tempo e da frequência pode proporcionar análises mais detalhadas e caminhos promissores para a detecção de vazamentos com o uso de transitórios hidráulicos, conforme visto nas diversas metodologias da literatura. Para aprimorar esses dados e aumentar a eficácia dos métodos de detecção, é fundamental empregar métricas adequadas. O uso de métricas permite quantificar a resposta do sistema, avaliar a influência de ruídos e melhorar a interpretação dos sinais, contribuindo para uma detecção mais precisa dos vazamentos.

### **3.6 Métricas de análise**

Para realizar análise de sinais de onda tanto no domínio do tempo quanto no da frequência pode-se utilizar variadas métricas. Com características próprias, cada métrica consegue verificar e comparar sinais buscando informações e padrões úteis que podem ser utilizados.

Estudos como o de Gomez e Kadri (2021) demonstram algumas dessas métricas que são utilizadas em cada um dos domínios. Nele foram aplicadas métricas destinadas à caracterização de sinais acústicos gerados por terremotos. Sua aplicação em sinais de onda guiam para potenciais usos dessas métricas na análise dos escoamentos transitórios sendo possível analisar algumas delas em específico.

Embora diversas métricas possam ser definidas tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, pode-se optar por empregar conjuntos distintos de métricas em cada domínio. Essa escolha visa explorar características complementares do sinal, sendo o domínio do tempo utilizado para descrever propriedades temporais do sinal, enquanto o domínio da frequência é empregado para caracterizar seu comportamento espectral.

As métricas a seguir, foram definidas de forma arbitrária a cada domínio, ainda que algumas delas possam ser aplicadas tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. A escolha das métricas a serem apresentadas e utilizadas depende do

objetivo do estudo a ser realizado e das abordagens adotadas. Assim, as métricas selecionadas procuram englobar aquelas mais recorrentes em trabalhos prévios e que melhor se adequam à análise de transitórios hidráulicos (JANG *et al.*, 2022; MA *et al.*, 2025; GOMEZ e KADRI, 2021).

No domínio do tempo pode se citar seis métricas para a análise de sinais. São elas:

a) Valor médio (S)

Representa a média aritmética dos valores do sinal no tempo. Indica a tendência central, conforme a equação (16).

$$S = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (16)$$

em que  $N$  é o número de valores e  $x_i$  é o valor amostral num passo de tempo  $i$ .

b) Entropias (Sh)

Essa métrica surgiu, primeiramente, com a entropia de Shannon que foi introduzida por Claude Shannon, em 1948, como uma medida da quantidade média de informação associada a uma fonte em um modelo matemático de comunicação, fundamentado nos conceitos de emissor, receptor, canal, ruído, redundância, codificação e decodificação (SHANNON, 1948; MAGOSSI e BARROS, 2021). No contexto da análise de sinais, essa métrica tem sido utilizada para quantificar o grau de desordem, complexidade ou imprevisibilidade de sinais físicos ao longo do tempo.

A entropia de Shannon pode ser empregada como um índice para avaliar a variabilidade temporal dos sinais de pressão associados a fenômenos transitórios hidráulicos. A entropia é expressa conforme equação (17).

$$Sh = - \sum_i p_i \cdot \log_2(p_i) \quad (17)$$

em que  $p_i$  corresponde à probabilidade de ocorrência de um determinado evento.

Diferentemente da formulação clássica da entropia de Shannon,  $p_i$  pode ser também um intervalo de valores obtido por meio de uma distribuição estatística ou definido a partir da normalização direta das amplitudes do sinal, conforme a equação (18) (KAPUR e KESAVAN, 1992; LYSENKO *et al.*, 2025; GRZYWACZ, 2025), gerando assim uma entropia normalizada.

$$p_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^N x_i} \quad (18)$$

em que  $x_i$  corresponde à amplitude instantânea do sinal de pressão no instante  $i$ , e  $N$  é o número total de amostras do sinal.

Essa abordagem interpreta cada amostra do sinal como uma contribuição relativa ao conteúdo total do sinal ao longo do tempo, permitindo avaliar a distribuição temporal da intensidade do fenômeno analisado. Assim, embora a estrutura matemática da entropia de Shannon seja preservada, a variável  $p_i$  não representa uma probabilidade de ocorrência no sentido estatístico clássico, mas sim uma probabilidade normalizada associada à intensidade ou à energia relativa do sinal em cada instante.

Abordagens semelhantes, nas quais  $p_i$  é obtido pela normalização da amplitude ou da energia do sinal, são empregadas na análise de sinais para caracterização da complexidade temporal (WANG *et al.*, 2024).

Segundo Magossi e Barros (2021), formulações desse tipo são utilizadas na análise de sinais e séries temporais quando o objetivo é caracterizar a irregularidade, a complexidade ou a dispersão da energia ao longo do tempo. Nessa perspectiva, valores elevados de entropia indicam maior dispersão temporal da energia do sinal, associada a comportamentos mais complexos e menos previsíveis, enquanto valores reduzidos de entropia estão relacionados a sinais mais organizados e previsíveis, com concentração da energia em intervalos específicos do tempo.

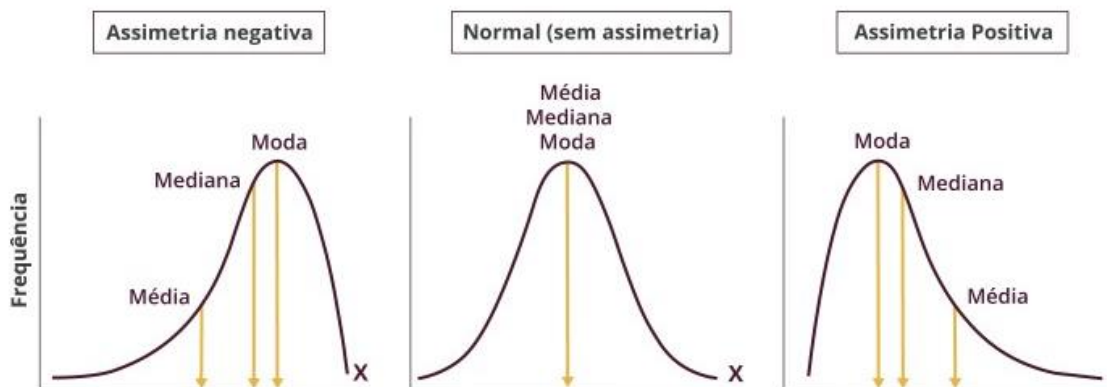
#### c) Coeficiente de assimetria

O coeficiente de assimetria é outro parâmetro que pode ser utilizado para averiguar um sinal de onda. Trata-se da distorção ou assimetria de um sinal, cuja interpretação

pode se dar graficamente olhando para a forma da distribuição do sinal (DYNAMOX, 2023).

Uma distribuição com assimetria positiva terá valores extremos da distribuição mais à direita da média, enquanto uma distribuição com assimetria negativa terá esses valores mais à esquerda da média, conforme a Figura 13.

**Figura 13: Assimetrias negativas e positivas**

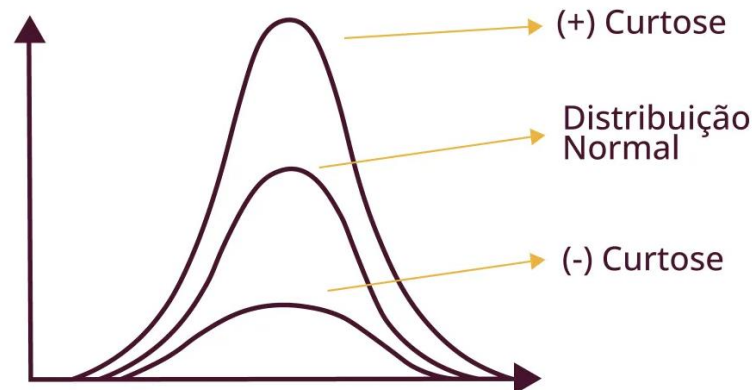


Fonte: DYNAMOX, 2023

#### d) Curtose ou distorção

Uma distribuição com alta curtose apresenta uma forma mais afunilada, indicando uma maior concentração de valores próximos à média. Em contrapartida, uma distribuição com baixa curtose tende a ser mais plana, com os valores distribuídos de maneira mais uniforme ao longo de um intervalo maior (Figura 14). Um sinal com muitos picos ou impactos distintos exibirá uma curtose elevada, uma vez que esses eventos aumentam significativamente os valores dos desvios em relação à média. (DYNAMOX, 2023).

**Figura 14: Curtose positiva e negativa**



Fonte: DYNAMOX, 2023

e) Valor máximo, valor mínimo e amplitude total

O valor máximo representa o ponto mais alto da onda de transitório, indicando a máxima pressão durante o evento. Esse valor é importante para entender os extremos que o sistema enfrenta. Já o valor mínimo corresponde ao ponto mais baixo da onda.

A amplitude total, por sua vez, é calculada como a diferença entre o valor máximo e o mínimo da onda. A amplitude total fornece uma medida da variação total experimentada pelo sistema.

f) Raiz média quadrática (RMS)

Em processamento de sinais, a energia de um sinal discreto é comumente definida como a soma dos quadrados de suas amplitudes ao longo do tempo, representando o conteúdo energético total associado ao sinal (BOASHASH, 2016).

A métrica RMS é uma medida média dessa energia do sinal (DYNAMOX, 2023), calculada com base em toda a amostra conforme a equação (19).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (19)$$

em que  $x_i$  representa os valores individuais da série.

O valor RMS é uma métrica adequada para a comparação da intensidade média de energia de um sinal, pois incorpora a contribuição global de suas amplitudes. De forma geral, a escolha entre o uso do RMS ou da energia do sinal depende dos objetivos da análise, bem como o seu uso no domínio do tempo ou da frequência.

No domínio da frequência também podem ser calculadas métricas. A energia total, como já discutido, pode ser utilizada em ambos os domínios, assim como o valor RMS. Neste trabalho, a energia é apresentada como total no domínio da frequência a fim de estabelecer uma distinção entre as métricas de energia avaliadas em cada domínio. Além disso, são apresentadas quatro métricas baseadas em fatores, todas com equacionamento semelhante ao proposto por Caesarendra e Tjahjowidodo (2017). São elas:

a) Energia total

Essa métrica representa a energia total do sinal no domínio da frequência. É calculada como a soma dos quadrados das amplitudes conforme a equação (20).

$$energia\ total = \sqrt{\sum a_m^2} \quad (20)$$

em que  $a_m$  é a amplitude do sinal de frequência.

A energia total indica a quantidade de energia contida em todas as frequências do sinal, sendo uma medida direta da potência total.

b) Fator de crista

O fator de crista é a diferença da amplitude da onda entre os níveis de pico e o valor RMS do sinal (STEWART, 2020). A equação (21) apresenta a sua formulação.

$$Fator\ de\ crista = \frac{\max(a_m)}{\frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum a_m^2}} \quad (21)$$

Valores elevados dessa métrica indicam picos agudos em relação à energia média do sinal.

## c) Fator de forma

É a razão entre o valor RMS do espectro e a média aritmética do espectro (Equação (22)).

$$\text{Fator de forma} = \frac{\frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum a_m^2}}{\frac{1}{N} \cdot \sum a_m} \quad (22)$$

Avalia a forma do sinal, comparando a energia média com a média aritmética das amplitudes. Valores altos indicam um sinal mais concentrado.

## d) Fator de impulso

É a razão entre o valor máximo do sinal e a média aritmética das amplitudes da onda (Equação (23)).

$$\text{Fator de impulso} = \frac{\max(a_m)}{\frac{1}{N} \cdot \sum a_m} \quad (23)$$

Indica a presença de picos isolados em relação ao valor médio. Valores elevados sugerem que o espectro tem picos pronunciados.

## e) Fator de margem

O fator de margem do sinal, conforme a equação (24), é a razão entre o seu valor máximo e a média das raízes quadradas das amplitudes.

$$\text{Fator de margem} = \frac{\max(a_m)}{\left(\frac{1}{N} \cdot \sum \sqrt{a_m}\right)^2} \quad (24)$$

É útil para detectar picos em sinais que têm variações menores ou mais suaves.

A variação de domínios (tempo e frequência) bem como as métricas em cada um deles condiciona a um cenário de diversos potenciais de análise quanto ao estudo de onda dos transitórios hidráulicos. Por isso, esse estudo procurou investigar cada métrica e variação gráfica para que seja possível indicar padrões quanto a detecção de vazamento com o uso dos transitórios.

## 4 METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em três etapas ou cenários principais (Figura 15). Apesar da divisão, os cenários foram realizados em conjunto; contudo a definição das manobras simuladas e alguns detalhes nos cenários computacionais foram escolhidos com base nos primeiros resultados do cenário experimental. No primeiro cenário, elaborou-se um modelo computacional fictício para exemplificar o comportamento do escoamento transitório e sua forma de cálculo no software. Para o cenário 2 foi construído um modelo computacional com o objetivo de representar o sistema laboratorial da maneira mais fiel possível. Ambos modelos computacionais foram desenvolvidos e analisados no software HAMMER®. O cenário 3 contemplou testes experimentais em diversas situações, com variação de vazão inicial do sistema, da magnitude do vazamento e das manobras realizadas, sendo apresentados mais adiante seu arranjo experimental e as características.

Figura 15: Cenários realizados no estudo

Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computacional</li> <li>• Tubulações longas</li> <li>• 4 pontos de análise</li> <li>• 2 pontos de vazamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computacional</li> <li>• Simular o laboratório</li> <li>• 3 pontos de análise</li> <li>• 2 pontos de vazamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Experimental</li> <li>• Tubulações com curvas 180°</li> <li>• 4 pontos de análise</li> <li>• 2 pontos de vazamento</li> </ul>

Fonte: AUTOR

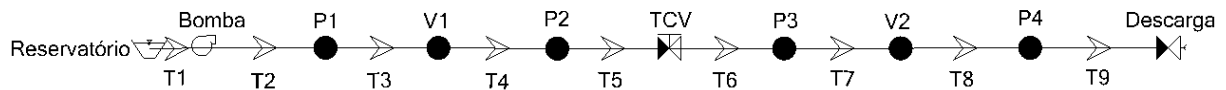
### 4.1 Modelo computacional padrão (Cenário 1)

O cenário 1 foi criado para a análise dos transientes hidráulicos no software de estudo. Esse modelo padrão permite compreender como a presença de vazamentos afeta o comportamento do sistema e de que forma manobras com diferentes velocidades impactam os resultados.

O modelo é composto por um reservatório, uma bomba e uma válvula TCV (*Throttle Control Valve*) utilizada para a execução das manobras de fechamento, contando ao todo com 2.000 metros de tubulação de PVC com 100 milímetros de diâmetro. A

válvula está localizada a aproximadamente 1.000 metros do reservatório, enquanto os pontos de vazamento simulados (V1 e V2) situam-se 500 e 1.500 metros dele. As coletas de pressão foram realizadas em quatro pontos distintos, posicionados 250 metros antes e 250 metros depois de cada ponto de vazamento (Figura 16). O cenário foi dividido em nove trechos (T1 a T9).

**Figura 16: Esquema do cenário 1**



Fonte: AUTOR

O sistema foi simulado tanto na condição sem vazamento quanto na presença de vazamentos no primeiro e no segundo ponto (V1 e V2) vistos na Figura 16. Também foram feitas, variações na magnitude dos vazamentos e no tempo de fechamento da válvula. A vazão do sistema sem vazamento é de aproximadamente 11 L/s, resultante das condições do sistema proposto, mas objetivada a alcançar um elevado valor. A magnitude do vazamento mínimo foi de 0,64 L/s e o máximo de 5,14 L/s, seguindo coeficientes de vazamentos de 0,1 e 1, respectivamente, utilizados no *software*. Os valores de vazamento foram adotados de forma arbitrária, tomando-se como referência a magnitude total da vazão do sistema para sua escolha.

Em ambos os modelos computacionais foram definidos dois tempos de manobra para a geração do escoamento transiente, ambos correspondentes ao fechamento linear da válvula reguladora de vazão, TCV. O fechamento lento foi considerado com duração de 10 segundos, enquanto o rápido foi de 0,1 segundo. Esses valores foram arbitrados, mas em conformidade com a definição de velocidade de manobra já comentada (Equação ((3)). O valor da celeridade da onda foi considerado como 500 m/s. Com isso, o valor de  $t_{car}$  para o cenário 1 é de 4 segundos, mantendo-se coerente com os critérios teóricos estabelecidos de fechamento rápido e lento.

As simulações foram realizadas, portanto, em dez cenários distintos englobando cinco manobras com fechamento rápido da válvula e cinco com fechamento lento. Dois dos cinco cenários foram com vazamento mínimo e máximo em V1 e o mesmo em V2

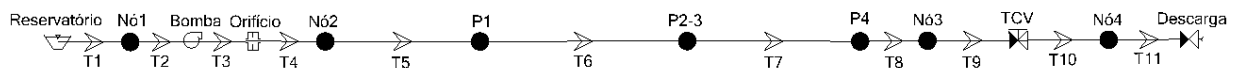
além do cenário sem vazamento. O tempo de simulação para todos os cenários foi de 30 segundos com a coleta dos dados de pressão em cada um dos quatro pontos (P1, P2, P3 e P4) em um intervalo de 0,01 segundos.

#### 4.2 Modelo computacional do experimento (Cenário 2)

O modelo para representar a bancada experimental de testes, cenário 2, foi criado de forma simplificada devido a dificuldades de se projetar no software alguns dos detalhes presentes no experimento. As simplificações envolveram, no geral, a retirada de algumas curvas e outras perdas localizadas que existem em laboratório.

Na Figura 17 está contemplado o modelo, apresentando uma tubulação de aproximadamente 66 metros de comprimento, com um trecho principal entre os pontos P1 e P4 que possuem juntos 48 metros. As características principais do modelo advieram, como dito, da bancada experimental que será detalhada no cenário 3 mais adiante.

Figura 17: Esquema do cenário 2



Fonte: AUTOR

Esse modelo apresenta características semelhantes ao modelo padrão, como a presença de um reservatório e de uma bomba a montante, além da válvula TCV para manobra a jusante. As diferenças concentram-se, essencialmente, nos comprimentos significativamente menores das tubulações e na vazão reduzida, de aproximadamente 0,4 L/s. Nas simulações desse cenário, também foram realizadas manobras lentas e rápidas de fechamento da válvula, considerando o mesmo tempo do cenário 1. Nesse cenário, o valor de  $t_{car}$  foi de 0,2 segundos devido ao menor comprimento da tubulação. Contudo, os tempos utilizados nas manobras ainda se mantiveram na classificação de rápido e lento.

Os pontos de coleta de dados de pressão foram posicionados em P1, P2-3 e P4, conforme indicado no esquema. Além disso, para esse modelo foram consideradas

três vazões de vazamento distintas, simuladas nos pontos P1 e P4, cujas magnitudes estão apresentadas na Tabela 2. Seus valores procuraram englobar um espectro de magnitudes de forma que a pressão mínima do sistema não chegasse próxima a zero.

**Tabela 2: Vazões dos vazamentos no modelo do laboratório**

<b>Nível do vazamento</b>	<b>Mínimo (l/s)</b>	<b>Médio (l/s)</b>	<b>Máximo (l/s)</b>
<b>Vazão do vazamento</b>	0,015	0,092	0,157

Fonte: AUTOR

Também como no cenário 1 foram atribuídos um tempo de coleta de dados de 30 segundos com um passo de tempo de 0,01 segundos. No esquema do Quadro 1 tem-se, resumidamente, todas as manobras realizadas tanto para o modelo padrão quanto para o modelo do laboratório.

**Quadro 1: Magnitudes de vazamento realizados em cada cenário**

<b>Magnitude dos vazamentos (Manobras)</b>	<b>Modelo padrão (Cenário 1)</b>	<b>Modelo do laboratório (Cenário 2)</b>
Sem vazamento (Lenta e Rápida)	Sim	Sim
Com vazamento Mínimo em V1 ou P1 (Lenta e Rápida)	Sim	Sim
Com vazamento Médio em V1 ou P1 (Lenta e Rápida)	Não	Sim
Com vazamento Máximo em V1 ou P1 (Lenta e Rápida)	Sim	Sim
Com vazamento Mínimo em V2 ou P4 (Lenta e Rápida)	Sim	Sim
Com vazamento Médio em V2 ou P4 (Lenta e Rápida)	Não	Sim
Com vazamento Máximo em V2 ou P4 (Lenta e Rápida)	Sim	Sim

Fonte: AUTOR

#### 4.2.1 Modelo experimental (Cenário 3)

A etapa experimental foi conduzida em uma bancada de ensaios. O foco foi, assim como nos modelos, a análise do escoamento transiente decorrente de manobras em

válvulas, tanto na presença quanto na ausência de vazamentos no sistema. Contudo, enquanto os cenários computacionais englobaram somente manobras de fechamento de válvulas o cenário 3 buscou maior variação.

Nesse cenário foi realizado um número maior de testes experimentais em razão do sistema de laboratório ter sido o primeiro a ser idealizado e implementado, servindo como base inicial para a investigação do fenômeno. À medida que os primeiros resultados experimentais foram sendo obtidos e analisados, tornou-se possível identificar quais manobras apresentavam maior relevância para os objetivos do estudo, de modo que os modelos computacionais passaram a reproduzir apenas um subconjunto representativo dessas condições experimentais.

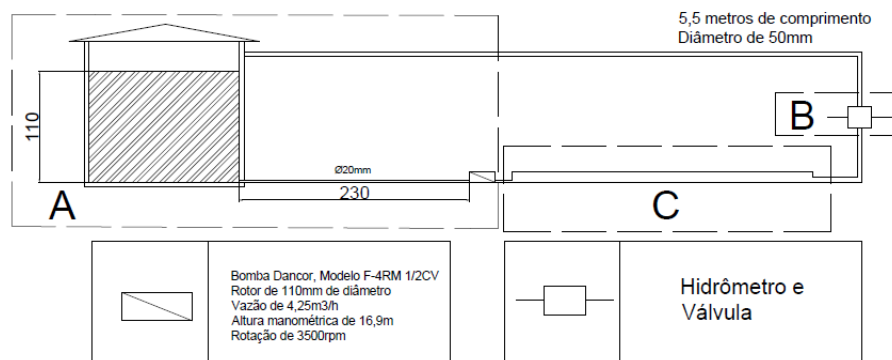
Para realizar as manobras experimentalmente, foi utilizado o circuito hidráulico do Centro de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal de Minas Gerais (CPH-UFMG). A Figura 18(a) apresenta o esquema geral deste circuito que ao todo possui 66 m de comprimento e tubulações de PVC que variam de 20 a 100 mm de diâmetro. A Figura 18(d) contém um detalhamento de 48 m de extensão do sistema, onde as tubulações estão dispostas em um curto espaço, e por isto seguem o padrão apresentado na Figura 18 (e), em que oito curvas de 180° estão instaladas.

Todo o circuito é alimentado por um conjunto motobomba, conforme ilustrado na Figura 18(b). O sistema conta com duas válvulas para a realização das manobras hidráulicas responsáveis pela geração do escoamento transitório: uma válvula solenoide de 50 mm de diâmetro, localizada no final do circuito, e outra de 20 mm de diâmetro, posicionada logo após a saída da bomba. Ambas válvulas são ativadas de forma padronizada ao ativar ou desativar sua fonte de energia, objetivando seguir o mesmo tempo de manobra para todos os cenários estudados. Além disso, um hidrômetro classe B está instalado próximo à válvula de jusante para a medição da vazão, como mostrado na Figura 18(c) e em sequência uma válvula gaveta utilizada para regular a vazão inicial do sistema.

Foram instalados sensores de pressão em quatro pontos do sistema conforme visto na Figura 18(d). Um está localizado a montante, após a bomba e a válvula de montante, outro mais a jusante, pouco antes do hidrômetro, e outros dois em uma das curvas do circuito. Estes sensores possuem uma faixa de medição de 0 a 40 m.c.a.,

e foram conectados a um sistema de aquisição de dados, com registro a cada 0,01 s. Os sensores representam um cenário semelhante ao nós do modelo computacional, utilizando as mesmas distâncias e pontos de medição. A única diferença é que, no laboratório, o ponto P2-3 da simulação corresponde a dois pontos distintos, localizados na curva intermediária de 180°. Como as curvas não foram simuladas no software, optou-se por representá-los como um único ponto.

**Figura 18: Representações da bancada experimental**



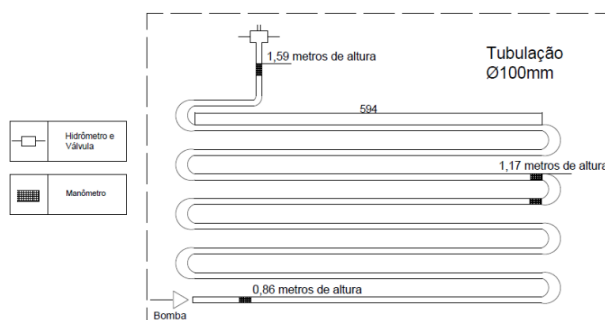
**(a) Esquema geral da bancada experimental e localização dos detalhes A, B e C**



**(b) Conjunto motobomba (Detalhe A)**



**(c) Válvula de manobra a jusante e hidrômetro (Detalhe B)**



**(d) Esquema da tubulação principal do circuito e localização dos sensores (Detalhe C)**



**(e) Vista do circuito principal em (Detalhe C)**

Fonte: AUTOR

Os pontos de medição de pressão foram identificados em sequência no sentido do escoamento, assim como no cenário computacional. O sensor localizado imediatamente após a bomba foi denominado P1; o sensor instalado a montante de uma das curvas intermediárias do sistema foi denominado P2; o sensor, a jusante da mesma curva, foi nomeado P3; e o sensor posicionado próximo à válvula de jusante recebeu a identificação P4. Cada um desses pontos conta com uma válvula própria, instalada especificamente para permitir a simulação controlada de vazamentos ao longo do sistema. A Figura 19 ilustra esse arranjo, representando o ponto P3 do circuito hidráulico. Nota-se que o sensor está após a saída de água da válvula que simula o vazamento.

**Figura 19: Exemplo do ponto de coleta de pressão e simulação de vazamentos**



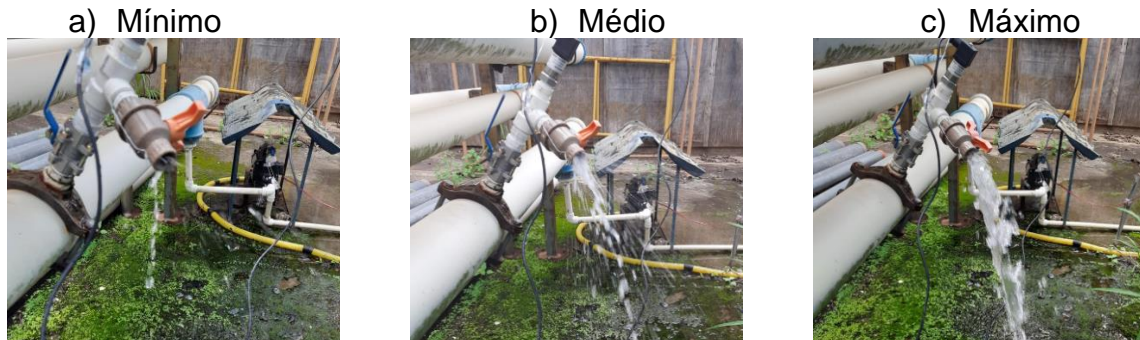
Fonte: AUTOR

Os testes incluíram três diferentes vazões, sendo chamadas de mínima, média e máxima conforme sua magnitude (Tabela 3), sendo estabelecidas de maneira a abranger o maior espectro que a bomba conseguiria para o sistema. Paralelamente, os vazamentos foram simulados em três níveis distintos de abertura: mínimo, médio e máximo, tendo como objetivo explorar toda a faixa de abertura da válvula de vazamento (Figura 20: Ilustração dos vazamentos em diferentes magnitudes). Os vazamentos foram simulados em dois pontos do sistema hidráulico, o ponto P1 e o ponto P4, e todos eles foram realizados manualmente: o mínimo correspondeu à menor abertura da válvula capaz de gerar escoamento; o médio, a uma abertura intermediária previamente demarcada; e o máximo correspondeu à abertura total da válvula de vazamento.

**Tabela 3: Vazões iniciais do sistema**

<b>Magnitude da vazão inicial do sistema</b>	<b>Valor da vazão (l/s)</b>
Mínimo	0,09
Médio	0,34
Máximo	0,40

Fonte: AUTOR

**Figura 20: Ilustração dos vazamentos em diferentes magnitudes**

Fonte: AUTOR

A Tabela 4 apresenta as vazões de vazamento medidas nos experimentos localizados em P1. Elas foram mensuradas manualmente, utilizando um balde com demarcação de volume e cronômetro, para cada condição inicial de vazão do sistema e para as magnitudes mínima e média. Contudo, não foi possível obter medições para a magnitude máxima devido a limitações práticas no laboratório. Nessa condição, a bomba não conseguiu manter a vazão estável, especialmente quando o sistema operava em sua vazão máxima, o que inviabilizou a coleta de dados confiáveis. As medições com o vazamento no ponto P4 também não foram coletadas pela mesma razão.

Observou-se um padrão de variação decrescente nos valores de vazamento médio associados à vazão do sistema: quanto maior a vazão do sistema menor a vazão de vazamento. Já na condição de vazamento mínimo vazões mais elevadas do sistema resultaram em maiores valores de vazamento, sendo observado a tendência oposta. Esse comportamento pode ser atribuído à operação manual da válvula, que naturalmente introduz erros. Dada a baixa magnitude dos vazamentos mínimos, é plausível que ela tenha sido responsável por alterar o padrão durante as manobras manuais. Ainda assim, a variação observada permaneceu dentro da faixa de

classificação esperada, entre os níveis mínimo, médio e máximo, o que atende o objetivo do estudo.

**Tabela 4: Medições dos vazamentos no laboratório**

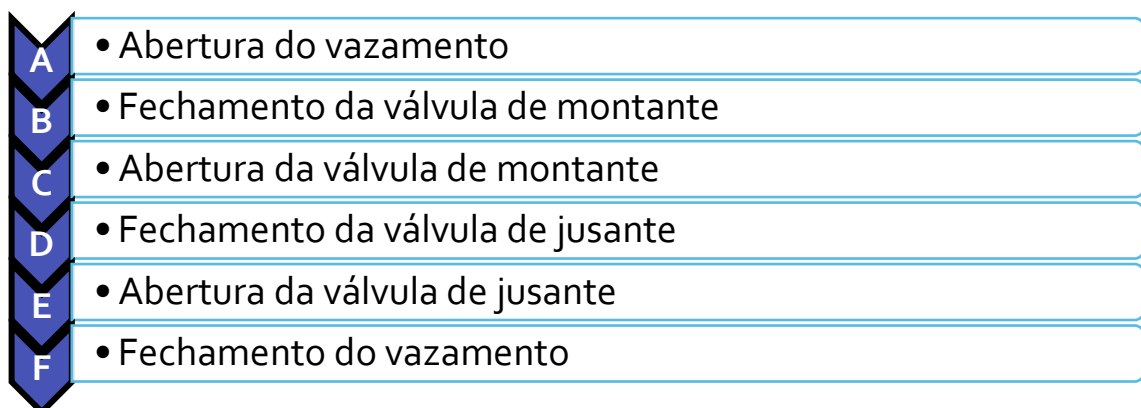
<b>Vazão do vazamento por vazão do sistema (l/s)</b>			
<b>Magnitude do vazamento</b>	Mínimo	Médio	Máximo
Mínimo	0,007	0,008	0,017
Médio	0,163	0,112	0,072
Máximo	-	-	-

Fonte: AUTOR

As vazões dos vazamentos experimentais foram próximas às simuladas em todas as magnitudes no cenário 2, uma vez que foram observadas paralelamente às simulações computacionais, possibilitando sua reprodução com maior precisão no modelo. Como não foram coletados os dados referentes aos vazamentos máximos, no modelo esses vazamentos foram calibrados com base na pressão observada nos sensores experimentais.

O conjunto de seis manobras realizadas, conforme a Figura 21, foi considerado como um ciclo de manobras. As manobras (golpes) podem ser definidas como uma alteração proposital do sistema que tenha gerado um transitório, tanto abertura e fechamento de válvulas como a aparição ou conserto de um vazamento. Foram realizadas manobras em condições sem vazamento e nas condições de vazamento nos pontos P1 e P4.

**Figura 21: Manobras hidráulicas realizadas em laboratório**

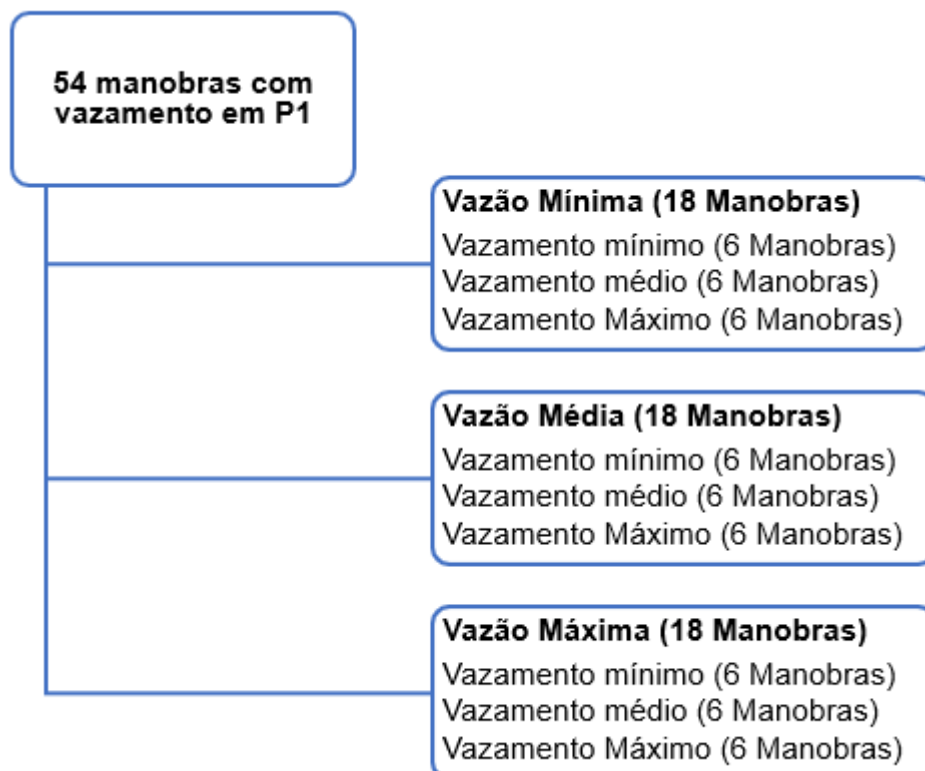


Fonte: AUTOR

Cada ciclo de manobras foi executado para cada condição de vazão e nível de vazamento, conforme ilustrado no esquema da Figura 22, que apresenta todos os testes realizados com vazamento no ponto P1, totalizando 54 manobras. Parte das manobras envolvendo a válvula de montante sofreram erros na coleta, sendo assim as manobras de fechamento e abertura da válvula de montante não foram obtidas para a condição de vazão máxima e vazamento máximo.

A realização dos ciclos (Manobras de A a F) com vazamento no ponto P1 serão realizados primeiramente. Com isso, será possível adotar critérios para selecionar quais manobras e vazões serão mais adequadas para a análise, e que melhor representariam o que foi possível realizar no modelo computacional (Cenário 2). Considerando esses critérios, as manobras com vazamento no ponto P4 serão limitadas a determinadas condições e cenários. Os ciclos sem vazamento, por envolver apenas a variação da vazão, totalizaram 12 golpes. Já os testes com vazamento no ponto P4 serão quantificados após a análise inicial dos resultados obtidos com vazamento em P1.

**Figura 22: Manobras realizadas variando vazão e vazamento em P1**



Fonte: AUTOR

Para fins de comparação e análise, foram selecionados tempos específicos de manobra para cada combinação de vazão, considerando sempre o maior tempo entre eles, conforme apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5: Tempo de análise de cada manobra para cada vazão inicial**

Manobra	Tempo determinado para análise (s)		
	Vazão Mínima	Vazão Média	Vazão Máxima
A	30	20	18
B	25	27	18
C	20	20	20
D	20	25	30
E	18	18	18
F	25	22	25

Fonte: AUTOR

### 4.3 Tratamento de dados

Os dados de pressão em cada manobra, tanto computacionalmente quanto experimentalmente, foram coletados e separados pelo seu correspondente período de tempo. Em seguida, com a base de dados segregada, foram gerados gráficos em ambos os domínios do tempo e da frequência, esse último obtido através da transformada de Fourier.

A transformação dos sinais para o domínio da frequência foi realizada utilizando a linguagem de programação Python, por meio do ambiente Jupyter Notebook. Para a análise espectral, foi empregada a função “fft” da biblioteca “*scipy.fft*” (VIRTANEN *et al.*, 2020), que possibilita a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT). As análises foram automatizadas por meio de códigos próprios, garantindo reprodutibilidade e agilidade no processamento dos dados experimentais coletados.

A frequência máxima de análise dos sinais de pressão foi estabelecida em 50 Hz com base na frequência de Nyquist, que define o limite superior de frequências que podem ser corretamente representadas em um sinal digital. Como os dados foram coletados com um intervalo de amostragem de 0,01 segundos, a frequência de amostragem é de 100 Hz, de modo que, conforme o teorema de Nyquist, apenas componentes de frequência até a metade desse valor (50 Hz) podem ser analisadas sem risco de

sobreposição espectral (Equação (25)). Assim, a escolha desse limite garante a fidelidade da análise espectral realizada no domínio da frequência.

$$Fr = \frac{1}{ta} = \frac{1}{0,01} = 100Hz; \frac{100}{2} = 50Hz \quad (25)$$

em que  $Fr$  é a frequência de amostragem e  $ta$  o intervalo de amostragem.

Além disso, os gráficos gerados na parte experimental foram limitados a determinadas frequências após a análise dos resultados, objetivando facilitar a visualização e análise gráfica.

Em sequência foram calculadas métricas considerando todo o espectro do tempo e da frequência, tanto nos modelos quanto nos experimentos laboratoriais, buscando identificar padrões e comportamentos característicos em ambos os domínios estudados. Dessa forma, as métricas calculadas para o domínio do tempo foram: valor médio, entropia (com normalização direta das amplitudes do sinal), coeficiente de assimetria, curtose, valor máximo, valor mínimo, amplitude total e RMS. E para o domínio da frequência as métricas foram: energia total, fator de crista, fator de forma, fator de impulso e fator de margem.

Sendo assim foram obtidos dados de pressão nos diversos cenários propostos. Eles foram organizados em gráficos nos domínios do tempo e da frequência e realizado o cálculo de métricas em ambos os domínios. Na sequência serão analisados esses resultados, procurando comparar padrões tanto entre cenários quanto entre manobras e vazamentos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, são apresentados os resultados gráficos obtidos nos cenários 1 e 2 (computacionais), seguidos pelos resultados do cenário 3 (experimental), de forma a possibilitar a análise visual dos cenários simulados nos domínios do tempo e da frequência. Em seguida, são discutidas em conjunto as métricas calculadas para os três cenários, ressaltando suas convergências e divergências, bem como os principais aspectos observados em cada abordagem.

Com o início dos primeiros testes em laboratório, foram coletados os dados das manobras hidráulicas realizadas sem a presença de vazamentos no sistema. Em seguida, foram executadas a ampla gama de manobras com vazamento localizado no ponto P1 e, por fim, realizaram-se as manobras com o vazamento no ponto P4. Durante esse processo a calibração e desenvolvimento dos modelos computacionais também foram realizados.

Como dito os três cenários analisados foram desenvolvidos de forma integrada. No início da etapa experimental, foram realizados ciclos completos de manobras tanto na condição sem vazamento quanto com vazamento localizado no ponto P1, com o objetivo de coletar os primeiros dados e avaliar a resposta do sistema com cada manobra.

A análise preliminar desses ensaios permitiu estabelecer critérios para a definição das manobras mais representativas, as quais passaram a orientar tanto os ensaios subsequentes em laboratório quanto o desenvolvimento dos modelos computacionais.

Verificou-se que as manobras associadas à abertura e ao fechamento do vazamento (A e F) apresentaram maior variabilidade em função da operação das válvulas manuais, dificultando a reprodutibilidade dos resultados, enquanto as manobras realizadas por meio da válvula de montante produziram respostas com baixa sensibilidade às alterações do sistema se comparado as manobras na válvula de jusante.

Com base nesses critérios, no cenário experimental com vazamento localizado em P4, optou-se por concentrar as análises nas manobras D e E, associadas à válvula de jusante. Para os cenários computacionais, adotou-se exclusivamente a manobra D, correspondente ao fechamento da válvula de jusante, definida como manobra de referência para a comparação entre os diferentes cenários, assegurando viabilidade na análise comparativa.

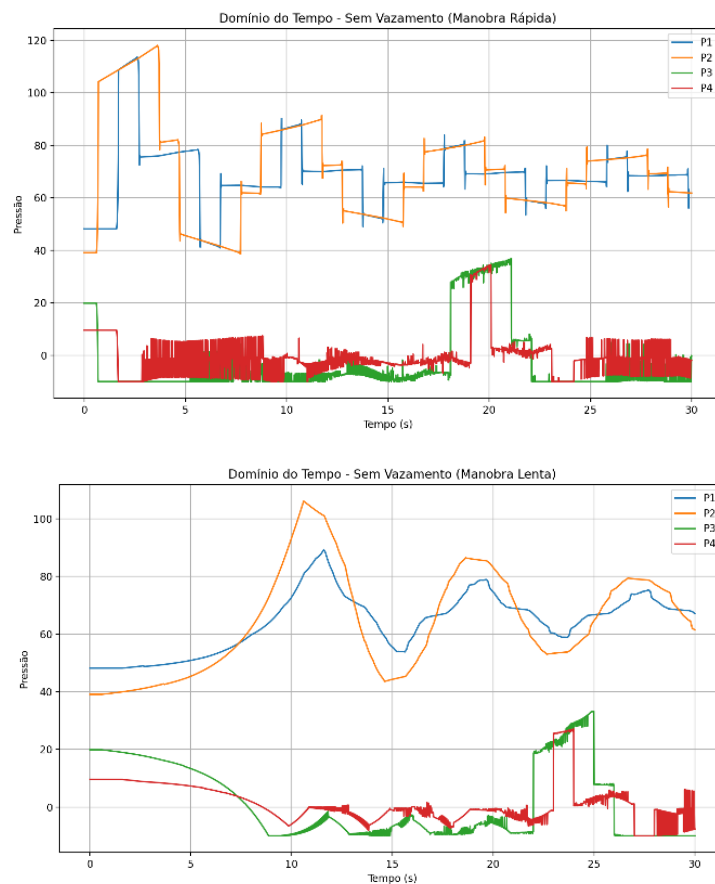
Ademais, devido à baixa vazão geral do sistema experimental, optou-se por utilizar apenas a maior vazão disponível nos testes de vazamento em P4 no cenário 3. Pelo mesmo motivo a vazão nos testes do cenário 2 também foi fixada no mesmo valor, já que esse cenário busca se assemelhar ao laboratório.

## 5.1 Modelo computacional padrão (Cenário 1)

No cenário 1 foi possível analisar o comportamento da onda de pressão nas diferentes velocidades de fechamento da válvula. A Figura 23 apresenta essa comparação: nas manobras rápidas geraram-se maiores picos de pressão associados ao golpe, resultando em ondas mais quadrangulares e com maior repetição de picos, quando analisados os pontos a montante da válvula. Por outro lado, o fechamento lento promove um efeito de amortecimento, reduzindo a pressão máxima atingida e produzindo ondas de formato mais suave e curvilíneo.

No geral não foram vistos padrões que colaborassem com as análises objetivadas no estudo nos sensores P3 e P4 (à jusante da válvula), bem como a ocorrência do vazamento no ponto V2. Esse fato é dado pela ocorrência de separação da coluna d'água com o fechamento da válvula que está a montante desses pontos. Assim, para esse cenário, as comparações serão atreladas aos pontos P1 e P2 e com o vazamento no ponto V1.

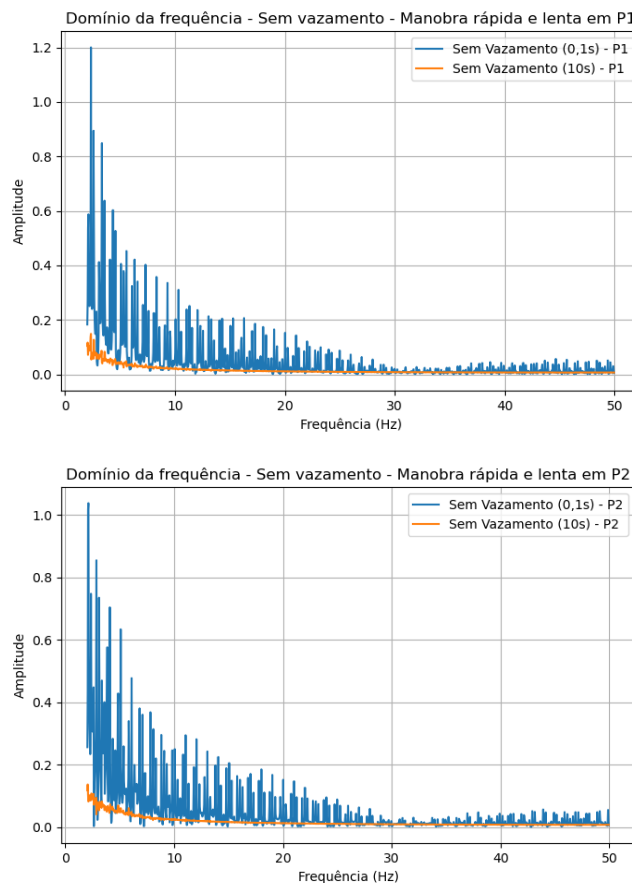
**Figura 23: Manobra rápida e lenta no cenário 1 sem vazamento**



Fonte: AUTOR

Corroborando com o que foi observado no domínio do tempo, a análise no domínio da frequência mostra que a manobra rápida resultou em maiores e mais variadas amplitudes em quase todo o espectro analisado. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de manobras rápidas imporem variações de pressão mais abruptas ao sistema, as quais, demandam a superposição de um maior número de componentes de frequência para sua representação. Ou seja, o espectro possui maiores amplitudes devido a maior energia gerada na manobra. A Figura 24 apresenta essa comparação do espectro de frequência entre as duas manobras, tanto para o ponto P1 quanto para o P2.

**Figura 24: Manobra rápida e lenta no ponto P1 e P2 no modelo padrão sem vazamento**



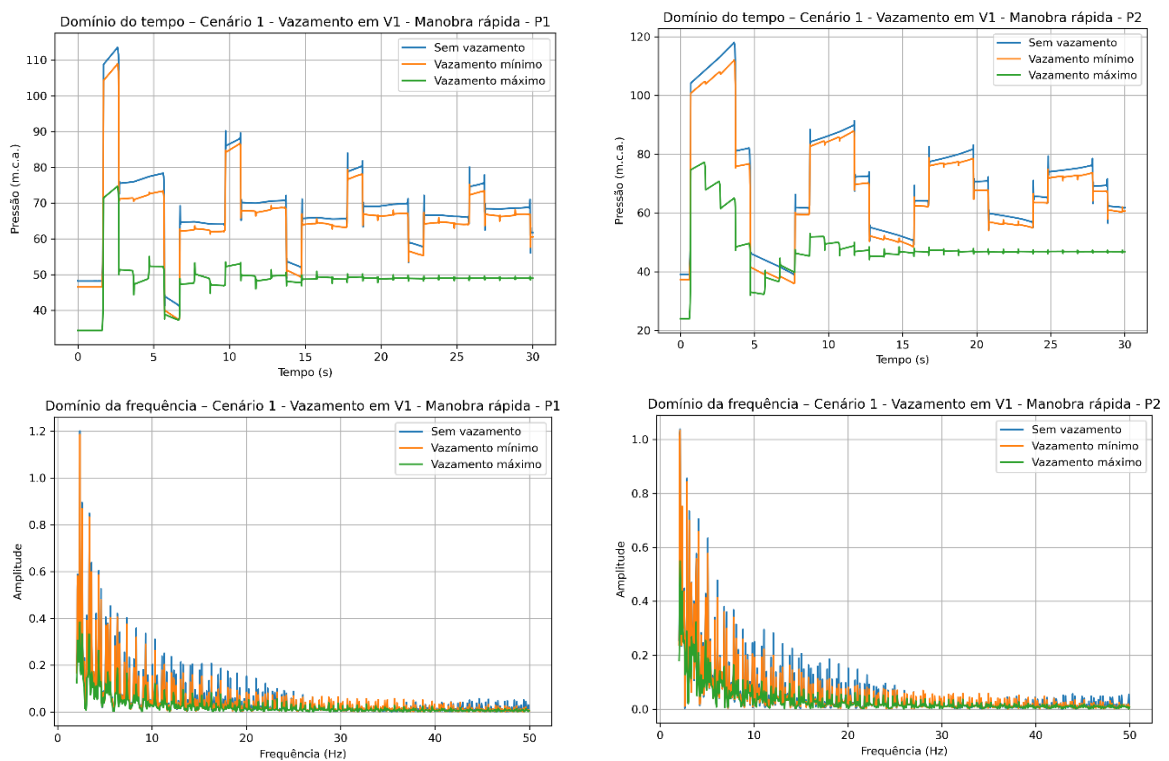
Fonte: AUTOR

Com a introdução de vazamentos no sistema a montante da válvula, observa-se uma atenuação dos picos de pressão gerados pelo transitório hidráulico. Quanto maior a magnitude do vazamento, menores são os valores máximos de pressão registrados tanto no ponto P1 quanto no ponto P2, como ilustrado na Figura 25. Além disso, verifica-se que a dissipação da onda de pressão ocorre mais rapidamente em cenários

com vazamentos mais intensos. No caso do vazamento máximo, por exemplo, a pressão começa a se estabilizar a partir de 15 segundos após a manobra, enquanto nos demais cenários a onda de pressão persiste, ainda que atenuada, até o final da simulação, em 30 segundos. Isso é atrelado a perda de energia que o vazamento gera no sistema.

Um padrão semelhante foi observado nas manobras lentas, ou seja, ocorreu a diminuição das ondas de pressão conforme o aumento do vazamento, mantendo, entretanto, o formato característico do cenário sem vazamento. Além disso, de modo geral, verificou-se uma atenuação no espectro de frequência com a presença dos vazamentos em ambos os casos (Figura 25), ainda que, no caso das manobras rápidas, os valores de amplitude sejam, em geral, superiores aos das manobras lentas.

**Figura 25: Manobra rápida em ambos os domínios no ponto P1 e P2 no cenário 1 sem e com vazamento em V1**



Fonte: AUTOR

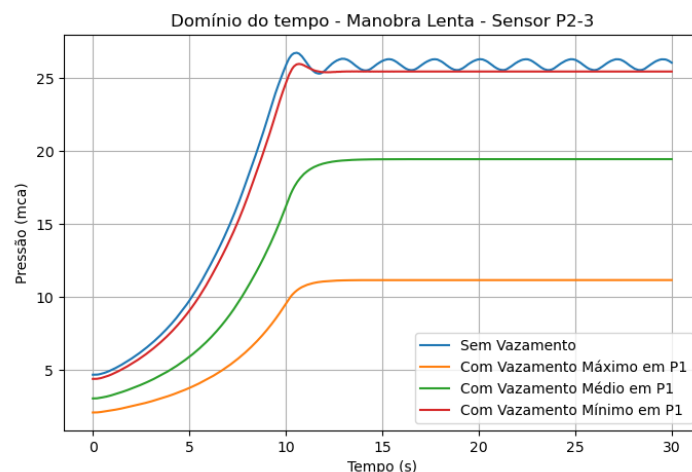
## 5.2 Modelo computacional do experimento (Cenário 2)

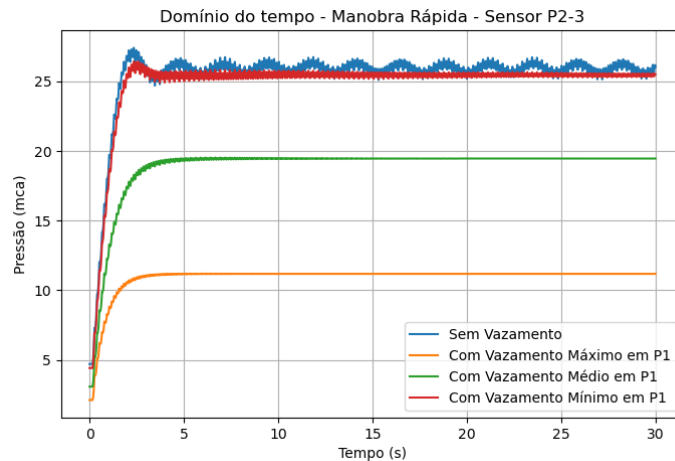
Como dito, nesse cenário não foi adicionado as curvas 180° existentes no cenário 3. Isso se é devido às limitações inerentes à forma como esse tipo de elemento é tratado

nos softwares de simulação hidráulica. Em geral, tais ferramentas incorporam as perdas associadas às curvas por meio de coeficientes equivalentes ou pela transformação das perdas localizadas em perdas distribuídas, o que simplifica o cálculo, mas não representa adequadamente os fenômenos físicos que ocorrem nesses trechos. Mesmo a utilização direta de um coeficiente de perda localizada não é suficiente para descrever de forma fiel o comportamento hidráulico da curva de 180°, uma vez que nesse tipo de geometria ocorrem efeitos complexos, especialmente relevantes em regimes transitórios. Dessa forma, optou-se por não modelar explicitamente essas curvas no software.

De toda forma, o modelo computacional desenvolvido para simular a bancada experimental apresentou resultados semelhantes ao cenário padrão no que se refere ao amortecimento dos picos de pressão na presença de vazamentos. No entanto, o formato dos sinais de pressão no domínio do tempo mostrou-se distinto do observado no cenário 1. Nesse caso, a onda de pressão sofre um aumento e se estabiliza em um novo patamar, sem apresentar, ao menos graficamente, ciclos bem definidos de sobrepressão e subpressão. Observa-se que, ao atingir o pico, principalmente na condição sem vazamento, a onda assume um perfil senoidal. Já nos casos com vazamento, mesmo que mínimo, nota-se uma atenuação desse comportamento (Figura 26).

**Figura 26: Manobra lenta e rápida no ponto P2-3 no cenário 2 sem e com vazamento em P1**

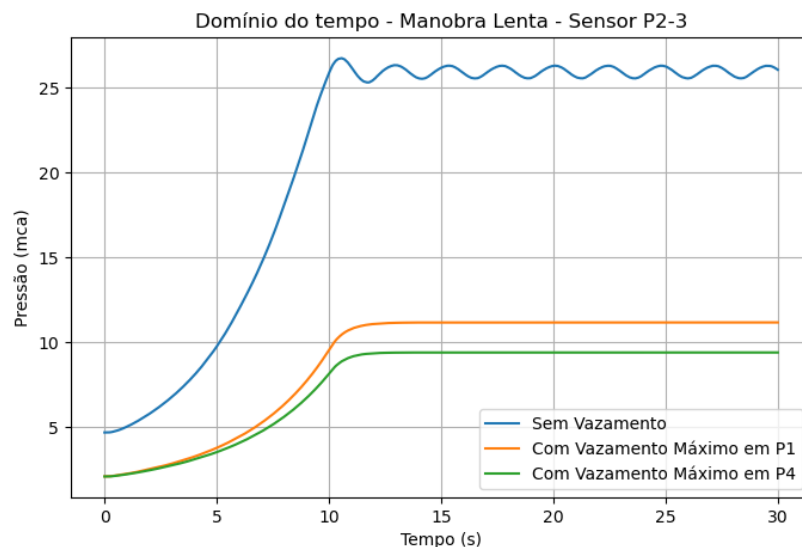




Fonte: AUTOR

Ainda nesse cenário, no que se refere às diferenças da onda de pressão em relação à localização do vazamento, observa-se que, quando este ocorre no ponto P4, a atenuação registrada no sensor P2-3 é maior do que quando o vazamento ocorre em P1. Isso indica que, quanto mais próximo o vazamento está da região de geração do surto de pressão, menores são os valores máximos atingidos pela onda (Figura 27).

**Figura 27: Manobra lenta no ponto P2-3 no cenário 2 sem e com vazamento em pontos distintos (P1 e P4)**

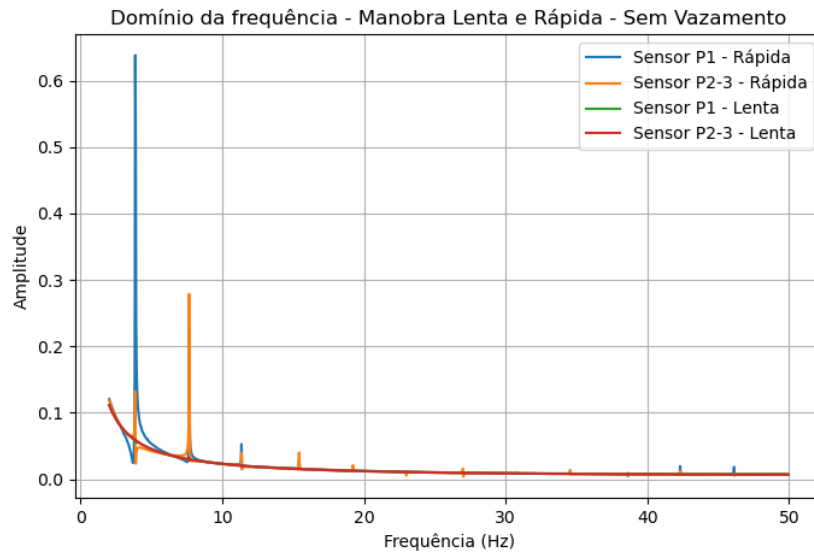


Fonte: AUTOR

No domínio da frequência, esse modelo também se assemelhou ao padrão, uma vez que as manobras rápidas apresentaram maiores variações no espectro. Além disso, verificou-se que, nesse caso, surgiram frequências em que o sinal ultrapassou o padrão das demais, evidenciando componentes características de repetição do sinal no domínio do tempo (Figura 28). Esse fenômeno pode ser causado pelas

características do sistema, segundo Covas e Ramos (2010), descontinuidades como perdas locais introduzem variações no sinal de pressão transitório, sendo essas variações características da topologia do sistema. Outros fatores tais como viscoelasticidade da tubulação e fator de atrito também podem contribuir nesse aparecimento de componentes característicos.

**Figura 28: Manobras no domínio da frequência no cenário 2 sem vazamento**



Fonte: AUTOR

Portanto as análises gráficas também podem ser pautadas na reação desses picos, nomeados, característicos ou de destaque, observando seu comportamento nas manobras que foram realizadas. Essas frequências de destaque, contudo, se mostraram presentes essencialmente nas manobras rápidas, enquanto as lentas apresentaram um formato com poucos ou nenhum pico de amplitude relevante, fato esse que pode ser explicado pela pouca variação da onda de pressão das manobras lentas no domínio do tempo.

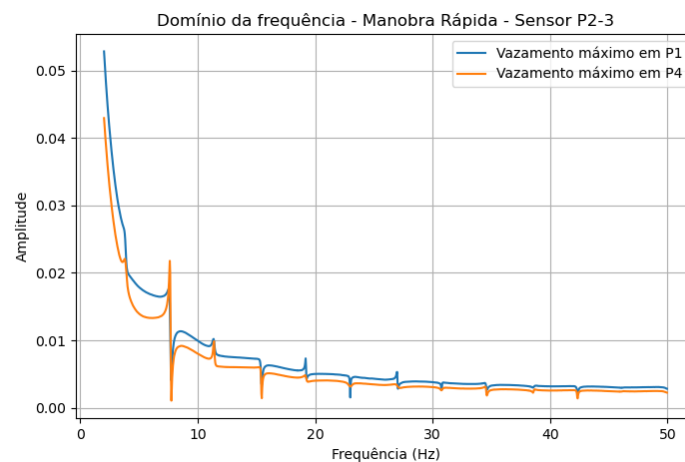
Ao analisar as diferentes posições de ocorrência do vazamento, observou-se que a curva do espectro de frequência manteve um formato semelhante em ambos os casos, porém com amplitudes geralmente menores quando o vazamento ocorreu em P4. Entretanto, nas frequências de maior destaque, notaram-se variações quanto à situação em que os picos apresentaram maior intensidade (Figura 29-A).

Ao analisar uma mesma manobra e sensor, variando apenas a magnitude do vazamento, verificou-se que menores vazamentos resultaram em um leve aumento

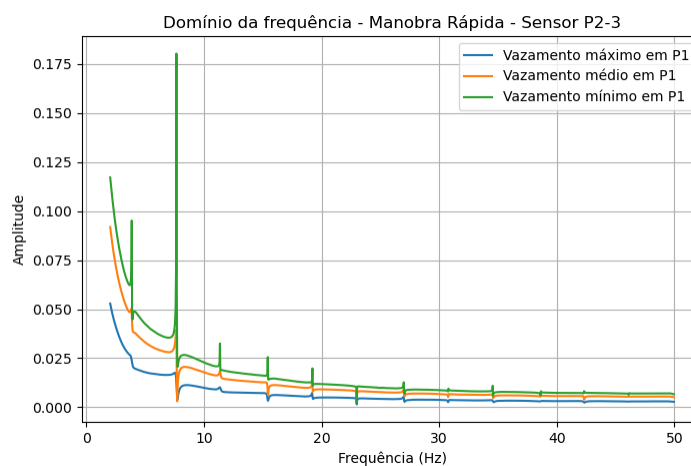
geral das amplitudes, enquanto a localização das frequências de destaque permaneceram praticamente inalteradas nas três categorias avaliadas, conforme a parte B da Figura 29. Além disso, nos cenários com vazamentos de menor magnitude, observou-se maior elevação desses picos característicos, aproximando-se do comportamento da condição sem vazamento. A diminuição tanto das amplitudes médias quanto das destaque pode ser explicada, nesse caso, pela perda energética gerada pelos vazamentos.

**Figura 29: Manobras no domínio da frequência no cenário 2**

**A) Vazamento em P1 e P4**



**B) Vazamentos em P1 com diferentes magnitudes**



Fonte: AUTOR

### 5.3 Modelo experimental (Cenário 3)

Na etapa final, foram obtidos os resultados das manobras hidráulicas realizadas em laboratório, com o objetivo de compará-los aos cenários computacionais. Para essa comparação, foi selecionada a manobra experimental D, por ser a mais semelhante às simulações, já que envolve o fechamento de uma válvula a jusante. Entretanto, as

demais manobras executadas no experimento, bem como suas características, também são apresentadas sempre que necessário para complementar a análise. No geral, essas manobras adicionais apresentaram poucos padrões na diferenciação entre condições com e sem vazamento quanto aos observados na manobra D, reforçando a escolha desta última como foco principal.

Ao analisar as seis manobras experimentais que compõem o ciclo transitório, observa-se um padrão gráfico característico no comportamento do sinal de pressão, conforme ilustrado na Figura 30. Em todas as manobras, as variações de pressão refletem diretamente as alterações operacionais impostas ao sistema.

Na manobra A, com a abertura do vazamento, verifica-se um decaimento gradual da pressão ao longo do tempo nos quatro sensores. Esse decréscimo é mais acentuado no sensor localizado no ponto do vazamento (P1), em função da sua localização após o vazamento. Ao final da manobra, as pressões se estabilizam em um novo regime permanente, com níveis inferiores aos iniciais.

Comportamento semelhante é observado na manobra B, na qual também ocorre redução das pressões, já que, devido ao fechamento da válvula de montante, a pressurização do sistema foi diminuindo. Ao término dessa manobra, o sensor P1 volta a apresentar a maior pressão entre os pontos monitorados, condição associada à sua menor cota altimétrica no sistema.

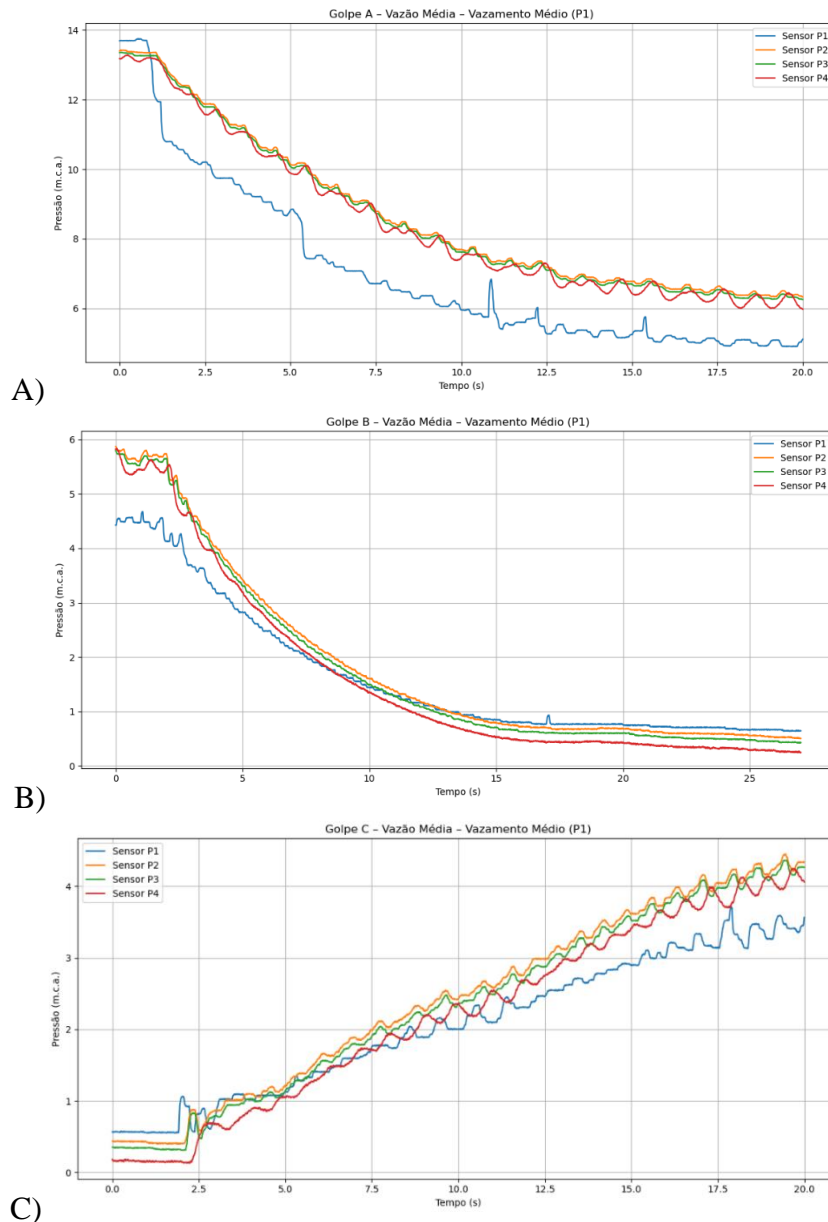
Na manobra C, com a abertura da válvula de montante ocorre a elevação das pressões nos quatro sensores. Contudo, como o vazamento permanece ativo em P1, esse ponto volta a registrar a menor pressão relativa, evidenciando novamente a influência direta do vazamento sobre o sinal medido.

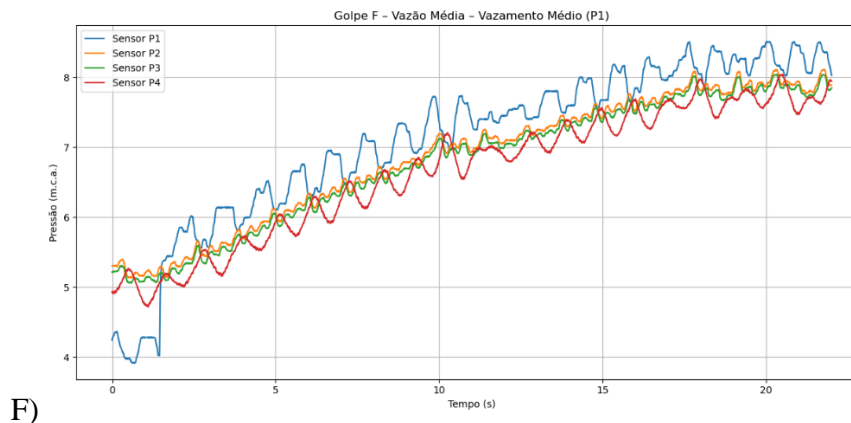
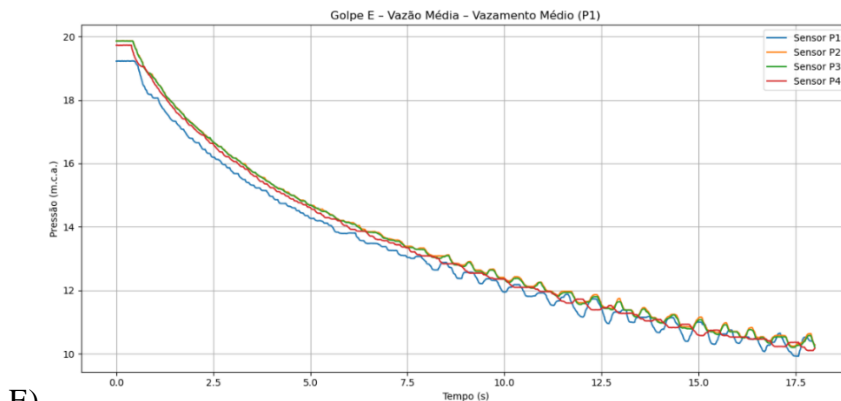
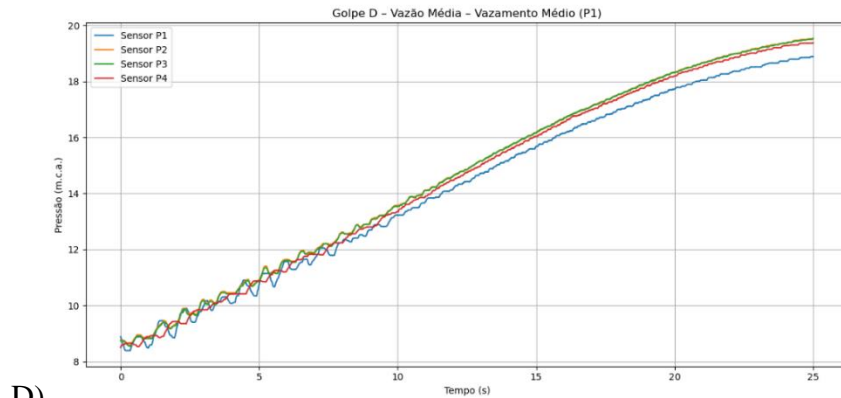
Durante a manobra D, correspondente ao fechamento da válvula de jusante, observa-se um aumento generalizado das pressões em todos os sensores em decorrência do transitório hidráulico gerado. Ainda assim, o ponto de vazamento mantém-se como aquele de menor pressão. Ao final dessa manobra, as pressões se estabilizam em níveis superiores aos observados antes da sua execução.

Na manobra E, comportamento oposto ao da manobra D é verificado. A abertura da válvula de jusante resulta em redução das pressões em todos os sensores, as quais evoluem até valores próximos a um novo ponto de equilíbrio do sistema.

Por fim, na manobra F, caracterizada pelo fechamento do vazamento, observa-se um aumento progressivo das pressões em todo o sistema. Destaca-se a elevação mais acentuada no sensor P1, anteriormente afetado pela perda de carga associada ao vazamento, evidenciando o impacto direto de seu fechamento sobre o comportamento do sinal de pressão.

**Figura 30: Exemplo de um ciclo de manobras no domínio do tempo com vazamento em P1**





Fonte: AUTOR

Verificou-se, também, que vazões iniciais mais elevadas resultaram em sobrepressões de maior magnitude, em razão da maior velocidade do fluido. A velocidade de fechamento das válvulas experimentais, como já dito, foi inicialmente definida para ocorrer no menor tempo possível, devido ao uso das válvulas automáticas. No entanto, os resultados obtidos apresentaram tempos de transiente mais próximos aos observados nas manobras lentas do modelo computacional, o que pode indicar que, em determinadas execuções experimentais, a válvula em laboratório tenha variado seu tempo de fechamento. Essa constatação também pode ser suposta

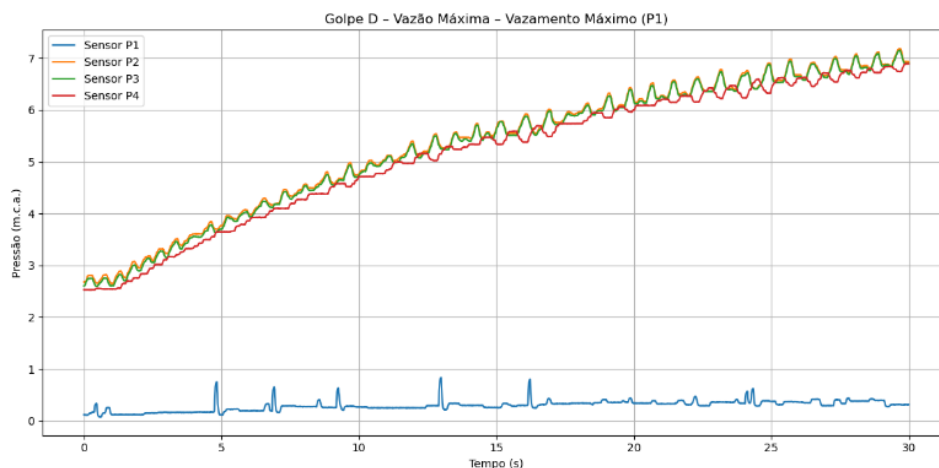
por questões laboratoriais devido a ocorrências de superaquecimento da válvula de manobra de jusante.

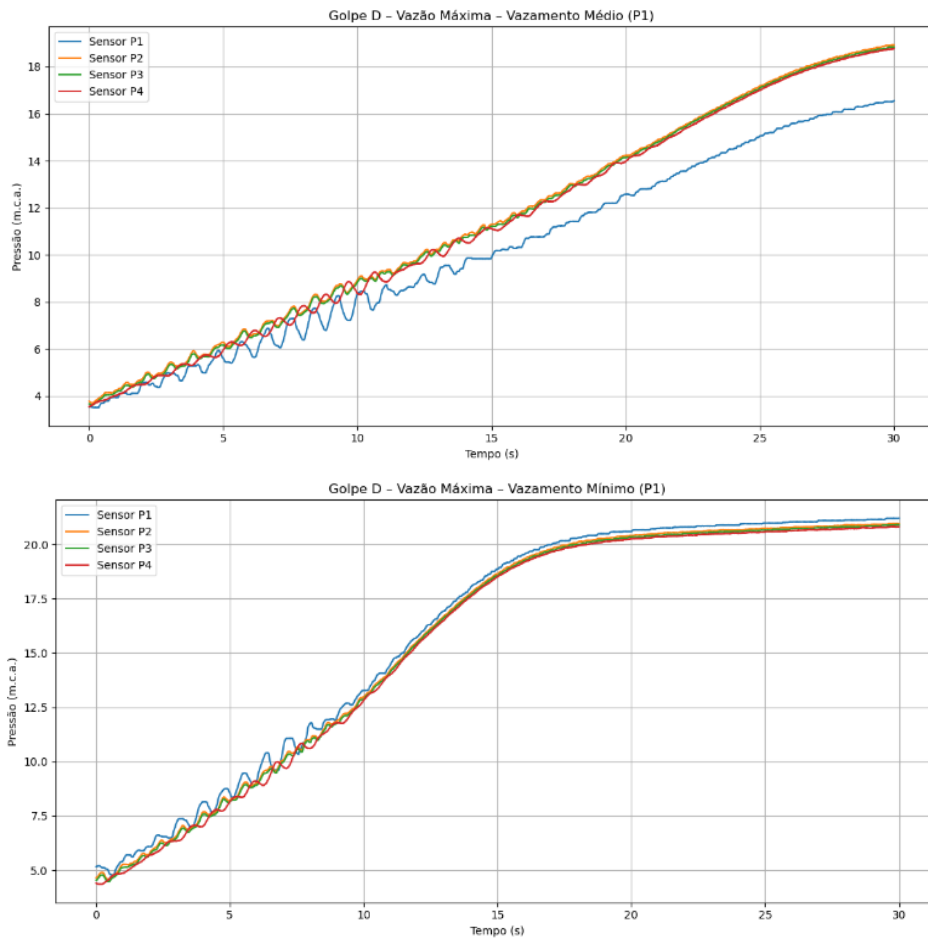
### 5.3.1 Domínio do tempo: comparação com os cenários simulados

Na parte experimental, quando se fixou uma vazão inicial, como por exemplo a máxima, observou-se que, quanto maior o vazamento, maior é o amortecimento do sinal de pressão e menor é a sua magnitude (Figura 31). Esse padrão foi semelhante ao visto nos demais cenários computacionais e os formatos das curvas de pressão foram semelhantes aos resultados obtidos no modelo computacional do experimento, especialmente os vistos nas manobras lentas.

Com o vazamento ocorrendo no ponto P1, observou-se que a curva de pressão do sensor nesse ponto diminui à medida que sua magnitude aumenta. Também na Figura 31, esse comportamento é evidenciado no vazamento máximo, em que a pressão em P1 apresenta-se praticamente linear e próxima de zero. Esse efeito, entretanto, não é reproduzido no software, mesmo a medição de pressão sendo realizada no próprio ponto de ocorrência do vazamento. Tal diferença decorre do fato de o modelo computacional não representar fielmente o arranjo utilizado no laboratório para simular os vazamentos. No experimento, o sensor de pressão estava posicionado após a saída do vazamento, conforme ilustrado na Figura 19.

**Figura 31: Manobras D com vazão inicial máxima e variação da magnitude dos vazamentos**



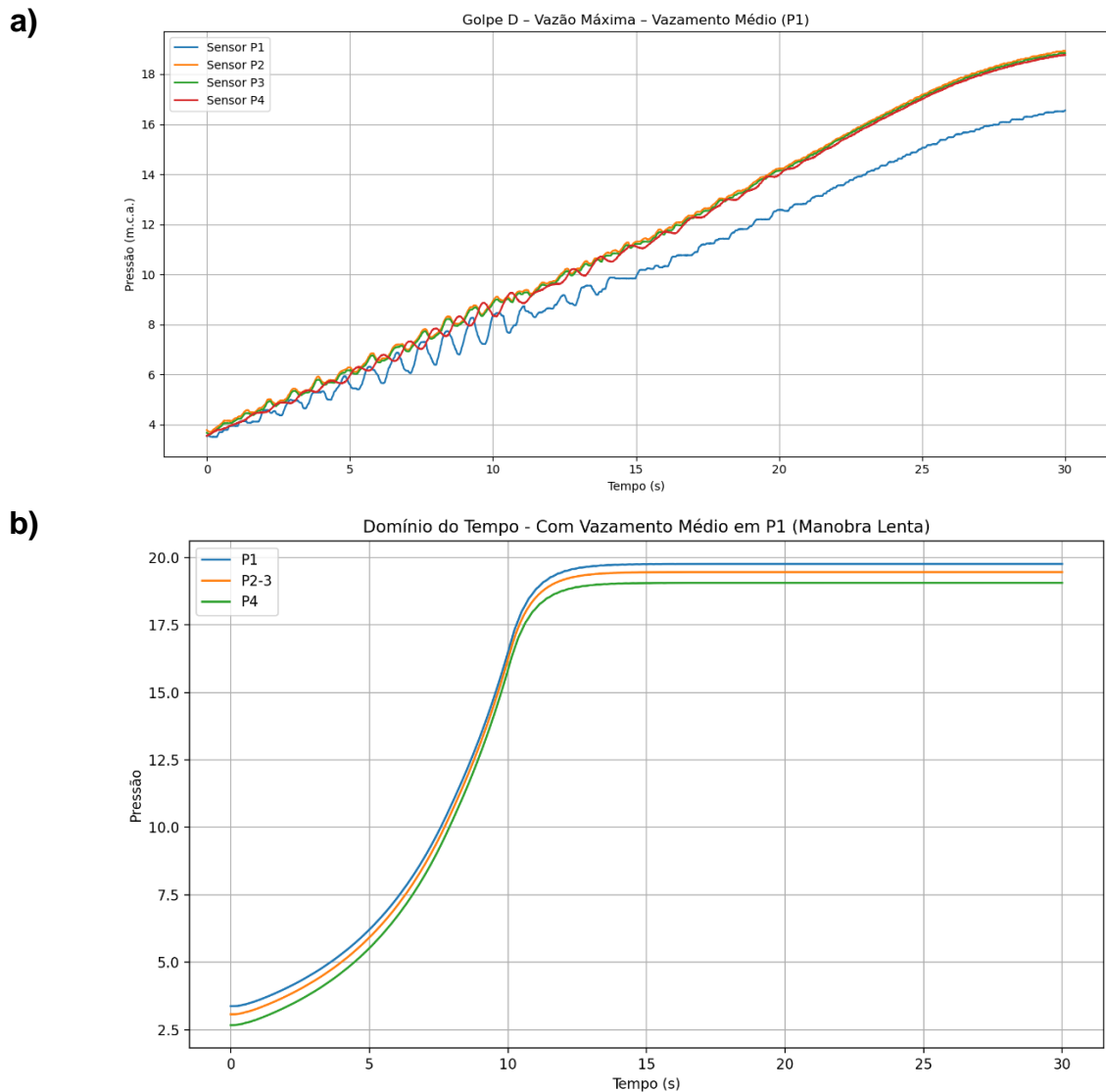


Fonte: AUTOR

O mesmo padrão foi observado nas variações de vazamento sob condições de vazão inicial média e mínima para as manobras D. No cenário de vazão mínima, com o amortecimento devido à presença do vazamento, o golpe hidráulico se torna pouco perceptível graficamente. Isso ocorre porque, mesmo sem vazamento, essa condição já apresenta uma magnitude reduzida do transitório. Esses padrões de amortecimento também se seguiram nas manobras E.

Nesse contexto, é possível comparar as manobras experimentais D com vazão máxima para os casos de vazamento nos pontos P1 e P4 e comparar com os resultados do modelo computacional de laboratório, conforme apresentado nas Figura 32 e Figura 33. Nos testes com vazamento no ponto P4 foram utilizados somente três sensores de pressão, sendo retirado o do ponto P2 por indisponibilidade de sensores.

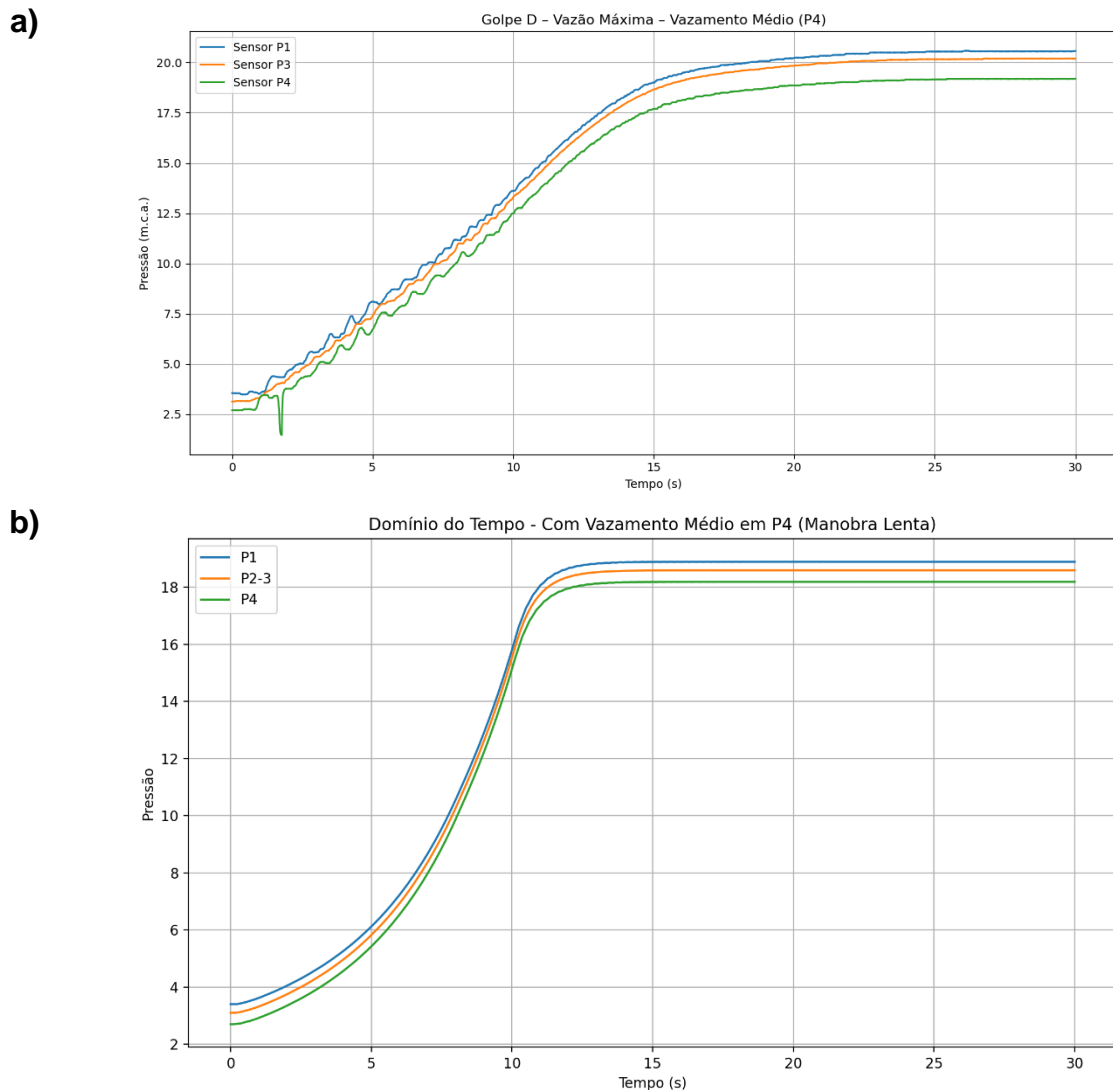
**Figura 32: Manobras D no cenário 3 (a) e cenário 2 (b) com vazamento médio e em P1**



Fonte: AUTOR

É visto uma maior oscilação de pressão no sensor localizado junto ao ponto de vazamento quando este ocorre no ponto P1 e oscilações em P1 e P4 quando o vazamento ocorre em P4. Essas oscilações não são vistas no modelo computacional e indicam serem inerentes ao cenário real, e possivelmente amplificadas pelas curvas 180°.

**Figura 33: Manobras D no cenário 3 (a) e cenário 2 (b) com vazamento médio e em P4**



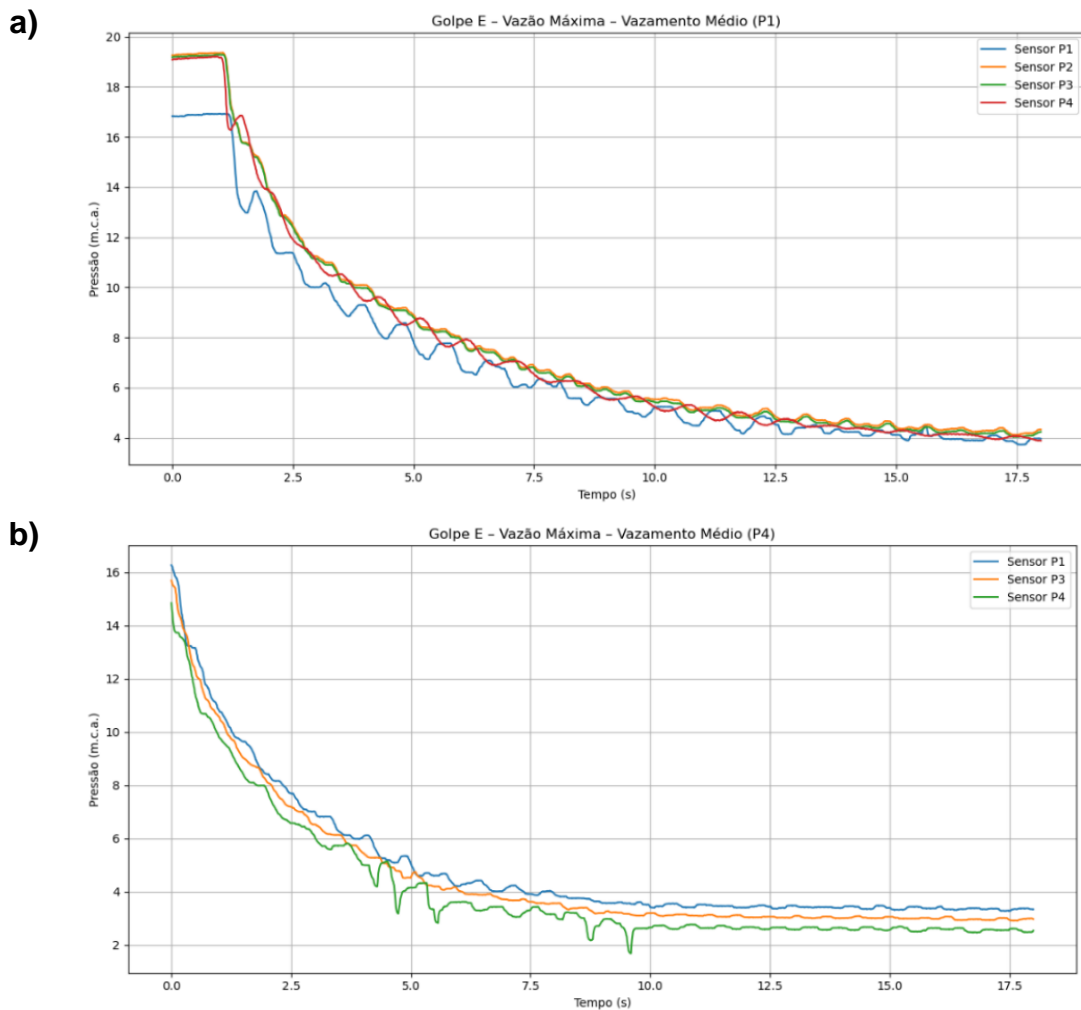
Fonte: AUTOR

Nota-se que, em ambos os casos experimentais, o período transitório foi mais longo que o obtido no software, provavelmente devido a variação no tempo de fechamento da válvula experimental. No modelo computacional, as curvas mantiveram a mesma sequência de magnitude para cada sensor, independentemente da posição do vazamento, alterando apenas a pressão máxima atingida. Já no experimento, o ponto de ocorrência do vazamento apresentou os menores valores de pressão em ambas as posições, o que reforça as diferenças entre a simulação computacional e o arranjo físico utilizado em laboratório para simular os vazamentos.

De forma semelhante, ao se analisar as diferentes posições de ocorrência do vazamento na manobra de abertura da válvula de jusante, observa-se que, quando o vazamento ocorre em P1, a variação do sinal de pressão no ponto apresenta uma

característica mais senoidal. Já quando o vazamento ocorre em P4, o sensor nele localizado registrou algumas quedas de pressão (Figura 34), ou seja, esses efeitos, que são vistos somente em laboratório, se repetiram para ambas as manobras de abertura e fechamento da válvula de jusante. Além disso, em ambos os casos, o ponto de vazamento apresentou, de modo geral, os menores valores de pressão e características mais senoidais.

**Figura 34: Manobras E com vazão máxima e vazamento médio em P1 (a) e P4 (b)**

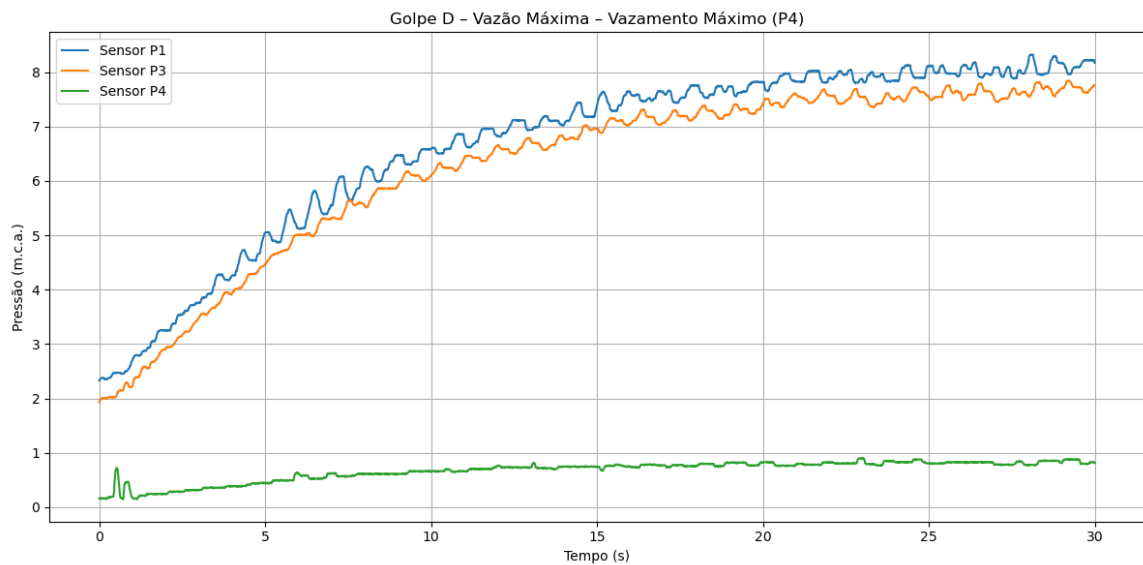


Fonte: AUTOR

Analisando diferentes posições de vazamento, com vazamento de nível máximo, observa-se que o sensor de pressão localizado no ponto de vazamento registra pequenos picos de pressão quando o vazamento máximo ocorre em P1, como visto na Figura 31. Esse comportamento não se repete quando o vazamento ocorre no ponto P4 (Figura 35). Esse fato sugere que vazamentos mais distantes do ponto de geração do transitório podem produzir reflexões leves e localizadas. Por outro lado,

quando o vazamento é de pequena magnitude, não são percebidas diferenças significativas na variação dos pontos de ocorrência de vazamento.

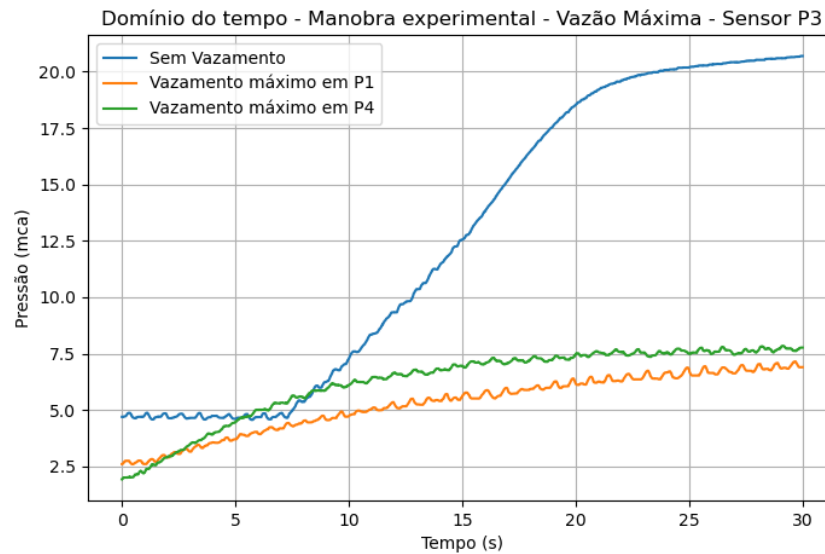
**Figura 35: Manobras D com vazão máxima e vazamento máximo em P4**



Fonte: AUTOR

Por fim, analisando apenas um sensor, como feito na Figura 27 para o cenário 2 e considerando o mesmo sensor de análise nos dois casos, observa-se na Figura 36 que o vazamento máximo, em ambas as posições (P1 e P4), reduz significativamente o sinal de pressão do transitório. Contudo, enquanto no modelo computacional a maior atenuação ocorreu com o vazamento em P4, no cenário experimental os menores valores de pressão foram registrados quando o vazamento ocorreu em P1. Esse comportamento pode ser explicado tanto pela maior perda de carga associada às curvas do sistema experimental quanto por variações no tempo de fechamento da válvula durante o experimento.

**Figura 36: Manobra D no sensor P3 no laboratório sem e com vazamento em pontos distintos (P1 e P4)**



Fonte: AUTOR

Além disso, no cenário experimental observa-se maior oscilação do sinal de pressão nos casos com vazamento, enquanto esse comportamento não se manifesta de forma significativa nos casos com vazamento do modelo computacional. Essa maior variabilidade do sinal no sistema real pode indicar a presença do vazamento, uma vez que, na condição sem vazamento, as oscilações são consideravelmente menores.

A diferença entre os modelos real e computacional pode ser atribuída à ocorrência de fenômenos presentes no experimento, como irregularidades do sistema e perturbações hidráulicas, que não são representados nas simulações.

### 5.3.2 Domínio da frequência: comparação com os cenários simulados

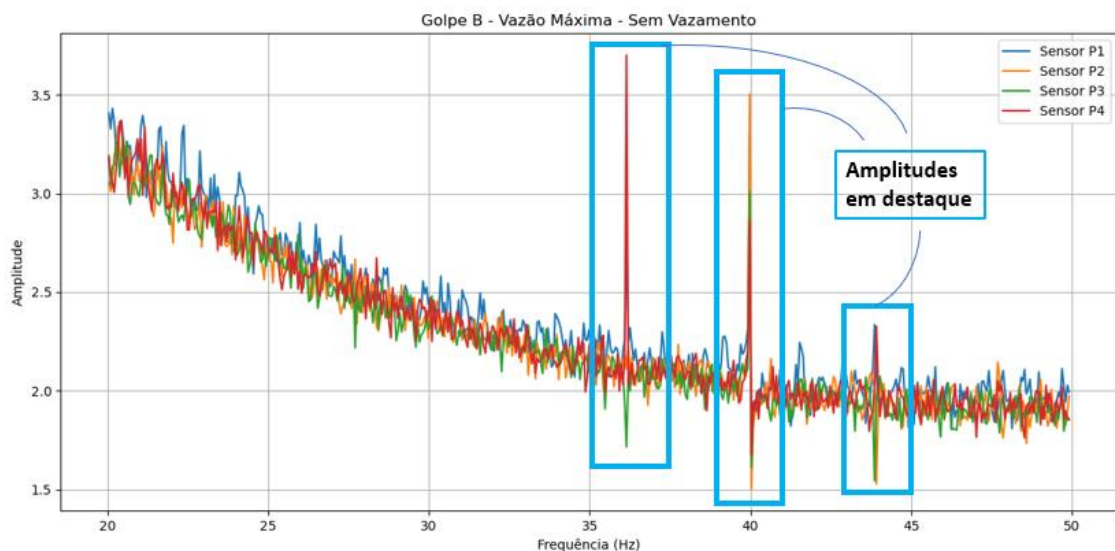
A análise gráfica no domínio da frequência foi limitada a valores maiores que 20 Hz no teste experimental e 2 Hz nos testes computacionais, com o objetivo de facilitar a visualização e análise, uma vez que as frequências mais baixas, especialmente próximas de zero, apresentam amplitudes significativamente elevadas, dificultando a análise graficamente.

Em sinais reais, é comum que as componentes de baixa frequência apresentem amplitudes superiores às das frequências mais elevadas, uma vez que essas componentes estão associadas às variações lentas e ao comportamento médio do

sistema, concentrando a maior parte da energia do sinal (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010). Contudo, para uma análise visual gráfica se faz necessária a limitação.

Ao analisar o espectro de frequência das manobras ao longo de todo o ciclo experimental, observou-se a presença de frequências com amplitudes destacadas, como na faixa de 40 Hz (Figura 37). Esse padrão, igualmente identificado no modelo do cenário 2, especialmente nas manobras rápidas, foi intensificado pelas reflexões da onda transitória geradas pelas diversas curvas de 180° presentes na bancada experimental. Graficamente, observa-se que, nos resultados computacionais, os valores de amplitude foram significativamente menores do que aqueles registrados nos experimentais.

**Figura 37: Exemplo de um gráfico no domínio da frequência (Cenário 3)**



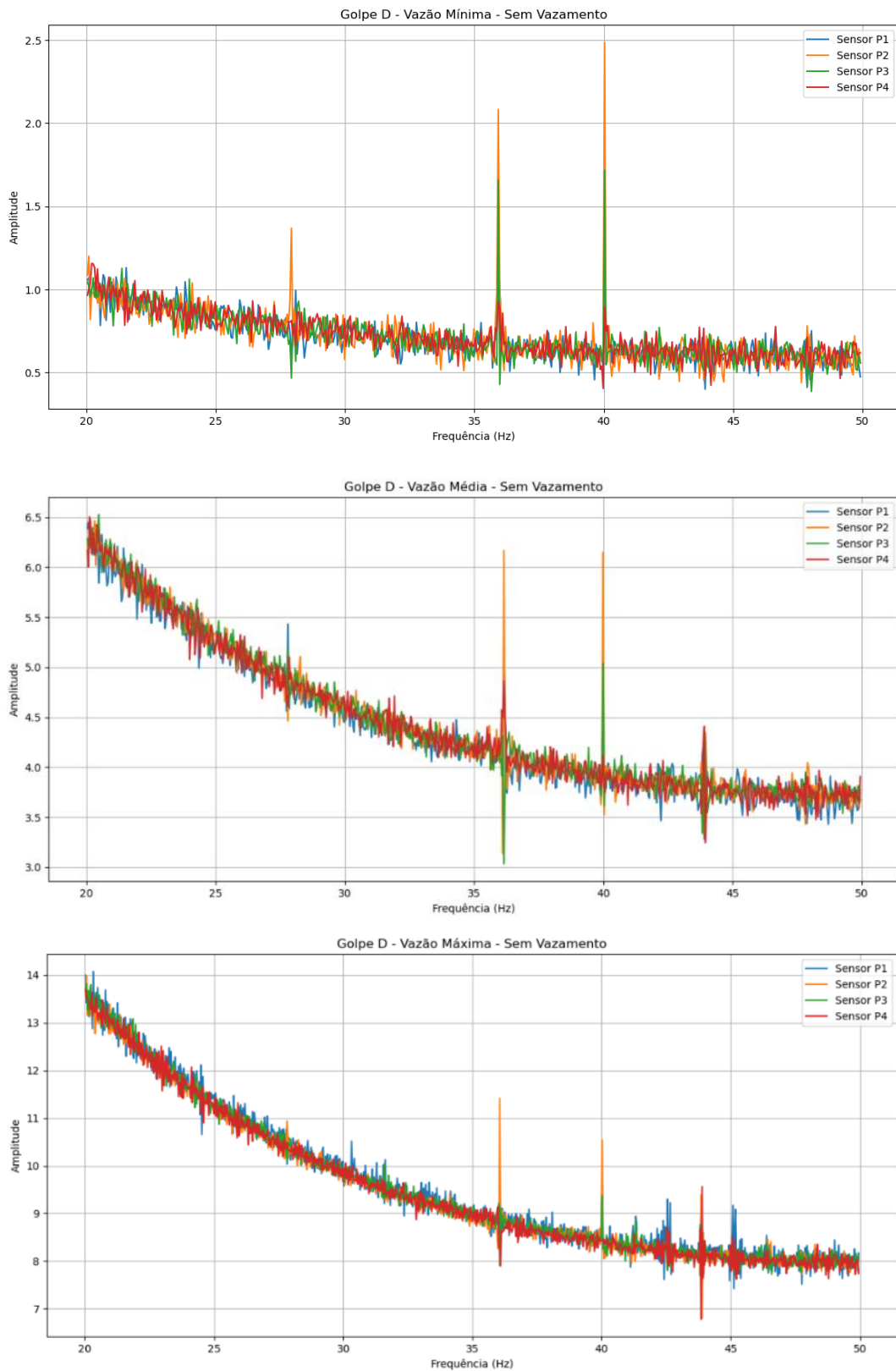
Fonte: AUTOR

Na análise dos gráficos das manobras B (fechamento da válvula de montante) sem a presença de vazamentos, observou-se que as amplitudes foram mais elevadas nas condições de vazão mínima e média, enquanto, para a vazão máxima, as amplitudes gerais foram reduzidas. Nas manobras C (abertura da válvula de montante), as amplitudes apresentaram tendência de diminuição com o aumento da vazão inicial. Em ambas as manobras não foi possível identificar padrões claros nas frequências características.

Já nas manobras D as amplitudes foram maiores conforme o aumento da vazão inicial. Destaca-se que os sensores P2 e P3 registraram, em pontos de frequência

característica, amplitudes superiores às dos demais sensores de pressão (Figura 38), o que pode ser atribuído à sua localização intermediária no circuito.

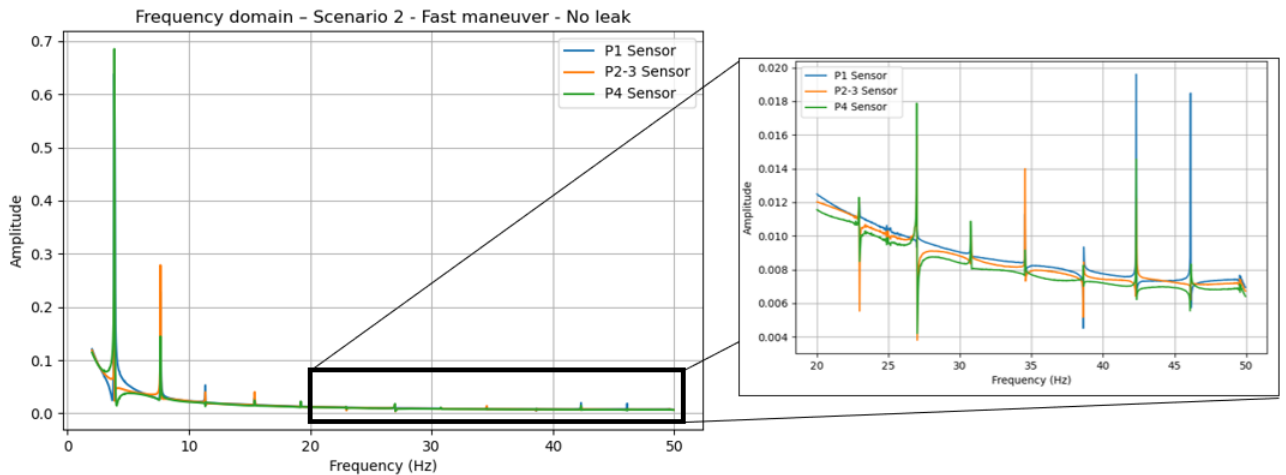
**Figura 38: Manobras D sem vazamento com variação da vazão inicial**



Fonte: AUTOR

De maneira geral as manobras E (abertura de válvula de jusante) seguiram o mesmo padrão das manobras D. Já no cenário 2 computacional, os sensores P2-3 e P4 apresentaram variações em maior escala. Contudo, ao observar frequências mais altas e em menor escala, nota-se certa regularidade nas variações de amplitude em todos os sensores (Figura 39).

**Figura 39: Manobra rápida sem vazamento no cenário 2**

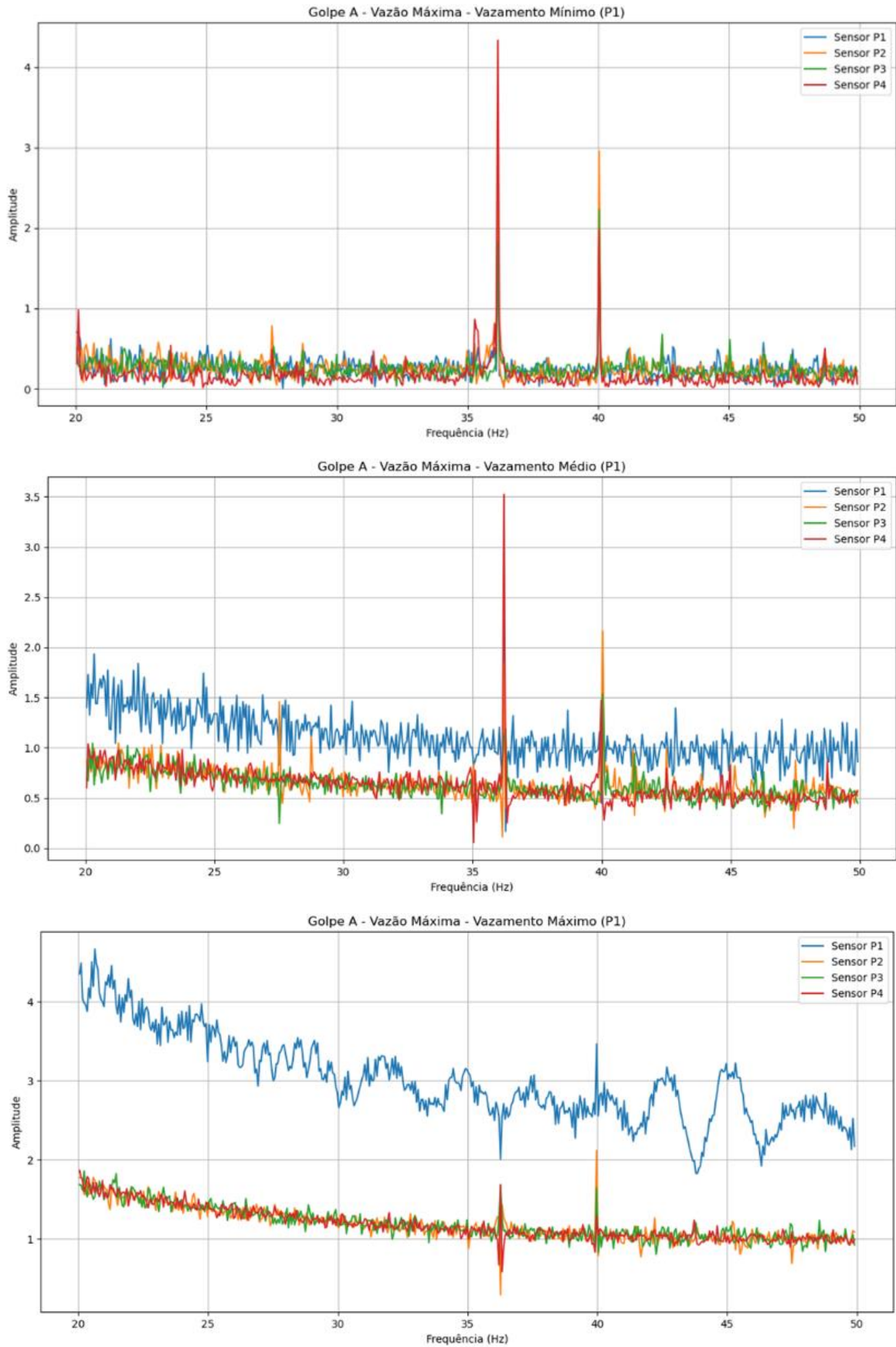


Fonte: AUTOR

Ao se analisar as manobras que simulam os vazamentos no domínio da frequência, observa-se que, nas manobras de abertura de vazamento, para uma mesma vazão inicial, as amplitudes no ponto P1 — onde ocorre o vazamento — são, em geral, superiores às dos demais sensores, aumentando conforme a magnitude do vazamento (Figura 40).

Esse fato demonstra que vazamentos maiores funcionam como descontinuidades mais intensas na tubulação, atuando como pontos de perturbação adicionais no escoamento transitório. Isso intensifica o grau de reflexão e modificação das ondas de pressão, gerando componentes de frequência mais acentuadas no sinal medido no vazamento.

**Figura 40: Manobras A com vazão máxima e variação da magnitude de vazamento**

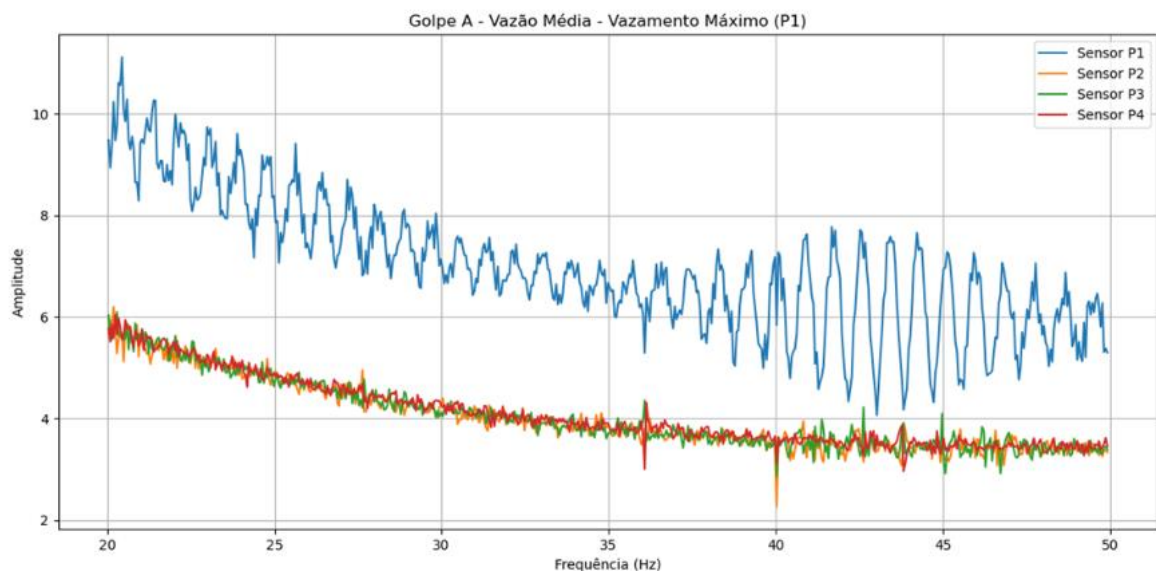


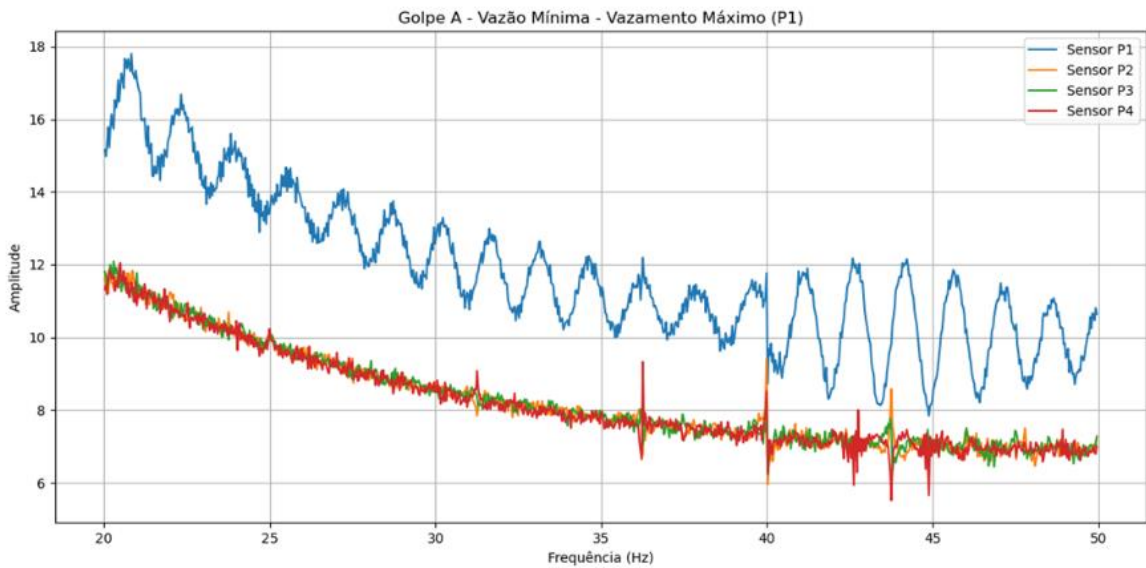
Fonte: AUTOR

Ao se considerar apenas a condição de vazamento máximo, variando-se as vazões iniciais do sistema, observa-se que o sinal de pressão no sensor P1 apresenta menor variação à medida que a magnitude da vazão diminui. Em outras palavras, para a vazão média, o espectro de frequência do sinal de P1 apresenta maior número de picos concentrados em uma mesma faixa de frequências, enquanto, na condição de vazão mínima, esses picos tornam-se mais espaçados, conforme ilustrado na Figura 41. Esse comportamento indica uma redução da excitação das componentes de alta frequência do sistema em regimes de menor energia hidráulica.

Por outro lado, na condição de vazão máxima, esse padrão não se manifesta de forma tão clara, uma vez que o sinal não apresenta uma organização espectral semelhante à observada nas demais vazões. Tal comportamento pode estar associado à maior intensidade dos transitórios hidráulicos e ao aumento de efeitos, como turbulência elevada e interações mais complexas entre o escoamento e o vazamento, o que tende a introduzir maior irregularidade no sinal de pressão e dificultar a identificação de um padrão espectral bem definido.

**Figura 41: Manobras A com vazamento máximo**

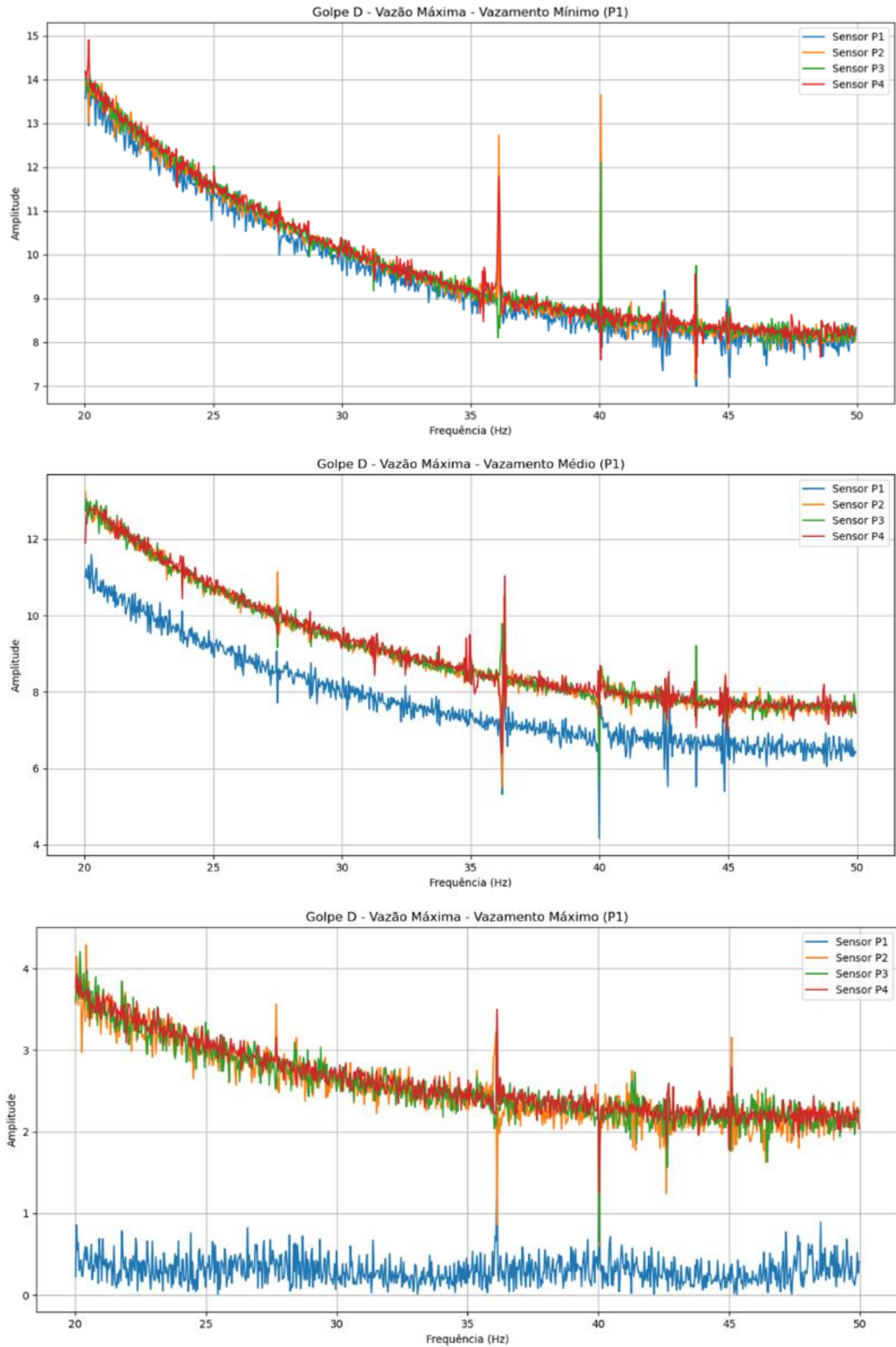




Fonte: AUTOR

Ao observar a Figura 42, que apresenta a mesma manobra D e vazão inicial máxima com diferentes aberturas de vazamento, nota-se que, nos casos de vazamentos maiores, a curva de frequência no ponto do vazamento tende a assumir um comportamento mais linear, com amplitudes reduzidas. Além disso, nos pontos de frequência de destaque, verifica-se que a amplitude tende a aumentar em vazamentos menores, enquanto em vazamentos maiores ela tende a diminuir. Ou seja, para determinados pontos do espectro de frequência, vazamentos menores provocam perturbações mais nítidas e localizadas nas ondas de pressão, resultando em picos de amplitude mais evidentes. Já os vazamentos maiores dissipam mais energia do sistema, reduzindo essas amplitudes.

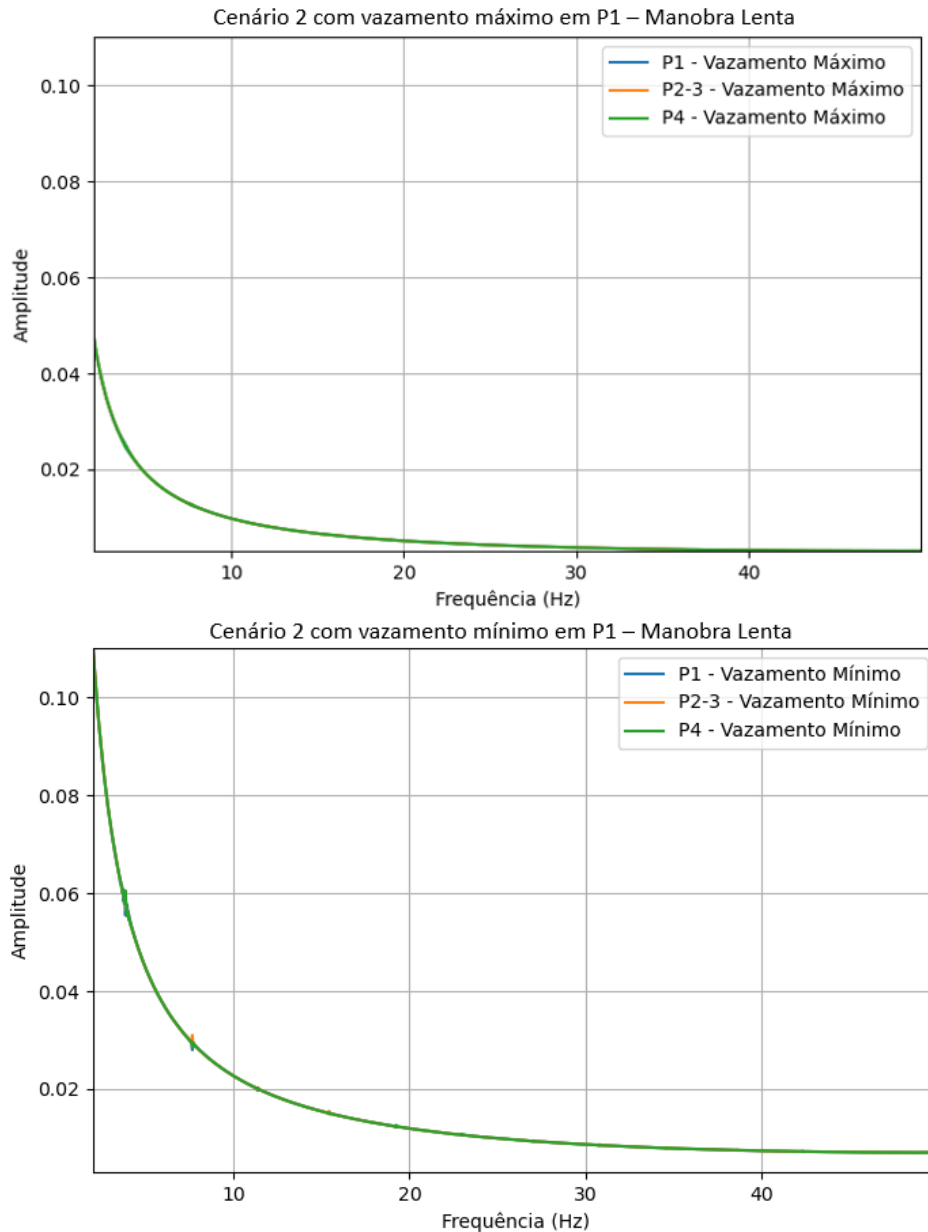
Esse comportamento do sensor P1 se segue nas demais vazões iniciais. Entretanto, o padrão das frequências de destaque não é totalmente visto entre elas, além da vazão inicial máxima. Já nas simulações do cenário 2, com vazamento no ponto P1, não foram observadas alterações na curva do sensor P1 como ocorreu no laboratório, em razão novamente das diferenças no arranjo experimental e no modelo computacional no local do vazamento.

**Figura 42: Manobras D com vazão máxima e variação da magnitude de vazamento**

Fonte: AUTOR

Nas Figura 43 e Figura 44 podemos comparar o comportamento do cenário 2 com o comportamento do cenário 3 visto na Figura 42. São apresentados os resultados para vazamentos máximo e mínimo, considerando tanto manobras lentas quanto rápidas.

**Figura 43: Manobras lentas no cenário 2 com vazamento mínimo e máximo**

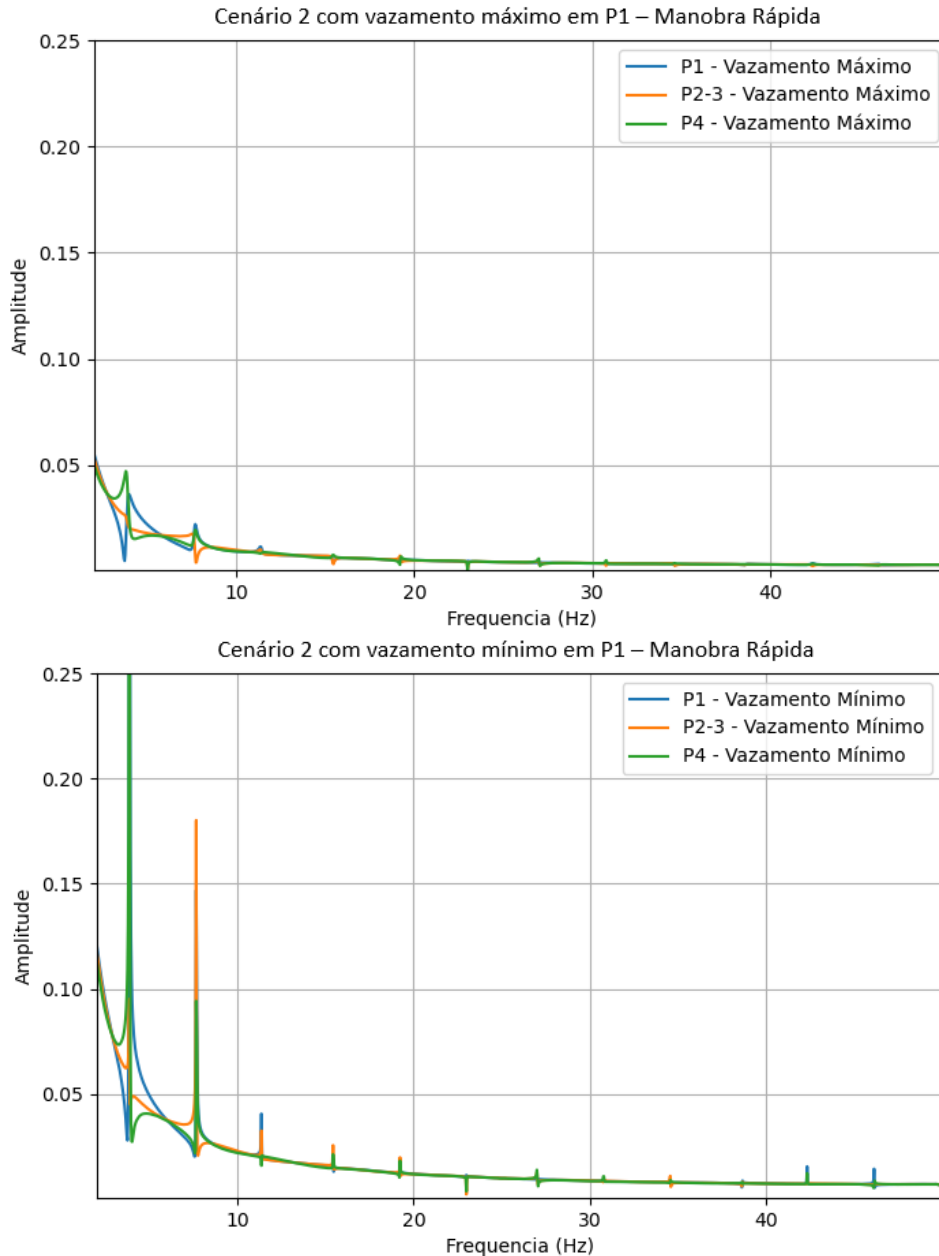


Fonte: AUTOR

Nas manobras lentas, os picos característicos foram pouco evidentes comparando em mesma escala, sendo levemente perceptíveis no cenário com menor vazamento. Já nas manobras rápidas, o comportamento foi semelhante, porém com picos de amplitude mais elevados. Ressalta-se que, no modelo computacional com manobra rápida, também foi verificada a tendência de aumento das amplitudes de destaque em

vazamentos menores e redução em vazamentos maiores, de modo análogo ao observado no experimento.

**Figura 44: Manobras rápidas no cenário 2 com vazamento mínimo e máximo**



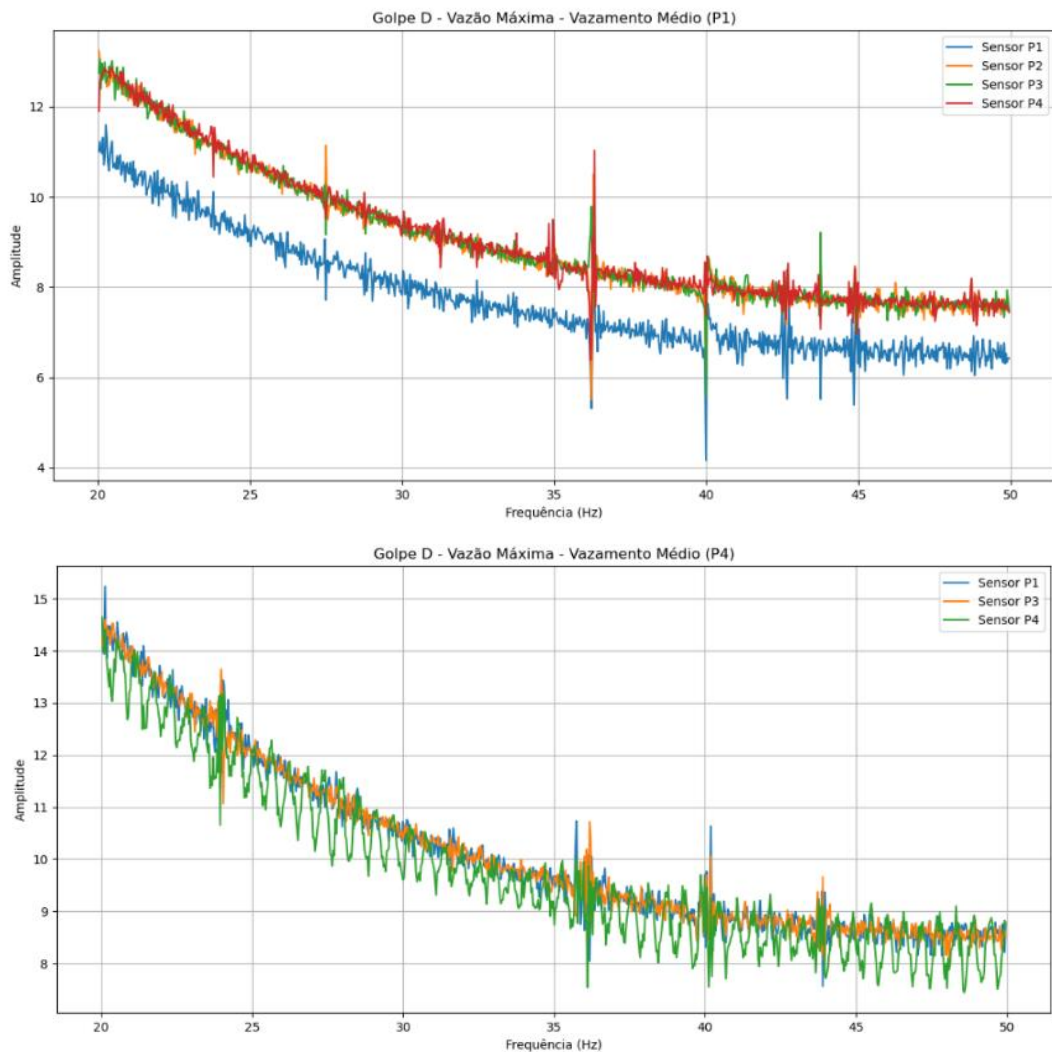
Fonte: AUTOR

Comparando agora, no domínio da frequência, as manobras do tipo D realizadas com vazão máxima e vazamento médio experimentalmente, tanto ocorrendo em P1 quanto em P4, observa-se que, quando o vazamento ocorre no ponto P4, a variação de amplitude no sensor localizado nesse ponto é maior do que quando o vazamento ocorre em P1 (Figura 45). Esse comportamento pode ser justificado pela proximidade do ponto P4 em relação à válvula de manobra. Como o vazamento em P4 ocorre mais

próximo da origem do golpe, a onda de pressão interage mais diretamente com o ponto de vazamento, resultando em uma maior resposta no sensor localizado nesse ponto.

Comparando com os resultados do modelo do cenário 2, observa-se que esse comportamento não se repetiu. No caso, ambas as curvas apresentaram formatos semelhantes, diferindo apenas de forma discreta nas amplitudes máximas e mínimas. Assim, não foi identificado nenhum padrão adicional de variação de amplitude nas frequências de destaque entre as diferentes localizações de vazamento, como ilustrado na Figura 29 (A).

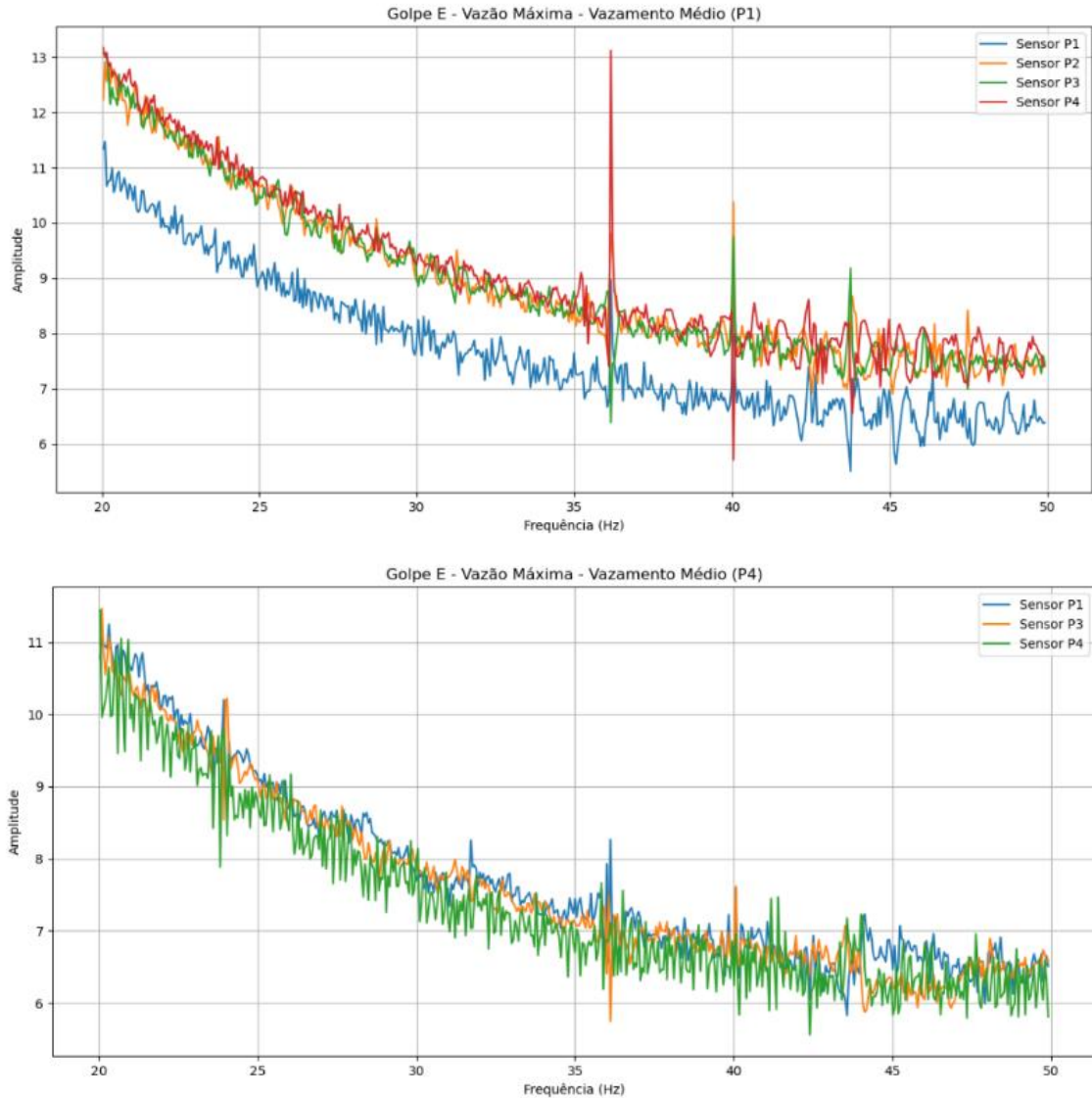
**Figura 45: Manobras D com vazão máxima e vazamento médio em P1 e P4**



Fonte: AUTOR

Além disso é visto que as frequências características geram maiores amplitudes quando o vazamento ocorre em P1, e isso pode ser notado tanto para o golpe D quanto para o golpe E (Figura 46).

**Figura 46: Manobras E com vazão máxima e vazamento médio em P1 e P4**



Fonte: AUTOR

Foi também realizada uma comparação considerando um único sensor (P3, como exemplo), avaliando cada magnitude de vazamento sob a condição de vazão inicial máxima do sistema experimental, tanto para vazamentos em P1 quanto em P4 (Figura 47). Utilizando o cenário de vazão máxima e a mesma manobra D, observou-se que as maiores amplitudes médias no domínio da frequência ocorreram nas condições de vazamento mínimo e sem vazamento. Em seguida, o vazamento médio apresentou

amplitudes intermediárias, enquanto o vazamento máximo resultou nos menores valores registrados entre os sensores.

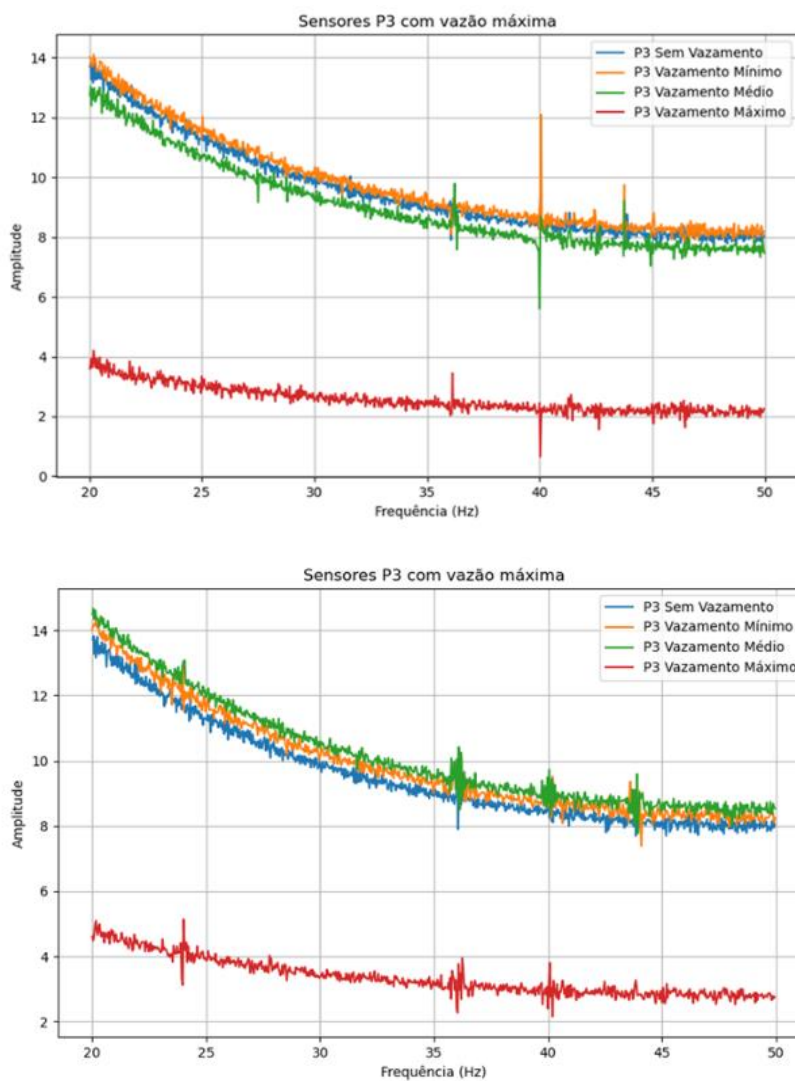
Nesse cenário de vazão máxima, verificou-se o amortecimento das amplitudes em função da presença do vazamento, seguindo o padrão em que amplitudes gerais diminuem à medida que a magnitude do vazamento aumenta. Em relação às frequências características, constatou-se maior predominância daquelas associadas aos cenários de vazamento mínimo e médio, enquanto as condições de vazamento máximo apresentaram amplitudes consistentemente inferiores.

Ainda na Figura 47, ao analisar a manobra D com vazão máxima e vazamento localizado em P4, observou-se que as maiores amplitudes ocorreram no vazamento médio, diferentemente do que ocorreu com vazamento em P1. No entanto, neste caso, os valores se mostraram mais próximos dos obtidos nos cenários de vazamento mínimo e sem vazamento em todos os sensores.

Comparando esses resultados com os obtidos no modelo que simula o experimento (Cenário 2), observa-se, na Figura 29 (B) (manobra lenta com vazamento em P1) e na Figura 48 (manobras lenta e rápida com vazamento em P4), a possibilidade de uma análise comparativa em um único sensor (no caso, P2-3) para situações de variação do vazamento e sua localização. Verificou-se que, em ambas as manobras lentas, o padrão de maiores amplitudes para vazamentos menores foi mantido, de forma semelhante ao observado experimentalmente. No entanto, na manobra rápida, as amplitudes referentes a todas as magnitudes de vazamento tenderam a se aproximar.

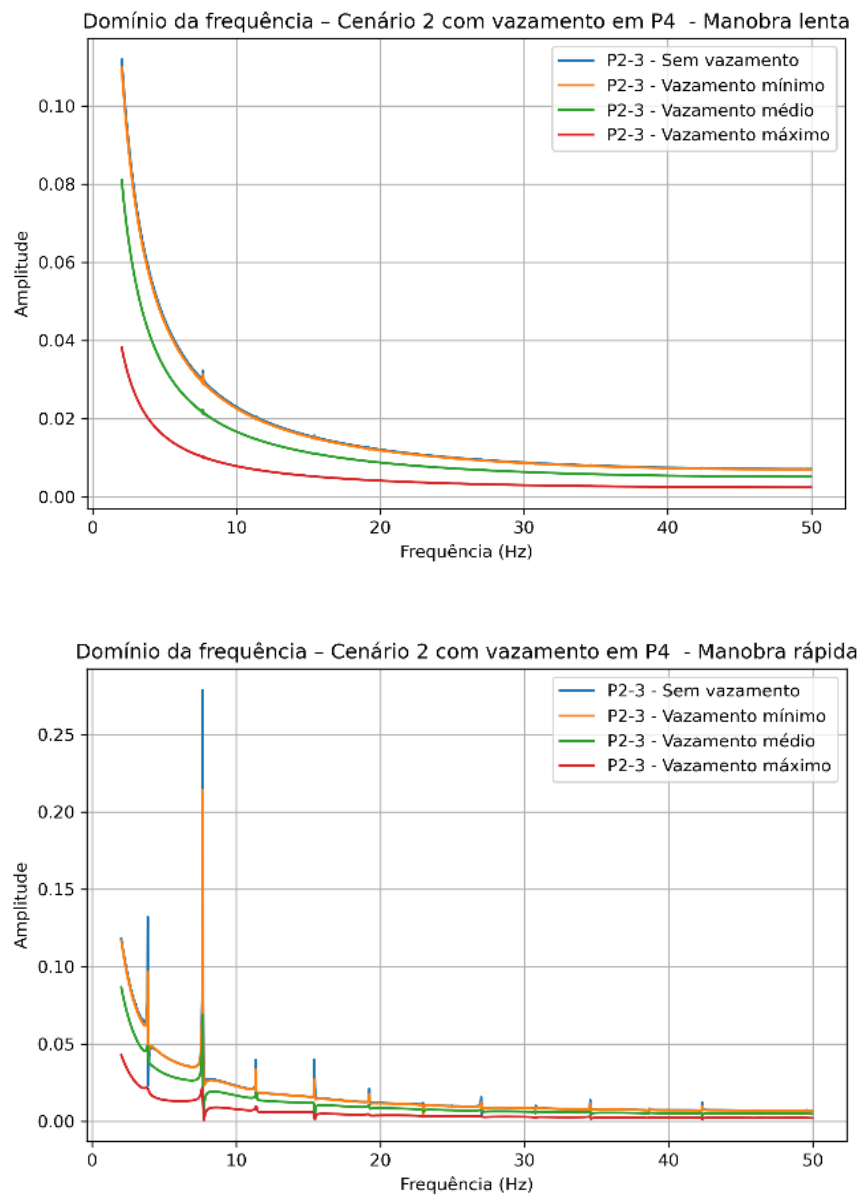
Em relação às frequências de destaque, os cenários de manobras lentas apresentaram maiores amplitudes na condição de vazamento mínimo, enquanto na manobra rápida o maior valor foi observado no vazamento médio. O padrão de variação entre o modelo computacional e o experimento mostrou-se pouco consistente quanto a essas frequências específicas. Portanto, é possível concluir apenas que, de modo geral, as situações com vazamento apresentaram essas amplitudes superiores às do caso sem vazamento, ao menos considerando a análise restrita experimentalmente e ao sensor intermediário do sistema.

Figura 47: Manobras D experimentais com vazamentos em P1 (esquerda) e em P4 (direita) no domínio da frequência



Fonte: AUTOR

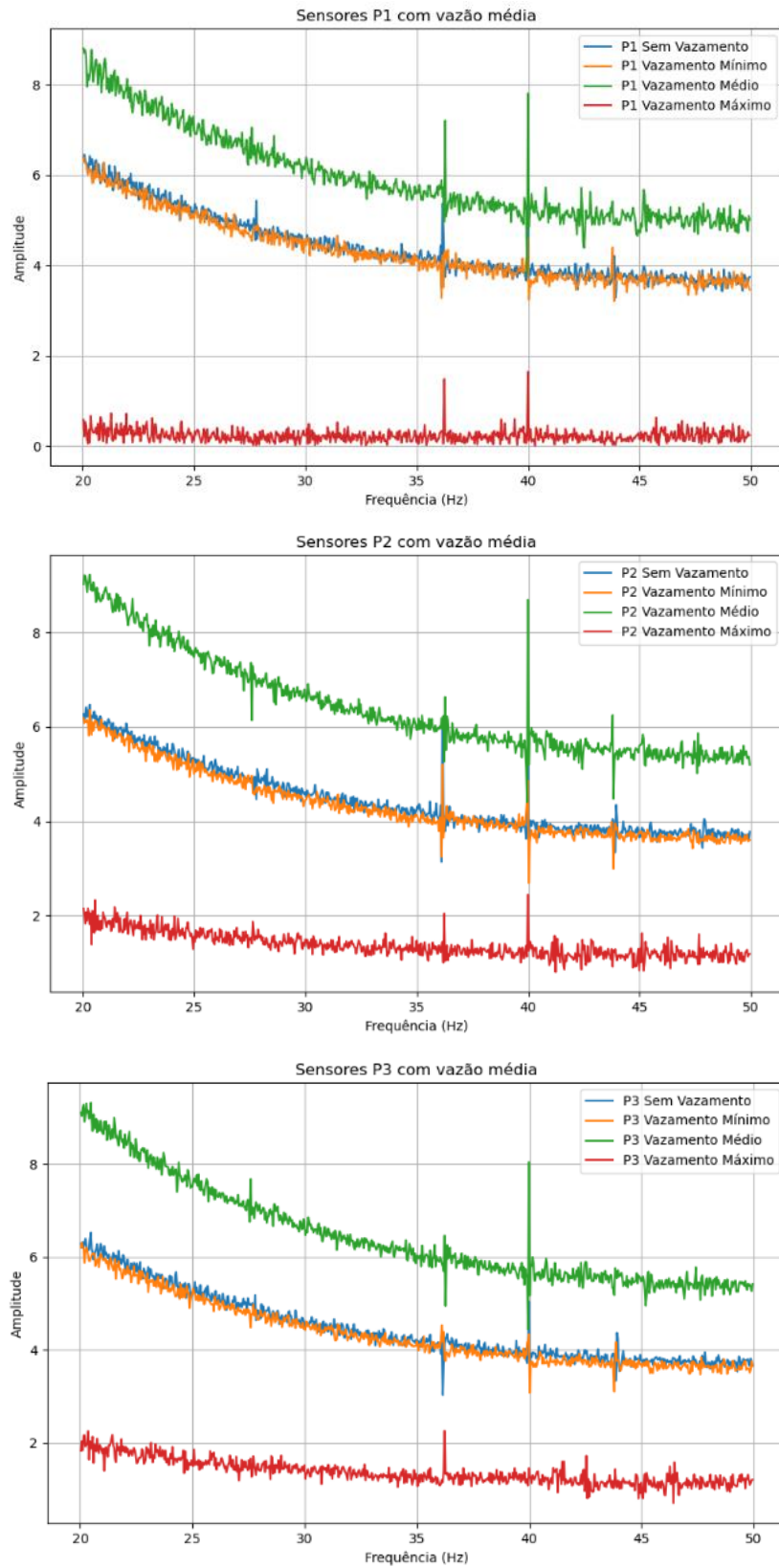
**Figura 48: Manobras do cenário 2 no sensor 2-3 com vazamentos em P4 no domínio da frequência (Lenta e Rápida)**

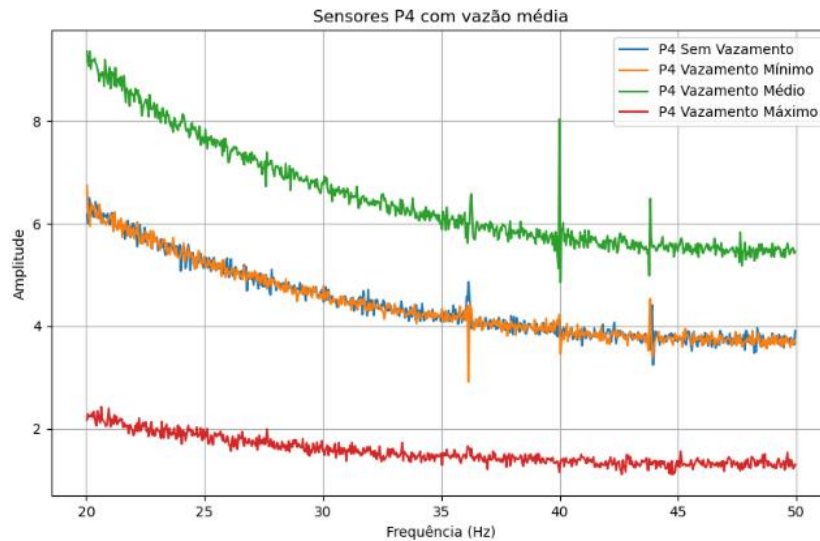


Fonte: AUTOR

De forma semelhante ao visto no cenário com vazão máxima e vazamento em P4, ao se comparar os espectros de frequência com vazão inicial média, observa-se que o vazamento médio apresenta as maiores amplitudes em todos os sensores (Figura 49).

**Figura 49: Manobras D com vazão inicial média em cada sensor para cada magnitude de vazamento (Vazamento em P1)**





Fonte: AUTOR

Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, em condições de vazamento muito intenso, há um maior amortecimento das oscilações de pressão no sistema, além de uma perda de energia total. Por outro lado, o vazamento médio parece permitir uma interação ideal entre o distúrbio hidráulico e a ressonância do sistema, elevando as amplitudes registradas no domínio da frequência quando comparado aos casos de vazamento mínimo e sem vazamento. Casos de vazamento em P4 podem causar esses distúrbios assim como ocorrido nesses cenários de vazão e vazamento médios.

Ademais, nota-se que os picos de frequência característicos foram mais pronunciados no caso do vazamento médio que os demais, enquanto no vazamento máximo apresentaram-se menos destacados.

De modo geral, a análise gráfica nos domínios do tempo e da frequência apresentou resultados e padrões que contribuem para a detecção de vazamentos, evidenciando tanto características comuns a todos os cenários quanto particularidades específicas de cada um, sobretudo no Cenário 3, que utiliza dados experimentais reais. Aliado a isso, a aplicação de métricas permite identificar novos padrões e reforçar aqueles já observados até o momento.

## 5.4 Métricas

As métricas obtidas para todos os três cenários serão abordadas em conjunto quando pertinente, tanto as do domínio do tempo quanto da frequência. Contudo, devido ao maior número de manobras realizadas no cenário 3, em alguns casos será dado maior foco a este cenário devido a existência de mais métricas para comparação.

### 5.4.1 Domínio do tempo

- Valor médio

O valor médio é utilizado para avaliar a mudança geral na linha de base do sinal de pressão. Na análise transitória, tais mudanças podem indicar perda de energia devido a vazamentos, tornando essa métrica um indicador potencialmente útil da integridade do sistema.

Nos Cenários 2 e 3, por apresentarem características semelhantes, o valor médio manteve um comportamento consistente nos casos sem vazamento, independentemente da vazão inicial ou da manobra realizada no experimento. Nesses cenários, os sensores registraram valores de pressão crescentes do sensor P1 ao P4, conforme esperado em função da diferença de cotas e das perdas de carga ao longo do sistema. No entanto, no Cenário 1, o sensor P2, localizado mais próximo à válvula, apresentou valor médio superior ao do P1, em razão das maiores distâncias nas tubulações, diferenciando-se dos demais cenários.

Com a introdução de vazamentos, verificou-se que, nos casos de vazamentos mínimos, esse padrão se manteve. No entanto, nos vazamentos de magnitude média e máxima, os sensores localizados no ponto do vazamento passaram a apresentar os menores valores médios de pressão. Uma exceção foi observada nas manobras B e C, nas quais, em alguns cenários, o sensor P4 registrou valores médios menores que P1, mesmo quando o vazamento ocorria neste último. Isso se deve ao fechamento da válvula de montante, que provoca uma despressurização geral do sistema.

Nos modelos computacionais, a redução da pressão no ponto de ocorrência do vazamento não se manifesta da mesma forma observada experimentalmente, conforme já discutido anteriormente. Assim, a variação da métrica entre os sensores

com vazamento manteve uma sequência semelhante à dos cenários sem vazamento. No entanto, no Cenário 1 com vazamento máximo em V1, o sensor que apresentou o maior valor médio foi o P1, e não mais o P2, como havia ocorrido.

O Quadro 2 apresenta o comportamento dessa métrica nas situações com vazamento máximo para cada um dos cenários analisados, considerando, no caso do cenário 3, a manobra D. Observa-se, em geral, um decréscimo dos valores da métrica à medida que a magnitude do vazamento aumenta, comportamento associado à perda de energia introduzida pelo vazamento ao longo do sistema, sendo representado em porcentagem pela comparação com a situação sem vazamento de cada caso.

No cenário 2, a diminuição percentual dos valores médios, considerando o conjunto dos sensores, foi maior quando o vazamento ocorreu em P4 do que quando ocorreu em P1; entretanto, no caso experimental, observou-se comportamento oposto, com maior decréscimo quando o vazamento estava localizado em P1. Essa diferença pode estar associada à efeitos locais do escoamento e perdas adicionais não plenamente representadas no modelo computacional.

No geral houve diminuição da métrica com a existência de vazamentos. Contudo, no cenário 3, as condições com vazamento mínimo apresentaram valores médios ligeiramente superiores à condição sem vazamento, o que pode estar relacionado a pequenas diferenças nas posições iniciais da válvula de manobra, capazes de alterar o regime hidráulico inicial e, conseqüentemente, influenciar a resposta do sistema durante o transitório.

**Quadro 2: Valores médio de pressão em manobras com vazamento máximo nos cenários 1 e 2 e manobras D do cenário 3 em m.c.a.**

Velocidade de manobra	Sensor	Valor Médio (Cenário 1 – Vazamento Máximo)			Mudança entre com e sem vazamento
		Sem vazamento	Vazamento em P1	-	
Rápida	P1	68,46	-29%	-	Diminuição
	P2	70,49	-32%	-	
Lenta	P1	64,13	-29%	-	Diminuição
	P2	64,34	-34%	-	
Velocidade de manobra	Sensor	Valor Médio (Cenário 2 – Vazamento Máximo)			Mudança entre com e sem vazamento
		Sem vazamento	Vazamento em P1	Vazamento em P4	
Rápida	P1	25,65	-56%	-63%	Diminuição
	P2-3	25,36	-57%	-64%	
	P4	24,96	-58%	-65%	
Lenta	P1	21,51	-57%	-63%	Diminuição
	P2-3	21,21	-58%	-64%	
	P4	20,81	-59%	-65%	
Magnitude da Vazão	Sensor	Valor Médio (Cenário 3 – Vazamento Máximo)			Mudança entre com e sem vazamento
		Sem vazamento	Vazamento em P1	Vazamento em P4	
Mínima	P1	20,92	-99%	-	Diminuição
	P2	20,53	-70%	-	
	P3	20,52	-70%	-	
	P4	20,30	-70%	-	
Média	P1	19,16	-98%	-	Diminuição
	P2	18,78	-70%	-	
	P3	18,76	-70%	-	
	P4	18,67	-70%	-	
Máxima	P1	13,01	-98%	-49%	Diminuição
	P2	12,65	-58%	-	
	P3	12,63	-58%	-51%	
	P4	12,50	-59%	-95%	

Fonte: AUTOR

- Entropia

No cenário experimental a entropia apresentou, nas manobras A e F, os menores valores no sensor P1 e os maiores nos sensores intermediários P2 e P3. Já as manobras B e C, de modo geral, seguiram o padrão observado nas simulações sem

vazamento, em que a entropia é mais elevada no sensor P1 e diminui gradativamente até que o sensor P4 apresente o menor valor.

Nas manobras D e E do Cenário 3, observou-se que, nos casos sem vazamento, com vazamento mínimo e médio, o padrão se manteve: o sensor P4 registrou a menor entropia, enquanto o P1 apresentou a maior. Entretanto, nos cenários de vazamento máximo ocorreu uma inversão. Quando o vazamento estava localizado em P1, esse sensor apresentou a menor entropia; de forma análoga, quando localizado em P4, o menor valor foi registrado nesse ponto.

Além disso, verificou-se que, na condição de vazão mínima e máxima da manobra D, os valores de entropia foram mais elevados nos casos com vazamento, independentemente de sua magnitude ou localização, conforme ilustrado no Quadro 3. Esse comportamento também foi identificado no Cenário 1, mas no Cenário 2 a entropia seguiu essa tendência somente com vazamento máximo, mesmo que em menor magnitude. Isso demonstra que a desordem da métrica causada pelo vazamento é mais perceptível na situação de laboratório.

**Quadro 3: Entropia nos cenários 2 e 3**

Magnitude do vazamento	Sensor	Entropia (Cenário 3 – Experimental – Vazão máxima)			Mudança entre com e sem vazamento
		Sem vazamento	Vazamento em P1	Vazamento em P4	
Mínimo	P1	11,362721	+0,78%	+1,02%	Aumento
	P2	11,351686	+0,83%	-	
	P3	11,349853	+0,83%	+1,10%	
	P4	11,344686	+0,86%	+1,12%	
Médio	P1	11,362721	+0,66%	+0,55%	Aumento
	P2	11,351686	+0,69%	-	
	P3	11,349853	+0,68%	+0,60%	
	P4	11,344686	+0,70%	+0,58%	
Máximo	P1	11,362721	+0,97%	+1,18%	Aumento
	P2	11,351686	+1,37%	-	
	P3	11,349853	+1,37%	+1,24%	
	P4	11,344686	+1,39%	+1,20%	

Magnitude do vazamento	Sensor	Entropia (Cenário 2 – Computacional – Manobra lenta)			Mudança entre com e sem vazamento
		Sem vazamento	Vazamento em P1	Vazamento em P4	
Mínimo	P1	11,538177	-0,003%	-0,003%	Diminuição
	P2-3	11,538491	-0,005%	-0,005%	
	P4	11,537838	-0,004%	-0,004%	
Médio	P1	11,538177	-0,013%	-0,007%	Diminuição
	P2-3	11,538491	-0,018%	-0,012%	
	P4	11,537838	-0,017%	-0,012%	
Máximo	P1	11,538177	+0,022%	+0,039%	Aumento
	P2-3	11,538491	+0,017%	+0,033%	
	P4	11,537838	+0,017%	+0,032%	

Fonte: AUTOR

Por outro lado, ao comparar essa mesma manobra na vazão inicial média, o padrão se altera. Para a vazão média, os valores de entropia nos cenários com vazamento se mostraram semelhantes aos casos sem vazamento, independentemente da magnitude. Isso demonstra que em vazões menores do sistema a confiabilidade nesse padrão da entropia pode não ser confiável.

Por fim, um padrão identificado nas simulações computacionais, especialmente no Cenário 2: as manobras lentas resultaram em menores valores de entropia em comparação às manobras rápidas. Além disso, a manobra lenta mostrou-se, de modo geral, mais sensível à posição dos pontos de monitoramento: quanto mais próximo da válvula de manobra, menores foram os valores de entropia, independentemente da localização do vazamento — com exceção do caso sem vazamento.

Ainda no Cenário 2, mas considerando a manobra rápida em condições de vazamento máximo, a entropia apresentou os maiores valores em relação às demais magnitudes de vazamento, superando inclusive o caso sem vazamento, que em geral se mantinha como o mais elevado. Esse resultado indica que um vazamento de maior magnitude é capaz de aumentar significativamente a desordem do sistema, a ponto de superar até mesmo o comportamento observado sem vazamentos. Em contrapartida, vazamentos de menor magnitude não provocam um nível de desordem superior ao cenário sem vazamento.

- Coeficiente de assimetria

O coeficiente de assimetria mede a assimetria da distribuição do sinal. Na análise transitória, o vazamento pode distorcer as respostas de pressão, produzindo assimetria positiva, com uma cauda mais longa à direita da média, ou assimetria negativa, com uma cauda mais longa à esquerda, mas na prática isso não foi tão perceptível. Para essa métrica e manobra experimental D, sem vazamento, os sensores intermediários registraram valores ligeiramente inferiores de assimetria, com exceção da condição de vazão máxima, em que o sensor P1 apresentou o menor valor. Já no modelo computacional de laboratório, de forma distinta, o sensor intermediário foi o que apresentou a maior assimetria (Quadro 4).

**Quadro 4: Coeficiente de assimetria em manobras com vazamento máximo nos cenários 1 e 2 e manobras D do cenário 3**

Velocidade de manobra	Sensor	Coeficiente de assimetria (Cenário 1 – Vazamento Máximo)			Mudança entre com e sem vazamento
		Sem vazamento	Vazamento em P1	-	
Rápida	P1	0,983	1,269	-	Aumento
	P2	0,558	1,076	-	
Lenta	P1	0,019	-0,526	-	Diminuição
	P2	0,377	-0,330	-	
Velocidade de manobra	Sensor	Coeficiente de assimetria (Cenário 2 – Vazamento Máximo)			Mudança entre com e sem vazamento
		Sem vazamento	Vazamento em P1	Vazamento em P4	
Rápida	P1	-5,051	-5,711	-6,110	Diminuição
	P2-3	-5,407	-5,681	-6,046	
	P4	-5,094	-5,648	-5,990	
Lenta	P1	-1,186	-0,997	-1,014	Aumento
	P2-3	-1,187	-0,998	-1,014	
	P4	-1,188	-1,000	-1,015	
Magnitude da Vazão	Sensor	Coeficiente de assimetria (Cenário 3 – Vazamento Máximo)			Mudança entre com e sem vazamento
		Sem vazamento	Vazamento em P1	Vazamento em P4	
Mínima	P1	-0,736	0,855	-	Aumento
	P2	-0,750	-0,292	-	
	P3	-0,749	-0,306	-	
	P4	-0,738	-0,095	-	
Média	P1	-1,072	3,462	-	Aumento
	P2	-1,073	-0,270	-	

Magnitude da Vazão	Sensor	Coeficiente de assimetria (Cenário 3 – Vazamento Máximo)			Mudança entre com e sem vazamento
		Sem vazamento	Vazamento em P1	Vazamento em P4	
Média	P3	-1,073	-0,275	-	Aumento
	P4	-1,071	-0,283	-	
Máxima	P1	-0,029	0,785	-1,195	Diminuição
	P2	-0,026	-0,540	-	
	P3	-0,026	-0,545	-1,204	
	P4	-0,027	-0,548	-1,237	

Fonte: AUTOR

Nas manobras com vazamento, não foi possível identificar um padrão uniforme em todos os cenários. Entretanto, no Cenário 3, sob a condição de vazão inicial máxima e vazamento médio (tanto em P1 quanto em P4), observou-se uma tendência clara: o menor coeficiente de assimetria ocorreu justamente no ponto de ocorrência do vazamento. Esse mesmo comportamento foi mantido no caso de vazamento máximo, sobretudo em P4. Esse padrão é caracterizado novamente pelo arranjo do sensor de pressão no ponto de vazamento experimental, não sendo necessariamente uma característica de detecção de vazamentos.

No modelo do Cenário 2, o maior valor do coeficiente de assimetria foi consistentemente associado aos casos de vazamento máximo em manobras rápidas e aos de vazamento mínimo em manobras lentas, independentemente da localização do vazamento. Esse padrão também se repetiu no Cenário 1. Esse comportamento sugere que, nas simulações, a intensidade da manobra influencia diretamente a magnitude da assimetria: manobras rápidas amplificam os efeitos de grandes vazamentos, enquanto manobras lentas tornam os efeitos de pequenos vazamentos relativamente mais perceptíveis.

Sendo assim, no geral, essa métrica apresentou pouca utilidade na detecção de padrões para o uso objetivado no estudo.

- Curtose

Analisando primeiramente o cenário experimental em relação à curtose, observa-se que, sob a condição de vazão inicial máxima e manobra D, os valores mais elevados ocorrem no sensor localizado no ponto de vazamento: maior em P1 quando o

vazamento está em P1, e maior em P4 quando ocorre em P4, independentemente da magnitude da abertura, novamente, devido ao arranjo experimental.

No Quadro 5, que apresenta a métrica para esse caso, verifica-se que os valores médios de curtose para cada cenário de manobra aumentam na presença de vazamentos, sendo esse aumento mais significativo quando o vazamento se localiza em P4.

**Quadro 5: Valores de curtose no cenário 3 para manobras D com vazão inicial máxima**

Magnitude do vazamento	Sensor	Curtose			Mudança entre com e sem vazamento
		Sem vazamento	Vazamento em P1	Vazamento em P4	
<b>Mínimo</b>	P1	-1,686	+33,0%	+122,3%	Aumento
	P2	-1,689	+32,6%	-	
	P3	-1,689	+32,6%	+122,1%	
	P4	-1,689	+32,6%	+123,0%	
<b>Médio</b>	P1	-1,686	+26,0%	+48,0%	Aumento
	P2	-1,689	+25,5%	-	
	P3	-1,689	+25,5%	+47,4%	
	P4	-1,689	+25,4%	+48,1%	
<b>Máximo</b>	P1	-1,686	+319,5%	+116,1%	Aumento
	P2	-1,689	+48,6%	-	
	P3	-1,689	+49,0%	+117,6%	
	P4	-1,689	+48,0%	+127,2%	

Fonte: AUTOR

O mesmo fenômeno ocorre analisando a métrica curtose para vazão máxima do golpe E, a métrica aumenta conforme a existência do vazamento. Com exceção do caso de vazamento em P1 e vazamento máximo, em que a curtose foi menor que o cenário sem vazamentos (Quadro 6).

Ou seja, essa métrica pode auxiliar não somente na identificação da existência de vazamentos, mas também, na sua distância do ponto de geração do transitório hidráulico.

**Quadro 6: Curtose para a manobra E com vazamento máximo**

Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria		
		Sem vazamento	Vazamento em P1	Vazamento em P4
<b>Mínimo</b>	P1	1,417	1,602	2,366
	P2	1,421	1,606	-
	P3	1,423	1,608	2,335
	P4	1,418	1,600	2,286
<b>Médio</b>	P1	1,417	1,496	2,104
	P2	1,421	1,507	-
	P3	1,423	1,507	2,092
	P4	1,418	1,501	2,040
<b>Máximo</b>	P1	1,417	1,338	2,104
	P2	1,421	1,118	-
	P3	1,423	1,117	2,092
	P4	1,418	1,112	2,040

Fonte: AUTOR

Nos cenários 1 e 2, para as manobras lentas, todos os sensores apresentaram valores negativos de curtose em todos os níveis de vazamento. Isso indica que a distribuição da pressão se torna mais uniforme ao longo de um intervalo maior, em contraste com o comportamento observado nas manobras rápidas. Nessa condição de velocidade de manobra, não foi possível identificar padrões claros da métrica relacionados à variação da magnitude dos vazamentos.

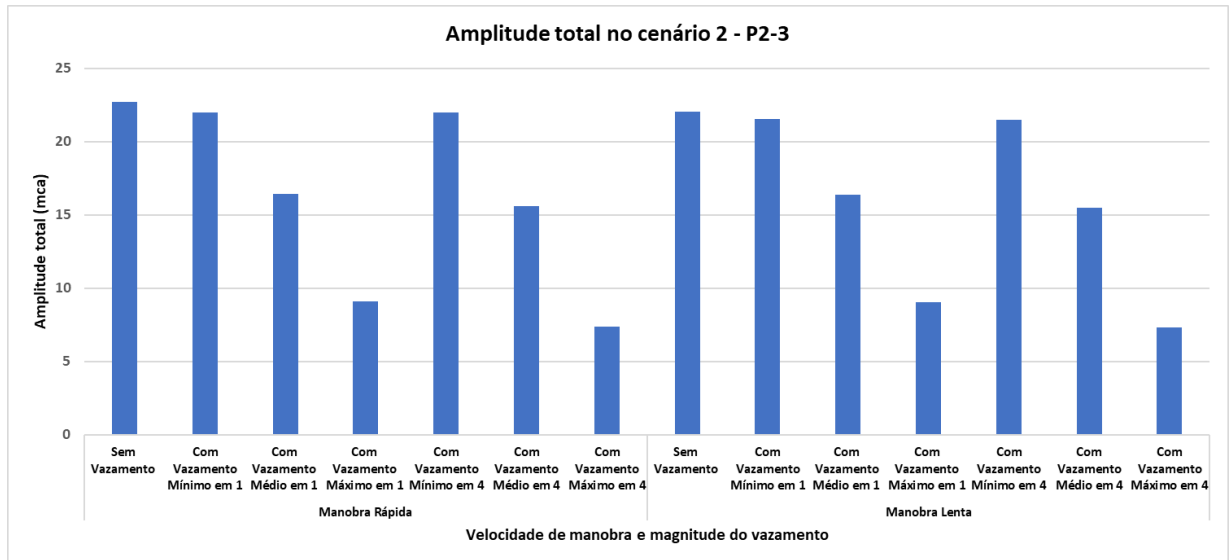
Já nas manobras rápidas, a curtose mostrou-se mais sensível. No cenário 1, os maiores valores foram registrados nos sensores P1 e P2 quando o vazamento era máximo. No cenário 2, observou-se comportamento semelhante, com a curtose alcançando valores mais altos nos cenários com vazamento máximo, tanto em P1 quanto em P4, em concordância com o observado experimentalmente. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que a curtose representa o grau de achatamento da distribuição da curva: quando o vazamento aumenta, especialmente no caso máximo, ocorre maior amortecimento das oscilações de pressão, o que resulta no aumento dessa métrica.

- Valores máximos, mínimos e amplitude total

Ao avaliar essas métricas no domínio do tempo para os modelos computacionais, nota-se um padrão claro: os valores máximos, mínimos e a amplitude total foram mais elevados nos cenários sem vazamento e diminuíram progressivamente conforme

aumentava a magnitude do vazamento simulado (Figura 50). Esse comportamento demonstra que a presença de vazamento reduz a variação de pressão durante uma manobra transitória, atuando como um mecanismo de amortecimento no sistema.

**Figura 50: Métrica amplitude total no modelo computacional do laboratório**



Fonte: AUTOR

Nos testes de laboratório, o mesmo padrão geral foi observado, embora com algumas diferenças pontuais. Essas discrepâncias podem ser atribuídas, novamente, ao impacto distinto que os vazamentos causam nos sensores no qual ele ocorre, considerando a configuração física do sistema experimental, em contraste com a representação do modelo computacional.

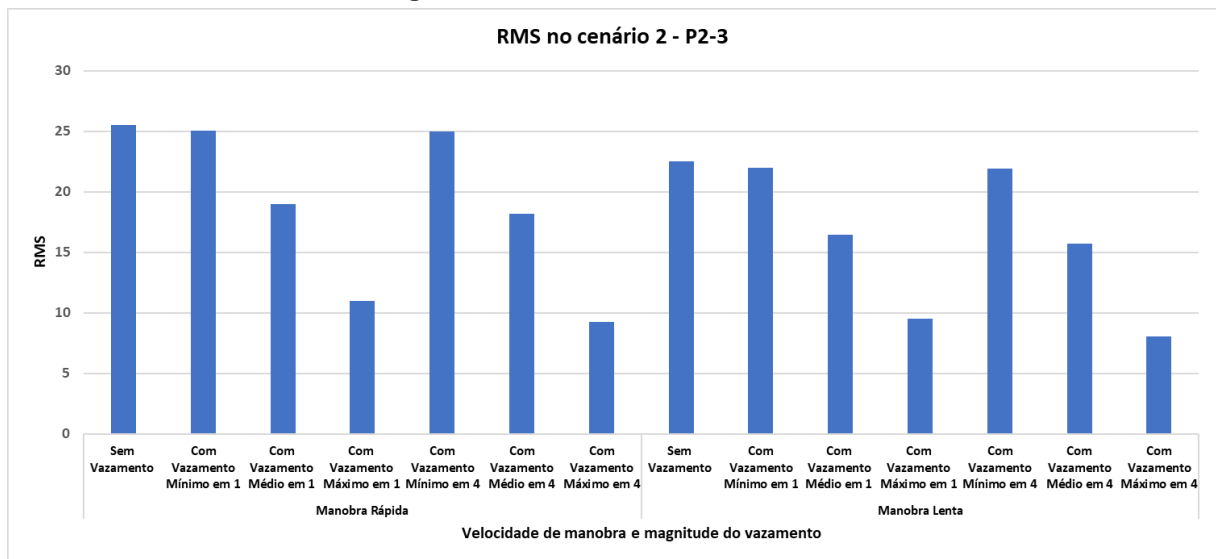
- RMS

O valor da métrica RMS reflete o conteúdo energético do sinal no domínio do tempo. Como o vazamento dissipa energia, as variações estão diretamente relacionadas à presença e à gravidade dos vazamentos. Semelhante ao observado para a métrica de amplitude, a análise do RMS no cenário 2, responsável por quantificar a energia do sinal no domínio do tempo, mostrou maiores valores nos casos sem vazamento, diminuindo gradualmente à medida que a magnitude do vazamento aumentava em todas as situações (Figura 51). Além disso, essa métrica apresentou valores ligeiramente mais elevados quando o vazamento ocorreu em P4 e a manobra foi lenta. Entre os sensores, observou-se uma redução progressiva do RMS do primeiro (P1) ao último (P4). Esse comportamento indica que, com o aumento do vazamento, a

energia disponível no sistema é dissipada, e a atenuação entre os sensores reflete as perdas de carga acumuladas ao longo do sistema.

No cenário 3 foi visto padrão semelhante no vazamento médio e máximo observando o sensor P3. Contudo, em vazamento mínimo o RMS foi ligeiramente maior que o caso sem vazamento, indicando que vazamentos com baixas magnitudes podem não interferir nos resultados da métrica.

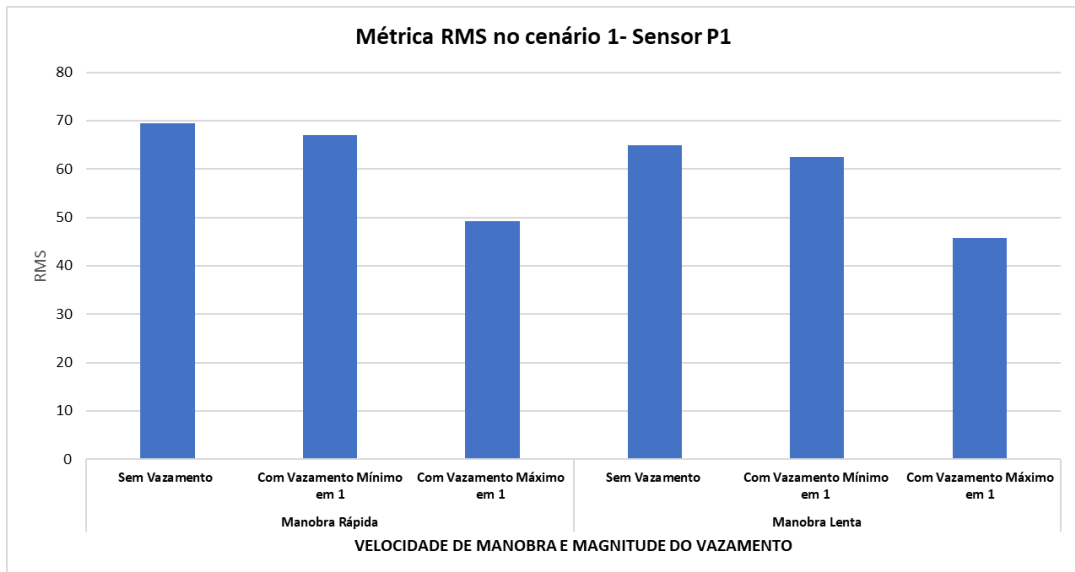
**Figura 51: Métrica RMS no cenário 2**



Fonte: AUTOR

Esse padrão também foi observado nos dois sensores posicionados antes da válvula no cenário 1. Entretanto, nesse caso, os maiores valores de RMS foram registrados no ponto P2, mais próximo da válvula, com exceção da situação de vazamento máximo (Figura 52). Essa diferença pode estar associada ao maior comprimento das tubulações no cenário 1, o que favorece a dissipação de energia da onda transitória e altera a distribuição dos valores médios entre os sensores, fazendo com que o ponto mais próximo da válvula registre maiores intensidades, exceto quando o vazamento é predominante.

**Figura 52: Métrica RMS no cenário 1**



Fonte: AUTOR

Considerando novamente a métrica para as manobras experimentais, foi visto que ela apresentou variações consistentes conforme a manobra, a vazão inicial e a presença de vazamentos. Na manobra A, observou-se maior valor de RMS no sensor P1 quando o vazamento era mínimo; entretanto, esse valor se inverteu para o menor quando o vazamento foi médio ou máximo — todas as manobras A foram realizadas apenas com vazamento no ponto P1.

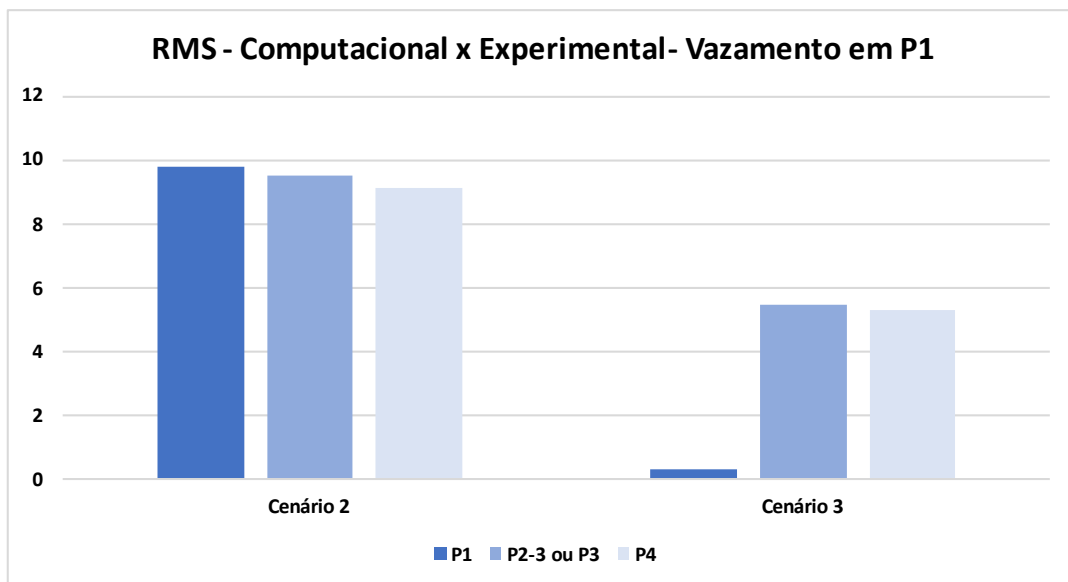
Nas manobras B e C, de modo geral, os testes sem vazamento e com vazamento mínimo apresentaram maior RMS no sensor P1 e menor no sensor P4. Já com vazamento médio, o menor valor passou a ser registrado no sensor P1, enquanto no caso de vazamento máximo, o menor RMS foi sempre observado em P4. Isso pode ser explicado pela maior queda de pressão em P4 ao fechar a válvula de montante por estar em uma maior cota.

Nas manobras D e E, sem a presença de vazamentos, os maiores valores de RMS ocorreram no sensor P1, e os menores no sensor P4, assim como no cenário 2 computacional. Para as mesmas manobras, e em todas as condições de vazão inicial, o padrão com vazamento mínimo permaneceu semelhante ao dos testes sem vazamento. No entanto, quando o vazamento foi médio ou máximo, o menor valor de RMS foi registrado no sensor onde o vazamento estava localizado, tanto para o ponto P1 quanto para o ponto P4, diferindo do visto no modelo computacional. Esse ponto

de distinção é devido a diferença de simulação do arranjo experimental de vazamento no sensor onde ele ocorre.

Uma última comparação refere-se aos menores valores absolutos observados no experimento em relação ao modelo computacional. Embora ambos apresentem condições semelhantes de vazão inicial e manobra, o modelo obteve valores significativamente superiores. Esse comportamento pode ser explicado tanto pelas maiores perdas de carga presentes no sistema experimental quanto por maior vazão de vazamento máximo no cenário 3, quando comparado ao cenário 2 (Figura 53).

**Figura 53: Comparação entre o RMS no cenário 2 (Manobra lenta) e cenário 3 com vazamento máximo em P1**



Fonte: AUTOR

A análise das métricas no domínio do tempo permitiu identificar diferentes padrões associados à detecção de vazamentos e consolidou alguns padrões vistos na análise gráfica. Métricas de energia, como o RMS, mostraram-se particularmente eficazes em captar a perda energética decorrente desses eventos. Já a curtos demonstrou padrões de detecção e posição dos vazamentos. Nos cenários computacionais, observaram-se semelhanças de comportamento em relação à presença ou ausência de vazamentos, bem como à variação de sua magnitude e localização. Parte das diferenças registradas entre os resultados experimentais e simulados pode ser atribuída ao arranjo distinto utilizado para representar os vazamentos no laboratório, além das perdas de carga localizadas das curvas 180°, presentes apenas no sistema experimental.

#### 5.4.2 Domínio da frequência

- Energia total

A primeira métrica considerada no domínio da frequência foi a energia total. Por também se tratar de uma medida de energia, assim como o RMS no domínio do tempo, ela apresentou padrões semelhantes em todos os cenários. Nos resultados computacionais, observou-se um comportamento idêntico ao RMS nos cenários 1 e 2, inclusive com menores valores da métrica nas manobras lentas. No caso do cenário 3 experimental o padrão também foi semelhante ao observado no RMS. Na Tabela 6 é visto o comportamento dos sensores tanto para o RMS quanto para a energia total. O mesmo padrão de valores inferiores pode ser observado entre ambas as métricas, com os valores em negrito indicando o sensor que registrou a menor medição entre os quatro sensores.

Nas situações de vazamento máximo a Energia total e o RMS sempre apresentaram valores médios nos quatro sensores menores que o caso sem vazamento, indicando também essa perda energética do vazamento experimentalmente.

**Tabela 6: Métricas RMS e energia total para o cenário 3 com vazão máxima e manobra D**

Magnitude do vazamento	Sensor	RMS			Energia total		
		Sem vazamento	Com vazamento em P1	Com vazamento em P4	Sem vazamento	Com vazamento em P1	Com vazamento em P4
<b>Mínimo</b>	P1	14,516	16,888	18,644	1,71E+09	2,43E+09	2,99E+09
	P2	14,185	16,658	-	1,63E+09	2,36E+09	-
	P3	14,176	16,582	18,282	1,62E+09	2,33E+09	2,87E+09
	P4	<b>14,060</b>	<b>16,500</b>	<b>17,945</b>	<b>1,59E+09</b>	<b>2,31E+09</b>	<b>2,76E+09</b>
<b>Médio</b>	P1	14,516	<b>10,931</b>	16,611	1,71E+09	<b>1,01E+09</b>	2,32E+09
	P2	14,185	12,405	-	1,63E+09	1,29E+09	-
	P3	14,176	12,329	16,257	1,62E+09	1,27E+09	2,21E+09
	P4	<b>14,060</b>	12,239	<b>15,404</b>	<b>1,59E+09</b>	1,25E+09	<b>1,98E+09</b>
<b>Máximo</b>	P1	14,516	<b>0,309</b>	6,838	1,71E+09	<b>8,20E+05</b>	4,07E+08
	P2	14,185	5,484	-	1,63E+09	2,64E+08	-
	P3	14,176	5,448	6,456	1,62E+09	2,60E+08	3,61E+08
	P4	<b>14,060</b>	5,305	<b>0,695</b>	<b>1,59E+09</b>	2,46E+08	<b>4,17E+06</b>

Fonte: AUTOR

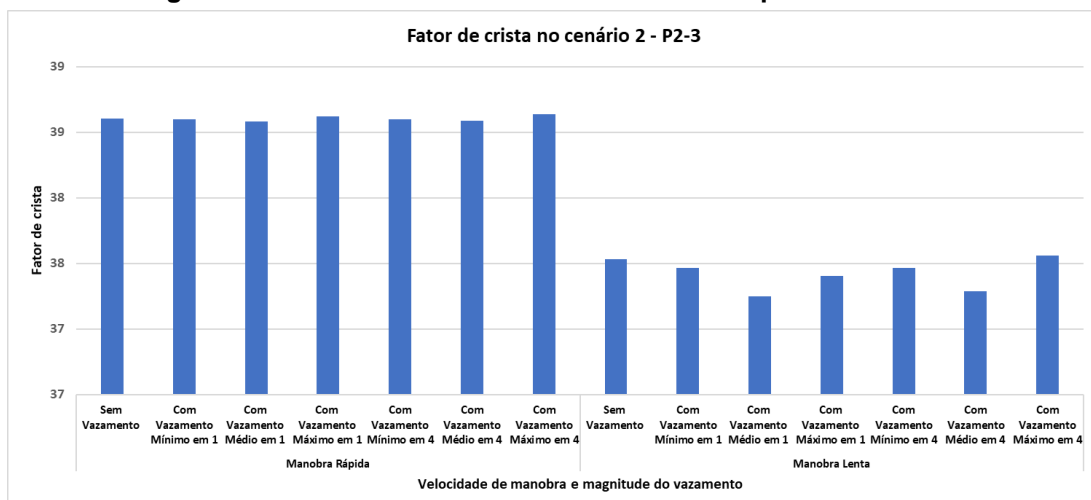
- Fator de crista, forma e impulso

De modo geral, as três métricas, fator de crista, de forma e de impulso apresentaram comportamentos semelhantes, razão pela qual foram tratadas em conjunto. No cenário 1, considerando os pontos P1 e P2, verificou-se que todas as manobras rápidas resultaram em maiores valores dessas métricas no caso de vazamento máximo. Nas manobras lentas, contudo, essa tendência não se manteve integralmente: no ponto P2, os fatores de forma e de impulso apresentaram valores menores justamente para o vazamento máximo.

No cenário 2, que corresponde ao modelo do experimento, os três pontos de análise exibiram comportamentos semelhantes entre si. Nessa condição, as manobras lentas apresentaram valores absolutos menores das métricas em comparação às rápidas. Além disso, com exceção do caso de manobra lenta e vazamento em P1, todos os cenários mostraram maiores valores das métricas para o vazamento máximo, especialmente quando localizado em P4 (Figura 54). Por outro lado, os vazamentos mínimo e médio simulados resultaram em valores menores do que no caso sem vazamento, diferindo, portanto, do comportamento observado no vazamento máximo.

Em resumo, esses resultados indicam que, computacionalmente, as métricas são mais sensíveis à intensidade do vazamento quando ele é elevado, mas podem apresentar inversões ou reduções inesperadas em condições de menor vazamento, o que sugere uma limitação das métricas em discriminar vazamentos sutis

**Figura 54: Métrica fator de crista no sensor P2-3 para o cenário 2**



Fonte: AUTOR

Essas três métricas, no cenário real e na manobra D, apresentaram padrões consistentes entre as diferentes vazões iniciais: os maiores valores ocorreram no ponto P1 e os menores em P4, tanto para os cenários de vazamento mínimo, médio e sem vazamento. Esse mesmo comportamento foi observado predominantemente no cenário 2, com apenas pequenas exceções, indicando um padrão consistente de comportamento em vazamentos de pequena e média magnitude.

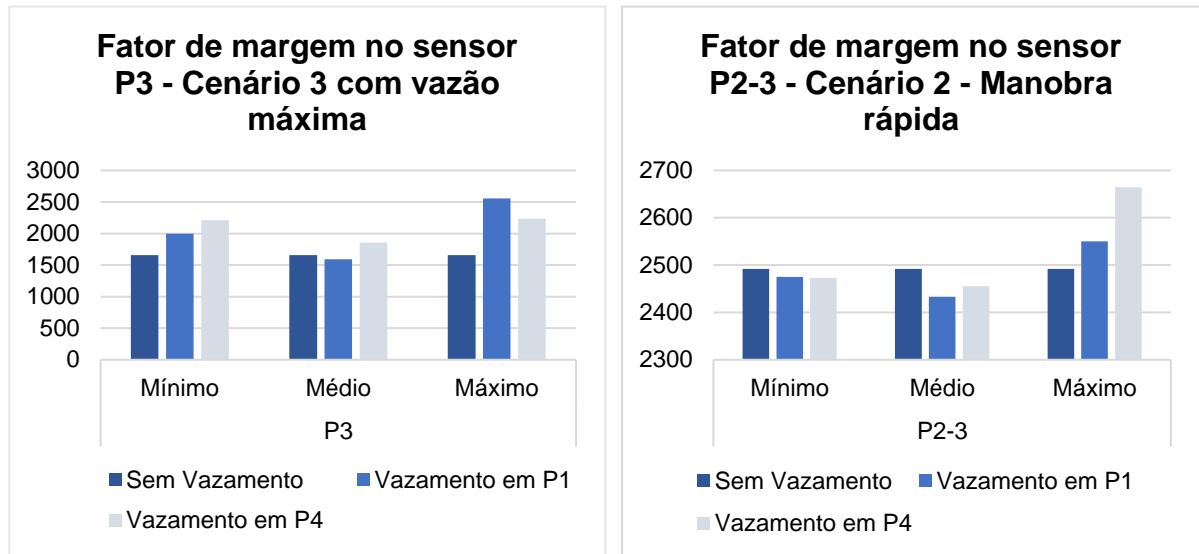
- Fator de margem

O fator de margem avalia a relação entre picos espectrais e níveis médios de energia. No modelo computacional representativo do sistema laboratorial (cenário 2), observou-se um comportamento inconsistente: nos casos de vazamentos mínimos, o maior valor da métrica ocorreu na condição sem vazamento, seguido pelos vazamentos em P1 e P4. Entretanto, para o vazamento máximo, o padrão se inverteu, apresentando o maior valor para o vazamento em P4. Além disso, ao comparar vazamentos de diferentes magnitudes em um mesmo ponto, não foi identificado um padrão claro — apenas que o vazamento máximo apresentou valores mais elevados da métrica em relação aos vazamentos médio e mínimo.

No cenário 3 (experimental em laboratório), verificou-se que, para a manobra D, a métrica tende a apresentar valores mais altos quando há vazamento em P1 ou P4, em comparação à condição sem vazamento. De modo geral, o fator de margem foi quase sempre maior nos casos com vazamento, seguindo tendência semelhante à observada para o vazamento máximo no cenário 2.

A Figura 55 compara os cenários 2 (computacional) e 3 (experimental) para os sensores P2-3 e P3, respectivamente. Observa-se o padrão descrito: no cenário experimental, a métrica tende a aumentar na presença de vazamentos, enquanto no cenário computacional isso ocorre apenas para o vazamento de maior magnitude. Contudo, no caso experimental, a variação da métrica não acompanha diretamente a magnitude do vazamento, sendo possível observar valores mais altos para vazamentos mínimos do que para médios, por exemplo.

Figura 55: Métrica fator de margem para o cenário 2 e 3 (Manobra D)



Fonte: AUTOR

A análise das métricas no domínio da frequência revelou cenários e padrões semelhantes aos observados no domínio do tempo. A métrica energia total apresentou comportamento próximo ao RMS do domínio do tempo, reforçando que métricas baseadas em energia são consistentes e eficazes para identificar determinadas características de vazamentos. Já os fatores de crista, forma e impulso mostraram resultados semelhantes entre si, permitindo em alguns casos discriminar diferenças entre cenários, mas no geral poucos padrões robustos foram observados. Por fim, o fator de margem exibiu um padrão característico no cenário experimental com maiores métricas em condições de vazamentos.

#### 5.4.3 Síntese das métricas

Dada a ampla variedade de métricas analisadas neste estudo, elaborou-se uma tabela de síntese que reúne os principais resultados obtidos. Nela, são destacados os principais comportamentos observados nas métricas em cada domínio (tempo e frequência), bem como as contribuições para a detecção de vazamentos. O Quadro 7 permite identificar quais métricas se mostraram mais sensíveis a determinadas condições, fornecendo uma visão consolidada das potencialidades e limitações de cada análise. Cada métrica foi classificada seguindo o seu potencial uso na detecção de vazamento, sendo divididas entre ruim, raramente, parcialmente e bom. Assim, a tabela oferece um guia para aplicações futuras em contextos experimentais e computacionais análogos.

**Quadro 7: Resumo dos resultados das métricas e seu nível de aplicabilidade**

<b>Métrica analisada</b>	<b>Síntese</b>	<b>Uso na detecção de vazamentos?</b>
Valor médio	<p>-Nos Cenários 2 e 3, o valor médio manteve padrão consistente nos casos sem vazamento, com pressões crescentes de P1 a P4 (efeito de cotas e perdas de carga).</p> <p>-Experimentalmente, nos vazamentos médios e máximos, o ponto do vazamento apresentou os menores valores de pressão, devido ao arranjo de vazamento experimental.</p> <p>-No Cenário 1, o sensor P2 registrou valor médio superior a P1, devido à maior distância das tubulações até a válvula. Contudo, com vazamento máximo em V1, o maior valor médio foi em P1 (não mais em P2).</p>	Raramente
Entropia	<p>-A entropia foi mais elevada nos casos com vazamento (independentemente da magnitude ou posição) no experimento e também no Cenário 1. No Cenário 2, esse comportamento ocorreu apenas para o vazamento máximo, ainda que em menor intensidade.</p> <p>-Na manobra rápida do Cenário 2, o vazamento máximo gerou os maiores valores de entropia, superando inclusive o caso sem vazamento.</p> <p>-Vazamentos de menor magnitude não ultrapassaram a desordem característica do cenário sem vazamento.</p>	Parcialmente
Coefficiente de assimetria	<p>-Com vazamentos, houve poucos padrões nos cenários.</p> <p>-No Cenário 3, com vazão máxima e vazamento médio ou máximo, o menor valor de assimetria ocorreu no ponto do vazamento (principalmente em P4), mas também devido ao arranjo de vazamento experimental.</p> <p>-Nos Cenários 1 e 2, o maior valor de assimetria foi associado a vazamentos máximos em manobras rápidas e a vazamentos mínimos em manobras lentas, indicando que a intensidade da manobra dificulta na identificação dos vazamentos.</p>	Ruim
Curtose	<p>-Os valores médios de curtose para cada cenário de manobra aumentam na presença de vazamentos, sendo maior quando o vazamento se localiza em P4.</p> <p>- No cenário 2 a curtose média alcança valores mais altos nos cenários com vazamento máximo, tanto o vazamento em P1 quanto em P4.</p>	Bom
Valor máximo, mínimo e amplitude total	<p>-Nos modelos computacionais, essas métricas foram maiores nos cenários sem vazamento e diminuíram progressivamente com o aumento da magnitude do vazamento.</p> <p>-Diferenças pontuais surgiram no cenário real devido à influência direta do vazamento sobre os sensores no mesmo ponto.</p>	Parcialmente

Métrica analisada	Síntese	Uso na detecção de vazamentos?
RMS	<p>-Tendência geral de maiores valores no cenário sem vazamento; redução progressiva conforme o aumento a magnitude do vazamento.</p> <p>-Influência da posição e da manobra no cenário 2: valores ligeiramente mais altos quando o vazamento ocorreu em P4 e a manobra foi lenta.</p> <p>-Redução gradual do RMS de P1 até P4, tanto experimental quanto computacional.</p>	Bom
Energia total	-Semelhante ao RMS no domínio do tempo.	Bom
Fatores de crista, forma e impulso	<p>-Manobras lentas com valores das métricas inferiores às rápidas nos modelos computacionais.</p> <p>-No cenário 2 vazamentos em P4 obtiveram maiores valores das métricas.</p> <p>-As métricas são mais sensíveis à intensidade do vazamento quando ele é elevado, mas podem apresentar inversões ou reduções inesperadas em condições de menor vazamento.</p>	Parcialmente
Fator de margem	<p>-No cenário 2 foi visto um comportamento inconsistente, mas o vazamento máximo apresentou valores mais elevados da métrica em relação aos vazamentos médio e mínimo.</p> <p>-Experimentalmente, verificou-se que a métrica tende a apresentar valores mais altos quando há vazamento em P1 ou P4, em comparação à condição sem vazamento.</p>	Parcialmente

Fonte: AUTOR

## 5.5 Discussão sobre as Limitações

As diferenças observadas entre o modelo computacional e o sistema experimental podem ser atribuídas tanto a aspectos físicos do arranjo laboratorial, como a presença das curvas de 180° e a posição dos sensores após o ponto de vazamento, quanto a variações qualitativas nas medições. Esses fatores resultaram em divergências pontuais entre os dois modelos, especialmente em relação à amplitude e ao comportamento das ondas de pressão.

O arranjo experimental adotado para a simulação de vazamentos causou alterações significativas nas métricas e nos gráficos dos sensores próximos ao ponto de vazamento. Esses resultados refletem adequadamente o impacto físico do vazamento sobre a pressão local, mas contribuem menos para a sua detecção, uma vez que o

sinal é fortemente influenciado pela posição do sensor em relação ao ponto de vazamento.

No caso das diferenças associadas às curvas de 180° presentes no sistema real, observou-se um aumento geral na amplitude e maior variação nos espectros de frequência. Isso evidencia a influência da geometria da tubulação na propagação e reflexão das ondas de pressão, em contraste com os cenários computacionais que simulam trechos retilíneos.

De modo geral, as análises dos sensores intermediários e dos padrões médios das métricas mostraram-se mais consistentes, mitigando parte das limitações impostas pela configuração experimental. Quanto às curvas, a comparação entre os cenários real e computacional permitiu compreender de forma mais ampla o comportamento do sistema frente às descontinuidades, destacando diferenças relevantes que podem auxiliar no aprimoramento de futuras modelagens e na interpretação de sinais transitórios em condições reais.

## 6 CONCLUSÕES

O estudo realizado reforça a relevância da análise de transitórios hidráulicos como ferramenta para a detecção de vazamentos em sistemas de abastecimento de água, especialmente em adutoras. As investigações desenvolvidas em modelos computacionais e no sistema experimental permitiram comparar diferentes cenários e identificar padrões consistentes tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, demonstrando o potencial dessas abordagens na compreensão do comportamento hidráulico frente à ocorrência de perdas de água.

Análises com vazamentos em menores magnitudes, em todos os cenários, demonstraram maior dificuldade na detecção se comparado com magnitudes maiores. Isso demonstra o contínuo problema apresentado nas redes de distribuição de água na dificuldade de detecção de pequenos vazamentos.

Apesar disso, as análises gráficas e métricas evidenciaram que indicadores baseados em energia, como o RMS e a energia total, são particularmente eficazes para identificar alterações no sistema, enquanto outras métricas contribuem para diferenciar condições específicas de vazamento. Métricas como a entropia e curtose apresentaram valores maiores em casos com vazamento do que sem vazamentos tanto computacionalmente quanto experimentalmente, além disso, a curtose no cenário 3 apresentou maiores valores com vazamentos mais próximos a geração da manobra hidráulica.

As semelhanças observadas entre os cenários simulados e experimentais validam as técnicas empregadas, ainda que algumas diferenças tenham sido registradas em função das particularidades do arranjo físico do sistema laboratorial.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam que a combinação de simulações numéricas e ensaios experimentais fornece uma visão abrangente e complementar, permitindo maior confiabilidade na caracterização de vazamentos. Assim, este trabalho contribui para o avanço do uso de transitórios hidráulicos na área, apontando caminhos para o aprimoramento de métodos de detecção aplicáveis tanto em estudos acadêmicos quanto em contextos práticos de operação de redes de abastecimento.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos e nas limitações observadas ao longo deste estudo, algumas recomendações são propostas para o aprimoramento de pesquisas futuras e para a aplicação prática das técnicas de detecção de vazamentos baseadas em transitórios hidráulicos.

Primeiramente, recomenda-se a realização de novos experimentos com diferentes geometrias de tubulação, incluindo trechos retos e ramificados, de modo a avaliar com maior precisão a influência das descontinuidades, tais como curvas, conexões e derivações, na propagação e reflexão das ondas de pressão e seus resultados no domínio da frequência. A inclusão de sistemas com pontos de medição de pressão anteriores e após o vazamento também é sugerida, evitando o posicionamento junto ao sensor de pressão a fim de aprimorar o método.

Além disso, a automatização do processo de abertura e fechamento das válvulas pode reduzir os erros associados à operação manual, garantindo maior reprodutibilidade e confiabilidade dos resultados. A implementação de controladores eletrônicos ou válvulas motorizadas permitiria testar variações de manobra com maior precisão, minimizando as incertezas observadas nas análises experimentais.

Por fim, do ponto de vista numérico, é recomendável a ampliação do modelo computacional para contemplar geometrias mais complexas e diferentes condições de contorno, permitindo maior aproximação com a realidade dos sistemas de distribuição. Além de melhoria no modelo hidráulico em relação a fatores de tensão e deformação da tubulação e de relações fluido estrutura, de maneira a abranger aspectos mais realistas do que é visto em laboratório.

## REFERÊNCIAS

AL-WASHALI, Taha; SHARMA, Saroj; KENNEDY, Maria. Methods of assessment of water losses in water supply systems: a review. *Water Resources Management*, v. 30, n. 14, p. 4985–5001, 2016. DOI: 10.1007/s11269-016-1503-7.

AL-WASHALI, Taha *et al.* Assessment of water losses in distribution networks: methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 152, 104515, 2020. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104515.

ARREGUI, Francisco J. *et al.* Calculation proposal for the economic level of apparent losses (ELAL) in a water supply system. *Water*, v. 10, n. 12, 2018. DOI: 10.3390/w10121750.

ASADA, Yohei *et al.* Transient damping method for narrowing down leak location in pressurized pipelines. *Hydrological Research Letters*, v. 14, n. 1, p. 41–47, 2020. DOI: 10.3178/hrl.14.41.

ASLAM, H. *et al.* Detection of leaks in water distribution system using non-destructive techniques. In: IOP CONFERENCE SERIES: EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCE, 2018. *Bristol: IOP Publishing*, 2018. v. 140, 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/140/1/012004.

BÁGGIO, Mário Augusto (org.). *Redução de perdas em sistemas de abastecimento de água*. 2. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2014. Disponível em: [http://www.funasa.gov.br/site/wpcontent/files\\_mf/reducao\\_de\\_perdas\\_em\\_saa74.pdf](http://www.funasa.gov.br/site/wpcontent/files_mf/reducao_de_perdas_em_saa74.pdf). Acesso em: 15 maio 2025.

BARROS, Daniel *et al.* Leak detection and localization in water distribution systems via multilayer networks. *Water Research X*, v. 26, 100280, 2025. DOI: 10.1016/j.wroa.2024.100280.

BENTLEY SYSTEMS, INCORPORATED. *OpenFlows HAMMER*. [Software]. [S. l.]: Bentley Systems, [s.d.]. Disponível em: <https://www.bentley.com/software/openflows-hammer/>. Acesso em: 15 maio 2025.

BOASHASH, Boualem. *Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference*. San Diego: Academic Press, 2016.

BRUNONE, B.; FERRANTE, M. Detecting leaks in pressurized pipes by means of transients. *Journal of Hydraulic Research*, v. 39, n. 5, p. 539–547, 2001.

BRUNONE, Bruno *et al.* A review of physical experiments for leak detection in water pipes through transient tests for addressing future research. *Journal of Hydraulic Research*, v. 60, n. 6, p. 894–906, 2022.

CAESARENDRA, Wahyu; TJAHHJOWIDODO, Tegoeh. A review of feature extraction methods in vibration-based condition monitoring and its application for degradation trend estimation of low-speed slew bearing. *Machines*, v. 5, n. 4, p. 21, 2017. DOI: 10.3390/machines5040021.

CAMPOS, Diego Perazzo Creazzola. *Aquisição e processamento de sinais de vibração em redes de distribuição de água para detecção de vazamentos*. 2025. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2025.

CHAN, T. K.; CHIN, C. S.; ZHONG, X. Review of current technologies and proposed intelligent methodologies for water distributed network leakage detection. *IEEE Access*, v. 6, p. 78846–78867, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2883115.

CHANAKA. Signal processing basics. *Medium*, 21 jun. 2024. Disponível em: <https://medium.com/@ChanakaDev/signal-processing-basics-67a06d9ff92f>. Acesso em: 15 jan. 2025.

CHAUDHRY, M. H. *Applied hydraulic transients*. 2. ed. New York: Springer, 2014.

CHE, Tong-Chuan; DUAN, Huan-Feng; LEE, Pedro J. Transient wave-based methods for anomaly detection in fluid pipes: a review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 160, 107874, 2021. DOI: 10.1016/j.ymssp.2021.107874.

COVAS, Dídia; RAMOS, Helena. Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis. *Journal of Water Resources Planning and*

*Management*, v. 136, n. 2, p. 248–257, 2010. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:2(248).

DE SILVA, D.; MASHFORD, J.; BURN, S. *Computer aided leak location and sizing in pipe networks*. Technical Report n. 17. City East, QLD: Urban Water Security Research Alliance, 2011. 27 p.

DYNAMOX. Métricas de análise de vibração: curtose e skewness. 2023. Disponível em: <https://dynamox.net/blog/metricas-de-analise-de-vibracao-curtose-e-skewness>. Acesso em: 16 jan. 2025.

EL-ZAHAB, Samer; ZAYED, Tarek. Leak detection in water distribution networks: an introductory overview. *Smart Water*, v. 4, n. 5, 2019. DOI: 10.1186/s40713-019-0017-x.

FARAH, E.; SHAHROUR, I. Water leak detection: a comprehensive review of methods, challenges, and future directions. *Water*, v. 16, 2975, 2024. DOI: 10.3390/w16202975.

FERRANTE, M. *et al.* Numerical transient analysis of random leakage in time and frequency domains. *Civil Engineering and Environmental Systems*, v. 33, n. 1, p. 70–84, 2016. DOI: 10.1080/10286608.2016.1138941.

FERRANTE, M. *et al.* Wavelets for the analysis of transient pressure signals for leak detection. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 11, p. 1274–1282, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:11(1274).

FRAUENDORFER, R.; LIEMBERGER, R. *The issues and challenges of reducing non-revenue water*. Mandaluyong: Asian Development Bank, 2010.

GHIDETTI, A. J.; LUVIZOTTO, E. J. Eficácia do método das vazões mínimas noturnas para diagnosticar as perdas de água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013. Anais [S. l.]: ABRH, 2013.

GOMEZ, Bernabe; KADRI, Usama. Earthquake source characterization by machine learning algorithms applied to acoustic signals. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, 23062, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-02483-w.

GONG, J.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R.; ZECCHIN, A. C. Single-event leak detection in pipeline using first three resonant responses. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 139, n. 6, p. 645–655, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000708.

GOULET, J.; COUTU, S.; SMITH, I. Model falsification diagnosis and sensor placement for leak detection in pressurized pipe networks. *Advanced Engineering Informatics*, v. 27, n. 2, p. 261–269, 2013. DOI: 10.1016/j.aei.2013.01.001.

GRZYWACZ, Norberto M. Perceptual complexity as normalized Shannon entropy. *Entropy*, v. 27, n. 2, p. 166, 2025. DOI: 10.3390/e27020166.

GUAN, L. *et al.* A review on small-diameter pipeline inspection gauge localization techniques: problems, methods and challenges. In: *IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE*, 2019. Proceedings [S. l.]: IEEE, 2019.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (org.). *Abastecimento de água para consumo humano*. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. v. 1. ISBN 978-85-423-0185-4.

HONG KONG METROPOLITAN UNIVERSITY. DFT: computational complexity. 2015. Disponível em: <https://www.opentextbooks.org.hk/ditatopic/9757>. Acesso em: 9 jan. 2026.

HU, Zukang *et al.* Review of model-based and data-driven approaches for leak detection and location in water distribution systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 21, n. 7, p. 3282–3306, 2021. DOI: 10.2166/ws.2021.135.

HUNAIDI, O.; CHU, W.; WANG, A.; GUAN, W. Detecting leaks in plastic pipes. *Journal of the American Water Works Association*, v. 92, n. 2, p. 82–94, 2000.

INTEGRATED WATER RESOURCE MANAGEMENT. Documents produced under the Central Case Study Documentation Programme of the GoC, DFID funded, Water Resources Demand Management Assistance Project (2005–2010). [S. l.]: [s. n.], 2010.

Introdução ao software Octave e modulação em amplitude (AM). *Revista Antenna*, [s. d.]. Disponível em: <https://revistaantenna.com.br/introducao-ao-software-octave-e-modulacao-em-amplitude-am/8/>. Acesso em: 17 out. 2025.

JACOBSZ, S. W.; JAHNKE, S. I. Leak detection on water pipelines in unsaturated ground by discrete fibre optic sensing. *Structural Health Monitoring*, v. 19, n. 4, p. 1219–1236, 2020.

JANG, J.-G. et al. Vibration data feature extraction and deep learning-based preprocessing method for highly-accurate motor fault diagnosis. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2022. DOI: 10.1093/jcde/qwac128.

JENSEN, R. K. et al. Implementation and validation of a free open source 1D water hammer code. *Fluids*, v. 3, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids3030064>.

KAPUR, J. N.; KESAVAN, H. K. *Entropy optimization principles with applications*. San Diego: Academic Press, 1992.

KARNEY, B. W.; McINNIS, D. Transient analysis of water distribution systems. *Journal of the American Water Works Association*, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1990.tb06992.x>.

KERAMAT, A. et al. Transient-based leak detection in the frequency domain considering fluid–structure interaction and viscoelasticity. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020.

LAMBERT, A. Accounting for losses: the bursts and background concept. *Journal of the Institution of Water and Environmental Management*, v. 8, abr. 1994.

LI, J.; ZHANG, Z. Pipeline leakage localization method based on transient signal detection and data fusion from multi-sensor. *Journal of Hydroinformatics*, v. 26, n. 9, p. 2235–2250, 2024.

LI, R.; HUANG, H.; XIN, K.; TAO, T. A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 15, n. 3, p. 429–441, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2014.123>.

LIAO, Z. *et al.* Deep learning identifies leak in water pipeline system using transient frequency response. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 155, p. 355–365, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.033>.

LIEMBERGER, R.; WYATT, A. Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 19, n. 3, p. 831–837, 2019.

LIOU, C. P. Pipeline leak detection by impulse response extraction. *Journal of Fluids Engineering*, v. 120, n. 4, p. 833–838, 1998.

LYONS, R. G. *Understanding digital signal processing*. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.

LYSENKO, P. *et al.* Information complexity of time-frequency distributions of signals in detection and classification problems. *Entropy*, v. 27, n. 10, p. 998, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/e27100998>.

MA, L. *et al.* Signal processing techniques for detecting leakage in urban water supply pipelines: denoising and feature enhancement. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 162, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106670>.

MAGOSSI, J.; BARROS, A. A entropia de Shannon: uma abordagem axiomática. *REMAT: Revista Eletrônica de Matemática*, v. 7, n. 1, 2021. DOI: <https://doi.org/10.35819/remat2021v7i1id4756>.

MASHFORD, J.; DE SILVA, D.; BURN, S.; MARNEY, D. Leak detection in simulated water pipe networks using SVM. *Applied Artificial Intelligence*, v. 26, p. 429–444, 2012.

MENICONI, S. *et al.* Leak detection in a real transmission main through transient tests: deeds and misdeeds. *Water Resources Research*, v. 57, n. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020WR027838>.

MPESHA, W.; GASSMAN, S. L.; CHAUDHRY, M. H. Leak detection in pipes by frequency response method. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 127, n. 2, p. 134–147, 2001.

NEGM, A. *et al.* Review of leakage detection in water distribution networks. *In: International Conference on Hydroinformatics, 14., 2023. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1136/1/012052>.

NYQUIST, H. Certain topics in telegraph transmission theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 47, n. 2, p. 617–644, 1928.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Discrete-time signal processing*. 3. ed. Boston: Pearson, 2010.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H. *Sinais e sistemas*. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

PEZESHK, P. *Introduction to hydraulic transient analysis*. CHA, 2024. 42 slides. Disponível em: [https://cdn.ymaws.com/www.fsawwa.org/resource/resmgr/water\\_bugs\\_presentations/Intro\\_to\\_Hydraulic\\_Transient.pdf](https://cdn.ymaws.com/www.fsawwa.org/resource/resmgr/water_bugs_presentations/Intro_to_Hydraulic_Transient.pdf). Acesso em: 22 jan. 2025.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. *Digital signal processing: principles, algorithms, and applications*. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

PUUST, R.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D.; KOPPEL, T. A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, v. 7, n. 1, p. 25–45, 2010.

RAHMANSHAHI, M.; FATHI-MOGHADAM, M.; HAGHIGHI, A. Leak detection in viscoelastic pipeline using inverse transient analysis. *Journal of Water and Wastewater*, v. 29, n. 5, p. 85–97, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22093/wwj.2017.88886.2425>.

SERAFEIM, A. V. *et al.* Leakages in water distribution networks: estimation methods, influential factors, and mitigation strategies—A comprehensive review. *Water*, v. 16, n. 11, p. 1534, 2024.

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, v. 27, n. 3, p. 379–423, 1948. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.

SHANNON, C. E. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, v. 37, n. 1, p. 10–21, 1949. DOI: <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1949.232969>.

SMITH, S. W. *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. 2. ed. California: California Technical Publishing, 1999.

SOARES, A. K. et al. Leak detection by inverse transient analysis in an experimental PVC pipe system. *Journal of Hydroinformatics*, 2011.

SOUZA, R. G. M. *Otimização de manobras para localização de vazamentos em redes de distribuição de água: uma abordagem baseada em transitórios lentos*. 2025. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

STAFFORD, M.; WILLIAMS, N.; BRITAIN, G. *Pipeline leak detection study*. London: Bechtel Limited for the Health and Safety Executive, 1996. (Technical Report).

STEWART, I. What is crest factor and why is it important? *iZotope*, 2020. Disponível em: <https://www.izotope.com/en/learn/whatiscrestfactor.html?srsId=AfmBOoq6dATq11ayAzp4VvmhLqOsxaNulXZfdhlaLBWfgB0KuckvbbG>. Acesso em: 16 jan. 2025.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. *Fluid mechanics*. 6. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1975.

TRATA BRASIL; GO ASSOCIADOS. *Estudo de perdas de água de 2025: desafios na eficiência do saneamento básico no Brasil*. Brasília: SINISA – Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico, 2023.

TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de água*. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

TORRES, L. Location of leaks in pipelines using parameter identification tools. *arXiv*, 2014. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1406.5437>.

TULLIS, J. P. *Hydraulics of pipelines: pumps, valves, cavitation, transients*. New York: John Wiley & Sons, 1989. 266 p.

VIRTANEN, P. *et al.* SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, v. 17, p. 261–272, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>.

VITKOVSKÝ, J. P.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R.; LIGGETT, J. A. Experimental observation and analysis of inverse transients for pipeline leak detection. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 133, n. 6, p. 519–530, 2007.

VITKOVSKÝ, J. P.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R.; WANG, X. J. An experimental verification of the inverse transient technique. In: *CONFERENCE ON CIVIL ENGINEERING HYDRAULICS*. Hobart, Australia: Institution of Engineers, 2001.

VITKOVSKÝ, J. P.; LEE, P. J.; STEPHENS, M. L.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R. Leak and blockage detection in pipelines via an impulse response method. In: *PROCEEDINGS OF PEDS 2003: Pumps, Electromechanical Devices and Systems Applied to Urban Water Management*. Valencia, Spain, 2003.

WANG, S. *et al.* Application of distributed acoustic sensing technology in pipeline leakage monitoring. *Journal of Energy and Natural Resources*, v. 13, n. 2, p. 81–89, 2024. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.jenr.20241302.14>.

WANG, S. *et al.* Cumulative spectrum distribution entropy for rotating machinery fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 206, p. 110905, 2024.

WANG, X. J.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R.; LIGGETT, J. A.; VITKOVSKÝ, J. P. Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128, n. 7, p. 697–711, 2002.

WAQAR, M. *et al.* Pipeline leak detection using hydraulic transients and domain-guided machine learning. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 224, p. 111967, 2025.

WHITE, F. M. *Mecânica dos fluidos*. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2011.

WRIGHT, G. Nyquist theorem. *TechTarget*, 31 maio 2022. Disponível em: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/Nyquist-Theorem>. Acesso em: 23 maio 2025.

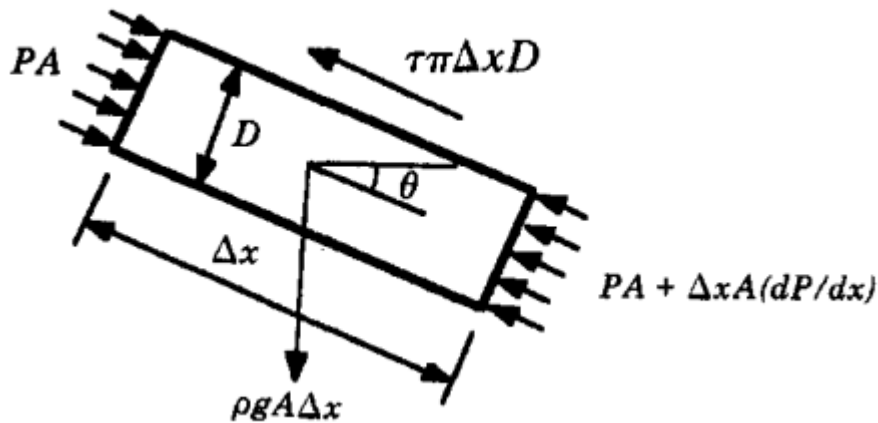
WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. *Fluid transients*. New York: McGraw-Hill, 1978. 384 p.

ZENG, W. *et al.* Paired-IRF method for detecting leaks in pipe networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 146, n. 5, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001201](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001201).

## APÊNDICE A – Equações do escoamento transiente

A Figura 56 é um diagrama de corpo livre mostrando as forças que atuam sobre um segmento cilíndrico de fluido para a demonstração da equação de quantidade de movimento no escoamento transitório (TULLIS, 1989).

Figura 56: Diagrama de corpo livre da seção do fluido



Fonte: TULLIS (1989)

Essas forças incluem: forças de pressão nas extremidades, forças de atrito na superfície externa e a força gravitacional. A equação de movimento aplicada na direção do escoamento, denominada eixo  $x$ , é apresentada na equação (26).

$$P \cdot A - \left( P + \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \Delta x \right) \cdot A - \tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x + \rho \cdot g \cdot A \cdot \Delta x \cdot \sin \theta = \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \frac{DV}{Dt} \quad (26)$$

Em que:

$P$  (Pa) = Pressão;

$A$  (m<sup>2</sup>) = Área;

$\Delta x$  (m) = Comprimento do segmento de fluido na direção  $x$ ;

$\tau$  (Pa) = Tensão de cisalhamento;

$D$  (m) = Diâmetro do cilindro;

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) = Massa específica do fluido;

$V$  (m/s) = Velocidade;

$t$  (s) = Tempo;

É comum que a tensão de cisalhamento no escoamento não permanente seja avaliada por meio das mesmas equações utilizadas para o escoamento permanente, sendo assim, pode-se expressar a perda de energia por atrito como perda de carga piezométrica no trecho (TULLIS, 1989). Essa relação pode ser desenvolvida considerando o  $\sin \theta$  igual a zero e aplicando a equação da continuidade na Figura 56.

$$(P_1 - P_2).A = \tau.\pi.D.\Delta x = \gamma.(H_1 - H_2).A \quad (27)$$

Sendo  $H$  a carga piezométrica em metros e  $\gamma$  a massa específica em kg/m<sup>3</sup>.

Substituindo a equação (28) de Darcy-Weisbach na equação (27), (sendo  $f$  o fator de atrito e  $L$  o comprimento em metros), e reorganizando o termo de tensão de cisalhamento na equação (26)(29), temos a relação apresentada na equação (29).

$$(H_1 - H_2) = \frac{f.L.V^2}{2.g.D} = \frac{f.\Delta x.V.|V|}{2.g.D} \quad (28)$$

$$\tau.\pi.D = \frac{\rho.f.V.|V|.A}{2.D} \quad (29)$$

Sendo assim dividindo a equação (26) por  $\rho.A$ , substituindo na equação (29) e expandindo a derivada total de  $V$ , tem-se a equação (30).

$$\frac{\partial P}{\rho.\partial x} + \frac{f.V.|V|}{2.D} - g.\sin \theta + \frac{\partial V}{\partial x}.\frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (30)$$

Por fim, utilizando a carga piezométrica como  $H = \frac{P}{\gamma} + Z$  como simplificação para uso com líquidos, obtém-se a equação (31) que é uma das equações diferenciais para o regime transitório.

$$g \cdot \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{f \cdot V \cdot |V|}{2 \cdot D} + \frac{V \cdot \partial V}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (31)$$

Segundo Tullis (1989), a lei de conservação de massa aplicada a um volume de controle estabelece que o fluxo líquido de massa através de uma superfície de controle deve ser igual à taxa de variação da massa contida no interior desse volume ao longo do tempo. Na situação ilustrada na Figura 56, observa-se que o volume de controle — representado por uma pequena seção de tubo — pode sofrer variações tanto na área transversal quanto no comprimento em decorrência das variações de pressão. No desenvolvimento do equacionamento, essas deformações são consideradas pequenas, porém não desprezíveis, sendo incorporadas de forma linearizada.

Assim, para demonstrar a segunda equação do regime transitório tem-se que a equação de continuidade é expressa conforme a equação (32).

$$\rho \cdot A \cdot V - \left[ \rho \cdot A \cdot V + \frac{\partial(\rho \cdot A \cdot V)}{\partial x} \cdot dx \right] = \frac{\partial(\rho \cdot A \cdot dx)}{\partial t} \quad (32)$$

Após expandir e reorganizar resulta-se na equação (33).

$$\frac{1}{A} \cdot \left( \frac{\partial A}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (33)$$

Os dois primeiros termos entre parênteses são as derivadas totais de  $A$  e  $\rho$  em relação ao tempo, então a equação se reduz conforme a equação (34).

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (34)$$

Com isso o primeiro termo dessa equação pode ser alterado com as propriedades estruturais do tubo e demonstrado na sua forma diferencial, como apresentado por TULLIS (1989). Além disso o segundo termo da equação (34) pode ser expresso em termos do módulo de elasticidade volumétrico (equação (35)). Com isso o equacionamento resultante está apresentado na equação (36).

$$K = \frac{dP}{\frac{d\rho}{\rho}} \quad (35)$$

$$\frac{dH}{dt} \cdot \left( \frac{1 + \frac{K.D}{e.E}}{\frac{K}{\rho}} \right) + \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (36)$$

Em que  $K$  é o módulo de elasticidade volumétrico em Pascal,  $e$  é a espessura da parede do tubo em metros e  $E$  é o módulo de elasticidade do material do tubo em Pascal.

Por fim, ao aplicar a equação (37), que representa a velocidade da onda conforme TULLIS (1989), na equação (36), obtém-se a segunda equação parcial do escoamento transitório, como mostrado na equação (38).

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K.D}{E.e}}} \quad (37)$$

$$V \cdot \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial V}{\partial X} = 0 \quad (38)$$

## APÊNDICE B – Métricas calculadas

### Cenário 1

<b>Sem Vazamento (Manobra Rápida)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	68,46	11,529272	0,983	3,718	113,59	40,93
<b>P2</b>	70,49	11,499787	0,558	0,003	118,05	38,63
<b>P3</b>	-2,89	-	2,062	2,820	36,78	-9,98
<b>P4</b>	-0,65	-	2,324	7,631	34,55	-9,98
<b>Sem Vazamento (Manobra Lenta)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	64,13	11,532991	0,019	-0,729	89,31	48,18
<b>P2</b>	64,34	11,495449	0,377	-0,824	106,11	39,1
<b>P3</b>	1,63	-	0,753	-0,924	33,23	-9,98
<b>P4</b>	1,33	-	1,369	3,152	27,1	-9,98
<b>Com Vazamento Máximo em V1 (Manobra Rápida)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	48,78	11,540407	1,269	7,841	74,69	34,39
<b>P2</b>	47,91	11,527864	1,076	3,600	77,23	23,98
<b>P3</b>	-2,63	-	1,728	1,827	43,18	-9,98
<b>P4</b>	-0,92	-	1,539	4,097	32,18	-9,98
<b>Com Vazamento Máximo em V1 (Manobra Lenta)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	45,29	11,535911	-0,526	-0,824	59,97	34,39
<b>P2</b>	42,43	11,505799	-0,330	-0,474	66,16	23,98
<b>P3</b>	-0,17	-	0,888	-0,448	26,56	-9,98
<b>P4</b>	0,43	-	1,375	4,316	24,17	-9,98
<b>Com Vazamento Máximo em V2 (Manobra Rápida)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	64,67	11,520981	1,015	3,719	114,88	33,41
<b>P2</b>	66,86	11,477919	0,520	-0,125	120,03	30,6
<b>P3</b>	-2,62	-	1,799	3,640	33,59	-9,98
<b>P4</b>	-0,70	-	0,981	4,215	29,03	-9,98
<b>Com Vazamento Máximo em V2 (Manobra Lenta)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	60,43	11,530724	0,028	-0,755	85,11	44,26
<b>P2</b>	60,56	11,481889	0,340	-0,892	103,61	33,75
<b>P3</b>	-0,15	-	0,418	-1,013	16,97	-9,81
<b>P4</b>	0,08	-	0,363	0,844	20,44	-9,98

<b>Com Vazamento Mínimo em V1 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>	
<b>P1</b>	65,94	11,528621	0,826	3,603	108,98	37,31	
<b>P2</b>	67,74	11,496893	0,412	-0,184	112,03	35,93	
<b>P3</b>	-2,94	-	2,091	2,971	56,03	-9,98	
<b>P4</b>	-0,66	-	2,392	8,281	54,35	-9,98	
<b>Com Vazamento Mínimo em V1 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>	
<b>P1</b>	61,75	11,533036	0,016	-0,734	85,69	46,5	
<b>P2</b>	61,70	11,493936	0,331	-0,905	101,18	37,25	
<b>P3</b>	1,37	-	0,755	-0,909	32,82	-9,98	
<b>P4</b>	1,22	-	1,426	3,503	27,01	-9,98	
<b>Com Vazamento Mínimo em V2 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>	
<b>P1</b>	67,92	11,528200	0,991	3,720	113,81	39,73	
<b>P2</b>	69,97	11,496980	0,552	-0,017	118,37	37,36	
<b>P3</b>	-3,24	-	2,005	2,628	33,83	-9,98	
<b>P4</b>	-0,78	-	2,271	7,485	33,99	-9,98	
<b>Com Vazamento Mínimo em V2 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>	
<b>P1</b>	63,61	11,532685	0,021	-0,732	88,77	47,62	
<b>P2</b>	63,79	11,493618	0,373	-0,834	105,8	38,33	
<b>P3</b>	1,07	-	0,664	-1,194	26,83	-9,98	
<b>P4</b>	1,10	-	1,312	3,051	24,89	-9,98	
<b>Sem Vazamento (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	72,66	69,528	19043,054	38,42996	19,091	733,7	669,6
<b>P2</b>	79,42	73,008	20599,284	38,04541	17,752	675,4	647,2
<b>P3</b>	46,76	13,266	368,642	17,52431	3,540	62,0	28,4
<b>P4</b>	44,53	7,889	125,305	12,74470	2,165	27,6	11,7
<b>Sem Vazamento (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	41,13	64,934	16659,424	38,48934	25,558	983,7	906,6
<b>P2</b>	67,01	66,799	17202,360	37,99538	22,705	862,7	836,1
<b>P3</b>	43,21	13,002	343,442	21,09679	5,566	117,4	48,6
<b>P4</b>	37,08	7,083	103,883	15,75506	3,537	55,7	19,8

<b>Com Vazamento Máximo em V1 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	40,3	49,157	9592,030	38,58118	21,387	825,1	608,5
<b>P2</b>	53,25	48,701	9333,454	38,40990	18,191	698,7	515,6
<b>P3</b>	53,16	12,850	344,063	17,83667	3,234	57,7	26,3
<b>P4</b>	42,16	7,580	116,602	12,56788	1,917	24,1	10,4
<b>Com Vazamento Máximo em V1 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	25,58	45,750	8287,848	38,53235	25,998	1001,8	742,8
<b>P2</b>	42,18	43,678	7416,110	38,16431	21,305	813,1	562,6
<b>P3</b>	36,54	10,698	228,964	23,99726	5,331	127,9	46,1
<b>P4</b>	34,15	5,516	61,236	18,41081	3,233	59,5	18,7
<b>Com Vazamento Máximo em V2 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	81,47	66,051	17088,955	38,31774	18,115	694,1	654,6
<b>P2</b>	89,43	70,217	18802,289	37,77098	16,726	631,8	622,8
<b>P3</b>	43,57	8,686	164,584	18,10250	3,240	58,7	23,0
<b>P4</b>	39,01	3,405	24,167	16,10677	2,011	32,4	9,3
<b>Com Vazamento Máximo em V2 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	40,85	61,277	14813,947	38,45990	25,283	972,4	872,8
<b>P2</b>	69,86	63,410	15375,681	37,82782	22,056	834,3	788,9
<b>P3</b>	26,78	7,145	102,158	26,24854	5,027	131,9	41,5
<b>P4</b>	30,42	2,758	15,226	24,35298	3,333	81,2	17,4
<b>Com Vazamento Mínimo em V1 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	71,67	66,981	17668,191	38,42428	19,350	743,5	674,3
<b>P2</b>	76,1	70,257	19049,672	38,01724	17,760	675,2	639,2
<b>P3</b>	66,01	13,183	364,895	17,46161	3,312	57,8	26,7
<b>P4</b>	64,33	7,627	117,207	13,08404	2,059	26,9	11,3
<b>Com Vazamento Mínimo em V1 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	39,19	62,517	15442,942	38,48996	25,572	984,3	891,3
<b>P2</b>	63,93	64,112	15833,452	37,97892	22,357	849,1	790,3
<b>P3</b>	42,8	12,665	324,601	21,54111	5,528	119,1	48,8
<b>P4</b>	36,99	7,018	101,471	15,75923	3,273	51,6	18,3

Com Vazamento Mínimo em V2 (Manobra Rápida)							
	Amplitude Total	RMS	Energia Total	Fator de crista	Fator de forma	Fator de impulso	Fator de margem
P1	74,08	69,027	18755,615	38,41535	18,909	726,4	663,2
P2	81,01	72,602	20334,807	38,00956	17,571	667,9	640,9
P3	43,81	12,444	330,765	16,63674	3,360	55,9	25,3
P4	43,97	7,380	110,162	12,19151	2,193	26,7	11,0
Com Vazamento Mínimo em V2 (Manobra Lena)							
	Amplitude Total	RMS	Energia Total	Fator de crista	Fator de forma	Fator de impulso	Fator de margem
P1	41,15	64,411	16388,674	38,48534	25,521	982,2	901,8
P2	67,47	66,315	16934,610	37,97240	22,614	858,7	829,6
P3	36,81	11,904	285,730	21,30065	5,230	111,4	43,0
P4	34,87	6,512	87,229	15,56713	3,349	52,1	17,6

## Cenário 2

Sem Vazamento (Manobra Rápida)						
	Valor Médio	Entropia	Coef. de assimetria	Curtose	Valor Máximo	Valor Mínimo
P1	25,65	11,538177	-5,051	27,761	28,600	5,000
P2-3	25,36	11,538491	-5,407	30,353	27,412	4,698
P4	24,96	11,537838	-5,094	27,885	27,766	4,298
Sem Vazamento (Manobra Lenta)						
	Valor Médio	Entropia	Coef. de assimetria	Curtose	Valor Máximo	Valor Mínimo
P1	21,51	11,438500	-1,186	-0,326	27,021	5,000
P2-3	21,21	11,434780	-1,187	-0,324	26,742	4,698
P4	20,81	11,429471	-1,188	-0,322	26,353	4,298
Com Vazamento Máximo em 1 (Manobra Rápida)						
	Valor Médio	Entropia	Coef. de assimetria	Curtose	Valor Máximo	Valor Mínimo
P1	11,22	11,540716	-5,711	34,644	11,496	2,414
P2-3	10,92	11,540478	-5,681	34,270	11,196	2,113
P4	10,52	11,539802	-5,648	33,806	10,803	1,712
Com Vazamento Máximo em 1 (Manobra Lenta)						
	Valor Médio	Entropia	Coef. de assimetria	Curtose	Valor Máximo	Valor Mínimo
P1	9,18	11,433057	-0,997	-0,775	11,479	2,414
P2-3	8,89	11,423907	-0,998	-0,771	11,179	2,113
P4	8,49	11,409604	-1,000	-0,768	10,779	1,712

<b>Com Vazamento Máximo em 4 (Manobra Rápida)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	9,52	11,542708	-6,110	39,845	9,771	2,407
<b>P2-3</b>	9,22	11,542298	-6,046	38,914	9,458	2,105
<b>P4</b>	8,82	11,541485	-5,990	38,061	9,056	1,704
<b>Com Vazamento Máximo em 4 (Manobra Lenta)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	7,89	11,450897	-1,014	-0,730	9,71	2,407
<b>P2-3</b>	7,59	11,441678	-1,014	-0,729	9,409	2,105
<b>P4</b>	7,19	11,427154	-1,015	-0,728	9,009	1,704
<b>Com Vazamento Médio em 1 (Manobra Rápida)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	19,16	11,536679	-4,941	25,523	19,915	3,376
<b>P2-3</b>	18,86	11,536471	-4,929	25,342	19,531	3,075
<b>P4</b>	18,47	11,535912	-4,907	25,073	19,182	2,674
<b>Com Vazamento Médio em 1 (Manobra Lenta)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	15,55	11,412023	-0,987	-0,795	19,758	3,376
<b>P2-3</b>	15,25	11,405651	-0,988	-0,793	19,458	3,075
<b>P4</b>	14,85	11,396261	-0,989	-0,791	19,058	2,674
<b>Com Vazamento Médio em 4 (Manobra Rápida)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	18,34	11,537418	-5,014	26,345	19,123	3,406
<b>P2-3</b>	18,04	11,537123	-4,997	26,091	18,712	3,104
<b>P4</b>	17,64	11,536496	-4,972	25,774	18,365	2,703
<b>Com Vazamento Médio em 4 (Manobra Lenta)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	14,92	11,417203	-0,989	-0,791	18,887	3,406
<b>P2-3</b>	14,62	11,410718	-0,990	-0,789	18,586	3,104
<b>P4</b>	14,22	11,401216	-0,990	-0,788	18,185	2,703
<b>Com Vazamento Mínimo em 1 (Manobra Rápida)</b>						
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>
<b>P1</b>	25,15	11,537868	-5,267	28,877	27,575	4,713
<b>P2-3</b>	24,86	11,537874	-5,361	29,487	26,424	4,412
<b>P4</b>	24,46	11,537433	-5,266	28,670	26,682	4,011

<b>Com Vazamento Mínimo em 1 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>	
<b>P1</b>	20,92	11,431532	-1,143	-0,441	26,275	4,713	
<b>P2-3</b>	20,63	11,427473	-1,144	-0,438	25,979	4,412	
<b>P4</b>	20,23	11,421654	-1,145	-0,436	25,593	4,011	
<b>Com Vazamento Mínimo em 4 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>	
<b>P1</b>	25,10	11,537866	-5,248	28,726	27,532	4,717	
<b>P2-3</b>	24,81	11,537868	-5,347	29,368	26,376	4,416	
<b>P4</b>	24,41	11,537415	-5,251	28,539	26,639	4,015	
<b>Com Vazamento Mínimo em 4 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Valor Médio</b>	<b>Entropia</b>	<b>Coef. de assimetria</b>	<b>Curtose</b>	<b>Valor Máximo</b>	<b>Valor Mínimo</b>	
<b>P1</b>	20,88	11,431547	-1,140	-0,446	26,222	4,717	
<b>P2-3</b>	20,58	11,427467	-1,141	-0,444	25,925	4,416	
<b>P4</b>	20,18	11,421627	-1,142	-0,442	25,537	4,015	
<b>Sem Vazamento (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	23,600	25,826	2650,113	38,59911	19,607	756,8	352,1
<b>P2-3</b>	22,714	25,524	2588,976	38,60376	19,979	771,2	355,5
<b>P4</b>	23,468	25,133	2509,511	38,59651	19,850	766,1	355,1
<b>Sem Vazamento (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	22,021	22,819	1966,343	37,56537	16,837	632,5	300,3
<b>P2-3</b>	22,044	22,541	1915,923	37,53455	16,711	627,3	296,2
<b>P4</b>	22,055	22,168	1849,207	37,49117	16,546	620,3	290,7
<b>Com Vazamento Máximo em 1 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	9,082	11,277	505,917	38,62436	20,499	791,8	241,8
<b>P2-3</b>	9,083	10,980	479,576	38,62228	20,363	786,5	236,0
<b>P4</b>	9,091	10,583	445,413	38,61665	20,052	774,3	227,6
<b>Com Vazamento Máximo em 1 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	9,065	9,786	360,203	37,48002	16,913	633,9	196,9
<b>P2-3</b>	9,066	9,507	338,729	37,40151	16,630	622,0	190,6
<b>P4</b>	9,067	9,136	311,059	37,28280	16,239	605,4	182,2

<b>Com Vazamento Máximo em 4 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	7,364	9,563	364,139	38,64300	21,057	813,7	228,3
<b>P2-3</b>	7,353	9,263	341,598	38,63926	20,865	806,2	221,6
<b>P4</b>	7,352	8,864	312,698	38,63226	20,490	791,6	212,5
<b>Com Vazamento Máximo em 4 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	7,303	8,339	263,546	37,64339	17,487	658,3	188,3
<b>P2-3</b>	7,304	8,055	244,946	37,56011	17,145	644,0	181,2
<b>P4</b>	7,305	7,679	221,275	37,43350	16,674	624,2	171,8
<b>Com Vazamento Médio em 1 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	16,539	19,304	1479,553	38,58546	19,734	761,5	307,0
<b>P2-3</b>	16,456	19,008	1434,360	38,58364	19,683	759,4	303,0
<b>P4</b>	16,508	18,612	1374,932	38,57898	19,498	752,2	296,8
<b>Com Vazamento Médio em 1 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	16,382	16,719	1042,457	37,29891	16,348	609,8	248,2
<b>P2-3</b>	16,383	16,443	1005,930	37,24724	16,185	602,8	243,6
<b>P4</b>	16,384	16,074	958,035	37,17268	15,963	593,4	237,3
<b>Com Vazamento Médio em 4 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	15,717	18,469	1354,743	38,59212	19,858	766,4	302,0
<b>P2-3</b>	15,608	18,171	1311,226	38,58952	19,793	763,8	297,6
<b>P4</b>	15,662	17,774	1254,243	38,58426	19,606	756,5	291,6
<b>Com Vazamento Médio em 4 (Manobra Lenta)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	15,481	16,008	957,679	37,34252	16,479	615,4	245,0
<b>P2-3</b>	15,482	15,730	922,392	37,28900	16,307	608,1	240,1
<b>P4</b>	15,482	15,360	876,350	37,21235	16,073	598,1	233,7
<b>Com Vazamento Mínimo em 1 (Manobra Rápida)</b>							
	<b>Amplitude Total</b>	<b>RMS</b>	<b>Energia Total</b>	<b>Fator de crista</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Fator de impulso</b>	<b>Fator de margem</b>
<b>P1</b>	22,862	25,326	2548,367	38,59773	19,779	763,4	352,4
<b>P2-3</b>	22,012	25,029	2488,901	38,59831	19,891	767,8	350,8
<b>P4</b>	22,671	24,635	2410,610	38,59413	19,749	762,2	346,8

Com Vazamento Mínimo em 1 (Manobra Lenta)							
	Amplitude Total	RMS	Energia Total	Fator de crista	Fator de forma	Fator de impulso	Fator de margem
P1	21,562	22,276	1867,891	37,49789	16,735	627,5	294,5
P2-3	21,567	21,998	1818,773	37,46462	16,611	622,3	290,4
P4	21,582	21,626	1753,874	37,41757	16,444	615,3	284,8
Com Vazamento Mínimo em 4 (Manobra Rápida)							
	Amplitude Total	RMS	Energia Total	Fator de crista	Fator de forma	Fator de impulso	Fator de margem
P1	22,815	25,276	2538,271	38,59758	19,766	762,9	351,9
P2-3	21,96	24,979	2478,877	38,59815	19,880	767,3	350,3
P4	22,624	24,584	2400,700	38,59388	19,747	762,1	346,6
Com Vazamento Mínimo em 4 (Manobra Lenta)							
	Amplitude Total	RMS	Energia Total	Fator de crista	Fator de forma	Fator de impulso	Fator de margem
P1	21,505	22,228	1859,853	37,49752	16,739	627,7	294,2
P2-3	21,509	21,950	1810,794	37,46403	16,614	622,4	290,1
P4	21,522	21,578	1746,009	37,41676	16,446	615,3	284,6

### Cenário 3

Manobra A - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	-	19,67	-	-	11,551166	-
	P2	-	19,37	-	-	11,551174	-
	P3	-	19,35	-	-	11,551174	-
	P4	-	19,25	-	-	11,551172	-
Médio	P1	-	16,19	-	-	11,543751	-
	P2	-	16,94	-	-	11,546274	-
	P3	-	16,92	-	-	11,546261	-
	P4	-	16,82	-	-	11,546193	-
Máximo	P1	-	0,90	-	-	9,792264	-
	P2	-	8,92	-	-	11,451639	-
	P3	-	8,87	-	-	11,450160	-
	P4	-	8,76	-	-	11,447177	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-	1,849	-	-	2,506	-
	P2	-	1,675	-	-	1,755	-
	P3	-	1,600	-	-	1,495	-
	P4	-	1,588	-	-	1,476	-
Médio	P1	-	1,431	-	-	0,850	-
	P2	-	1,005	-	-	-0,401	-

Manobra A - Vazão mínima							
	P3	-	1,007	-	-	-0,399	-
	P4	-	1,000	-	-	-0,412	-
Máximo	P1	-	6,451	-	-	40,089	-
	P2	-	1,476	-	-	1,376	-
	P3	-	1,476	-	-	1,378	-
	P4	-	1,479	-	-	1,401	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	-	20,20	-	-	19,52	-
	P2	-	19,84	-	-	19,23	-
	P3	-	19,81	-	-	19,20	-
	P4	-	19,71	-	-	19,11	-
Médio	P1	-	20,23	-	-	14,77	-
	P2	-	19,88	-	-	15,59	-
	P3	-	19,86	-	-	15,58	-
	P4	-	19,74	-	-	15,47	-
Máximo	P1	-	20,03	-	-	0,25	-
	P2	-	19,66	-	-	5,77	-
	P3	-	19,65	-	-	5,73	-
	P4	-	19,55	-	-	5,53	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	-	0,68	-	-	19,669	-
	P2	-	0,61	-	-	19,369	-
	P3	-	0,60	-	-	19,356	-
	P4	-	0,60	-	-	19,254	-
Médio	P1	-	5,46	-	-	16,275	-
	P2	-	4,29	-	-	16,997	-
	P3	-	4,28	-	-	16,981	-
	P4	-	4,28	-	-	16,881	-
Máximo	P1	-	19,78	-	-	2,981	-
	P2	-	13,89	-	-	9,591	-
	P3	-	13,92	-	-	9,553	-
	P4	-	14,02	-	-	9,455	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	-	3,484E+09	-	-	38,72900	-

Manobra A - Vazão mínima							
	P2	-	3,379E+09	-	-	38,72912	-
	P3	-	3,374E+09	-	-	38,72911	-
	P4	-	3,339E+09	-	-	38,72909	-
Médio	P1	-	2,373E+09	-	-	38,62534	-
	P2	-	2,593E+09	-	-	38,66180	-
	P3	-	2,588E+09	-	-	38,66162	-
	P4	-	2,557E+09	-	-	38,66069	-
Máximo	P1	-	4,365E+07	-	-	15,80888	-
	P2	-	7,723E+08	-	-	37,29332	-
	P3	-	7,654E+08	-	-	37,27225	-
	P4	-	7,482E+08	-	-	37,22980	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	-	37,069	-	-	1435,7	-
	P2	-	37,221	-	-	1441,5	-
	P3	-	37,225	-	-	1441,7	-
	P4	-	37,219	-	-	1441,5	-
Médio	P1	-	26,708	-	-	1031,6	-
	P2	-	28,960	-	-	1119,6	-
	P3	-	28,968	-	-	1120,0	-
	P4	-	28,889	-	-	1116,9	-
Máximo	P1	-	3,475	-	-	54,9	-
	P2	-	13,468	-	-	502,3	-
	P3	-	13,411	-	-	499,9	-
	P4	-	13,327	-	-	496,1	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão mínima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	-	53020,6	-
	P2	-	54858,7	-
	P3	-	55049,6	-
	P4	-	54856,2	-
Médio	P1	-	16991,5	-
	P2	-	19978,4	-
	P3	-	19984,2	-
	P4	-	19797,5	-
Máximo	P1	-	517,0	-
	P2	-	6043,9	-
	P3	-	6008,8	-
	P4	-	5952,8	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	-	13,82	-	-	10,966450	-
	P2	-	13,49	-	-	10,966481	-
	P3	-	13,46	-	-	10,966480	-
	P4	-	13,34	-	-	10,966474	-
Médio	P1	-	7,03	-	-	10,893039	-
	P2	-	8,63	-	-	10,921528	-
	P3	-	8,56	-	-	10,920763	-
	P4	-	8,44	-	-	10,919082	-
Máximo	P1	-	1,10	-	-	9,181783	-
	P2	-	7,35	-	-	10,913131	-
	P3	-	7,31	-	-	10,912232	-
	P4	-	7,20	-	-	10,910342	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-	-0,022	-	-	-0,906	-
	P2	-	0,616	-	-	-0,441	-
	P3	-	0,683	-	-	-0,380	-
	P4	-	0,306	-	-	-0,771	-
Médio	P1	-	1,315	-	-	0,874	-
	P2	-	0,826	-	-	-0,632	-
	P3	-	0,823	-	-	-0,634	-
	P4	-	0,820	-	-	-0,631	-
Máximo	P1	-	3,721	-	-	11,972	-
	P2	-	0,881	-	-	-0,391	-
	P3	-	0,879	-	-	-0,395	-
	P4	-	0,892	-	-	-0,366	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	-	14,11	-	-	13,57	-
	P2	-	13,70	-	-	13,33	-
	P3	-	13,69	-	-	13,31	-
	P4	-	13,54	-	-	13,17	-
Médio	P1	-	13,75	-	-	4,91	-
	P2	-	13,42	-	-	6,33	-
	P3	-	13,36	-	-	6,26	-
	P4	-	13,28	-	-	5,98	-
Máximo	P1	-	12,53	-	-	0,20	-
	P2	-	12,08	-	-	5,02	-

Manobra A - Vazão média							
	P3	-	12,04	-	-	4,96	-
	P4	-	11,83	-	-	4,85	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	-	0,54	-	-	13,823	-
	P2	-	0,37	-	-	13,486	-
	P3	-	0,38	-	-	13,461	-
	P4	-	0,37	-	-	13,340	-
Médio	P1	-	8,84	-	-	7,414	-
	P2	-	7,09	-	-	8,911	-
	P3	-	7,10	-	-	8,838	-
	P4	-	7,30	-	-	8,723	-
Máximo	P1	-	12,32	-	-	2,973	-
	P2	-	7,05	-	-	7,634	-
	P3	-	7,08	-	-	7,594	-
	P4	-	6,99	-	-	7,488	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	-	7,650E+08	-	-	31,62217	-
	P2	-	7,282E+08	-	-	31,62251	-
	P3	-	7,256E+08	-	-	31,62250	-
	P4	-	7,126E+08	-	-	31,62244	-
Médio	P1	-	2,090E+08	-	-	30,76739	-
	P2	-	3,082E+08	-	-	31,11673	-
	P3	-	3,030E+08	-	-	31,10831	-
	P4	-	2,948E+08	-	-	31,08976	-
Máximo	P1	-	2,012E+07	-	-	15,54103	-
	P2	-	2,249E+08	-	-	31,02150	-
	P3	-	2,224E+08	-	-	31,01160	-
	P4	-	2,159E+08	-	-	30,98991	-

Manobra A - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	-	30,298	-	-	958,1	-
	P2	-	30,866	-	-	976,1	-
	P3	-	30,872	-	-	976,2	-
	P4	-	30,750	-	-	972,4	-
Médio	P1	-	12,843	-	-	395,2	-
	P2	-	15,782	-	-	491,1	-

Manobra A - Vazão média							
	P3	-	15,703	-	-	488,5	-
	P4	-	15,492	-	-	481,6	-
Máximo	P1	-	4,341	-	-	67,5	-
	P2	-	14,891	-	-	461,9	-
	P3	-	14,822	-	-	459,7	-
	P4	-	14,661	-	-	454,3	-

Manobra A - Vazão média				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	-	32421,1	-
	P2	-	39601,3	-
	P3	-	40049,0	-
	P4	-	37752,9	-
Médio	P1	-	3998,9	-
	P2	-	5384,7	-
	P3	-	5330,9	-
	P4	-	5217,8	-
Máximo	P1	-	543,8	-
	P2	-	4701,4	-
	P3	-	4664,0	-
	P4	-	4570,8	-

Manobra A - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	-	5,16	-	-	10,731748	-
	P2	-	4,88	-	-	10,731883	-
	P3	-	4,78	-	-	10,731877	-
	P4	-	4,65	-	-	10,731936	-
Médio	P1	-	4,23	-	-	10,722058	-
	P2	-	4,50	-	-	10,727230	-
	P3	-	4,42	-	-	10,726987	-
	P4	-	4,27	-	-	10,726712	-
Máximo	P1	-	0,32	-	-	9,640947	-
	P2	-	3,49	-	-	10,715402	-
	P3	-	3,43	-	-	10,714485	-
	P4	-	3,30	-	-	10,712805	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-	0,110	-	-	-0,190	-
	P2	-	0,410	-	-	-0,371	-
	P3	-	0,394	-	-	-0,365	-

Manobra A - Vazão máxima							
	P4	-	0,117	-	-	-0,374	-
Médio	P1	-	1,421	-	-	1,050	-
	P2	-	0,577	-	-	-0,948	-
	P3	-	0,571	-	-	-0,962	-
	P4	-	0,591	-	-	-0,989	-
Máximo	P1	-	6,311	-	-	39,215	-
	P2	-	1,052	-	-	0,055	-
	P3	-	1,049	-	-	0,043	-
	P4	-	1,089	-	-	0,172	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	-	5,52	-	-	4,83	-
	P2	-	5,14	-	-	4,67	-
	P3	-	5,05	-	-	4,57	-
	P4	-	4,87	-	-	4,42	-
Médio	P1	-	5,66	-	-	3,68	-
	P2	-	5,35	-	-	4,02	-
	P3	-	5,25	-	-	3,92	-
	P4	-	5,02	-	-	3,78	-
Máximo	P1	-	5,30	-	-	0,11	-
	P2	-	4,97	-	-	2,85	-
	P3	-	4,92	-	-	2,80	-
	P4	-	4,73	-	-	2,74	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	-	0,69	-	-	5,162	-
	P2	-	0,47	-	-	4,883	-
	P3	-	0,48	-	-	4,782	-
	P4	-	0,45	-	-	4,655	-
Médio	P1	-	1,98	-	-	4,263	-
	P2	-	1,33	-	-	4,518	-
	P3	-	1,33	-	-	4,433	-
	P4	-	1,24	-	-	4,286	-
Máximo	P1	-	5,19	-	-	0,785	-
	P2	-	2,12	-	-	3,530	-
	P3	-	2,12	-	-	3,469	-
	P4	-	1,99	-	-	3,348	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	-	7,706E+07	-	-	29,15052	-
	P2	-	6,896E+07	-	-	29,15188	-
	P3	-	6,615E+07	-	-	29,15182	-
	P4	-	6,268E+07	-	-	29,15242	-
Médio	P1	-	5,220E+07	-	-	29,04794	-
	P2	-	5,887E+07	-	-	29,10431	-
	P3	-	5,665E+07	-	-	29,10183	-
	P4	-	5,296E+07	-	-	29,09897	-
Máximo	P1	-	1,038E+06	-	-	15,51366	-
	P2	-	3,563E+07	-	-	28,97913	-
	P3	-	3,439E+07	-	-	28,96946	-
	P4	-	3,199E+07	-	-	28,95129	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	-	25,610	-	-	746,6	-
	P2	-	26,220	-	-	764,4	-
	P3	-	26,196	-	-	763,7	-
	P4	-	27,055	-	-	788,7	-
Médio	P1	-	18,831	-	-	547,0	-
	P2	-	22,126	-	-	644,0	-
	P3	-	21,985	-	-	639,8	-
	P4	-	22,104	-	-	643,2	-
Máximo	P1	-	3,057	-	-	47,4	-
	P2	-	17,449	-	-	505,7	-
	P3	-	17,254	-	-	499,8	-
	P4	-	16,977	-	-	491,5	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra A - Vazão máxima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	-	9340,8	-
	P2	-	9529,0	-
	P3	-	9357,2	-
	P4	-	11738,4	-
Médio	P1	-	4277,6	-
	P2	-	5841,9	-
	P3	-	5729,6	-
	P4	-	5617,2	-
Máximo	P1	-	207,7	-
	P2	-	3475,0	-

Manobra A - Vazão máxima				
	P3	-	3396,8	-
	P4	-	3275,6	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	14,24	11,85	-	11,247374	11,195499	-
	P2	13,84	11,48	-	11,244912	11,189189	-
	P3	13,80	11,41	-	11,244329	11,187653	-
	P4	13,59	11,30	-	11,242878	11,184951	-
Médio	P1	14,24	5,30	-	11,247374	11,111248	-
	P2	13,84	6,49	-	11,244912	11,091076	-
	P3	13,80	6,42	-	11,244329	11,084829	-
	P4	13,59	6,29	-	11,242878	11,074417	-
Máximo	P1	14,24	8,11	-	11,247374	11,281736	-
	P2	13,84	2,21	-	11,244912	10,384675	-
	P3	13,80	2,15	-	11,244329	10,343314	-
	P4	13,59	1,80	-	11,242878	10,362877	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	0,373	0,591	-	-1,135	-0,878	-
	P2	0,376	0,595	-	-1,128	-0,876	-
	P3	0,374	0,596	-	-1,133	-0,875	-
	P4	0,372	0,597	-	-1,137	-0,876	-
Médio	P1	0,373	0,752	-	-1,135	-0,718	-
	P2	0,376	0,774	-	-1,128	-0,676	-
	P3	0,374	0,770	-	-1,133	-0,683	-
	P4	0,372	0,772	-	-1,137	-0,679	-
Máximo	P1	0,373	1,377	-	-1,135	0,642	-
	P2	0,376	1,109	-	-1,128	-0,270	-
	P3	0,374	1,114	-	-1,133	-0,259	-
	P4	0,372	1,117	-	-1,137	-0,250	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	20,19	20,22	-	9,40	6,29	-
	P2	19,81	19,86	-	9,00	5,93	-
	P3	19,79	19,82	-	8,96	5,86	-
	P4	19,55	19,73	-	8,71	5,72	-
Médio	P1	20,19	10,73	-	9,40	1,92	-

Manobra B - Vazão mínima							
	P2	19,81	13,58	-	9,00	2,52	-
	P3	19,79	13,53	-	8,96	2,44	-
	P4	19,55	13,45	-	8,71	2,35	-
	Máximo	P1	20,19	8,50	-	9,40	8,00
	P2	19,81	7,74	-	9,00	-0,03	-
	P3	19,79	7,67	-	8,96	-0,09	-
	P4	19,55	7,56	-	8,71	-0,44	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	10,79	13,93	-	14,647	12,609	-
	P2	10,81	13,93	-	14,260	12,265	-
	P3	10,83	13,96	-	14,221	12,204	-
	P4	10,84	14,01	-	14,015	12,108	-
Médio	P1	10,79	8,81	-	14,647	5,945	-
	P2	10,81	11,06	-	14,260	7,375	-
	P3	10,83	11,09	-	14,221	7,318	-
	P4	10,84	11,10	-	14,015	7,202	-
Máximo	P1	10,79	0,50	-	14,647	8,107	-
	P2	10,81	7,77	-	14,260	3,381	-
	P3	10,83	7,76	-	14,221	3,343	-
	P4	10,84	7,99	-	14,015	3,148	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	1,305E+09	9,361E+08	-	34,85801	34,23631	-
	P2	1,235E+09	8,824E+08	-	34,82872	34,16356	-
	P3	1,228E+09	8,729E+08	-	34,82185	34,14589	-
	P4	1,192E+09	8,579E+08	-	34,80479	34,11513	-
Médio	P1	1,305E+09	1,983E+08	-	34,85801	33,26704	-
	P2	1,235E+09	3,020E+08	-	34,82872	33,04672	-
	P3	1,228E+09	2,965E+08	-	34,82185	32,98316	-
	P4	1,192E+09	2,858E+08	-	34,80479	32,87515	-
Máximo	P1	1,305E+09	4,074E+08	-	34,85801	35,28217	-
	P2	1,235E+09	5,053E+07	-	34,82872	27,27159	-
	P3	1,228E+09	4,894E+07	-	34,82185	26,96154	-
	P4	1,192E+09	4,082E+07	-	34,80479	24,80758	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	18,066	14,457	-	629,8	495,0	-
	P2	17,812	14,209	-	620,4	485,4	-
	P3	17,773	14,144	-	618,9	483,0	-
	P4	17,629	14,050	-	613,6	479,3	-
Médio	P1	18,066	12,460	-	629,8	414,5	-
	P2	17,812	12,001	-	620,4	396,6	-
	P3	17,773	11,925	-	618,9	393,3	-
	P4	17,629	11,726	-	613,6	385,5	-
Máximo	P1	18,066	32,979	-	629,8	1163,6	-
	P2	17,812	9,086	-	620,4	247,8	-
	P3	17,773	8,991	-	618,9	242,4	-
	P4	17,629	8,377	-	613,6	207,8	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão mínima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	9002,7	6640,8	-
	P2	8746,5	6435,5	-
	P3	8715,9	6391,4	-
	P4	8573,9	6321,8	-
Médio	P1	9002,7	3931,2	-
	P2	8746,5	4191,8	-
	P3	8715,9	4146,7	-
	P4	8573,9	4034,7	-
Máximo	P1	9002,7	23343,8	-
	P2	8746,5	1837,0	-
	P3	8715,9	1790,0	-
	P4	8573,9	1498,3	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	6,42	6,70	-	11,222665	11,211895	-
	P2	6,06	6,37	-	11,202819	11,192985	-
	P3	6,00	6,28	-	11,197718	11,185543	-
	P4	5,91	6,16	-	11,189830	11,174744	-
Médio	P1	6,42	1,63	-	11,222665	11,049855	-
	P2	6,06	1,84	-	11,202819	10,903296	-
	P3	6,00	1,75	-	11,197718	10,851904	-
	P4	5,91	1,60	-	11,189830	10,722452	-
Máximo	P1	6,42	8,02	-	11,222665	11,395489	-
	P2	6,06	1,00	-	11,202819	10,768884	-

Manobra B - Vazão média							
	P3	6,00	0,93	-	11,197718	10,670856	-
	P4	5,91	0,68	-	11,189830	10,419052	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	0,820	0,776	-	-0,456	-0,622	-
	P2	0,835	0,792	-	-0,418	-0,584	-
	P3	0,832	0,788	-	-0,423	-0,590	-
	P4	0,829	0,789	-	-0,424	-0,587	-
Médio	P1	0,820	1,239	-	-0,456	0,190	-
	P2	0,835	1,253	-	-0,418	0,230	-
	P3	0,832	1,264	-	-0,423	0,259	-
	P4	0,829	1,266	-	-0,424	0,273	-
Máximo	P1	0,820	1,758	-	-0,456	2,024	-
	P2	0,835	1,805	-	-0,418	2,217	-
	P3	0,832	1,804	-	-0,423	2,232	-
	P4	0,829	1,808	-	-0,424	2,295	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	13,81	14,07	-	2,61	2,62	-
	P2	13,42	13,78	-	2,26	2,28	-
	P3	13,38	13,69	-	2,18	2,18	-
	P4	13,33	13,65	-	2,07	2,04	-
Médio	P1	13,81	4,68	-	2,61	0,63	-
	P2	13,42	5,87	-	2,26	0,50	-
	P3	13,38	5,80	-	2,18	0,42	-
	P4	13,33	5,84	-	2,07	0,24	-
Máximo	P1	13,81	8,25	-	2,61	7,97	-
	P2	13,42	4,21	-	2,26	0,13	-
	P3	13,38	4,10	-	2,18	0,05	-
	P4	13,33	4,03	-	2,07	-0,19	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	11,20	11,45	-	7,206	7,565	-
	P2	11,16	11,50	-	6,878	7,271	-
	P3	11,19	11,50	-	6,830	7,192	-
	P4	11,26	11,60	-	6,754	7,095	-
Médio	P1	11,20	4,04	-	7,206	2,037	-

Manobra B - Vazão média							
	P2	11,16	5,38	-	6,878	2,476	-
	P3	11,19	5,38	-	6,830	2,408	-
	P4	11,26	5,60	-	6,754	2,308	-
	Máximo	P1	11,20	0,29	-	7,206	8,025
P2		11,16	4,07	-	6,878	1,457	-
P3		11,19	4,05	-	6,830	1,407	-
P4		11,26	4,22	-	6,754	1,255	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	3,398E+08	3,726E+08	-	34,56527	34,45485	-
	P2	3,064E+08	3,409E+08	-	34,34228	34,24462	-
	P3	3,014E+08	3,324E+08	-	34,28769	34,16700	-
	P4	2,937E+08	3,219E+08	-	34,20403	34,05246	-
Médio	P1	3,398E+08	2,482E+07	-	34,56527	32,45593	-
	P2	3,064E+08	3,478E+07	-	34,34228	31,03674	-
	P3	3,014E+08	3,237E+07	-	34,28769	30,58054	-
	P4	2,937E+08	2,873E+07	-	34,20403	29,56400	-
Máximo	P1	3,398E+08	4,674E+08	-	34,56527	36,70092	-
	P2	3,064E+08	1,132E+07	-	34,34228	29,33738	-
	P3	3,014E+08	1,031E+07	-	34,28769	28,56747	-
	P4	2,937E+08	7,392E+06	-	34,20403	24,69431	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	11,992	12,150	-	414,5	418,6	-
	P2	11,623	11,752	-	399,1	402,5	-
	P3	11,539	11,648	-	395,6	398,0	-
	P4	11,392	11,490	-	389,6	391,2	-
Médio	P1	11,992	10,063	-	414,5	326,6	-
	P2	11,623	9,040	-	399,1	280,6	-
	P3	11,539	8,807	-	395,6	269,3	-
	P4	11,392	8,269	-	389,6	244,5	-
Máximo	P1	11,992	35,477	-	414,5	1302,0	-
	P2	11,623	9,140	-	399,1	268,1	-
	P3	11,539	8,899	-	395,6	254,2	-
	P4	11,392	8,230	-	389,6	203,2	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão média				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	4363,0	4509,5	-
	P2	4130,8	4272,1	-
	P3	4084,0	4208,8	-
	P4	4007,3	4122,9	-
Médio	P1	4363,0	1900,5	-
	P2	4130,8	1817,3	-
	P3	4084,0	1728,0	-
	P4	4007,3	1547,5	-
Máximo	P1	4363,0	34236,4	-
	P2	4130,8	1352,6	-
	P3	4084,0	1264,3	-
	P4	4007,3	966,7	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	2,21	2,55	-	10,607054	10,671962	-
	P2	1,86	2,25	-	10,515946	10,622523	-
	P3	1,82	2,14	-	10,505296	10,603854	-
	P4	1,68	2,00	-	10,445556	10,567860	-
Médio	P1	2,21	1,83	-	10,607054	10,661188	-
	P2	1,86	1,79	-	10,515946	10,596536	-
	P3	1,82	1,69	-	10,505296	10,571534	-
	P4	1,68	1,55	-	10,445556	10,516272	-
Máximo	P1	2,21	-	-	10,607054	-	-
	P2	1,86	-	-	10,515946	-	-
	P3	1,82	-	-	10,505296	-	-
	P4	1,68	-	-	10,445556	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	1,024	0,743	-	-0,263	-0,705	-
	P2	1,028	0,755	-	-0,268	-0,691	-
	P3	1,040	0,766	-	-0,239	-0,675	-
	P4	1,027	0,776	-	-0,269	-0,654	-
Médio	P1	1,024	0,853	-	-0,263	-0,580	-
	P2	1,028	0,878	-	-0,268	-0,541	-
	P3	1,040	0,885	-	-0,239	-0,516	-
	P4	1,027	0,900	-	-0,269	-0,484	-
Máximo	P1	1,024	-	-	-0,263	-	-
	P2	1,028	-	-	-0,268	-	-

Manobra B - Vazão máxima							
	P3	1,040	-	-	-0,239	-	-
	P4	1,027	-	-	-0,269	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	5,08	5,05	-	1,10	1,27	-
	P2	4,74	4,80	-	0,75	0,94	-
	P3	4,69	4,72	-	0,72	0,85	-
	P4	4,50	4,54	-	0,55	0,69	-
Médio	P1	5,08	3,71	-	1,10	0,96	-
	P2	4,74	4,03	-	0,75	0,79	-
	P3	4,69	3,93	-	0,72	0,69	-
	P4	4,50	3,75	-	0,55	0,53	-
Máximo	P1	5,08	-	-	1,10	-	-
	P2	4,74	-	-	0,75	-	-
	P3	4,69	-	-	0,72	-	-
	P4	4,50	-	-	0,55	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	3,97	3,78	-	2,532	2,805	-
	P2	3,99	3,86	-	2,248	2,544	-
	P3	3,97	3,87	-	2,207	2,451	-
	P4	3,95	3,85	-	2,100	2,329	-
Médio	P1	3,97	2,75	-	2,532	2,026	-
	P2	3,99	3,24	-	2,248	2,063	-
	P3	3,97	3,24	-	2,207	1,974	-
	P4	3,95	3,21	-	2,100	1,859	-
Máximo	P1	3,97	-	-	2,532	-	-
	P2	3,99	-	-	2,248	-	-
	P3	3,97	-	-	2,207	-	-
	P4	3,95	-	-	2,100	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	1,829E+07	2,332E+07	-	27,86493	28,54919	-
	P2	1,382E+07	1,869E+07	-	27,05205	28,09286	-
	P3	1,324E+07	1,719E+07	-	26,95706	27,92493	-
	P4	1,172E+07	1,527E+07	-	26,48184	27,61475	-
Médio	P1	1,829E+07	1,208E+07	-	27,86493	28,42188	-

Manobra B - Vazão máxima							
	P2	1,382E+07	1,210E+07	-	27,05205	27,81767	-
	P3	1,324E+07	1,095E+07	-	26,95706	27,59620	-
	P4	1,172E+07	9,478E+06	-	26,48184	27,12569	-
Máximo	P1	1,829E+07	-	-	27,86493	-	-
	P2	1,382E+07	-	-	27,05205	-	-
	P3	1,324E+07	-	-	26,95706	-	-
	P4	1,172E+07	-	-	26,48184	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	9,952	11,096	-	277,3	316,8	-
	P2	9,197	10,278	-	248,8	288,7	-
	P3	9,090	10,014	-	245,0	279,6	-
	P4	8,704	9,707	-	230,5	268,0	-
Médio	P1	9,952	11,041	-	277,3	313,8	-
	P2	9,197	10,103	-	248,8	281,0	-
	P3	9,090	9,780	-	245,0	269,9	-
	P4	8,704	9,191	-	230,5	249,3	-
Máximo	P1	9,952	-	-	277,3	-	-
	P2	9,197	-	-	248,8	-	-
	P3	9,090	-	-	245,0	-	-
	P4	8,704	-	-	230,5	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra B - Vazão máxima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	1678,3	1981,2	-
	P2	1441,0	1741,6	-
	P3	1408,6	1662,0	-
	P4	1298,7	1562,9	-
Médio	P1	1678,3	1675,3	-
	P2	1441,0	1534,6	-
	P3	1408,6	1449,5	-
	P4	1298,7	1307,9	-
Máximo	P1	1678,3	-	-
	P2	1441,0	-	-
	P3	1408,6	-	-
	P4	1298,7	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	12,35	7,97	-	10,894314	10,840466	-
	P2	11,97	7,64	-	10,889355	10,830198	-
	P3	11,94	7,57	-	10,888377	10,826541	-
	P4	11,68	7,44	-	10,884654	10,820752	-
Médio	P1	12,35	4,08	-	10,894314	10,903090	-
	P2	11,97	4,95	-	10,889355	10,894555	-
	P3	11,94	4,90	-	10,888377	10,891030	-
	P4	11,68	4,75	-	10,884654	10,885060	-
Máximo	P1	12,35	8,14	-	10,894314	10,959878	-
	P2	11,97	3,09	-	10,889355	10,609899	-
	P3	11,94	3,03	-	10,888377	10,592755	-
	P4	11,68	2,70	-	10,884654	10,503195	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	0,004	0,281	-	-1,280	-1,229	-
	P2	0,009	0,298	-	-1,294	-1,215	-
	P3	0,009	0,292	-	-1,295	-1,218	-
	P4	0,013	0,289	-	-1,292	-1,220	-
Médio	P1	0,004	-0,028	-	-1,280	-1,377	-
	P2	0,009	-0,066	-	-1,294	-1,428	-
	P3	0,009	-0,073	-	-1,295	-1,425	-
	P4	0,013	-0,055	-	-1,292	-1,404	-
Máximo	P1	0,004	0,318	-	-1,280	-0,755	-
	P2	0,009	-0,091	-	-1,294	-1,435	-
	P3	0,009	-0,088	-	-1,295	-1,436	-
	P4	0,013	-0,096	-	-1,292	-1,430	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	18,64	14,38	-	5,53	3,22	-
	P2	18,30	14,11	-	5,64	3,37	-
	P3	18,27	14,04	-	5,57	3,27	-
	P4	18,02	13,98	-	5,46	3,13	-
Médio	P1	18,64	5,97	-	5,53	1,92	-
	P2	18,30	7,38	-	5,64	2,52	-
	P3	18,27	7,35	-	5,57	2,44	-
	P4	18,02	7,32	-	5,46	2,35	-
Máximo	P1	18,64	8,55	-	5,53	8,00	-
	P2	18,30	6,22	-	5,64	0,26	-

Manobra C - Vazão mínima							
	P3	18,27	6,15	-	5,57	0,20	-
	P4	18,02	5,83	-	5,46	-0,16	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	13,12	11,17	-	12,941	8,633	-
	P2	12,66	10,74	-	12,579	8,320	-
	P3	12,70	10,77	-	12,552	8,260	-
	P4	12,56	10,85	-	12,306	8,151	-
Médio	P1	13,12	4,06	-	12,941	4,249	-
	P2	12,66	4,87	-	12,579	5,186	-
	P3	12,70	4,91	-	12,552	5,136	-
	P4	12,56	4,96	-	12,306	5,001	-
Máximo	P1	13,12	0,55	-	12,941	8,139	-
	P2	12,66	5,96	-	12,579	3,662	-
	P3	12,70	5,95	-	12,552	3,614	-
	P4	12,56	6,00	-	12,306	3,348	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	6,409E+08	2,764E+08	-	30,88150	30,33783	-
	P2	6,038E+08	2,553E+08	-	30,83341	30,23992	-
	P3	6,008E+08	2,512E+08	-	30,82403	30,20777	-
	P4	5,763E+08	2,439E+08	-	30,78839	30,15574	-
Médio	P1	6,409E+08	6,944E+07	-	30,88150	30,96743	-
	P2	6,038E+08	1,030E+08	-	30,83341	30,88708	-
	P3	6,008E+08	1,008E+08	-	30,82403	30,85412	-
	P4	5,763E+08	9,522E+07	-	30,78839	30,79641	-
Máximo	P1	6,409E+08	2,629E+08	-	30,88150	31,55811	-
	P2	6,038E+08	4,553E+07	-	30,83341	28,77090	-
	P3	6,008E+08	4,412E+07	-	30,82403	28,67663	-
	P4	5,763E+08	3,668E+07	-	30,78839	28,00354	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	14,293	12,399	-	441,4	376,1	-
	P2	14,058	12,126	-	433,5	366,7	-
	P3	14,020	12,044	-	432,2	363,8	-
	P4	13,863	11,897	-	426,8	358,8	-
Médio	P1	14,293	15,452	-	441,4	478,5	-

Manobra C - Vazão mínima							
	P2	14,058	15,108	-	433,5	466,7	-
	P3	14,020	14,912	-	432,2	460,1	-
	P4	13,863	14,520	-	426,8	447,2	-
Máximo	P1	14,293	29,542	-	441,4	932,3	-
	P2	14,058	10,185	-	433,5	293,0	-
	P3	14,020	10,074	-	432,2	288,9	-
	P4	13,863	9,409	-	426,8	263,5	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão mínima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	5827,6	4125,4	-
	P2	5650,2	3951,3	-
	P3	5628,4	3910,7	-
	P4	5511,9	3833,1	-
Médio	P1	5827,6	3729,3	-
	P2	5650,2	3942,2	-
	P3	5628,4	3862,6	-
	P4	5511,9	3716,9	-
Máximo	P1	5827,6	18098,1	-
	P2	5650,2	2156,1	-
	P3	5628,4	2114,8	-
	P4	5511,9	1861,4	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	5,73	4,53	-	10,846153	10,834451	-
	P2	5,37	4,21	-	10,830147	10,813562	-
	P3	5,32	4,12	-	10,826615	10,805138	-
	P4	5,19	3,99	-	10,816497	10,791372	-
Médio	P1	5,73	2,06	-	10,846153	10,801616	-
	P2	5,37	2,44	-	10,830147	10,743179	-
	P3	5,32	2,35	-	10,826615	10,724285	-
	P4	5,19	2,20	-	10,816497	10,670054	-
Máximo	P1	5,73	8,09	-	10,846153	10,959943	-
	P2	5,37	2,21	-	10,830147	10,748249	-
	P3	5,32	2,14	-	10,826615	10,730665	-
	P4	5,19	1,92	-	10,816497	10,719656	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-0,163	0,003	-	-1,191	-1,357	-
	P2	-0,206	-0,014	-	-1,206	-1,381	-
	P3	-0,200	-0,011	-	-1,214	-1,384	-
	P4	-0,193	-0,009	-	-1,211	-1,373	-
Médio	P1	-0,163	-0,087	-	-1,191	-1,256	-
	P2	-0,206	-0,110	-	-1,206	-1,271	-
	P3	-0,200	-0,101	-	-1,214	-1,262	-
	P4	-0,193	-0,112	-	-1,211	-1,247	-
Máximo	P1	-0,163	0,517	-	-1,191	0,813	-
	P2	-0,206	-0,331	-	-1,206	-1,152	-
	P3	-0,200	-0,334	-	-1,214	-1,136	-
	P4	-0,193	-0,349	-	-1,211	-1,104	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	9,52	7,57	-	1,53	1,30	-
	P2	8,80	7,15	-	1,39	1,33	-
	P3	8,76	7,09	-	1,35	1,24	-
	P4	8,90	7,02	-	1,25	1,09	-
Médio	P1	9,52	3,71	-	1,53	0,55	-
	P2	8,80	4,45	-	1,39	0,40	-
	P3	8,76	4,37	-	1,35	0,31	-
	P4	8,90	4,25	-	1,25	0,13	-
Máximo	P1	9,52	8,39	-	1,53	7,97	-
	P2	8,80	3,77	-	1,39	0,13	-
	P3	8,76	3,69	-	1,35	0,05	-
	P4	8,90	3,52	-	1,25	-0,19	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	7,99	6,27	-	6,157	4,903	-
	P2	7,41	5,82	-	5,811	4,606	-
	P3	7,41	5,85	-	5,772	4,531	-
	P4	7,65	5,93	-	5,660	4,421	-
Médio	P1	7,99	3,16	-	6,157	2,262	-
	P2	7,41	4,06	-	5,811	2,748	-
	P3	7,41	4,06	-	5,772	2,674	-
	P4	7,65	4,12	-	5,660	2,545	-
Máximo	P1	7,99	0,42	-	6,157	8,088	-
	P2	7,41	3,63	-	5,811	2,468	-

Manobra C - Vazão média							
	P3	7,41	3,64	-	5,772	2,401	-
	P4	7,65	3,71	-	5,660	2,215	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	1,417E+08	8,915E+07	-	30,46909	30,33433	-
	P2	1,253E+08	7,789E+07	-	30,34409	30,15972	-
	P3	1,234E+08	7,509E+07	-	30,31430	30,08917	-
	P4	1,181E+08	7,106E+07	-	30,23258	29,97835	-
Médio	P1	1,417E+08	1,872E+07	-	30,46909	30,08899	-
	P2	1,253E+08	2,700E+07	-	30,34409	29,66527	-
	P3	1,234E+08	2,539E+07	-	30,31430	29,53693	-
	P4	1,181E+08	2,262E+07	-	30,23258	29,21719	-
Máximo	P1	1,417E+08	2,596E+08	-	30,46909	31,55883	-
	P2	1,253E+08	2,179E+07	-	30,34409	29,78577	-
	P3	1,234E+08	2,051E+07	-	30,31430	29,68750	-
	P4	1,181E+08	1,704E+07	-	30,23258	29,23435	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	12,690	12,484	-	386,7	378,7	-
	P2	12,171	12,167	-	369,3	366,9	-
	P3	12,108	12,020	-	367,0	361,7	-
	P4	11,767	11,896	-	355,7	356,6	-
Médio	P1	12,690	11,702	-	386,7	352,1	-
	P2	12,171	11,056	-	369,3	328,0	-
	P3	12,108	10,822	-	367,0	319,7	-
	P4	11,767	10,382	-	355,7	303,3	-
Máximo	P1	12,690	29,959	-	386,7	945,5	-
	P2	12,171	11,169	-	369,3	332,7	-
	P3	12,108	10,952	-	367,0	325,1	-
	P4	11,767	10,083	-	355,7	294,8	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão média				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	3613,0	3134,3	-
	P2	3333,2	2953,2	-
	P3	3303,5	2892,4	-
	P4	3162,5	2832,4	-
Médio	P1	3613,0	1991,0	-

Manobra C - Vazão média				
	P2	3333,2	2066,9	-
	P3	3303,5	1994,1	-
	P4	3162,5	1865,7	-
Máximo	P1	3613,0	20096,2	-
	P2	3333,2	1985,9	-
	P3	3303,5	1919,4	-
	P4	3162,5	1681,6	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	3,55	2,44	-	10,885424	10,864822	-
	P2	3,21	2,14	-	10,863705	10,827970	-
	P3	3,16	2,03	-	10,860540	10,815158	-
	P4	2,99	1,88	-	10,843867	10,786329	-
Médio	P1	3,55	1,72	-	10,885424	10,876717	-
	P2	3,21	1,66	-	10,863705	10,835178	-
	P3	3,16	1,56	-	10,860540	10,818801	-
	P4	2,99	1,42	-	10,843867	10,778941	-
Máximo	P1	3,55	-	-	10,885424	-	-
	P2	3,21	-	-	10,863705	-	-
	P3	3,16	-	-	10,860540	-	-
	P4	2,99	-	-	10,843867	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-0,583	0,244	-	-0,903	-1,431	-
	P2	-0,602	0,248	-	-0,910	-1,445	-
	P3	-0,589	0,251	-	-0,929	-1,437	-
	P4	-0,587	0,244	-	-0,934	-1,444	-
Médio	P1	-0,583	0,065	-	-0,903	-1,357	-
	P2	-0,602	0,054	-	-0,910	-1,342	-
	P3	-0,589	0,039	-	-0,929	-1,335	-
	P4	-0,587	0,018	-	-0,934	-1,344	-
Máximo	P1	-0,583	-	-	-0,903	-	-
	P2	-0,602	-	-	-0,910	-	-
	P3	-0,589	-	-	-0,929	-	-
	P4	-0,587	-	-	-0,934	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	5,06	4,05	-	0,95	1,01	-
	P2	4,62	3,82	-	0,73	0,81	-
	P3	4,56	3,71	-	0,70	0,72	-
	P4	4,37	3,48	-	0,53	0,57	-
Médio	P1	5,06	2,80	-	0,95	0,70	-
	P2	4,62	2,91	-	0,73	0,53	-
	P3	4,56	2,80	-	0,70	0,43	-
	P4	4,37	2,58	-	0,53	0,27	-
Máximo	P1	5,06	-	-	0,95	-	-
	P2	4,62	-	-	0,73	-	-
	P3	4,56	-	-	0,70	-	-
	P4	4,37	-	-	0,53	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	4,11	3,04	-	3,724	2,606	-
	P2	3,89	3,01	-	3,401	2,332	-
	P3	3,86	2,99	-	3,358	2,230	-
	P4	3,83	2,91	-	3,201	2,102	-
Médio	P1	4,11	2,11	-	3,724	1,823	-
	P2	3,89	2,38	-	3,401	1,801	-
	P3	3,86	2,38	-	3,358	1,709	-
	P4	3,83	2,31	-	3,201	1,576	-
Máximo	P1	4,11	-	-	3,724	-	-
	P2	3,89	-	-	3,401	-	-
	P3	3,86	-	-	3,358	-	-
	P4	3,83	-	-	3,201	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	5,297E+07	2,552E+07	-	30,85415	30,56934	-
	P2	4,373E+07	2,004E+07	-	30,67908	30,22178	-
	P3	4,257E+07	1,821E+07	-	30,65243	30,10533	-
	P4	3,841E+07	1,596E+07	-	30,52521	29,85397	-
Médio	P1	5,297E+07	1,259E+07	-	30,85415	30,70760	-
	P2	4,373E+07	1,203E+07	-	30,67908	30,33287	-
	P3	4,257E+07	1,075E+07	-	30,65243	30,19619	-
	P4	3,841E+07	8,980E+06	-	30,52521	29,87987	-
Máximo	P1	5,297E+07	-	-	30,85415	-	-
	P2	4,373E+07	-	-	30,67908	-	-

Manobra C - Vazão máxima							
	P3	4,257E+07	-	-	30,65243	-	-
	P4	3,841E+07	-	-	30,52521	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	13,759	13,264	-	424,5	405,5	-
	P2	13,127	12,198	-	402,7	368,7	-
	P3	13,026	11,881	-	399,3	357,7	-
	P4	12,648	11,443	-	386,1	341,6	-
Médio	P1	13,759	13,391	-	424,5	411,2	-
	P2	13,127	11,961	-	402,7	362,8	-
	P3	13,026	11,590	-	399,3	350,0	-
	P4	12,648	11,109	-	386,1	331,9	-
Máximo	P1	13,759	-	-	424,5	-	-
	P2	13,127	-	-	402,7	-	-
	P3	13,026	-	-	399,3	-	-
	P4	12,648	-	-	386,1	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra C - Vazão máxima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	3026,1	2424,0	-
	P2	2755,5	2112,2	-
	P3	2713,8	2007,5	-
	P4	2560,0	1857,8	-
Médio	P1	3026,1	2084,1	-
	P2	2755,5	1815,4	-
	P3	2713,8	1714,5	-
	P4	2560,0	1573,2	-
Máximo	P1	3026,1	-	-
	P2	2755,5	-	-
	P3	2713,8	-	-
	P4	2560,0	-	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	20,92	20,48	-	10,814149	10,966151	-
	P2	20,53	20,19	-	10,814134	10,966140	-
	P3	20,52	20,18	-	10,814128	10,966134	-
	P4	20,30	20,07	-	10,814113	10,966144	-
Médio	P1	20,92	16,89	-	10,814149	10,962278	-

Manobra D - Vazão mínima							
	P2	20,53	17,86	-	10,814134	10,962115	-
	P3	20,52	17,85	-	10,814128	10,962117	-
	P4	20,30	17,74	-	10,814113	10,962059	-
Máximo	P1	20,92	0,31	-	10,814149	10,954281	-
	P2	20,53	6,17	-	10,814134	10,963933	-
	P3	20,52	6,13	-	10,814128	10,963855	-
	P4	20,30	6,00	-	10,814113	10,963577	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-0,736	-1,443	-	-1,344	0,417	-
	P2	-0,750	-1,466	-	-1,320	0,477	-
	P3	-0,749	-1,463	-	-1,323	0,465	-
	P4	-0,738	-1,454	-	-1,332	0,449	-
Médio	P1	-0,736	-0,497	-	-1,344	-1,177	-
	P2	-0,750	-0,502	-	-1,320	-1,171	-
	P3	-0,749	-0,503	-	-1,323	-1,169	-
	P4	-0,738	-0,502	-	-1,332	-1,172	-
Máximo	P1	-0,736	0,855	-	-1,344	1,559	-
	P2	-0,750	-0,292	-	-1,320	-0,950	-
	P3	-0,749	-0,306	-	-1,323	-0,946	-
	P4	-0,738	-0,095	-	-1,332	-0,821	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	21,34	20,78	-	20,14	19,49	-
	P2	20,97	20,48	-	19,74	19,19	-
	P3	20,94	20,47	-	19,72	19,18	-
	P4	20,72	20,37	-	19,51	19,09	-
Médio	P1	21,34	18,36	-	20,14	14,58	-
	P2	20,97	19,44	-	19,74	15,42	-
	P3	20,94	19,43	-	19,72	15,39	-
	P4	20,72	19,32	-	19,51	15,29	-
Máximo	P1	21,34	0,49	-	20,14	0,22	-
	P2	20,97	6,79	-	19,74	5,39	-
	P3	20,94	6,74	-	19,72	5,33	-
	P4	20,72	6,79	-	19,51	5,21	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	1,20	1,29	-	20,924	20,487	-
	P2	1,23	1,29	-	20,533	20,195	-
	P3	1,22	1,29	-	20,522	20,187	-
	P4	1,22	1,28	-	20,302	20,074	-
Médio	P1	1,20	3,78	-	20,924	16,934	-
	P2	1,23	4,03	-	20,533	17,916	-
	P3	1,22	4,04	-	20,522	17,902	-
	P4	1,22	4,03	-	20,302	17,793	-
Máximo	P1	1,20	0,27	-	20,924	0,313	-
	P2	1,23	1,40	-	20,533	6,184	-
	P3	1,22	1,41	-	20,522	6,142	-
	P4	1,22	1,58	-	20,302	6,016	-
Sem Vaz. Vaz.P1 Vaz. P4 Sem Vaz. Vaz.P1 Vaz. P4							

Manobra D - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	1,420E+09	1,680E+09	-	29,99552	31,61893	-
	P2	1,367E+09	1,633E+09	-	29,99537	31,61882	-
	P3	1,366E+09	1,631E+09	-	29,99531	31,61876	-
	P4	1,336E+09	1,613E+09	-	29,99516	31,61887	-
Médio	P1	1,420E+09	1,145E+09	-	29,99552	31,57720	-
	P2	1,367E+09	1,281E+09	-	29,99537	31,57547	-
	P3	1,366E+09	1,279E+09	-	29,99531	31,57550	-
	P4	1,336E+09	1,264E+09	-	29,99516	31,57488	-
Máximo	P1	1,420E+09	3,895E+05	-	29,99552	31,48609	-
	P2	1,367E+09	1,529E+08	-	29,99537	31,59482	-
	P3	1,366E+09	1,508E+08	-	29,99531	31,59399	-
	P4	1,336E+09	1,446E+08	-	29,99516	31,59084	-
Sem Vaz. Vaz.P1 Vaz. P4 Sem Vaz. Vaz.P1 Vaz. P4							

Manobra D - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	27,884	29,228	-	836,4	924,2	-
	P2	27,855	29,211	-	835,5	923,6	-
	P3	27,822	29,203	-	834,5	923,4	-
	P4	27,784	29,197	-	833,4	923,2	-
Médio	P1	27,884	24,674	-	836,4	779,1	-
	P2	27,855	24,586	-	835,5	776,3	-
	P3	27,822	24,587	-	834,5	776,4	-
	P4	27,784	24,544	-	833,4	775,0	-
Máximo	P1	27,884	15,539	-	836,4	489,3	-
	P2	27,855	25,225	-	835,5	797,0	-

Manobra D - Vazão mínima							
	P3	27,822	25,138	-	834,5	794,2	-
	P4	27,784	24,171	-	833,4	763,6	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão mínima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	25565,8	27177,0	-
	P2	25173,5	26877,8	-
	P3	24959,6	26868,7	-
	P4	24623,0	26675,4	-
Médio	P1	25565,8	14006,4	-
	P2	25173,5	14304,6	-
	P3	24959,6	14296,5	-
	P4	24623,0	14186,5	-
Máximo	P1	25565,8	1028,4	-
	P2	25173,5	9094,8	-
	P3	24959,6	8970,3	-
	P4	24623,0	7876,6	-

Manobra D - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	19,16	19,14	-	11,273041	11,275166	-
	P2	18,78	18,79	-	11,272473	11,274763	-
	P3	18,76	18,78	-	11,272354	11,274666	-
	P4	18,67	18,66	-	11,272177	11,274490	-
Médio	P1	19,16	14,23	-	11,273041	11,249998	-
	P2	18,78	14,65	-	11,272473	11,248142	-
	P3	18,76	14,63	-	11,272354	11,247782	-
	P4	18,67	14,51	-	11,272177	11,246987	-
Máximo	P1	19,16	0,32	-	11,273041	11,250718	-
	P2	18,78	5,69	-	11,272473	11,273214	-
	P3	18,76	5,65	-	11,272354	11,272767	-
	P4	18,67	5,51	-	11,272177	11,272106	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-1,072	-1,118	-	-0,468	-0,239	-
	P2	-1,073	-1,120	-	-0,469	-0,240	-
	P3	-1,073	-1,122	-	-0,467	-0,232	-
	P4	-1,071	-1,121	-	-0,468	-0,235	-
Médio	P1	-1,072	-0,172	-	-0,468	-1,288	-

Manobra D - Vazão média							
	P2	-1,073	-0,174	-	-0,469	-1,296	-
	P3	-1,073	-0,177	-	-0,467	-1,300	-
	P4	-1,071	-0,170	-	-0,468	-1,308	-
Máximo	P1	-1,072	3,462	-	-0,468	24,900	-
	P2	-1,073	-0,270	-	-0,469	-1,099	-
	P3	-1,073	-0,275	-	-0,467	-1,102	-
	P4	-1,071	-0,283	-	-0,468	-1,152	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	21,30	21,11	-	13,73	13,56	-
	P2	20,92	20,74	-	13,44	13,33	-
	P3	20,91	20,76	-	13,39	13,30	-
	P4	20,82	20,64	-	13,27	13,17	-
Médio	P1	21,30	18,89	-	13,73	8,39	-
	P2	20,92	19,53	-	13,44	8,58	-
	P3	20,91	19,54	-	13,39	8,55	-
	P4	20,82	19,38	-	13,27	8,51	-
Máximo	P1	21,30	1,06	-	13,73	0,20	-
	P2	20,92	7,14	-	13,44	4,20	-
	P3	20,91	7,07	-	13,39	4,15	-
	P4	20,82	6,78	-	13,27	4,13	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	7,57	7,55	-	19,352	19,302	-
	P2	7,48	7,41	-	18,972	18,953	-
	P3	7,52	7,46	-	18,953	18,946	-
	P4	7,55	7,47	-	18,862	18,829	-
Médio	P1	7,57	10,50	-	19,352	14,597	-
	P2	7,48	10,95	-	18,972	15,041	-
	P3	7,52	10,99	-	18,953	15,027	-
	P4	7,55	10,87	-	18,862	14,903	-
Máximo	P1	7,57	0,87	-	19,352	0,328	-
	P2	7,48	2,94	-	18,972	5,747	-
	P3	7,52	2,92	-	18,953	5,707	-
	P4	7,55	2,65	-	18,862	5,569	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	2,320E+09	2,311E+09	-	35,18044	35,20436	-
	P2	2,229E+09	2,227E+09	-	35,17421	35,19991	-
	P3	2,224E+09	2,226E+09	-	35,17290	35,19885	-
	P4	2,203E+09	2,198E+09	-	35,17095	35,19691	-
Médio	P1	2,320E+09	1,300E+09	-	35,18044	34,90817	-
	P2	2,229E+09	1,379E+09	-	35,17421	34,88744	-
	P3	2,224E+09	1,376E+09	-	35,17290	34,88351	-
	P4	2,203E+09	1,353E+09	-	35,17095	34,87435	-
Máximo	P1	2,320E+09	6,534E+05	-	35,18044	34,82804	-
	P2	2,229E+09	2,045E+08	-	35,17421	35,17559	-
	P3	2,224E+09	2,016E+08	-	35,17290	35,17042	-
	P4	2,203E+09	1,919E+08	-	35,17095	35,16275	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	23,293	23,508	-	819,5	827,6	-
	P2	23,143	23,367	-	814,0	822,5	-
	P3	23,115	23,332	-	813,0	821,3	-
	P4	23,091	23,230	-	812,1	817,6	-
Médio	P1	23,293	18,560	-	819,5	647,9	-
	P2	23,143	18,327	-	814,0	639,4	-
	P3	23,115	18,301	-	813,0	638,4	-
	P4	23,091	18,221	-	812,1	635,4	-
Máximo	P1	23,293	10,734	-	819,5	373,9	-
	P2	23,143	22,419	-	814,0	788,6	-
	P3	23,115	22,339	-	813,0	785,7	-
	P4	23,091	22,101	-	812,1	777,1	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão média				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	14367,3	14480,8	-
	P2	14046,3	14200,2	-
	P3	14017,2	14172,8	-
	P4	13970,0	13987,5	-
Médio	P1	14367,3	9301,7	-
	P2	14046,3	9262,5	-
	P3	14017,2	9240,3	-
	P4	13970,0	9139,1	-
Máximo	P1	14367,3	897,6	-
	P2	14046,3	7551,0	-

Manobra D - Vazão média				
	P3	14017,2	7492,5	-
	P4	13970,0	7032,5	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	13,01	15,94	17,97	11,362721	11,451158	11,478257
	P2	12,65	15,69	-	11,351686	11,446225	-
	P3	12,63	15,60	17,59	11,349853	11,444608	11,474815
	P4	12,50	15,51	17,24	11,344686	11,442546	11,471503
Médio	P1	13,01	10,19	15,55	11,362721	11,437198	11,425043
	P2	12,65	11,51	-	11,351686	11,429471	-
	P3	12,63	11,43	15,17	11,349853	11,427341	11,418041
	P4	12,50	11,33	14,32	11,344686	11,424167	11,409994
Máximo	P1	13,01	0,29	6,64	11,362721	11,473248	11,496736
	P2	12,65	5,33	-	11,351686	11,507162	-
	P3	12,63	5,29	6,25	11,349853	11,505826	11,490790
	P4	12,50	5,15	0,67	11,344686	11,502760	11,480822
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-0,029	-0,659	-1,369	-1,686	-1,129	0,376
	P2	-0,026	-0,657	-	-1,689	-1,138	-
	P3	-0,026	-0,656	-1,369	-1,689	-1,139	0,374
	P4	-0,027	-0,657	-1,372	-1,689	-1,139	0,388
Médio	P1	-0,029	0,027	-0,814	-1,686	-1,247	-0,877
	P2	-0,026	0,041	-	-1,689	-1,259	-
	P3	-0,026	0,041	-0,810	-1,689	-1,259	-0,888
	P4	-0,027	0,044	-0,814	-1,689	-1,260	-0,876
Máximo	P1	-0,029	0,785	-1,195	-1,686	3,700	0,272
	P2	-0,026	-0,540	-	-1,689	-0,868	-
	P3	-0,026	-0,545	-1,204	-1,689	-0,862	0,297
	P4	-0,027	-0,548	-1,237	-1,689	-0,879	0,460
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	21,07	21,21	21,35	4,86	4,79	4,98
	P2	20,67	20,97	-	4,60	4,57	-
	P3	20,69	20,91	20,97	4,56	4,49	4,40
	P4	20,56	20,84	20,63	4,43	4,35	3,92
Médio	P1	21,07	16,55	20,59	4,86	3,50	3,47

Manobra D - Vazão máxima							
	P2	20,67	18,93	-	4,60	3,70	-
	P3	20,69	18,85	20,20	4,56	3,61	3,12
	P4	20,56	18,78	19,19	4,43	3,55	1,46
	Máximo	P1	21,07	0,83	8,33	4,86	0,08
	P2	20,67	7,19	-	4,60	2,64	-
	P3	20,69	7,15	7,85	4,56	2,60	1,93
	P4	20,56	6,89	0,91	4,43	2,53	0,15
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	16,21	16,42	16,37	14,516	16,888	18,644
	P2	16,07	16,40	-	14,185	16,658	-
	P3	16,13	16,43	16,58	14,176	16,582	18,282
	P4	16,14	16,49	16,71	14,060	16,500	17,945
Médio	P1	16,21	13,05	17,12	14,516	10,931	16,611
	P2	16,07	15,23	-	14,185	12,405	-
	P3	16,13	15,24	17,09	14,176	12,329	16,257
	P4	16,14	15,23	17,73	14,060	12,239	15,404
Máximo	P1	16,21	0,76	6,00	14,516	0,309	6,838
	P2	16,07	4,55	-	14,185	5,484	-
	P3	16,13	4,55	5,92	14,176	5,448	6,456
	P4	16,14	4,36	0,76	14,060	5,305	0,695
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	1,711E+09	2,429E+09	2,991E+09	36,55972	37,59756	3,792E+01
	P2	1,626E+09	2,357E+09	-	36,45047	37,54874	-
	P3	1,623E+09	2,334E+09	2,871E+09	36,43300	37,53301	3,789E+01
	P4	1,593E+09	2,309E+09	2,763E+09	36,38369	37,51314	3,786E+01
Médio	P1	1,711E+09	1,005E+09	2,315E+09	36,55972	37,34590	3,737E+01
	P2	1,626E+09	1,290E+09	-	36,45047	37,25894	-
	P3	1,623E+09	1,273E+09	2,211E+09	36,43300	37,23586	3,730E+01
	P4	1,593E+09	1,252E+09	1,979E+09	36,38369	37,20107	3,724E+01
Máximo	P1	1,711E+09	8,204E+05	4,067E+08	36,55972	37,72372	3,811E+01
	P2	1,626E+09	2,635E+08	-	36,45047	38,18794	-
	P3	1,623E+09	2,599E+08	3,614E+08	36,43300	38,17288	3,805E+01
	P4	1,593E+09	2,460E+08	4,171E+06	36,38369	38,13799	3,795E+01
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	15,204	16,876	17,881	555,8	634,5	678,037
	P2	15,021	16,657	-	547,5	625,4	-
	P3	14,982	16,584	17,624	545,8	622,4	667,742
	P4	14,906	16,490	17,377	542,3	618,6	657,864
Médio	P1	15,204	14,962	16,120	555,8	558,8	602,346
	P2	15,021	14,735	-	547,5	549,0	-
	P3	14,982	14,668	15,902	545,8	546,2	593,194
	P4	14,906	14,582	15,680	542,3	542,4	583,837
Máximo	P1	15,204	10,135	18,243	555,8	382,3	695,145
	P2	15,021	19,042	-	547,5	727,2	-
	P3	14,982	18,912	17,846	545,8	721,9	678,984
	P4	14,906	18,617	15,996	542,3	710,0	607,134
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra D - Vazão máxima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	8160,1	9962,8	11067,4
	P2	7959,9	9736,0	-
	P3	7932,2	9668,3	10777,0
	P4	7863,5	9593,6	10522,4
Médio	P1	8160,1	7106,5	9413,3
	P2	7959,9	7443,3	-
	P3	7932,2	7385,0	9178,1
	P4	7863,5	7309,6	8812,2
Máximo	P1	8160,1	911,9	6837,4
	P2	7959,9	6449,5	-
	P3	7932,2	6374,6	6469,8
	P4	7863,5	6158,7	1947,0
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	19,77	19,88	-	10,814179	10,814115	-
	P2	19,36	19,58	-	10,814165	10,814093	-
	P3	19,34	19,56	-	10,814160	10,814087	-
	P4	19,14	19,46	-	10,814155	10,814093	-
Médio	P1	19,77	16,02	-	10,814179	10,811221	-
	P2	19,36	16,90	-	10,814165	10,811127	-
	P3	19,34	16,89	-	10,814160	10,811123	-
	P4	19,14	16,79	-	10,814155	10,811066	-
Máximo	P1	19,77	0,31	-	10,814179	10,799646	-
	P2	19,36	6,27	-	10,814165	10,813082	-

Manobra E - Vazão mínima							
	P3	19,34	6,22	-	10,814160	10,813064	-
	P4	19,14	6,09	-	10,814155	10,812716	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	2,326	0,929	-	4,595	-0,800	-
	P2	2,302	0,941	-	4,503	-0,779	-
	P3	2,325	0,937	-	4,622	-0,789	-
	P4	2,312	0,929	-	4,586	-0,787	-
Médio	P1	2,326	0,836	-	4,595	-0,518	-
	P2	2,302	0,851	-	4,503	-0,486	-
	P3	2,325	0,853	-	4,622	-0,479	-
	P4	2,312	0,840	-	4,586	-0,510	-
Máximo	P1	2,326	1,489	-	4,595	7,473	-
	P2	2,302	0,501	-	4,503	-0,675	-
	P3	2,325	0,533	-	4,622	-0,651	-
	P4	2,312	0,481	-	4,586	-0,408	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	21,32	20,78	-	19,46	19,43	-
	P2	20,93	20,49	-	19,05	19,13	-
	P3	20,92	20,48	-	19,03	19,11	-
	P4	20,72	20,37	-	18,84	19,00	-
Médio	P1	21,32	18,42	-	19,46	14,81	-
	P2	20,93	19,49	-	19,05	15,62	-
	P3	20,92	19,48	-	19,03	15,61	-
	P4	20,72	19,37	-	18,84	15,49	-
Máximo	P1	21,32	0,64	-	19,46	0,21	-
	P2	20,93	6,94	-	19,05	5,76	-
	P3	20,92	6,90	-	19,03	5,75	-
	P4	20,72	6,86	-	18,84	5,49	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	1,86	1,35	-	19,776	19,885	-
	P2	1,87	1,37	-	19,369	19,582	-
	P3	1,89	1,37	-	19,346	19,570	-
	P4	1,88	1,37	-	19,148	19,463	-
Médio	P1	1,86	3,61	-	19,776	16,059	-

Manobra E - Vazão mínima							
	P2	1,87	3,87	-	19,369	16,946	-
	P3	1,89	3,87	-	19,346	16,933	-
	P4	1,88	3,88	-	19,148	16,829	-
Máximo	P1	1,86	0,44	-	19,776	0,316	-
	P2	1,87	1,18	-	19,369	6,272	-
	P3	1,89	1,15	-	19,346	6,230	-
	P4	1,88	1,37	-	19,148	6,094	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	1,268E+09	1,282E+09	-	29,99573	29,99511	-
	P2	1,217E+09	1,243E+09	-	29,99558	29,99488	-
	P3	1,214E+09	1,242E+09	-	29,99552	29,99481	-
	P4	1,189E+09	1,228E+09	-	29,99548	29,99487	-
Médio	P1	1,268E+09	8,345E+08	-	29,99573	29,96450	-
	P2	1,217E+09	9,291E+08	-	29,99558	29,96349	-
	P3	1,214E+09	9,277E+08	-	29,99552	29,96345	-
	P4	1,189E+09	9,164E+08	-	29,99548	29,96285	-
Máximo	P1	1,268E+09	3,207E+05	-	29,99573	29,83849	-
	P2	1,217E+09	1,275E+08	-	29,99558	29,98431	-
	P3	1,214E+09	1,258E+08	-	29,99552	29,98411	-
	P4	1,189E+09	1,203E+08	-	29,99548	29,98048	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	26,906	27,562	-	807,1	826,7	-
	P2	26,863	27,530	-	805,8	825,7	-
	P3	26,841	27,524	-	805,1	825,6	-
	P4	26,814	27,525	-	804,3	825,6	-
Médio	P1	26,906	23,471	-	807,1	703,3	-
	P2	26,863	23,385	-	805,8	700,7	-
	P3	26,841	23,379	-	805,1	700,5	-
	P4	26,814	23,333	-	804,3	699,1	-
Máximo	P1	26,906	13,361	-	807,1	398,7	-
	P2	26,863	24,895	-	805,8	746,5	-
	P3	26,841	24,868	-	805,1	745,6	-
	P4	26,814	24,151	-	804,3	724,1	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão mínima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	19938,3	23071,0	-
	P2	19545,3	22768,8	-
	P3	19477,6	22754,1	-
	P4	19280,6	22669,2	-
Médio	P1	19938,3	12129,9	-
	P2	19545,3	12354,4	-
	P3	19477,6	12343,5	-
	P4	19280,6	12247,8	-
Máximo	P1	19938,3	839,8	-
	P2	19545,3	9069,5	-
	P3	19477,6	8987,7	-
	P4	19280,6	7982,0	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	18,48	18,47	-	10,811583	10,812649	-
	P2	18,07	18,10	-	10,811477	10,812600	-
	P3	18,04	18,08	-	10,811437	10,812583	-
	P4	17,98	17,99	-	10,811472	10,812589	-
Médio	P1	18,48	13,12	-	10,811583	10,790323	-
	P2	18,07	13,45	-	10,811477	10,789261	-
	P3	18,04	13,42	-	10,811437	10,788891	-
	P4	17,98	13,31	-	10,811472	10,788486	-
Máximo	P1	18,48	0,28	-	10,811583	10,784776	-
	P2	18,07	5,40	-	10,811477	10,799184	-
	P3	18,04	5,35	-	10,811437	10,798729	-
	P4	17,98	5,22	-	10,811472	10,798394	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	1,129	0,987	-	0,297	0,356	-
	P2	1,133	0,982	-	0,304	0,343	-
	P3	1,137	0,989	-	0,316	0,364	-
	P4	1,133	0,967	-	0,318	0,314	-
Médio	P1	1,129	0,838	-	0,297	-0,211	-
	P2	1,133	0,834	-	0,304	-0,225	-
	P3	1,137	0,831	-	0,316	-0,236	-
	P4	1,133	0,819	-	0,318	-0,268	-
Máximo	P1	1,129	0,672	-	0,297	1,547	-
	P2	1,133	0,763	-	0,304	-0,428	-

Manobra E - Vazão média							
	P3	1,137	0,768	-	0,316	-0,426	-
	P4	1,133	0,734	-	0,318	-0,547	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	21,32	21,12	-	17,20	17,32	-
	P2	20,91	20,75	-	16,79	16,95	-
	P3	20,90	20,74	-	16,75	16,93	-
	P4	20,82	20,64	-	16,70	16,83	-
Médio	P1	21,32	19,23	-	17,20	9,92	-
	P2	20,91	19,87	-	16,79	10,24	-
	P3	20,90	19,86	-	16,75	10,20	-
	P4	20,82	19,73	-	16,70	10,10	-
Máximo	P1	21,32	0,54	-	17,20	0,17	-
	P2	20,91	7,52	-	16,79	4,38	-
	P3	20,90	7,50	-	16,75	4,33	-
	P4	20,82	7,19	-	16,70	4,23	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	4,12	3,80	-	18,524	18,499	-
	P2	4,12	3,80	-	18,113	18,123	-
	P3	4,15	3,82	-	18,083	18,107	-
	P4	4,12	3,81	-	18,018	18,011	-
Médio	P1	4,12	9,31	-	18,524	13,345	-
	P2	4,12	9,63	-	18,113	13,692	-
	P3	4,15	9,67	-	18,083	13,665	-
	P4	4,12	9,64	-	18,018	13,553	-
Máximo	P1	4,12	0,38	-	18,524	0,289	-
	P2	4,12	3,14	-	18,113	5,456	-
	P3	4,15	3,17	-	18,083	5,415	-
	P4	4,12	2,96	-	18,018	5,277	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	1,111E+09	1,109E+09	-	29,96815	29,97960	-
	P2	1,062E+09	1,064E+09	-	29,96702	29,97908	-
	P3	1,058E+09	1,062E+09	-	29,96659	29,97890	-
	P4	1,051E+09	1,051E+09	-	29,96696	29,97897	-
Médio	P1	1,111E+09	5,679E+08	-	29,96815	29,74109	-

Manobra E - Vazão média							
	P2	1,062E+09	5,973E+08	-	29,96702	29,72980	-
	P3	1,058E+09	5,949E+08	-	29,96659	29,72590	-
	P4	1,051E+09	5,850E+08	-	29,96696	29,72176	-
Máximo	P1	1,111E+09	2,656E+05	-	29,96815	29,68895	-
	P2	1,062E+09	9,551E+07	-	29,96702	29,83639	-
	P3	1,058E+09	9,404E+07	-	29,96659	29,83151	-
	P4	1,051E+09	8,932E+07	-	29,96696	29,82819	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	23,522	24,109	-	704,9	722,8	-
	P2	23,425	24,024	-	702,0	720,2	-
	P3	23,393	23,998	-	701,0	719,4	-
	P4	23,395	23,988	-	701,1	719,1	-
Médio	P1	23,522	16,550	-	704,9	492,2	-
	P2	23,425	16,318	-	702,0	485,1	-
	P3	23,393	16,265	-	701,0	483,5	-
	P4	23,395	16,204	-	701,1	481,6	-
Máximo	P1	23,522	12,157	-	704,9	360,9	-
	P2	23,425	18,562	-	702,0	553,8	-
	P3	23,393	18,412	-	701,0	549,3	-
	P4	23,395	18,044	-	701,1	538,2	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão média				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	13071,2	13598,3	-
	P2	12792,3	13329,6	-
	P3	12754,1	13289,8	-
	P4	12720,7	13229,5	-
Médio	P1	13071,2	6520,9	-
	P2	12792,3	6475,7	-
	P3	12754,1	6441,6	-
	P4	12720,7	6404,9	-
Máximo	P1	13071,2	760,8	-
	P2	12792,3	4904,0	-
	P3	12754,1	4823,1	-
	P4	12720,7	4505,0	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	9,62	9,36	5,99	10,682495	10,684867	10,610134
	P2	9,24	9,06	-	10,673861	10,677622	-
	P3	9,20	8,95	5,60	10,671806	10,673939	10,586699
	P4	9,07	8,85	5,28	10,668391	10,670880	10,563723
Médio	P1	9,62	6,99	4,98	10,682495	10,643187	10,650175
	P2	9,24	7,78	-	10,673861	10,630928	-
	P3	9,20	7,69	4,60	10,671806	10,626104	10,626814
	P4	9,07	7,56	4,12	10,668391	10,619559	10,595320
Máximo	P1	9,62	0,22	4,98	10,682495	10,713082	10,650175
	P2	9,24	4,32	-	10,673861	10,751336	-
	P3	9,20	4,26	4,60	10,671806	10,748590	10,626814
	P4	9,07	4,14	4,12	10,668391	10,745339	10,595320
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	1,417	1,602	2,366	1,015	1,819	5,605
	P2	1,421	1,606	-	1,012	1,802	-
	P3	1,423	1,608	2,335	1,017	1,808	5,354
	P4	1,418	1,600	2,286	1,003	1,783	5,055
Médio	P1	1,417	1,496	2,104	1,015	1,308	4,019
	P2	1,421	1,507	-	1,012	1,324	-
	P3	1,423	1,507	2,092	1,017	1,322	3,940
	P4	1,418	1,501	2,040	1,003	1,303	3,664
Máximo	P1	1,417	1,338	2,104	1,015	1,614	4,019
	P2	1,421	1,118	-	1,012	0,171	-
	P3	1,423	1,117	2,092	1,017	0,172	3,940
	P4	1,418	1,112	2,040	1,003	0,140	3,664
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	21,23	21,52	21,35	5,61	5,38	3,65
	P2	20,82	21,26	-	5,43	5,20	-
	P3	20,83	21,19	20,97	5,39	5,09	3,31
	P4	20,72	21,12	20,63	5,27	4,96	2,98
Médio	P1	21,23	16,93	16,27	5,61	3,73	3,27
	P2	20,82	19,37	-	5,43	4,11	-
	P3	20,83	19,30	15,69	5,39	4,03	2,91
	P4	20,72	19,22	14,84	5,27	3,88	1,69
Máximo	P1	21,23	0,55	16,27	5,61	0,12	3,27
	P2	20,82	7,81	-	5,43	2,94	-

Manobra E - Vazão máxima							
	P3	20,83	7,80	15,69	5,39	2,89	2,91
	P4	20,72	7,62	14,84	5,27	2,80	1,69
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	15,62	16,14	17,71	10,582	10,291	7,000
	P2	15,39	16,07	-	10,222	10,015	-
	P3	15,44	16,10	17,66	10,192	9,925	6,651
	P4	15,45	16,16	17,65	10,074	9,826	6,366
Médio	P1	15,62	13,21	12,99	10,582	7,896	5,635
	P2	15,39	15,26	-	10,222	8,872	-
	P3	15,44	15,27	12,78	10,192	8,793	5,289
	P4	15,45	15,34	13,15	10,074	8,682	4,840
Máximo	P1	15,62	0,44	12,99	10,582	0,237	5,635
	P2	15,39	4,87	-	10,222	4,520	-
	P3	15,44	4,91	12,78	10,192	4,470	5,289
	P4	15,45	4,82	13,15	10,074	4,348	4,840
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	3,317E+08	3,137E+08	1,371E+08	28,54017	28,54193	2,756E+01
	P2	3,079E+08	2,958E+08	-	28,44705	28,46125	-
	P3	3,057E+08	2,898E+08	1,221E+08	28,42500	28,42107	2,730E+01
	P4	2,981E+08	2,835E+08	1,105E+08	28,38985	28,38922	2,706E+01
Médio	P1	3,317E+08	1,803E+08	9,129E+07	28,54017	28,11180	2,806E+01
	P2	3,079E+08	2,259E+08	-	28,44705	27,98102	-
	P3	3,057E+08	2,213E+08	7,928E+07	28,42500	27,93133	2,780E+01
	P4	2,981E+08	2,150E+08	6,521E+07	28,38985	27,86610	2,746E+01
Máximo	P1	3,317E+08	1,704E+05	9,129E+07	28,54017	28,89252	2,806E+01
	P2	3,079E+08	6,338E+07	-	28,44705	29,31178	-
	P3	3,057E+08	6,190E+07	7,928E+07	28,42500	29,28224	2,780E+01
	P4	2,981E+08	5,843E+07	6,521E+07	28,38985	29,24744	2,746E+01
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	10,600	10,229	7,501	302,5	291,9	206,727
	P2	10,383	10,072	-	295,4	286,7	-
	P3	10,330	9,986	7,231	293,6	283,8	197,400
	P4	10,220	9,831	7,038	290,2	279,1	190,454
Médio	P1	10,600	9,679	8,253	302,5	272,1	231,605

Manobra E - Vazão máxima							
	P2	10,383	9,498	-	295,4	265,8	-
	P3	10,330	9,425	7,935	293,6	263,3	220,590
	P4	10,220	9,267	7,601	290,2	258,2	208,732
Máximo	P1	10,600	8,836	8,253	302,5	255,3	231,605
	P2	10,383	13,328	-	295,4	390,7	-
	P3	10,330	13,178	7,935	293,6	385,9	220,590
	P4	10,220	12,752	7,601	290,2	373,0	208,732
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra E - Vazão máxima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	3717,7	3561,1	2176,8
	P2	3573,8	3447,8	-
	P3	3549,1	3403,4	2037,1
	P4	3487,4	3331,5	1932,3
Médio	P1	3717,7	2937,8	2117,5
	P2	3573,8	3045,1	-
	P3	3549,1	3007,5	1972,7
	P4	3487,4	2935,3	1802,0
Máximo	P1	3717,7	512,4	2117,5
	P2	3573,8	3046,9	-
	P3	3549,1	2993,7	1972,7
	P4	3487,4	2834,5	1802,0
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	-	19,88	-	-	11,288162	-
	P2	-	19,52	-	-	11,288172	-
	P3	-	19,51	-	-	11,288171	-
	P4	-	19,39	-	-	11,288173	-
Médio	P1	-	18,36	-	-	11,279403	-
	P2	-	18,15	-	-	11,281828	-
	P3	-	18,14	-	-	11,281834	-
	P4	-	18,03	-	-	11,281722	-
Máximo	P1	-	12,02	-	-	11,147550	-
	P2	-	11,97	-	-	11,202954	-
	P3	-	11,95	-	-	11,202151	-
	P4	-	11,81	-	-	11,199848	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-	-1,201	-	-	-0,137	-
	P2	-	-1,116	-	-	-0,348	-
	P3	-	-1,107	-	-	-0,369	-
	P4	-	-1,091	-	-	-0,406	-
Médio	P1	-	-0,926	-	-	-0,560	-
	P2	-	-0,676	-	-	-1,105	-
	P3	-	-0,676	-	-	-1,104	-
	P4	-	-0,679	-	-	-1,102	-
Máximo	P1	-	-0,596	-	-	-0,051	-
	P2	-	-0,006	-	-	-1,291	-
	P3	-	-0,006	-	-	-1,291	-
	P4	-	-0,005	-	-	-1,287	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	-	20,10	-	-	19,32	-
	P2	-	19,75	-	-	19,02	-
	P3	-	19,73	-	-	19,01	-
	P4	-	19,61	-	-	18,90	-
Médio	P1	-	20,17	-	-	14,42	-
	P2	-	19,80	-	-	15,19	-
	P3	-	19,78	-	-	15,19	-
	P4	-	19,67	-	-	15,07	-
Máximo	P1	-	18,90	-	-	0,14	-
	P2	-	18,53	-	-	5,45	-
	P3	-	18,52	-	-	5,43	-
	P4	-	18,39	-	-	5,21	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	-	0,78	-	-	19,880	-
	P2	-	0,73	-	-	19,523	-
	P3	-	0,72	-	-	19,507	-
	P4	-	0,71	-	-	19,396	-
Médio	P1	-	5,75	-	-	18,465	-
	P2	-	4,61	-	-	18,232	-
	P3	-	4,59	-	-	18,220	-
	P4	-	4,60	-	-	18,105	-
Máximo	P1	-	18,75	-	-	12,904	-
	P2	-	13,08	-	-	12,636	-

Manobra F - Vazão mínima							
	P3	-	13,09	-	-	12,620	-
	P4	-	13,18	-	-	12,491	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	-	2,472E+09	-	-	35,35379	-
	P2	-	2,384E+09	-	-	35,35392	-
	P3	-	2,380E+09	-	-	35,35389	-
	P4	-	2,353E+09	-	-	35,35393	-
Médio	P1	-	2,120E+09	-	-	35,25101	-
	P2	-	2,070E+09	-	-	35,27828	-
	P3	-	2,067E+09	-	-	35,27836	-
	P4	-	2,041E+09	-	-	35,27705	-
Máximo	P1	-	9,726E+08	-	-	34,08092	-
	P2	-	9,475E+08	-	-	34,38797	-
	P3	-	9,448E+08	-	-	34,37957	-
	P4	-	9,244E+08	-	-	34,35561	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão mínima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	-	33,658	-	-	1189,9	-
	P2	-	33,735	-	-	1192,7	-
	P3	-	33,737	-	-	1192,7	-
	P4	-	33,748	-	-	1193,1	-
Médio	P1	-	25,015	-	-	881,8	-
	P2	-	26,493	-	-	934,6	-
	P3	-	26,483	-	-	934,3	-
	P4	-	26,448	-	-	933,0	-
Máximo	P1	-	12,445	-	-	424,1	-
	P2	-	15,137	-	-	520,5	-
	P3	-	15,100	-	-	519,1	-
	P4	-	15,127	-	-	519,7	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão mínima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	-	42194,8	-
	P2	-	42631,6	-
	P3	-	42671,6	-
	P4	-	42587,3	-
Médio	P1	-	15600,0	-

Manobra F - Vazão mínima				
	P2	-	17189,8	-
	P3	-	17160,6	-
	P4	-	17063,3	-
Máximo	P1	-	5840,9	-
	P2	-	6938,0	-
	P3	-	6916,8	-
	P4	-	6922,7	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	-	16,92	-	-	11,103917	-
	P2	-	16,55	-	-	11,103918	-
	P3	-	16,53	-	-	11,103917	-
	P4	-	16,43	-	-	11,103916	-
Médio	P1	-	7,09	-	-	11,083812	-
	P2	-	6,85	-	-	11,090957	-
	P3	-	6,78	-	-	11,090545	-
	P4	-	6,65	-	-	11,089606	-
Máximo	P1	-	6,11	-	-	10,982941	-
	P2	-	6,11	-	-	11,075480	-
	P3	-	6,07	-	-	11,074672	-
	P4	-	5,93	-	-	11,073033	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-	-0,747	-	-	-0,801	-
	P2	-	-0,748	-	-	-0,815	-
	P3	-	-0,758	-	-	-0,728	-
	P4	-	-0,758	-	-	-0,813	-
Médio	P1	-	-1,061	-	-	0,575	-
	P2	-	-0,457	-	-	-1,094	-
	P3	-	-0,460	-	-	-1,091	-
	P4	-	-0,459	-	-	-1,054	-
Máximo	P1	-	-1,731	-	-	2,820	-
	P2	-	-0,217	-	-	-1,204	-
	P3	-	-0,220	-	-	-1,201	-
	P4	-	-0,214	-	-	-1,213	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	-	17,05	-	-	16,72	-
	P2	-	16,66	-	-	16,35	-
	P3	-	16,66	-	-	16,32	-
	P4	-	16,55	-	-	16,23	-
Médio	P1	-	8,51	-	-	3,91	-
	P2	-	8,11	-	-	5,13	-
	P3	-	8,04	-	-	5,06	-
	P4	-	8,04	-	-	4,72	-
Máximo	P1	-	8,69	-	-	0,17	-
	P2	-	8,02	-	-	4,00	-
	P3	-	7,97	-	-	3,95	-
	P4	-	7,88	-	-	3,91	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	-	0,33	-	-	16,923	-
	P2	-	0,31	-	-	16,551	-
	P3	-	0,34	-	-	16,533	-
	P4	-	0,32	-	-	16,434	-
Médio	P1	-	4,59	-	-	7,184	-
	P2	-	2,98	-	-	6,909	-
	P3	-	2,99	-	-	6,842	-
	P4	-	3,32	-	-	6,713	-
Máximo	P1	-	8,52	-	-	6,442	-
	P2	-	4,02	-	-	6,224	-
	P3	-	4,02	-	-	6,191	-
	P4	-	3,97	-	-	6,053	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	-	1,387E+09	-	-	33,16594	-
	P2	-	1,327E+09	-	-	33,16595	-
	P3	-	1,324E+09	-	-	33,16595	-
	P4	-	1,308E+09	-	-	33,16594	-
Médio	P1	-	2,469E+08	-	-	32,95345	-
	P2	-	2,293E+08	-	-	33,02176	-
	P3	-	2,248E+08	-	-	33,01730	-
	P4	-	2,162E+08	-	-	33,00712	-
Máximo	P1	-	1,911E+08	-	-	32,29069	-
	P2	-	1,842E+08	-	-	32,85212	-

Manobra F - Vazão média							
	P3	-	1,822E+08	-	-	32,84358	-
	P4	-	1,739E+08	-	-	32,82600	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão média							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	-	32,443	-	-	1076,0	-
	P2	-	32,412	-	-	1075,0	-
	P3	-	32,413	-	-	1075,0	-
	P4	-	32,393	-	-	1074,3	-
Médio	P1	-	19,247	-	-	634,3	-
	P2	-	22,050	-	-	728,1	-
	P3	-	21,920	-	-	723,7	-
	P4	-	21,130	-	-	697,4	-
Máximo	P1	-	12,631	-	-	407,9	-
	P2	-	18,467	-	-	606,7	-
	P3	-	18,378	-	-	603,6	-
	P4	-	18,332	-	-	601,8	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão média				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	-	47059,4	-
	P2	-	45059,5	-
	P3	-	45397,3	-
	P4	-	44883,4	-
Médio	P1	-	6498,7	-
	P2	-	7572,5	-
	P3	-	7450,2	-
	P4	-	6882,9	-
Máximo	P1	-	3906,4	-
	P2	-	5640,9	-
	P3	-	5603,2	-
	P4	-	5528,7	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Médio			Entropia		
Mínimo	P1	-	5,24	-	-	11,287235	-
	P2	-	4,91	-	-	11,287274	-
	P3	-	4,81	-	-	11,287238	-
	P4	-	4,68	-	-	11,287265	-
Médio	P1	-	4,56	-	-	11,283394	-

Manobra F - Vazão máxima							
	P2	-	4,29	-	-	11,285414	-
	P3	-	4,20	-	-	11,285163	-
	P4	-	4,06	-	-	11,285139	-
Máximo	P1	-	4,31	-	-	11,241387	-
	P2	-	4,08	-	-	11,271546	-
	P3	-	4,03	-	-	11,270664	-
	P4	-	3,87	-	-	11,269108	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Coeficiente de Assimetria			Curtose		
Mínimo	P1	-	-0,147	-	-	-0,723	-
	P2	-	-0,078	-	-	-0,960	-
	P3	-	-0,108	-	-	-0,976	-
	P4	-	-0,173	-	-	-1,176	-
Médio	P1	-	-1,582	-	-	2,439	-
	P2	-	-0,850	-	-	-0,240	-
	P3	-	-0,858	-	-	-0,247	-
	P4	-	-0,921	-	-	-0,277	-
Máximo	P1	-	-2,724	-	-	9,686	-
	P2	-	-0,824	-	-	-0,427	-
	P3	-	-0,828	-	-	-0,430	-
	P4	-	-0,830	-	-	-0,477	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Valor Máximo			Valor Mínimo		
Mínimo	P1	-	5,70	-	-	4,71	-
	P2	-	5,32	-	-	4,52	-
	P3	-	5,20	-	-	4,41	-
	P4	-	5,00	-	-	4,28	-
Médio	P1	-	5,08	-	-	3,40	-
	P2	-	4,72	-	-	3,62	-
	P3	-	4,63	-	-	3,53	-
	P4	-	4,43	-	-	3,42	-
Máximo	P1	-	5,29	-	-	0,10	-
	P2	-	4,94	-	-	2,61	-
	P3	-	4,90	-	-	2,52	-
	P4	-	4,60	-	-	2,49	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Amplitude Total			RMS		
Mínimo	P1	-	0,99	-	-	5,240	-
	P2	-	0,80	-	-	4,915	-
	P3	-	0,79	-	-	4,809	-
	P4	-	0,72	-	-	4,683	-
Médio	P1	-	1,69	-	-	4,577	-
	P2	-	1,10	-	-	4,302	-
	P3	-	1,10	-	-	4,205	-
	P4	-	1,00	-	-	4,069	-
Máximo	P1	-	5,19	-	-	4,403	-
	P2	-	2,33	-	-	4,121	-
	P3	-	2,38	-	-	4,075	-
	P4	-	2,11	-	-	3,921	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Energia Total			Fator de Crista		
Mínimo	P1	-	1,716E+08	-	-	35,34246	-
	P2	-	1,510E+08	-	-	35,34293	-
	P3	-	1,445E+08	-	-	35,34249	-
	P4	-	1,371E+08	-	-	35,34284	-
Médio	P1	-	1,306E+08	-	-	35,29831	-
	P2	-	1,155E+08	-	-	35,32084	-
	P3	-	1,104E+08	-	-	35,31788	-
	P4	-	1,033E+08	-	-	35,31764	-
Máximo	P1	-	1,187E+08	-	-	34,97471	-
	P2	-	1,051E+08	-	-	35,16193	-
	P3	-	1,027E+08	-	-	35,15219	-
	P4	-	9,499E+07	-	-	35,13498	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão máxima							
Vazamento	Sensor	Fator de Forma			Fator de Impulso		
Mínimo	P1	-	29,659	-	-	1048,2	-
	P2	-	30,236	-	-	1068,6	-
	P3	-	30,210	-	-	1067,7	-
	P4	-	29,949	-	-	1058,5	-
Médio	P1	-	24,815	-	-	875,9	-
	P2	-	27,263	-	-	962,9	-
	P3	-	27,032	-	-	954,7	-
	P4	-	27,395	-	-	967,5	-
Máximo	P1	-	15,372	-	-	537,6	-
	P2	-	21,554	-	-	757,9	-

Manobra F - Vazão máxima							
	P3	-	21,373	-	-	751,3	-
	P4	-	21,050	-	-	739,6	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4	Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4

Manobra F - Vazão máxima				
Vazamento	Sensor	Fator de Margem		
Mínimo	P1	-	13262,5	-
	P2	-	13315,1	-
	P3	-	13252,4	-
	P4	-	11262,2	-
Médio	P1	-	7766,6	-
	P2	-	8884,0	-
	P3	-	8613,6	-
	P4	-	8632,7	-
Máximo	P1	-	4152,7	-
	P2	-	5959,3	-
	P3	-	5867,7	-
	P4	-	5526,3	-
		Sem Vaz.	Vaz.P1	Vaz. P4