



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

FÁBIO KROLL DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR VIRTUAL DE VAZAMENTO PARA
TESTAR CORRELACIONADORES ACÚSTICOS COMERCIAIS**

Ilha Solteira
2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

FÁBIO KROLL DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR VIRTUAL DE VAZAMENTO PARA
TESTAR CORRELACIONADORES ACÚSTICOS COMERCIAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia – UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Mecânica dos
Sólidos

Prof. Dr. Michael John Brennan

Orientador

**Prof. Dr. Fabricio César Lobato de
Almeida**

Co-orientador

Ilha Solteira
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L732d Lima, Fábio Kroll de.
Desenvolvimento de um simulador virtual de vazamento para testar
correlacionadores acústicos comerciais / Fábio Kroll de Lima. -- Ilha Solteira:
[s.n.], 2014
82 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2014

Orientador: Michael John Brennan

Co-orientador: Fabricio César Lobato De Almeida

Inclui bibliografia

1. Simulador virtual de vazamento. 2. Detecção de vazamentos.
3. Método de correlação cruzada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Desenvolvimento de um Simulador Virtual de Vazamento para Testar Correlacionadores Acústicos Comerciais

AUTOR: FÁBIO KROLL DE LIMA

ORIENTADOR: Prof. Dr. MICHAEL JOHN BRENNAN

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. FABRICIO CÉSAR LOBATO DE ALMEIDA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: MECÂNICA DOS SÓLIDOS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MICHAEL JOHN BRENNAN

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. GUSTAVO LUIZ CHAGAS MANHÃES DE ABREU

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. PAULO JOSE PAUPITZ GONCALVES

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru

Data da realização: 09 de dezembro de 2014.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por ter guiado meus passos e zelado por mim durante toda a minha vida.

Pelo amor, carinho e afeto dado pelos meus pais, Heitor e Nelci, afirmo que sem eles, nada disso seria possível.

Pela atenção, carinho e amor de Ligia, uma pessoa especial que apareceu em minha vida de repente e a fez muito mais feliz.

Aos meus orientadores e amigos, Professor Mike e Professor Fabrício, pela orientação, paciência, e suporte, durante o desenvolvimento deste trabalho.

Deixo aqui também um agradecimento a todos docentes da Universidade.

Aos técnicos dos laboratórios, pelo suporte dado, Edvaldo “Quati”, Marino e um agradecimento em especial ao Carlos Santana “Grilo”.

Agradeço também, aos meus amigos, “Charlie”, Marcus, Hiroshi, João e Vinicyus, que apesar da distância e tempo, continuamos com a nossa amizade.

Agradeço também aos meus amigos de Ilha Solteira, Gedael, Camilo, Pedro Ayalla, Valterson, Viviane, Marcelo, Sanderson, Danilo Damasceno, Felipe Carvalho, “Gabi”, Altair, Carlos Joventino, Breno, Tiago Bernardes, Oscar, Cristian, Bruce, João Mastrangi, Newton, Igor, Johnattan, Arthur, “Cadu”, e a todos que estiveram presente.

Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais
evidente fica nossa ignorância.”

John F. Kennedy

RESUMO

Vazamento em tubulações é uma das principais preocupações de empresas fornecedoras de água, devido à escassez e disponibilidade de fontes de água potável, principalmente em grandes cidades. A técnica de correlação cruzada tem sido bastante utilizada nos últimos 30 anos na localização de vazamentos em tubulações metálicas. Entretanto, o método de correlação cruzada não tem a mesma eficácia na detecção de vazamentos em tubulações plásticas, devido ao elevado nível de atenuação entre a parede da tubulação e o fluido, que rapidamente suprimem o sinal de vazamento. Por isso, o sinal de vazamento não consegue percorrer longas distâncias em tais tipos de tubulações.

Sabe-se que, a faixa de frequência na qual a energia do vazamento está localizada é baixa, conseqüentemente o sinal de vazamento é facilmente afetado pelo ruído de fundo. Para evitar esta interferência, o filtro passa-banda é utilizado para suprimir o ruído indesejado antes de aplicar a técnica de correlação cruzada. A escolha das frequências apropriadas a serem utilizadas no filtro passa-baixa são fundamentais para obtenção de uma estimativa de tempo de atraso confiável entre dois sinais de vazamento, este tempo de atraso é utilizado para calcular a posição do vazamento.

Este trabalho tem como objetivo à investigação e criação de um simulador de vazamento, aqui chamado de Simulador Virtual de Vazamento, através da utilização de um modelo analítico de vazamento em conjunto com atuadores mecânicos (caixas de som). Este simulador de vazamento poderá ser utilizado para avaliar correlacionadores comerciais e para fins de treinamento. A principal vantagem deste método é o controle de todo o experimento, de modo que a característica do sinal de vazamento simulado é conhecida previamente.

Palavras-chave: Simulador virtual de vazamento. Detecção de vazamentos. Método de correlação cruzada.

ABSTRACT

Leak in pipes is one of the main concerns of water companies due to the scarcity and availability of potable water sources, especially in big cities. The cross-correlation technique has been used in the past 30 years to locate leaks in metallic pipes. Although the cross-correlation method works very well for metallic pipes, it does not have the same effectiveness in plastic pipes. This is mainly due to the high attenuation between the pipe wall and the fluid, which suppress rapidly the leak noise. Hence, leak noise does not travel long distance in such pipes.

Moreover, the frequency range over which the leak energy is located, is at low frequency. Hence, the leak signal is easily affected by background noise. To avoid these problems, a band-pass filter is used to suppress undesirable noise before conducting the correlation. The selection of the band-pass filter limits is the key to have a reliable time delay estimate between two leak signals, which is used to calculate the position of a suspected leak.

This work concerns the investigation and design of a leak simulator, here named *Virtual Pipe Rig*, using an analytical leak model together with mechanical actuators (shakers). The analytical model is responsible for generating leak signals used to drive the mechanical actuators, which are responsible for simulating the measure positions. This virtual pipe rig can be used to assess commercial correlators and training purposes. The main advantage of this method is the entire control of the experiment, so that the characteristic of the simulated leak signal is known beforehand.

Key words: Virtual pipe rig. Leak detection. Cross-correlation technique.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Nome	Unidade
d	Distância entre os sensores	[metros] – [m]
d_1	Distância entre o vazamento até o sensor 01	[m]
d_2	Distância entre o vazamento até o sensor 02	[m]
t	Tempo	[segundos] – [s]
c	Velocidade de propagação do ruído de vazamento	[m/s]
T_0	Diferença de tempo na chegada do ruído de vazamento entre os sensores	[s]
$R_{x_1 x_2}$	Correlação cruzada entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$	[--]
$R_{x_1 x_1}$	Auto Correlação do sinal $x_1(t)$	[--]
$R_{x_2 x_2}$	Auto Correlação do sinal $x_2(t)$	[--]
τ	Valor do tempo de atraso entre os sinais	[s]
$E[]$	Esperança Matemática	[--]
$F^{-1}\{ \}$	Transformada Inversa de Fourier	[--]
ω	Frequência	[rad/s]
ω_0	Frequência de corte inferior do filtro passa faixa	[rad/s]
ω_1	Frequência de corte superior do filtro passa faixa	[rad/s]
$S_{x_1 x_2}$	Densidade Espectral Cruzada	[--]
S_0	Auto Densidade Espectral constant do ruído de vazamento	[--]
S_{xx}	Auto Densidade Espectral do ruído de vazamento	[--]
Ψ	Propriedades da tubulação no domínio da frequência	[--]
ψ	Propriedades da tubulação no domínio do tempo	[--]
δ	Função delta de <i>Dirac</i>	[--]
$\rho_{x_1 x_2}$	Coeficiente de correlação cruzada	[--]
G	Filtro passa faixa no domínio da frequência	[--]
g	Filtro passa faixa no domínio do tempo	[--]

H	Função resposta em frequência do tubo entre o vazamento até o sensor	[--]
β	Fator de perda da parede do tubo	[--]
c_f	Velocidade de onda do fluído	[m/s]
F_a	Frequência de Amostragem	[Hertz] – [Hz]
T	Período	[s]
k_f	Número de onda de um fluído livre	[--]
η	Fator de perda da parede do tubo	[--]
a	Raio do tubo	[milimetro] – [mm]
h	Espessura da parede do tubo	[mm]
E	Módulo de Young do material do tubo	[Newton/metro] – [N/m]
B	Módulo de Bulk do fluído	[N/m]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CAUSAS DO VAZAMENTO EM TUBULAÇÕES DE ÁGUA	12
1.2	MÉTODOS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTO	14
1.3	MÉTODO ACÚSTICO DE CORRELAÇÃO	15
1.3.1	Possíveis Influências na Estimativa do Método de Correlação	16
1.3.2	Características do Ruído de Vazamento	17
1.4	OBJETIVOS.....	17
1.5	CONTRIBUIÇÕES	18
1.6	TÓPICOS DA DISSERTAÇÃO	18
2	MODELO TEÓRICO DE VAZAMENTO	19
2.1	CORRELAÇÃO CRUZADA DE SINAIS APLICADA À DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS SUBTERRÂNEOS	19
2.2	MODELO TEÓRICO DE VAZAMENTOS EM DUTOS SUBTERRÂNEOS	21
2.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	24
2.4	CONCLUSÕES	28
3	CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DOS ATUADORES ELETROMECAÂNICOS.....	29
3.1	FUNDAMENTAÇÃO INICIAL	29
3.2	IDEIA CONCEITUAL PARA OBTENÇÃO DO SIMULADOR DE VAZAMENTO	29
3.3	CONCEPÇÃO DOS SINAIS DE VAZAMENTO	31
3.4	MODELAGEM DO ATUADOR ELETROMECAÂNICO	32
3.5	CONCLUSÕES	43
4	VALIDAÇÃO E APLICAÇÃO DO SIMULADOR DE VAZAMENTO DE DUTOS SUBTERRÂNEOS	44
4.1	APARATO EXPERIMENTAL	44
4.2	ESTUDO DE CASO	48
4.2.1	Análise da Placa de Áudio do Laptop	49
4.2.2	Análise dos Componentes do Sistema	53
4.3	ESTIMATIVA DO ATRASO E DISTÂNCIA	58
4.4	COMPARATIVO DOS RESULTADOS ENTRE SINAIS REAIS DE VAZAMENTO E SINAIS DO SIMULADOR VIRTUAL DE VAZAMENTO.....	63
4.5	CONCLUSÕES	70

5	CONCLUSÕES	71
5.1	RESUMO DA DISSERTAÇÃO	71
5.2	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	72
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A	76
	APÊNDICE B.....	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 CAUSAS DO VAZAMENTO EM TUBULAÇÕES DE ÁGUA

Em sistemas de fornecimento de água de países desenvolvidos, cerca de 20 a 30% da água transportada é perdida, podendo até mesmo chegar a 50% da produção e isso se deve a problemas existentes na tubulação responsável pelo abastecimento dos consumidores (CHEONG,1991). Entretanto, em outros países de fraca economia, tais como Nigéria e Armênia, este percentual pode chegar a mais de 70% (UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT- USAID, 2012). No ano de 2007 o Japão, por meio de um controle de desperdício de água, conseguiu reduzir significativamente perdas em seu sistema de distribuição de água, chegando a 7% (BENOUAHI; UEDA, 2009).

As perdas em sistemas de distribuição de água são classificadas em perdas reais ou perdas aparentes. Perdas aparentes são as perdas não físicas de água, onde são apontadas incoerências na água consumida, mas não propriamente mensurada. Os motivos podem ser consumo não autorizado, imprecisão no medidor de água do cliente ou erros de manipulação dos dados por parte da empresa fornecedora de água (AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION- AWWA, 2012). Já as perdas reais correspondem às perdas físicas de água no sistema de distribuição, devido a vazamentos na rede distribuidora, transbordamento dos tanques de armazenagem e vazamento no serviço de conexão. Tais perdas inflacionam os custos de produção da concessionária fornecedora de água e a exploração desnecessária do recurso hídrico natural, uma vez que a água é extraída e tratada, mas não chega ao consumidor (AWWA, 2012).

Vazamentos podem ser originários de problemas no projeto do sistema de distribuição, se dando através da existência de válvulas, ramificações, articulações, conexões entre as tubulações, entre outros. Fatores externos também podem comprometer a integridade da tubulação, podendo ser mencionado: o clima, a corrosão do material em se tratando de tubulações metálicas, defeito de fabricação do tubo, instalação defeituosa, pressão da água muito elevada, peso excessivo sobre o solo por onde passa a tubulação, vibração do solo devido a intenso tráfego nas ruas, entre outros (HUNAIDI, 2000).

Uma reportagem disponibilizada no site da Revista Época Negócios no primeiro semestre de 2014, cujo título é “Tubulação Velha da SABESP Causa perdas no Centro de São Paulo”, pode ser utilizada como um meio de exemplificar o contexto em questão.

Nesta reportagem, afirma-se que o envelhecimento da tubulação que abastece a região central de São Paulo (onde vivem 3,5 milhões de habitantes), é uma das principais causas de vazamento, sendo que, 51% do sistema de abastecimento de água têm mais de 30 anos de uso, 17% da rede têm mais de 40 anos, 34% entre 30 e 40 anos e que no centro de São Paulo ainda é possível encontrar tubulações feitas na década de 1930.

Segundo o estudo realizado em 2013 pela própria SABESP (Companhia de Saneamento Básico de São Paulo), estima-se que a empresa perdeu 31,2% de toda a água produzida entre a estação de tratamento seu destino final, ou seja, potenciais consumidores. Este índice representa cerca de 950 bilhões de litros de água desperdiçada. Além do mais, conclui-se que cerca de 66% das perdas são provocadas por vazamentos ou transbordamentos de reservatório (REVISTA ÉPOCA NEGÓCIOS, 2014).

A empresa (SABESP) afirma que 4 em 10 vazamentos de água, são invisíveis e indetectáveis, estes vazamentos são provocados por rachaduras causadas pelo desgaste da tubulação aterrada, onde a água não sobe a superfície e nem faz barulho. Apenas 13% dos vazamentos são visíveis e 50% não são vistos externamente, mas podem ser detectados por métodos de detecção de vazamento (REVISTA ÉPOCA NEGÓCIOS, 2014).

Alceu Bittencourt, presidente da Seção Paulista da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, entrevistado nesta reportagem, acredita que não é apenas uma manutenção na tubulação que resolveria o problema em questão, e sim uma substituição integral por redes de distribuição mais modernas como as feitas de Polietileno de Alta Densidade (PEAD).

Outro entrevistado nesta mesma reportagem foi o professor Marcelo Libânio, do departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), ele acredita que não é apenas a idade da tubulação a única responsável pelos vazamentos na rede de São Paulo, existem outros diversos fatores que devem ser analisados, tais como: magnitude da pressão da água, material da qual a tubulação é feita, como a rede foi implantada e sua extensão.

Com objetivo de evitar prejuízos gerados por vazamentos, tanto desperdício natural quanto financeiro, técnicas de detecção de vazamentos em tubulações subterrâneas têm sido desenvolvidas por empresas e centros de pesquisa, com intuito de obter métodos rápidos e com boa eficiência na localização do vazamento. Dentre essas técnicas existem os métodos acústicos e não acústicos (FUCHS, 1991).

1.2 MÉTODOS PARA DETECÇÃO DE VAZAMENTO

Técnicas acústicas utilizam a resposta vibro-acústica, gerada pela presença do vazamento em tubulações, para detectar sua presença e estimar sua localização. Vazamentos também podem ser detectados por inúmeras técnicas não acústicas. A Tabela 1.1 mostra algumas das técnicas mais usualmente utilizadas na detecção de vazamentos em tubulações:

Tabela 1.1 – Métodos utilizados na detecção de vazamento em tubulações subterrâneas.

Método	Aplicação	Limitações
Acústico	O operador utiliza varetas de escuta ou microfone de solo, realizando a escuta seguindo a direção da tubulação (HUNAIDI, 2000).	- Deve ser utilizado sobre a tubulação; - Necessidade de operadores experientes; - Interferência de ruídos de fundo; - Amortecimento pelo solo; - Deve estar próximo ao vazamento; - Tubulações plásticas dificultam a localização do vazamento; - Não apresenta boa precisão.
Acústico com correlação	Dois sensores são instalados estrategicamente em pontos opostos ao vazamento. Os dados obtidos pelos sensores são, então, enviados a um programa de correlação que calcula o atraso entre os sinais para realizar cálculos da estimativa da localização do vazamento (HUNAIDI, 2000).	- Alto custo; - Sinais de baixa intensidade são difíceis de correlacionar; - Mau desempenho em tubulações plásticas e grandes diâmetros.
Termografia Infravermelha	Detector de radiação infravermelho localiza diferenças de temperatura causadas por vazamento de água (HUNAIDI, 2000).	- Alto custo; - Necessita de operador com experiência; - Não apresenta boa precisão; - Limitações climáticas.
Gás-Tracejante	Água da seção da tubulação é drenada, em seguida um gás não tóxico e mais leve que o ar (podendo ser Hélio ou Hidrogênio) é injetado no segmento da tubulação de água. O gás escapa através da abertura causada pelo vazamento, por ser mais leve que o ar, ele permeará até a superfície, atravessando o solo. O vazamento é então localizado, com auxílio detector de gás, realizando um escaneamento na superfície do solo seguindo o trajeto da tubulação (HUNAIDI, 2000).	- Alto custo; - Demanda tempo; - Limitação de profundidade; - Não apresenta boa precisão;
Radar Penetrador do Solo	Radar gera uma imagem baseada na reflexão das ondas do radar quando alterada a densidade do solo ou do tubo (HUNAIDI, 2000).	Difícil interpretação;
Sensor no interior da Tubulação	Sensor transita dentro da tubulação e detecta o vazamento internamente (BEN-MANSOUR; HABIB, 2012).	Alto custo;

Sistema Sahara	Sensor acústico é conectado a um cabo que transita dentro da tubulação e sente a presença de vazamento. Uma vez que o sensor localiza um vazamento, um sinal pré-definido usado para localizar a posição é emitido, e utilizando um equipamento de rastreamento sobre a superfície é possível localizar a fissura na tubulação (BEN-MANSOUR; HABIB, 2012).	- Alto custo; - Utilizado em tubulações não-metálicas de grande diâmetro.
<i>Smart Ball</i>	Uma bola, com um circuito eletrônico em seu interior, emite pulsos elétricos utilizados para detectar sua posição em receptores fixados na tubulação quando a trinca for localizada (BEN-MANSOUR; HABIB, 2012).	- Alto custo; - Utilizado em tubulações de até 300 mm de diâmetro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

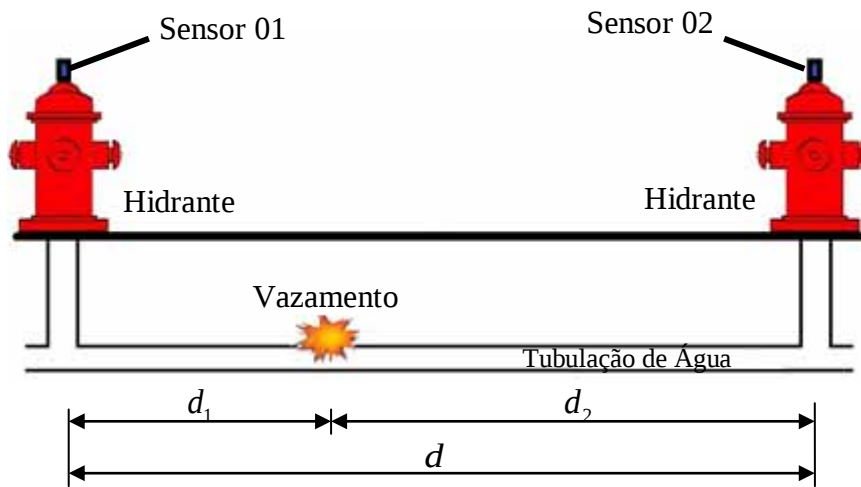
1.3 MÉTODO ACÚSTICO DE CORRELAÇÃO

A presença de vazamento em uma tubulação gera ruído, que pode ser usado para a sua detecção e localização. Com o auxílio de sensores vibro-acústicos, torna-se possível detectar e estimar a posição do vazamento ao longo da tubulação (GAO, 2004).

Um dos métodos acústicos mais utilizados na detecção de vazamento em tubulações subterrâneas é o método de correlação cruzada. Neste método, sensores vibro-acústicos (acelerômetro e/ou pick-up de velocidade e hidrofones) são conectados em dois pontos da tubulação (pontos de medida), geralmente hidrantes localizados de cada lado da posição do suposto vazamento (GAO, 2004).

A Figura 1.1 mostra esquematicamente de que forma os sensores são montados, em uma tubulação onde se pretende detectar o vazamento utilizando técnicas acústicas, onde d_1 e d_2 são as distâncias do vazamento até o ponto de instalação do sensor 01 e 02 respectivamente, enquanto d corresponde ao comprimento da tubulação entre os dois sensores.

Figura 1.1 – Esquemática de uma tubulação com vazamento, bem como os sensores vibratório-acústicos são conectados aos pontos de medida, geralmente hidrantes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a aquisição do ruído, gerado pela presença do vazamento através dos sensores instalados, realiza-se um processo de análise de sinais conhecido como correlação cruzada. Neste procedimento é encontrado um valor referente à diferença de tempo na chegada do ruído de vazamento entre os sensores T_0 . Este parâmetro é, então, utilizado para o cálculo da posição estimada da distância entre o vazamento até o ponto de instalação do sensor 01 (d_1) pela seguinte equação:

$$d_1 = \frac{d - cT_0}{2} \quad (1.1)$$

Onde c é a velocidade de propagação do ruído de vazamento, geralmente obtido em tabelas padrões de correlacionadores de sinais (ALMEIDA, 2013). Como observado na Eq.(1.1), uma boa estimativa da localização do vazamento é proporcional à qualidade da estimativa da velocidade de propagação do ruído, bem como a estimativa do atraso de sinais (GAO, 2004).

1.3.1 Possíveis Influências na Estimativa do Método de Correlação

O diâmetro do tubo e o tipo de material do qual é feito, podem influenciar na qualidade da estimativa do atraso de sinal utilizando o método de correlação. Isto porque tais fatores são responsáveis pela atenuação do ruído de vazamento, e a velocidade com que o mesmo se propaga ao longo da tubulação (HUNAIDI, 2000). Além do mais, em tubulações de plástico, a distância total percorrida pelo ruído de vazamento é menor quando comparada a

tubulações metálicas, devido à elevada atenuação entre o fluído e a parede do tubo. A atenuação do sinal se intensifica com o aumento do diâmetro do tubo (HUNAIDI, 2000).

O meio onde a tubulação está imersa, apresenta pouca interferência na atenuação do sinal do vazamento (MUGGLETON, 2007). Dessa maneira, a energia do sinal do vazamento fica próximo ao ruído de fundo, logo, um processamento de sinal efetivo deve ser empregado. Por este motivo a correlação cruzada é utilizada onde o sinal de vazamento correlacionado é acentuado, e o ruído de fundo (sinal espúrio) suprimido, melhorando assim a qualidade da estimativa do atraso do sinal.

1.3.2 Características do Ruído de Vazamento

As características do ruído de vazamento também dependem do tamanho e do tipo de vazamento. Rupturas ou fissuras causadas por corrosão nas paredes da tubulação, geram ruídos de vazamento mais forte e com frequências mais altas, quando comparado a vazamentos em articulações ou válvulas. É errôneo pensar que conforme maior o vazamento, maior será a intensidade do sinal, a intensidade do sinal está diretamente relacionada à pressão da água existente na tubulação. Por consequência, em tubulações onde a pressão da água é elevada, a intensidade do sinal também é elevada. Entretanto, em sistemas onde a pressão na tubulação é de aproximadamente 15 psi, torna-se muito difícil detectar sinais de vazamento, já que se trata de um sistema considerado de baixa pressão (HUNAIDI, 2000).

Hunaidi (1999) investigou, através da realização de experimentos, as características acústicas do ruído de vazamento em tubulações de plástico, utilizando hidrofones (medem a pressão sonora) e acelerômetros. Notou-se que, quando utilizado hidrofones, a energia do ruído de vazamento ficou localizada em frequências abaixo de 50 Hz, já com a utilização de acelerômetros, a faixa de frequência contendo o ruído de vazamento era de 50 a 150 Hz. Em frequências diferentes desta faixa, a amplitude do sinal era muito baixa e similar ao ruído do próprio ambiente, isso mostra que a faixa de frequência onde a energia do vazamento está localizada é dependente do tipo de sensor utilizado.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a pesquisa e desenvolvimento de um simulador de vazamento, aqui chamado de “Simulador Virtual de Vazamentos” (SVV), utilizando um modelo analítico de vazamento em tubos de plástico enterrados como gerador de sinais simulados de vazamento, em conjunto com atuadores eletromecânicos que simulam a resposta

da tubulação nos pontos de medição. Desta maneira, correlacionadores de sinais comerciais utilizados na detecção de vazamentos em tubulações subterrâneas podem ser testados, bem como efetuar a capacitação de equipes para treinamento na detecção de vazamentos simulando situações diversas.

1.5 CONTRIBUIÇÕES

A contribuição deste trabalho é:

- O desenvolvimento de um protótipo de um simulador de vazamento (*hardware*), para realização de testes em correlacionadores acústicos comerciais, utilizados na detecção de vazamento em dutos subterrâneos, e também servindo como base para treinamento de equipes de detecção de vazamentos.

1.6 TÓPICOS DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 1 foi abordada a revisão bibliográfica, introdução ao problema de detecção de vazamentos utilizando métodos acústicos e não acústicos, bem como o objetivo e contribuição deste trabalho.

No Capítulo 2 o modelo analítico utilizado para gerar os sinais de vazamento simulados será apresentado. Será realizado, ainda, um exemplo através de simulação computacional, utilizando parâmetros reais de um sistema de tubulação já utilizado em experimentos envolvendo detecção de vazamentos.

No Capítulo 3 o simulador de vazamentos, aqui chamado de “Simulador Virtual de Vazamento”, será apresentado e serão também abordadas a sua concepção e a forma como foram gerados os ruídos de vazamentos, simulados nos pontos de medição através de atuadores eletromecânicos.

No capítulo 4, serão mostrados os resultados obtidos através da realização de um experimento realizado em laboratório, com finalidade de validar o Simulador de Vazamentos em dutos subterrâneos.

No capítulo 5 serão apresentadas as principais conclusões obtidas através da realização do estudo proposto nesta dissertação. Também é incluso um resumo da dissertação e proposta para trabalho futuro.

2 MODELO TEÓRICO DE VAZAMENTO

2.1 CORRELAÇÃO CRUZADA DE SINAIS APLICADA À DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM DUTOS SUBTERRÂNEOS

Correlação cruzada é comumente utilizada no cálculo de atraso de sinais em vários problemas de engenharia. Quando dois sinais randômicos ergódicos e de valor médio igual a zero são correlacionados, a função de correlação cruzada do ponto de vista de processamento de sinais pode ser expressa como (BENDAT; PIERSOL, 2010).

$$R_{x_1x_2}(T_0) = E[x_1(t)x_2(t+T_0)] \quad (2.1)$$

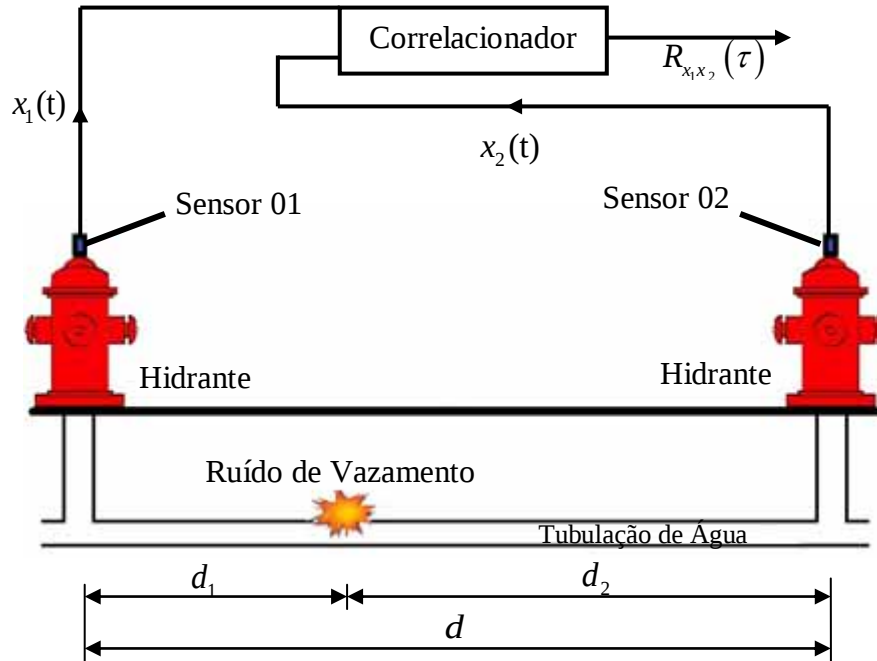
onde T_0 é ao valor do tempo de atraso entre os sinais, $E[\]$ esperança matemática e $x_1(t)$ e $x_2(t)$ dois sinais randômicos adquiridos em pontos distintos. Na prática, entretanto, a correlação cruzada pode ser calculada da seguinte maneira:

$$R_{x_1x_2}(\tau) = F^{-1}\{S_{x_1x_2}(\omega)\} \quad (2.2)$$

onde $S_{x_1x_2}(\omega)$ é a densidade espectral cruzada entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$ e $F^{-1}\{ \}$ a transformada inversa de Fourier.

Em problemas envolvendo detecção de vazamento em dutos subterrâneos, caso exista um vazamento entre dois pontos de medidas onde sensores de vibração/acústico estão alocados, a função de correlação cruzada apresentará um pico para um dado valor da variável T_0 , ou seja, este valor maximiza a função de correlação cruzada, fornecendo assim, uma estimativa do tempo de atraso (GAO, 2004). Isso nada mais é que uma medida de similaridade entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$. A Figura 2.1 ilustra de forma esquemática o problema de detecção de vazamentos, enfatizando o local de medida do sinal gerado pelo vazamento (hidrantes), distâncias entre os pontos de medida e o vazamento (d_1 e d_2), e cálculo da correlação cruzada utilizando um correlacionador de sinais. Como a tubulação está enterrada, geralmente os únicos pontos de acesso são hidrantes (conforme ilustrado na figura) e/ou válvulas subterrâneas que são de difícil acesso.

Figura 2.1 – Ilustração esquemática de uma tubulação com vazamento, enfatizando o posicionamento dos sensores vibratório-acústicos e cálculo da correlação cruzada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em alguns casos, é recomendado expressar a função de correlação cruzada em uma forma normalizada conhecida como coeficiente de correlação $\rho_{x_1x_2}(\tau)$, onde a escala tende de -1 a +1, sendo definida por (BENDAT; PIERSOL, 2010).

$$\rho_{x_1x_2}(\tau) = \frac{R_{x_1x_2}(\tau)}{\sqrt{R_{x_1x_1}(0) \cdot R_{x_2x_2}(0)}} \quad (2.3)$$

onde $R_{x_1x_1}(0)$ e $R_{x_2x_2}(0)$ são os valores da função de autocorrelação para os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$ quando $\tau = 0$.

Observando a Figura 2.1, o atraso de sinal pode ser então estimado utilizando a seguinte equação:

$$T_0 = \frac{d_2 - d_1}{c} \quad (2.4)$$

onde c corresponde à velocidade de propagação do ruído do vazamento ao longo da tubulação, e d_1 é a distância entre o vazamento e o sensor 1 e d_2 é a distância entre o vazamento e o sensor 2.

Sendo $d_2 = d - d_1$, como mostrado no capítulo anterior, a localização do vazamento em relação ao sensor 1, pode ser calculada através da seguinte equação (GAO, 2004):

$$d_1 = \frac{d - cT_0}{2} \quad (2.5)$$

onde $d = d_1 + d_2$ como sendo a distância entre os sensores 01 e 02 (ver Figura 2.1).

2.2 Modelo Teórico de Vazamentos em Dutos Subterrâneos

Gao et al (2004) propôs um modelo analítico para tubos preenchidos por fluido, onde a função resposta em frequência do tubo entre o vazamento até o ponto de medição é dada por:

$$H(\omega, l) = e^{-i\omega l/c} e^{-\omega\beta l} \quad (2.6)$$

Sendo l a distância entre o vazamento até o ponto de instalação do sensor, ω corresponde a frequência em rad/s, i simbolizando número complexo, β é o fator de atenuação da parede do tubo e c representando a velocidade de propagação do ruído gerado pela presença do vazamento, podendo ser estimada teoricamente por:

$$c = c_f \left(1 + \frac{2Ba}{Eh} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

onde c_f corresponde a velocidade de onda do fluido livre, ou seja, não existe condições de contorno delimitando o fluido, como por exemplo o tubo. Por sua vez o fator de atenuação da parede do tubo pode ser calculado por:

$$\beta = \frac{1}{c_f} \frac{\frac{\eta Ba}{Eh}}{\left(1 + \left(\frac{2Ba}{Eh} \right) \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.8)$$

onde η é o fator de perda da parede do tubo, B é o módulo de Bulk de elasticidade do fluido, E é o módulo de Young do material que é feito o tubo, a é o raio do tubo e o h a espessura da parede do tubo.

A densidade espectral cruzada $S_{x_1 x_2}(\omega)$, entre os sinais de vazamento $x_1(t)$ e $x_2(t)$ pode ser obtida através da seguinte equação:

$$S_{x_1 x_2}(\omega) = S_{xx}(\omega) \Psi(\omega) e^{i\omega T_0} \quad (2.9)$$

onde, $S_{xx}(\omega)$ corresponde a auto densidade espectral do ruído de vazamento $x(t)$; $\Psi(\omega)$ denota o comportamento da tubulação dada as propriedades do sistema, podendo ser representado da seguinte forma:

$$\Psi(\omega) = \left| H_1^*(\omega, l_1) \cdot H_2(\omega, l_2) \right| = e^{-\omega\beta(d_2 + d_1)} \quad (2.10)$$

onde $H_1^*(\omega, l_1)$ denota o conjugado da função resposta em frequência para $l = d_1$ e $H_2(\omega, l_2)$ denota função resposta em frequência para $l = d_2$.

A fase da densidade espectral cruzada entre os dois sinais está diretamente relacionada com o tempo de atraso dos sinais. Para o caso de vazamentos em dutos subterrâneos a fase possuiu um comportamento, onde seu gradiente está relacionado com o tempo de atraso entre os sinais, como pode ser visto na equação que segue:

$$\varphi_{x_1 x_2}(\omega) = \text{Arg}\{S_{x_1 x_2}(\omega)\} = \omega \cdot T_0 \quad (2.11)$$

A correlação cruzada pode ser obtida através da transformada inversa de *Fourier* da densidade espectral cruzada, dada pela Eq. (2.9). Sabe-se que a multiplicação no domínio da frequência é convolução no tempo, ou vice-versa. Portanto a correlação cruzada pode ser calculada por:

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = F^{-1}\{S_{x_1 x_2}(\omega)\} = R_{xx}(\tau) \otimes \psi(\tau) \otimes \delta(\tau + T_0) \quad (2.12)$$

onde $F^{-1}\{\}$ denota transformada inversa de *Fourier*; $R_{xx}(\tau)$ significa a auto correlação do ruído de vazamento; $\psi(\tau)$ denota o comportamento da tubulação; $\delta(\tau)$ representa a função delta de *Dirac*; $\otimes$ denota convolução.

A variável $\psi(\tau)$, que é a representação no domínio do tempo do termo $\Psi(\omega)$, é dado por (GAO, 2004):

$$\psi(\tau) = F^{-1}\{\Psi(\omega)\} = \frac{\beta d}{\pi[(\beta d)^2 + \tau^2]} \quad (2.13)$$

Na formulação proposta por Gao et al (2004), admitiu-se que as características espectrais do ruído de vazamento não são conhecidas, assim, assumiu-se um espectro de vazamento plano, sob o pressuposto que a densidade espectral do vazamento $S_{xx}(\omega)$ como sendo um valor constante, aqui representado por S_0 .

Na Eq. (2.12) é mostrada a função de correlação cruzada, onde o termo $\psi(\tau)$ é responsável por representar o comportamento da tubulação, este depende da medida de atenuação da parede do tubo β e da distância entre os sensores d , e apresenta comportamento análogo a um filtro passa-baixa.

Supondo um sistema com um grande nível de atenuação e/ou as posições de onde foram instalados os sensores estiverem muito distantes da fonte de vazamento, o comportamento do sistema se dá de forma semelhante ao de um filtro passa-baixa com

frequência de corte muito baixa, o que faz com que seja difícil de realizar a estimativa da localização do vazamento, uma vez que, grande parte do sinal que se encontra em frequências superiores a frequência de corte terá sido eliminada.

Filtro passa-faixa é utilizado para atenuar sinais que estejam fora da faixa de frequência de interesse, ou seja, a faixa de frequência onde a energia do sinal de vazamento não está localizada. No capítulo anterior, mencionou-se a respeito da investigação de Hunaidi (1999) sobre as características acústicas do ruído de vazamento, onde, sua energia está localizada em uma faixa de frequência geralmente entre 50 Hz e 150 Hz. Fora dessa faixa, outras fontes de ruído podem estar presentes, prejudicando assim a estimativa do atraso de sinal dado pela correlação cruzada.

Portanto, o uso de um filtro passa-faixa se faz necessário para atenuar sinais fora da faixa de frequência de interesse. Considerando a resposta em frequência de um filtro passa-faixa ideal $G(\omega)$ onde:

$$\begin{aligned} G(\omega) &= 1 & \omega_0 \leq |\omega| < \omega_1 \\ G(\omega) &= 0 & \text{caso contrário} \end{aligned} \quad (2.14)$$

e assumindo que, $S_{xx}(\omega) = S_0$, a equação 2.12, pode ser reescrita como:

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = S_0 \otimes \psi(\tau) \otimes g(\tau) \otimes \delta(\tau + T_0) \quad (2.15)$$

onde o filtro passa-faixa pode ser obtido através da transformada inversa de Fourier de $G(\omega)$ e é dado por::

$$g(\tau) = F^{-1}\{G(\omega)\} = \frac{\Delta\omega}{\pi} \frac{\sin(\Delta\omega\tau/2) \cos(\omega_c\tau)}{\Delta\omega\tau/2} \quad (2.16)$$

onde $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_0$ representa a faixa de frequência do filtro passa-faixa, ω_1 é a frequência de corte superior do filtro e ω_0 é a frequência de corte inferior do filtro. Reescrevendo a função de correlação cruzada demonstrada na equação 2.15, obtêm-se:

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = \frac{S_0 e^{-\omega_0 \beta d}}{\pi \sqrt{(\beta d)^2 + (\tau + T_0)^2}} \left[\cos(\omega_0(\tau + T_0) + \theta) - e^{-\Delta\omega \beta d} \cos(\omega_1(\tau + T_0) + \theta) \right] \quad (2.17)$$

e a expressão de θ sendo representada da seguinte forma:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{(\tau + T_0)}{(\beta d)} \right). \quad (2.18)$$

Seguindo uma análise similar ao demonstrado acima, a autocorrelação do sinal de vazamento, $R_{xx}(\tau)$ é dada por:

$$R_{xx}(\tau) = S_0 \cdot \phi(\tau) \otimes g(\tau) \quad (2.19)$$

onde:

$$\phi(\tau) = F^{-1}\{|H(\omega, l)|^2\} = \frac{2\beta l}{\pi \sqrt{(2\beta l)^2 + \tau^2}} \quad (2.20)$$

Reescrevendo a equação 2.19 tem-se:

$$R_{xx}(\tau) = \frac{S_0 e^{-2\omega_0 \beta l}}{\pi \sqrt{(2\beta l)^2 + (\tau)^2}} \left[\cos(\omega_0 \tau + \theta) - e^{-2\Delta\omega \beta l} \cos(\omega_1 \tau + \theta) \right] \quad (2.21)$$

Logo, utilizando as equações 2.17 e 2.21 é possível encontrar a equação referente ao coeficiente da correlação cruzada dada por:

$$\rho_{x_1 x_2}(\tau) = \frac{2\beta \sqrt{d_1 d_2}}{\sqrt{(\beta d)^2 + (\tau + T_0)^2}} \frac{\cos(\omega_0(\tau + T_0) + \theta) - e^{-\Delta\omega \beta d} \cos(\omega_1(\tau + T_0) + \theta)}{(1 - e^{-2\Delta\omega \beta d_1})^{\frac{1}{2}} (1 - e^{-2\Delta\omega \beta d_2})^{\frac{1}{2}}} \quad (2.22)$$

2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para realizar as simulações, visando a demonstração do método de correlação cruzada, utilizou-se dados descritos por Almeida et al. (2014), referente aos valores experimentais utilizados em seu trabalho. A Tabela 2.1 mostra os referidos dados, bem como dados relacionados aos parâmetros utilizados no processamento de sinais, como a frequência de amostragem e período de amostragem.

O motivo de utilizar parâmetros advindos de um experimento tem como objetivo simular um sistema de vazamento mais próximo do real e encontrado na literatura.

Tabela 2.1 – Dados utilizados na simulação.

Dados	Valor	Unidade
Frequência de Amostragem [F_a]	8000	<i>Hz</i>
Período [T]	5	<i>s</i>
Número de onda de um fluído livre [k_f]	1200	---
Fator de perda da parede do tubo [η]	0.1	---
Raio do Tubo [a]	75	<i>mm</i>
Espessura da parede do tubo [h]	9.85	<i>mm</i>
Módulo de Young do material do tubo [E]	$2 \cdot 10^9$	<i>N / m</i>
Módulo de Bulk do fluído [B]	$2.2 \cdot 10^9$	<i>N / m</i>
Distância 01 [d_1]	20	<i>m</i>
Distância 02 [d_2]	30	<i>m</i>
Velocidade de onda do fluído [c_f]	1500	<i>m / s</i>
Velocidade da onda [c]	356.0218	<i>m / s</i>

Fonte: Elaborado pelo autor

Com intuito de demonstrar o comportamento da densidade espectral cruzada teórica entre os ruídos de vazamento mostrada na Equação 2.9, utilizou-se os dados da Tabela 2.1.

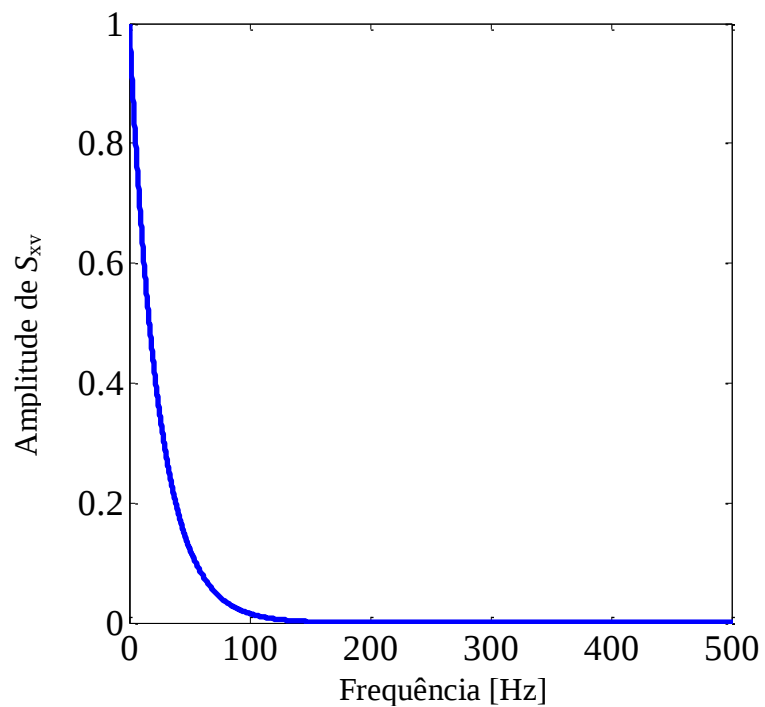
A Figura 2.2 demonstra o módulo e a fase da densidade espectral cruzada teórica mostrada na equação 2.9, onde corresponderia a densidade espectral cruzada entre os ruídos de vazamentos medidos pelo sensor 1 e 2. O módulo da densidade espectral cruzada, mostrado na Figura 2.2(a), como comentado anteriormente, apresenta um comportamento semelhante ao de um filtro passa-baixa devido ao parâmetro $\Psi(\omega)$.

O atraso do sinal pode ser calculado no domínio do tempo e no domínio da frequência. No domínio da frequência o atraso de sinal pode ser calculado estimando o gradiente da fase da densidade espectral cruzada, enquanto que, no domínio do tempo, a correlação cruzada é utilizada para o cálculo do atraso do sinal (SHIN; HAMMOND, 2008). A Figura 2.2(b) mostra o comportamento da fase da densidade espectral cruzada como sendo uma reta, como mostra a equação 2.11.

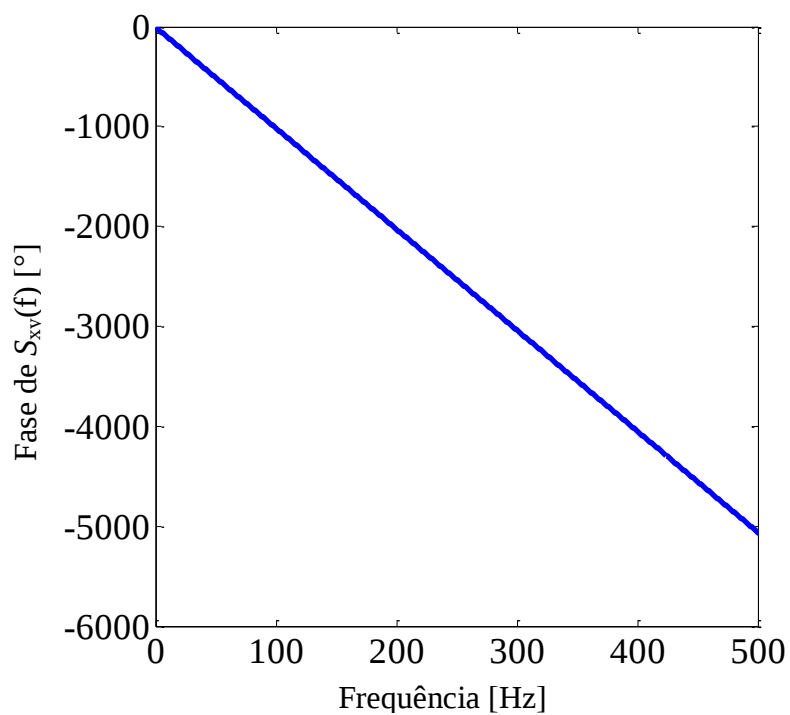
Como os parâmetros do sistema são previamente conhecidos (dados mostrados na tabela 2.1), o tempo de atraso também é conhecido e igual a 0.0281 segundos. Portanto, utilizando os dados mostrados na tabela 2.1 pode-se então calcular o gradiente da fase, que é a estimativa do tempo de atraso. O valor encontrado foi de 0.0281 segundos como esperado.

Figura 2.2 – Densidade espectral cruzada teórica, a) amplitude e b) fase.

a)



b)

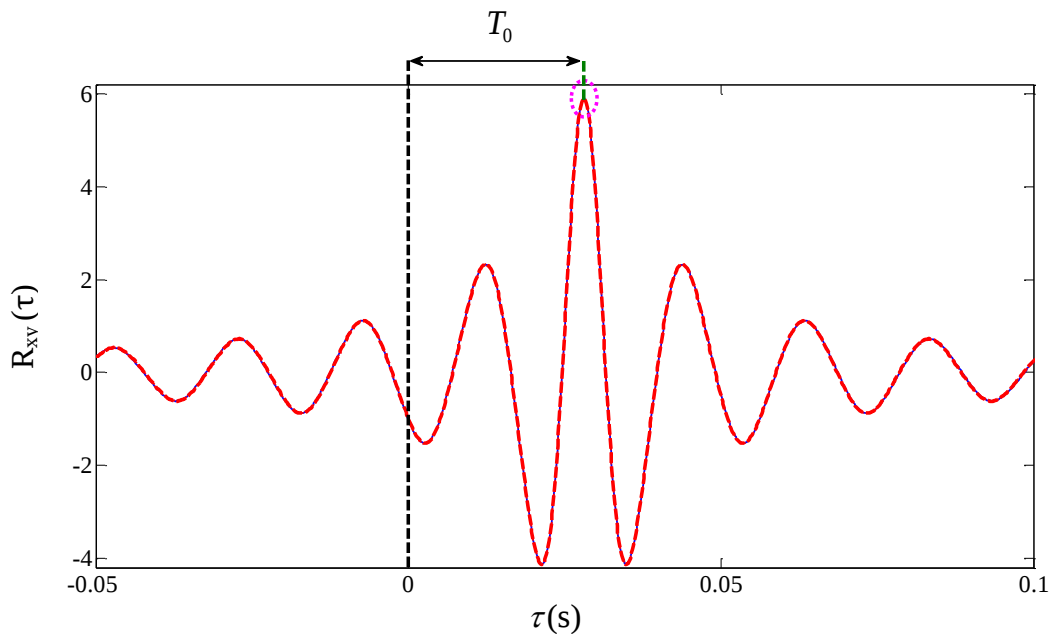


Fonte: Elaborado pelo autor

Para o cálculo do atraso de sinal no domínio do tempo, utilizou-se a correlação cruzada dos sinais. A Figura 2.3 mostra a comparação entre duas maneiras de cálculo da correlação cruzada, ambas utilizando os dados mostrados na tabela 2.1. A primeira forma de cálculo da correlação cruzada é obtida utilizando a equação 2.17 e mostrada pela linha tracejada vermelha.

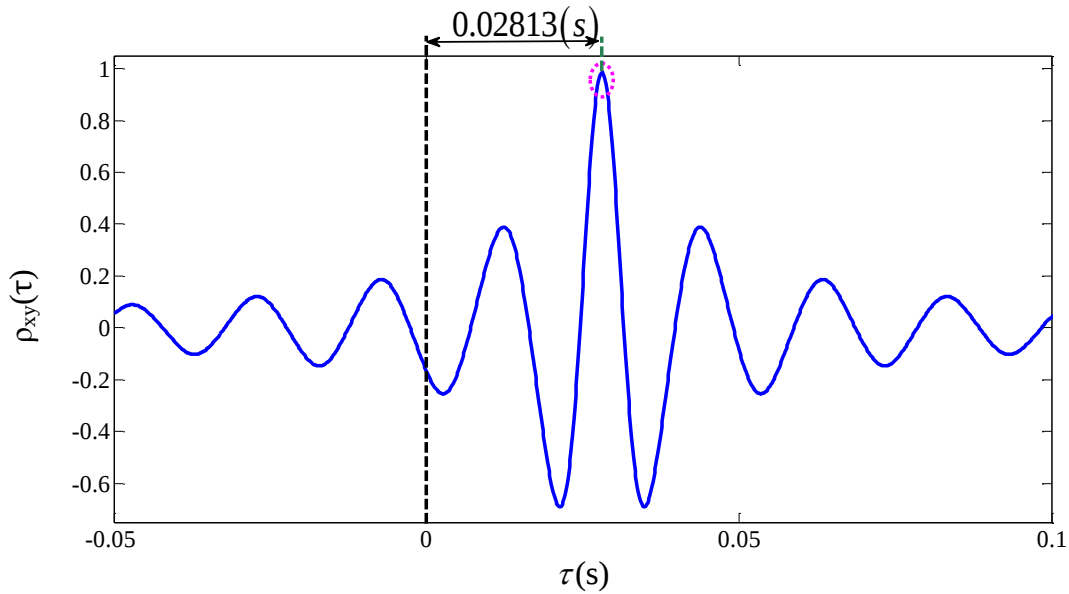
A segunda se faz utilizando a transformada inversa de *Fourier* da densidade espectral cruzada, mostrada pela equação 2.9, que é mostrada pela linha sólida em azul. Como esperado, a correlação cruzada calculada utilizando a equação 2.9 e a equação 2.17 são idênticas e ambos os picos forneceram o valor de 0.0281 segundos, condizente com os dados mostrados na Tabela 2.1. Este resultado também enfatiza que o programa criado para gerar sinais simulados de vazamento está correto e consistente, até mesmo mostrando que o atraso de sinal é igual ao gradiente da fase da densidade espectral condizente com a literatura.

Figura 2. 3 – Comparativo entre a correlação teórica com a transformada inversa de Fourier da densidade espectral teórica. — $F^{-1}\{S_{x_1x_2}(\omega)\}$; - - - $R_{x_1x_2}(\tau)$.



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 2.4 mostra o coeficiente de correlação cruzada, mostrado na equação 2.22, cuja amplitude varia de -1 a 1.

Figura 2.4 – Coeficiente de correlação cruzada teórica

Fonte: Elaborado pelo autor

Como não foi adicionado ruído de fundo ao simulador e o atraso de sinal puro, ou seja, sem distorções externas como, por exemplo, reflexões de onda, o coeficiente de correlação cruzada quando $\tau = T_0$ é próximo de 1. Isto significa que os sinais coletados tanto no sensor 1 quanto no sensor 2 são muito similares, ou seja, a única diferença é que um sinal é mais atenuado que o outro já que $d_1 \neq d_2$.

2.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo descreveu-se o método acústico de correlação cruzado utilizado para o cálculo de atraso de sinais, sendo aqui específico para problemas de detecção de vazamentos em dutos subterrâneos. Mostrou-se que tal método pode ser utilizado tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. No domínio da frequência, o gradiente da fase da densidade espectral cruzada é utilizado para o cálculo do atraso do sinal, já no domínio do tempo, a correlação cruzada entre os sinais de vazamento coletados, com dois sensores vibra-acústicos, é utilizada para o cálculo do atraso de sinais.

Também se mostrou o desenvolvimento do simulador de sinais de vazamento utilizando um modelo teórico de propagação de ondas em dutos subterrâneos, tal simulador foi validado utilizando dados reais de uma tubulação de plástico enterrada onde vazamentos simulados sobre condições controladas foram obtidos.

3 CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DOS ATUADORES ELETROMECAÑNICOS

3.1 FUNDAMENTAÇÃO INICIAL

No capítulo anterior mostrou-se o procedimento utilizado para gerar sinais simulados de vazamentos. O modelo analítico da tubulação utilizado foi baseado no trabalho realizado por Gao et al. (2004), sendo este, função dos parâmetros construtivos e geométricos da tubulação. Estes sinais simulados serão utilizados como sinais de entrada em atuadores eletromecânicos, que por sua vez simularão a resposta vibratória dos pontos de medição de tubos enterrados, de forma a obter-se situações simuladas de vazamento.

Desta maneira, correlacionadores de sinais comerciais poderão ser testados, bem como, equipes de detecção de vazamentos também poderão ser treinadas utilizando diferentes condições de vazamento criadas a partir do simulador de sinais. Entretanto, para utilizar os atuadores eletromecânicos como pontos de medição simulados, seu comportamento dinâmico e suas características construtivas devem ser entendidos, atenuando seus efeitos no sinal simulado medido em sua superfície.

O objetivo deste capítulo é descrever o modelo dinâmico utilizado na modelagem dos atuadores eletromecânicos, bem como, a resposta dinâmica do mesmo, visando um melhor entendimento físico de seu comportamento. Para este primeiro protótipo utilizou-se caixas de som facilmente encontradas no mercado como atuadores eletromecânicos. Estas caixas de som foram caracterizadas e modeladas visando diminuir seus efeitos dinâmicos, preservando as características principais de um sinal de vazamento simulado.

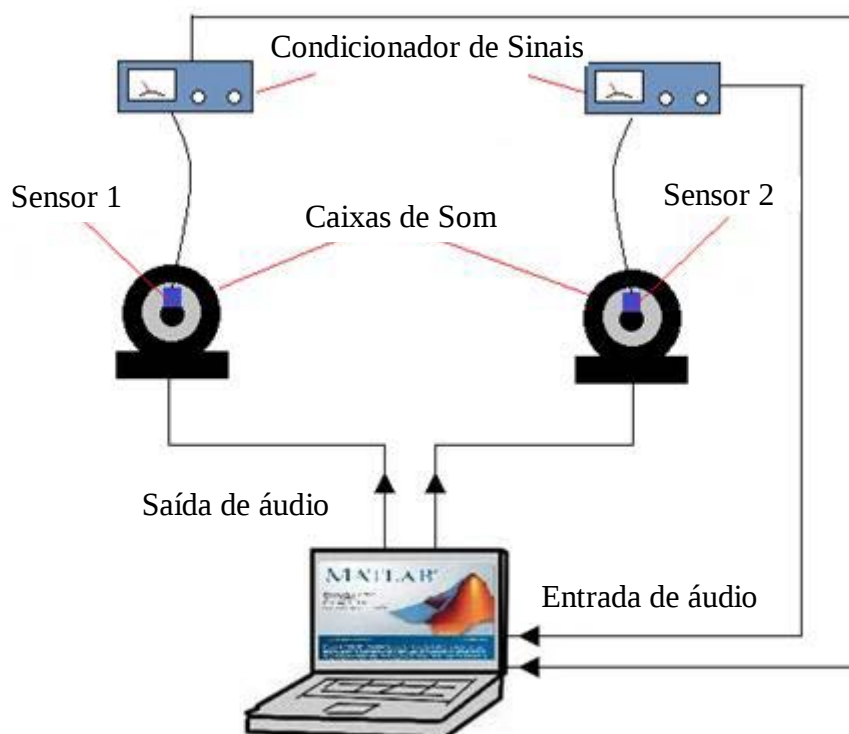
3.2 IDEIA CONCEITUAL PARA OBTENÇÃO DO SIMULADOR DE VAZAMENTO

A primeira ideia sobre o Simulador Virtual de Vazamentos (SVV) é que este equipamento deveria ser portátil e robusto. Desta maneira, pensou-se que um laptop convencional e dois atuadores eletromecânicos seriam o suficiente para obter inicialmente um primeiro protótipo do SVV.

A Figura 3.1 mostra o esquema do simulador de sinais de vazamento proposto neste trabalho. O sinal simulado de vazamento, obtido utilizando as equações descritas no capítulo anterior, é gerado por algum programa computacional instalado no laptop como, por exemplo, o MATLAB[®], e enviado pela saída de áudio do laptop para o atuador (caixas de som). Além

do mais, os sinais coletados na superfície dos atuadores eletromecânicos, utilizando sensores vibro-acústicos, são enviados ao laptop através da sua entrada de áudio, onde tais sinais também são gravados e processados a fim de se obter uma estimativa do atraso de sinal pela função de correlação cruzada, assim como é feito na prática.

Figura 3.1 – Esquemática do simulador de sinais aqui chamado de Simulador Virtual de Vazamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor

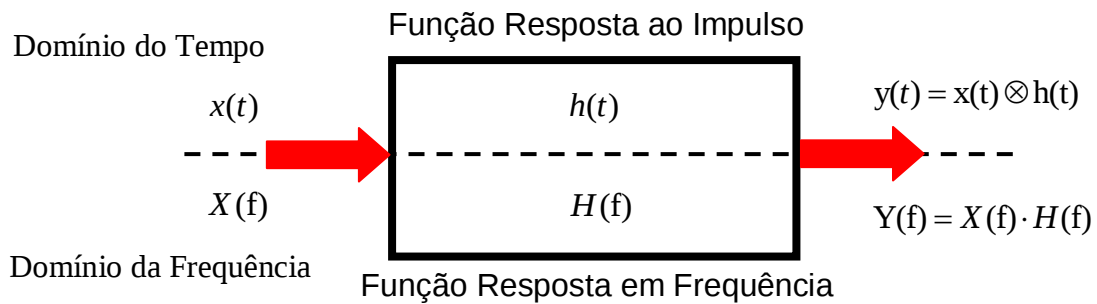
As caixas de som da marca Pixxo[®], modelo SP-N700 (atuadores eletromecânicos) utilizadas neste primeiro protótipo conseguem trabalhar na forma *stereo*, ou seja, são dois canais de áudio independentes, onde cada uma dessas caixas emitirá um sinal característico próprio simulando a resposta da tubulação nos pontos de medida. Um algoritmo computacional criado especialmente para este simulador ficará responsável por efetuar os cálculos necessários para estimar a localização do vazamento (estimativa do atraso dos sinais adquiridos) utilizando os sinais coletados pelos sensores.

O protótipo desenvolvido neste trabalho, intitulado como “Simulador Virtual de Vazamento” (SVV), é a primeira tentativa de produzir um equipamento (*hardware*) capaz de realizar testes em correlacionadores acústicos comerciais e treinamento de equipes responsáveis por detectar vazamentos em dutos subterrâneos em centros urbanos.

3.3 CONCEPÇÃO DOS SINAIS DE VAZAMENTO

Para uma melhor contextualização da concepção do SVV, alguns pontos teóricos mencionados no Capítulo 2 serão aqui citados novamente por conveniência. Existem dois domínios no qual se pode realizar a análise de um sinal, e estes domínios podem ser no tempo ou na frequência, sendo assim possível transformar o sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência através da transformada de *Fourier*, e vice versa utilizando a transformada inversa de *Fourier* (BENDAT; PIERSOL, 2010). A Figura 3.2 mostra a relação entre a entrada e saídas nos domínios do tempo e da frequência.

Figura 3.2 – Representação esquemática da entrada e saída de sinais em um sistema linear nos domínios do tempo e da frequência



Fonte: Elaborado pelo autor

A função que denota a forma como o sistema se comporta é chamada de função resposta ao impulso $h(t)$ quando o sinal é representado no domínio do tempo. Quando representado no domínio da frequência é chamado de função resposta em frequência $H(f)$. No domínio temporal, o sinal de saída $y(t)$ é obtido através da convolução (representada pelo símbolo $\otimes$) entre a entrada no domínio do tempo $x(t)$ com a função resposta ao impulso $h(t)$. No domínio da frequência, entretanto, obtêm-se a saída $Y(f)$ através da multiplicação do sinal de entrada com $X(f)$ a função resposta em frequência $H(f)$.

No estudo referente à detecção de vazamento, conforme mencionado no Capítulo 2, o sinal de vazamento é assumido como ruído branco com distribuição normal. Os cálculos dos sinais vibratórios simulados nos pontos de medida podem ser obtidos utilizando a função resposta em frequência da tubulação, proposta por Gao (2004), sendo esta, mostrada na equação 2.6. Tais sinais também podem ser obtidos, utilizando a resposta ao impulso obtida

via transformada inversa de *Fourier* $F^{-1}\{\}$ da FRF da tubulação. Portanto os sinais de vazamento podem ser gerados no domínio da frequência, sendo posteriormente convertido no domínio do tempo via transformada inversa de *Fourier* como:

$$x_{1,2}(t) = F\{X(\omega) \cdot H(\omega, d_{1,2}) \cdot G(\omega)\}^{-1} \quad (3.1)$$

ou utilizando a resposta ao impulso conforme mostra a equação abaixo

$$x_{1,2}(t) = x(t) \otimes h(t, d_{1,2}) \otimes g(t) \quad (3.2)$$

onde $x_{1,2}(t)$ corresponde aos ruídos de vazamento medidos pelos sensores 1 ou 2, dependendo do ponto de medida utilizado; $x(t)$ e $X(f)$ representam o ruído de vazamento no domínio do tempo e da frequência respectivamente, admitindo tal ruído como sendo um sinal randômico (ruído branco); $h(t, d_{1,2})$ e $H(\omega, d_{1,2})$ correspondem as funções resposta ao impulso e resposta em frequência, respectivamente, da seção da tubulação localizada entre o vazamento e o ponto de medida de interesse (1 e 2); $g(t)$ e $G(f)$ a resposta do filtro passa-faixa no domínio do tempo e da frequência, respectivamente.

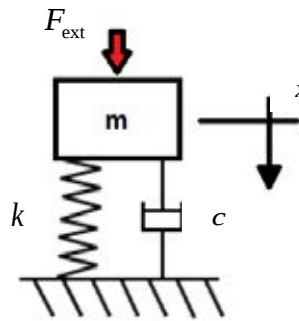
Portanto, os sinais simulados de vazamento podem ser criados desta maneira, mas para este trabalho, somente a equação 3.1 será utilizada, visto que, o processamento de sinais utilizado é mais eficiente e simples.

3.4 MODELAGEM DO ATUADOR ELETROMECHANICO

O intuito de realizar a modelagem do atuador eletromecânico está relacionado à necessidade de conhecer seu comportamento dinâmico, visando atenuar ou até mesmo eliminar sua interferência nos sinais simulados de vazamento coletados em sua superfície.

Na figura 3.3 é mostrada a esquemática da construção de uma caixa de som comum, similar à utilizada como atuador eletromecânico neste trabalho. Esta caixa de som possui massa, rigidez e amortecimento associada a sua característica construtiva.

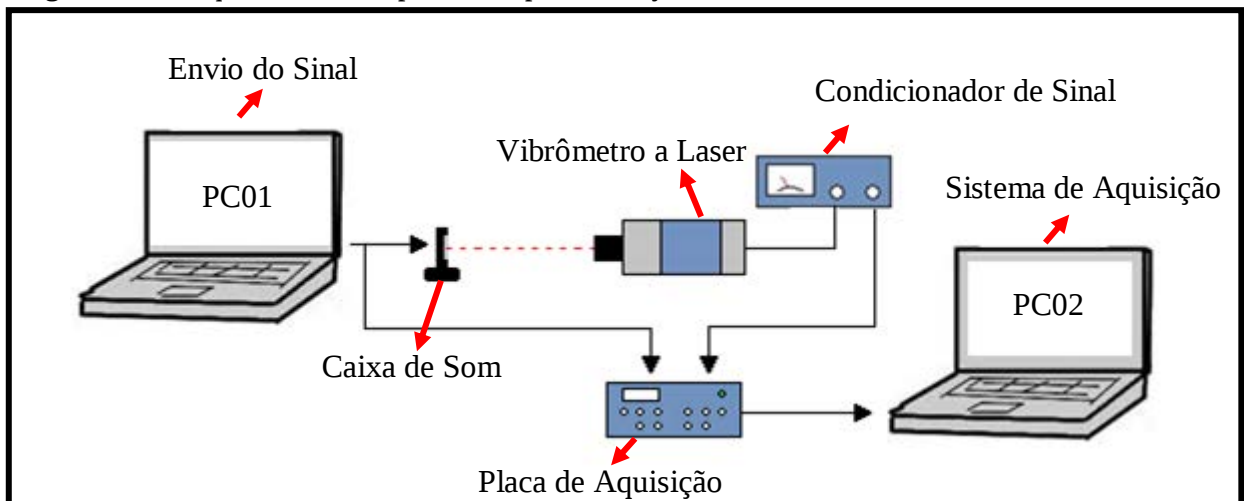
Figura 3.4 – Sistema massa-mola-amortecedor, k denota a rigidez da mola, c o amortecimento, m a massa, F_{ext} a força induzida no sistema e x como sendo o deslocamento.



Fonte: Elaborado pelo autor

Entretanto, para validar o modelo proposto para o atuador eletromecânico (1 grau de liberdade com excitação externa) se faz necessário medir a resposta real da caixa de som utilizada e comparar os resultados. A Figura 3.5 mostra, esquematicamente, o *set-up* experimental utilizado para a obtenção da função resposta em frequência da caixa de som.

Figura 3.5 – Esquemática do experimento para obtenção da FRF da caixa-acústica



Fonte: Elaborado pelo autor

O computador gera e envia um sinal randômico para a caixa de som e um vibrômetro a laser (medição sem contato) faz a leitura da resposta da membrana acústica da caixa. Como se tem os sinais de entrada e saída, a resposta em frequência do atuador eletromecânico pode ser estimada. A utilização do vibrômetro a laser se deve ao fato deste equipamento não interferir nas características do sistema, por exemplo, não adicionando massa ao sistema. Como já mencionado, o sinal medido pelo laser (sinal de saída) e o sinal enviado para a caixa de som (sinal de entrada), serão utilizados para a obtenção da FRF do atuador eletromecânico.

Segundo Bendat and Piersol (2010) o cálculo realizado para obtenção da FRF é realizado através da divisão entre a densidade espectral cruzada entrada-saída S_{xy} pela autodensidade espectral do sinal da entrada S_{xx} , conforme mostra a equação abaixo:

$$H_v(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (3.3)$$

Dessa forma é obtida uma FRF, a partir de um sinal de entrada, sendo este a voltagem enviada às caixas de som a partir da placa de áudio do laptop e como sinal de saída, a velocidade medida pelo laser.

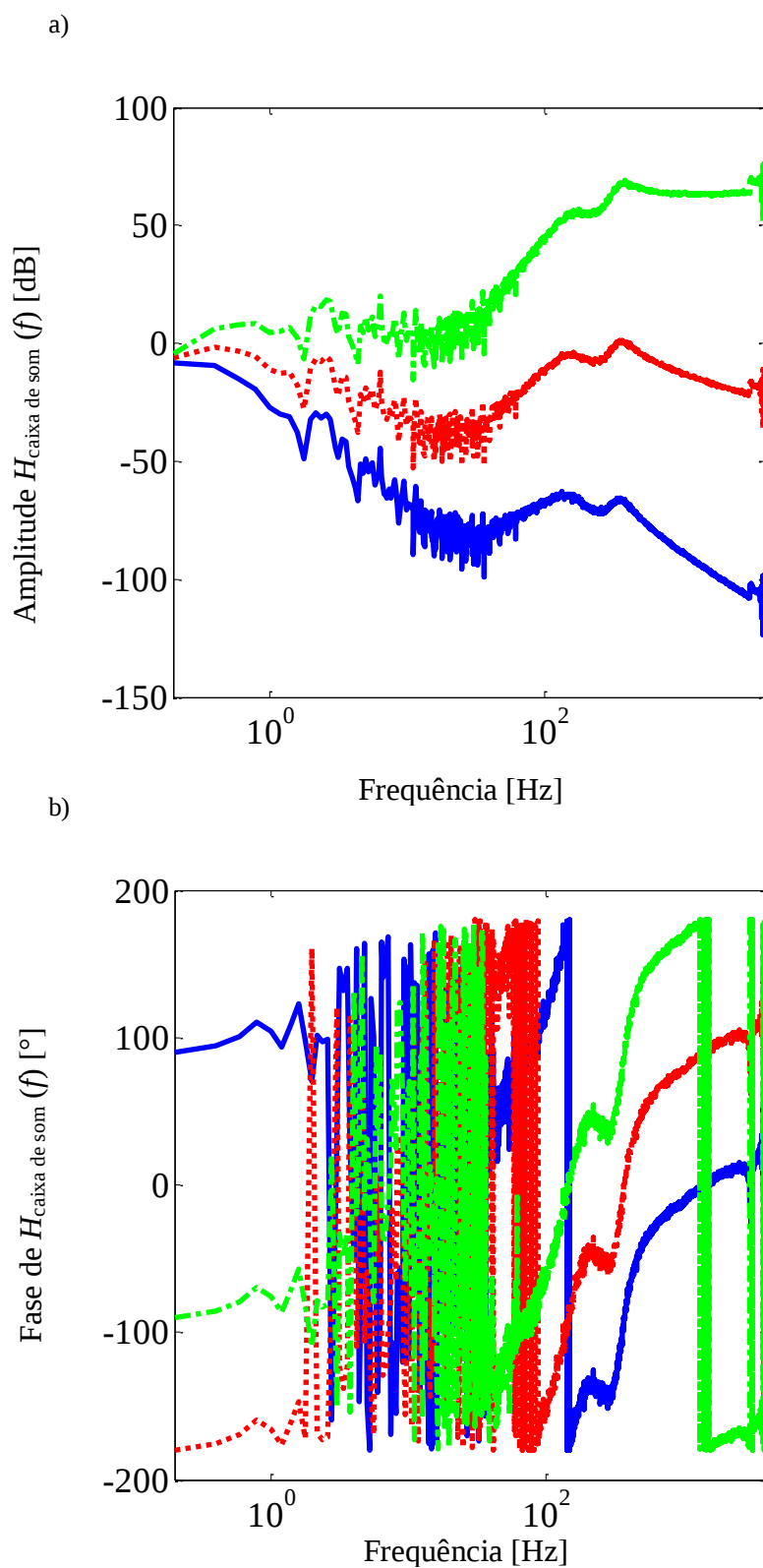
Derivando a FRF da velocidade, obtêm-se a FRF da aceleração, e ao realizar a integração da FRF da velocidade obtêm-se a FRF do deslocamento. Essas funções resposta em frequência são importantes para a correção do comportamento dinâmico dos atuadores eletromecânicos, visto que, a escolha das mesmas é dependente do tipo de sensor utilizado na medição da resposta da caixa de som como, por exemplo, sensores de deslocamento, velocidade e aceleração.

A Figura 3.6 mostra os resultados obtidos referentes às FRF da caixa de som para sinais de deslocamento, velocidade e aceleração. Na figura 3.6(a) são mostrados os módulos das FRFs da caixa de som, sendo a linha sólida azul correspondente a FRF dos sinais de deslocamento, a linha pontilhada vermelha como sendo a FRF dos sinais de velocidade e a linha tracejada verde correspondente a FRF dos sinais de aceleração.

As fases dessas FRFs são mostradas na Figura 3.6(b), onde se observa que o primeiro valor referente ao ângulo da fase da FRF dos sinais de deslocamento tem como valor aproximado de 90° , enquanto o ângulo da FRF dos sinais de velocidade apresentam valor aproximado de -180° e o ângulo referente aos sinais de aceleração por sua vez apresenta valor de -90° . Era esperada a existência dessa diferença de fase, uma vez que, o comportamento do atuador eletromecânico se dá de forma similar ao descrito nos conceitos de Vibração referente à Movimento Harmônico Simples, onde a velocidade tem uma diferença de fase de 90° com o deslocamento e a aceleração possui uma diferença de fase de 180° com o deslocamento.

Figura 3.6 – Função resposta em frequência da caixa de som, a) amplitude e b) fase;

— Deslocamento; ···· Velocidade; - - - Aceleração.

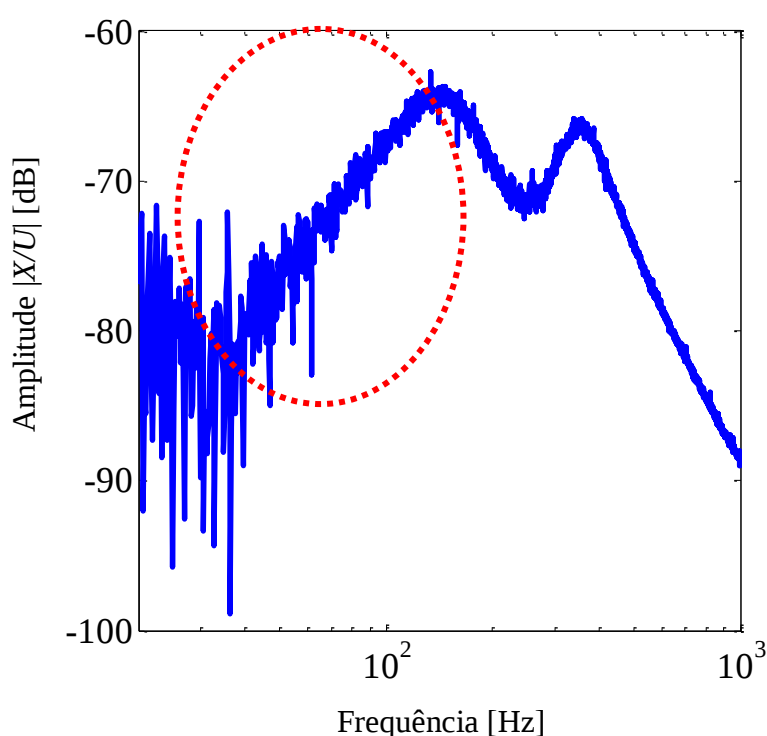


Fonte: Elaborado pelo autor

Será tomado como objeto de estudo a FRF referente aos sinais de deslocamento da caixa de som, uma vez que, esta FRF é mais usualmente estudada em literaturas referentes ao estudo de vibração.

A FRF referente ao deslocamento do atuador eletromecânico é mostrada na Figura 3.7, em que nota-se uma alteração no comportamento em frequências menores que 150 Hz. Este fenômeno deve-se à existência de um filtro passa-alta embutido na caixa de som que faz com que a FRF, ao invés de estar na horizontal, apresente certa declividade.

Figura 3.7 – Amplitude função resposta em frequência dos sinais do deslocamento da caixa de som



Fonte: Elaborado pelo autor

Para atenuar a influência do filtro passa-alta no sinal, uma forma de compensação pode ser utilizada antes de enviar os sinais de vazamento simulados para as caixas de som. Tal forma seria a multiplicação da resposta em frequência da inversa do filtro passa-alta pela resposta em frequência da caixa de som. Dessa maneira, os sinais de vazamento localizados em baixa frequência seriam amplificados atenuando, de certa maneira, os efeitos do filtro passa-alta.

Um circuito elétrico do tipo RC (resistivo capacitivo) pode ser utilizado para implementar operações de filtros passa-alta ou passa-baixa dependendo de qual elemento for escolhido para a análise do sinal de saída, tendo como sinal de entrada a fonte de alimentação Oppenheim (1997). Optando-se como tensão de saída a tensão sobre o resistor, obtêm-se um

filtro passa-alta. Caso a tensão de saída escolhida seja a tensão sobre o capacitor, será obtido um filtro passa-baixa. O inverso da resposta em frequência de um filtro passa-alta pode ser calculado por:

$$H_{\text{filt}} = \frac{1 + (i\omega \times RC)}{i\omega \times RC} \quad (3.4)$$

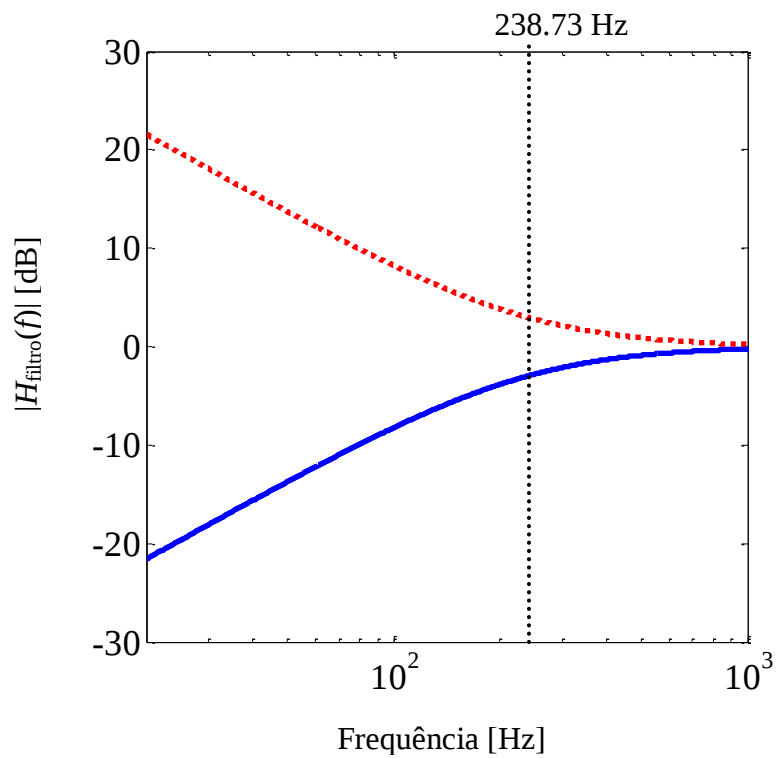
onde i representa número complexo; ω denota a frequência em rad/s; RC corresponde a uma constante resultante da multiplicação entre o valor do resistor pelo valor do capacitor do circuito elétrico.

A Figura 3.8 mostra o comportamento dinâmico (amplitude e fase) utilizando a equação 3.4 e com valor de RC igual a $6.67 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot F$:

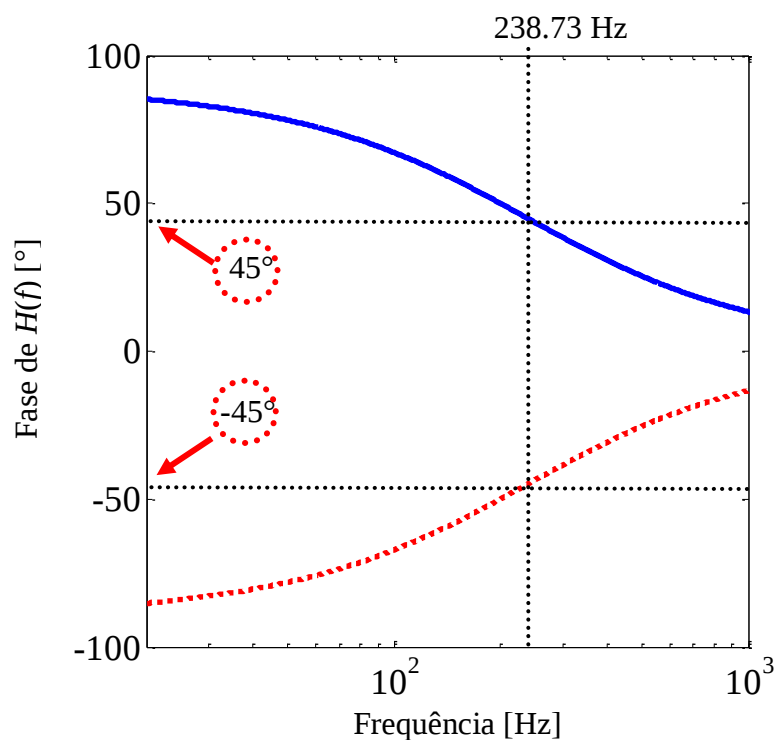
Figura 3.8 – Comportamento dos filtros a) amplitude e b) fase; — Inversa do Filtro Passa Alta;

..... Filtro Passa Alta.

a)



b)

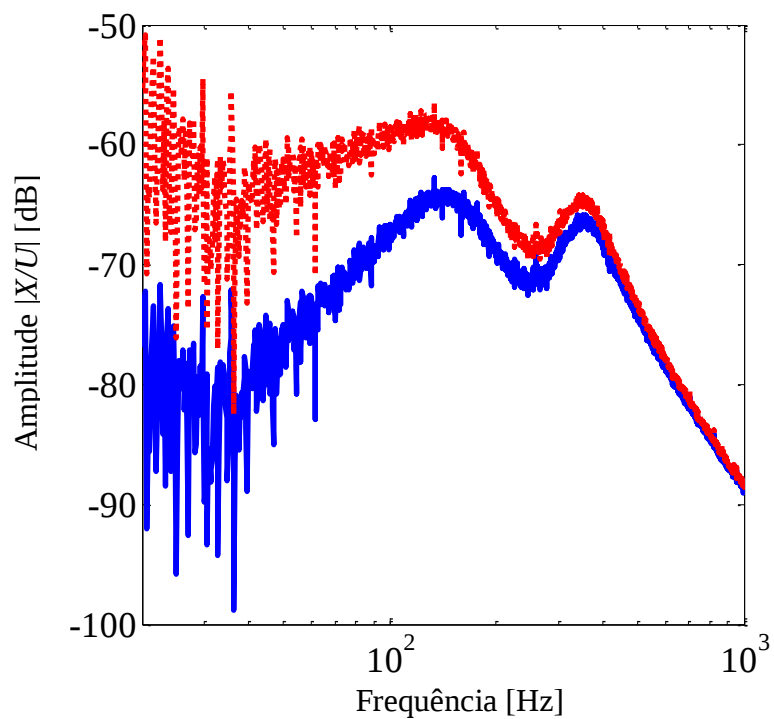


Fonte: Elaborado pelo autor

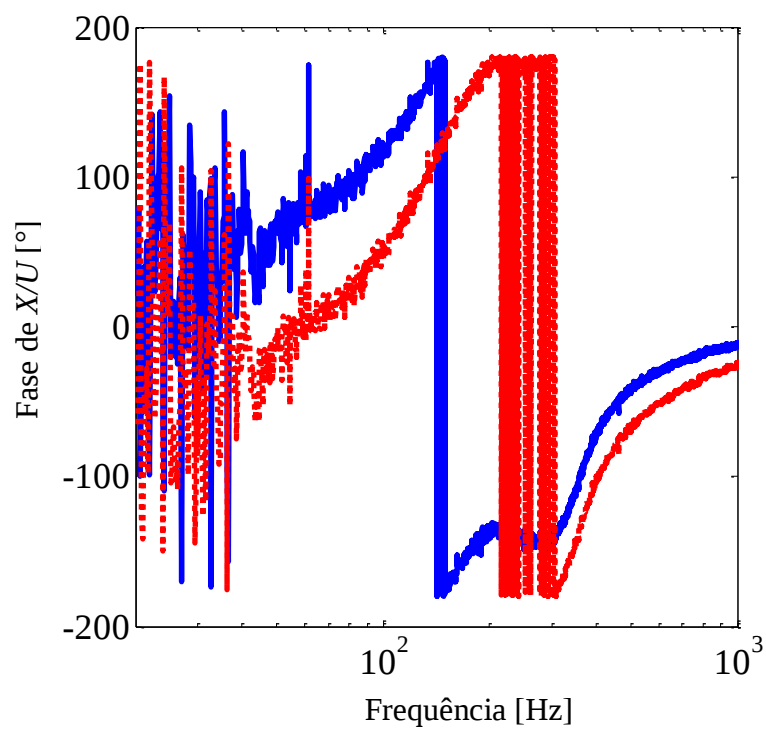
A Figura 3.9 mostra o resultado da compensação, quando aplicada na caixa de som, nota-se a alteração da FRF para frequências menores que 250 Hz, atenuando o comportamento dinâmico da caixa de som na faixa de frequência de interesse, que corresponde de 50 a 150 Hz.

Figura 3.9 – Diferença entre as compensações da função resposta em frequência da caixa de som; a) amplitude e b) fase; — Sem compensação; Com Compensação.

a)



b)

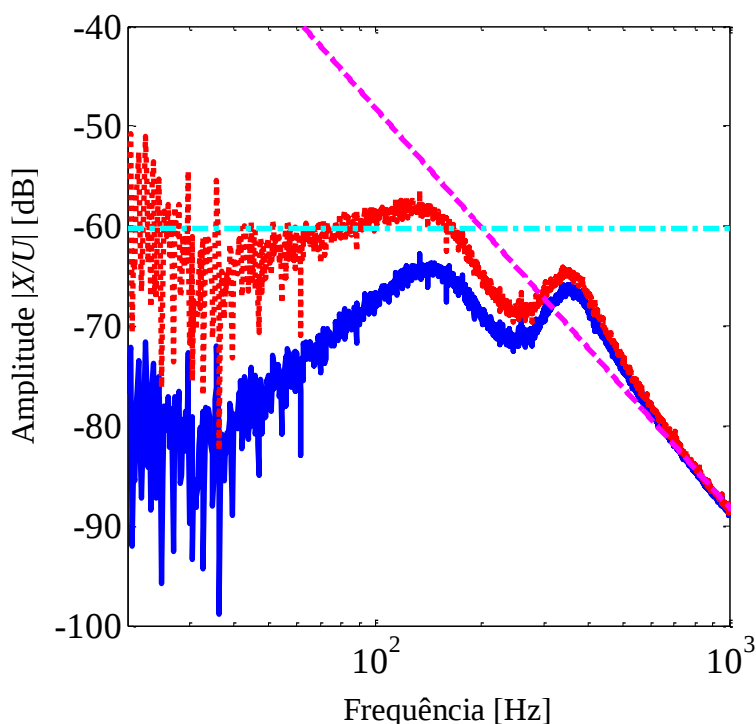


Fonte: Elaborado pelo autor

Como fora comentado anteriormente, a compensação tem o objetivo de preparar o sinal antes de realizar o envio deste para as caixas acústicas, mantendo sua integridade e não sofrendo influências provenientes deste atuador eletromecânico.

A Figura 3.10 mostra a função resposta em frequência do deslocamento, onde é possível observar a presença de dois picos de ressonância, o que indica que se trata de um sistema de dois graus de liberdade. A compensação se concentrou na faixa de frequência de 50 e 150 Hz, e de forma aproximada buscou manter a FRF como uma reta na horizontal, atenuando frequências fora da faixa de frequência de interesse. A partir da FRF do deslocamento, é possível estimar os valores da massa e da rigidez da mola, uma vez que, a equação da rigidez da mola é dada por $1/k$, obtendo-se um valor aproximado de 1028.8 N/m. Já utilizando a equação da massa, representada por $1/(m \cdot \omega^2)$, obteve-se um valor aproximado da massa do sistema igual a 6.4489e-4 Kg.

Figura 3.10 – Compensação da FRF da caixa de som; — Sem Compensação; Com compensação; — Equação da Mola (1028.8 N/m); — Equação da Massa (6.4489e-4 Kg).



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo discutiu-se como é constituído o Simulador Virtual de Vazamento, bem como o procedimento adotado para a geração ruídos de vazamento nos sensores. Outro tópico abordado neste capítulo foi à modelagem do atuador eletromecânico e a compensação dinâmica dos atuadores, de forma a obter sinais simulados com uma menor interferência dinâmica do atuador eletromecânico nas medidas realizadas em sua superfície.

4 VALIDAÇÃO E APLICAÇÃO DO SIMULADOR DE VAZAMENTO DE DUTOS SUBTERRÂNEOS

4.1 APARATO EXPERIMENTAL

O protótipo desenvolvido neste trabalho e intitulado como “Simulador Virtual de Vazamento”, é a primeira tentativa de produzir um equipamento (*hardware*) a ser utilizado na realização de testes em correlacionadores acústicos comerciais e treinamento de equipes responsáveis por detectar vazamentos em dutos subterrâneos em centros urbanos.

O objetivo deste capítulo é realizar o estudo referente ao funcionamento de um simulador de sinais (*hardware*) chamado de “Simulador Virtual de Vazamento”, mostrando os procedimentos adotados para sua concepção, componentes utilizados em sua montagem experimental e, por se tratar de um protótipo, serão mencionadas as adversidades encontradas que influenciaram ou poderiam influenciar na estimativa do atraso do sinal obtido pela técnica da correlação cruzada.

Para dar início aos procedimentos de teste utilizando o SVV e o correlacionador, primeiramente fixa-se os sensores do correlacionador nas membranas acústica dos dois atuadores eletromecânicos (caixas de som). Em seguida, através da interface do simulador do SVV, o usuário configura os parâmetros do sistema da tubulação, tais como as propriedades da tubulação e a distância entre os postos de instalação dos sensores, como uma situação real encontrada em campo. Neste trabalho, a interface com o usuário foi desenvolvida utilizando o GUI do MATLAB®. A partir dos parâmetros adotados, o software gera os ruídos de vazamento e os envia às caixas de som, assim, cada membrana acústica vibrará de acordo com o sinal que lhe fora enviado a partir da programação. A vibração gerada na membrana acústica da caixa de som é por sua vez medida utilizando sensores (neste trabalho utilizou-se acelerômetro).

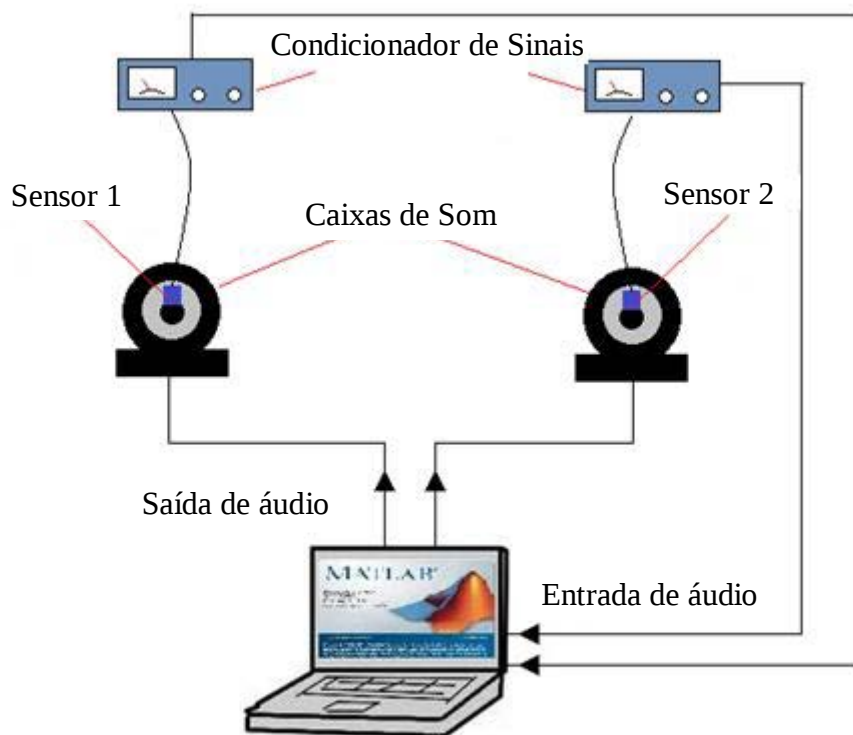
Os sinais adquiridos são então encaminhados ao correlacionador de sinais, ficando este, responsável por realizar os procedimentos de análise e processamento de sinais, a fim de fornecer a estimativa da localização do vazamento. É possível comparar os valores da estimativa da localização do vazamento fornecida pelo correlacionador e o real valor da posição do vazamento ao longo da tubulação, uma vez que, todas as características do sistema são previamente conhecidas.

Na elaboração do presente trabalho, não foi possível utilizar um correlacionador acústico comercial na realização dos testes no SVV, uma vez que, o custo deste equipamento é alto e não se encontra disponível na universidade. Dessa forma, foi proposta uma alternativa, onde se utiliza acelerômetros do tipo ICP para medir a vibração das membranas acústicas e, em seguida, os sinais medidos retornam ao laptop, para serem processados. Uma programação elaborada realizará a análise dos sinais mensurados e então fornecerá a estimativa da localização do vazamento. Em suma, o laptop irá desempenhar o mesmo papel que um correlacionador comercial desempenharia.

A esquemática do SVV já foi ilustrada nos capítulos anteriores, e por questão de conveniência será novamente mostrada na Figura 4.1(a). A Figura 4.1(b) mostra a montagem experimental do SVV, objeto de estudo deste trabalho.

Figura 4.1 – Simulador Virtual de Vazamento; (a) Esquemática do simulador e (b) montagem do experimento.

a)



b)



Fonte: Próprio autor.

O envio dos ruídos de vazamento e captação dos sinais medidos pelos acelerômetros se dá por meio da entrada e saída do sistema de áudio de um laptop comum, que podem ser visualizadas na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Entrada e saída de áudio do notebook.



Fonte: Acervo do próprio autor.

Os demais componentes utilizados na montagem experimental do SVV são mostrados na Figura 4.3.

Figura 4.3 – (a) Condicionador de Sinais de Sensores do tipo ICP, (b) adaptador do tipo P2 para BNC e (c) fixação do acelerômetro ICP na membrana acústica da caixa de som.



Fonte: Acervo do próprio autor.

4.2 ESTUDO DE CASO

No capítulo 03, tratou-se sobre a concepção dos ruídos de vazamento, onde se assume que a fonte inicial do vazamento é um sinal randômico (ruído branco). Assume-se que este sinal randômico é gerado pelo vazamento no local onde ocorre a trinca na tubulação. Para este sinal ser transformado nos ruídos de vazamento simulados gerados pelo simulador nos pontos de medida, é necessário que o mesmo passe por uma série de processamentos e correções como, por exemplo, a atenuação da resposta dinâmica das caixas de som.

Inicialmente, o sinal randômico passará por um procedimento de filtragem (filtro passa-faixa), excluindo parte do sinal que não esteja incluso na faixa de frequência de interesse. Uma vez que, como mencionado nos capítulos anteriores, a faixa de frequência que normalmente é encontrado sinais de vazamento, corresponde de 50 a 150 Hz.

Após esse procedimento de filtragem, o sinal é encaminhado ao compensador descrito no capítulo anterior. Este compensador foi desenvolvido com objetivo de atenuar a influência do atuador eletromecânico nas características do sinal, assim, o intuito dessa compensação é de fazer com que a integridade do sinal seja preservada.

Em seguida, o sinal é aplicado ao modelo analítico, mostrado no capítulo 02, que descreve o comportamento da tubulação (equação 2.6). Relembrando, este modelo analítico simula a filtragem do ruído gerado pelo vazamento, ao longo da tubulação, até chegar aos pontos de medidas. A filtragem é dependente da característica da tubulação e distância entre o vazamento e o ponto de medida desejado. Aqui os sinais enviados para cada caixa de som via sistema de áudio do laptop são gerados.

Os acelerômetros instalados nos atuadores eletromecânicos e conectados aos condicionadores de sinais medem a resposta vibratória das membranas acústicas da caixa de som. Tais sinais medidos são enviados ao laptop para uma posterior análise. Na Figura 4.4, é mostrado todo princípio de funcionamento do simulador descrito.

na integridade do sinal e, dessa forma, garantir com que os sinais cheguem aos atuadores eletromecânicos, sem nenhuma interferência devido o uso deste dispositivo.

O primeiro teste realizado no sistema de áudio do *notebook* se deu pelo envio simultâneo de um sinal randômico, pelos dois canais da saída de áudio, adquirindo-os posteriormente através dos dois canais da entrada de áudio. Possuindo os sinais de entrada e saída é possível analisar o comportamento da placa de áudio do laptop utilizado no experimento. Os parâmetros utilizados para a análise desses sinais são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para a análise dos sinais.

Parâmetros de Análise	
Tempo de Aquisição	60 segundos
Frequência de Amostragem	8000 Hz
Número de médias	60
Numero de pontos por média	8000

Fonte: Elaborado pelo autor

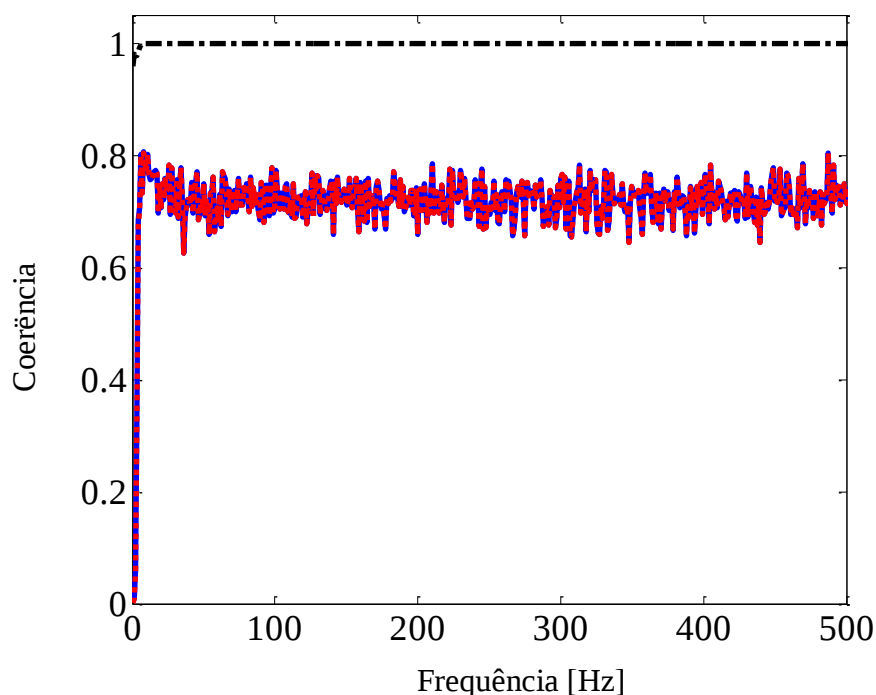
A função de coerência, uma ferramenta de processamento de sinais, é utilizada para examinar o grau de relação entre dois sinais, sendo comumente utilizada para estimar o grau de linearidade entre a entrada e saída de um sistema (SHIN; HAMMOND, 2008). Quando o sinal de entrada e o sinal de saída medidos não detiverem nenhuma espécie de relação entre si, o valor da coerência será zero, entretanto, caso os sinais detenham relação direta entre si e livre de ruídos, o valor da coerência será igual a um.

Na Figura 4.5 são mostradas as coerências, entre o sinal enviado pela saída de áudio (X) e os sinais obtidos pela entrada de áudio do canal 01 (X_{c_1}) e canal 02 (X_{c_2}), apresentam um comportamento plano, com valor de amplitude na faixa entre 0.6 e 0.8. Dessa forma, pode-se concluir que os sinais apresentam uma boa relação, assim, durante o ato de envio e recebimento, os sinais obtidos não sofreram alterações significativas.

Quando analisada a coerência entre os sinais de X_{c_1} e X_{c_2} , se obteve uma reta plana com amplitude igual a um, o que pode afirmar que os canais de áudio funcionam de forma similar, não apresentando disparidades entre si.

Figura 4.5 – Coerência entre os sinais enviados e recebidos pelo sistema de áudio do notebook;

— x e x_{c_1} ; ••••• x e x_{c_2} ; - - - - - x_{c_1} e x_{c_2} ;



Fonte: Elaborado pelo autor

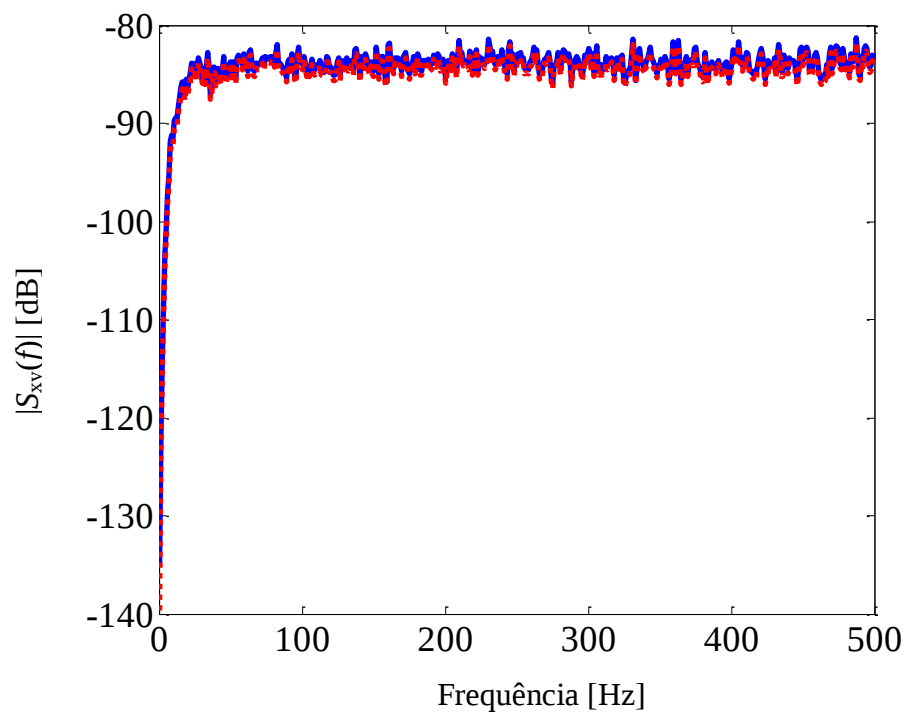
O segundo estudo realizado se refere ao tempo gasto de envio e recebimento do sinal através do sistema de áudio do laptop. Como mencionado nos capítulos anteriores, é possível obter o valor de atraso entre dois sinais através da fase da densidade espectral cruzada, quando analisado no domínio da frequência, ou através da correlação cruzada quando no domínio do tempo.

Na Figura 4.6(a) é mostrado o módulo da densidade espectral, entre o sinal enviado (x) e os sinais recebidos (x_{c_1} e x_{c_2}), apresentando um comportamento plano para frequências acima de 20 Hz, o que pode ser entendido como um comportamento linear do sistema de áudio. Ao observar o gráfico mostrado na Figura 4.6 (b), representando a fase da densidade espectral cruzada, se obteve uma reta inclinada cujo valor da declividade corresponde ao valor do tempo de atraso entre os sinais enviados e os recebidos. Vale ressaltar que o tempo de atraso para ambos os canais é igual e com valor de 0.13 segundos.

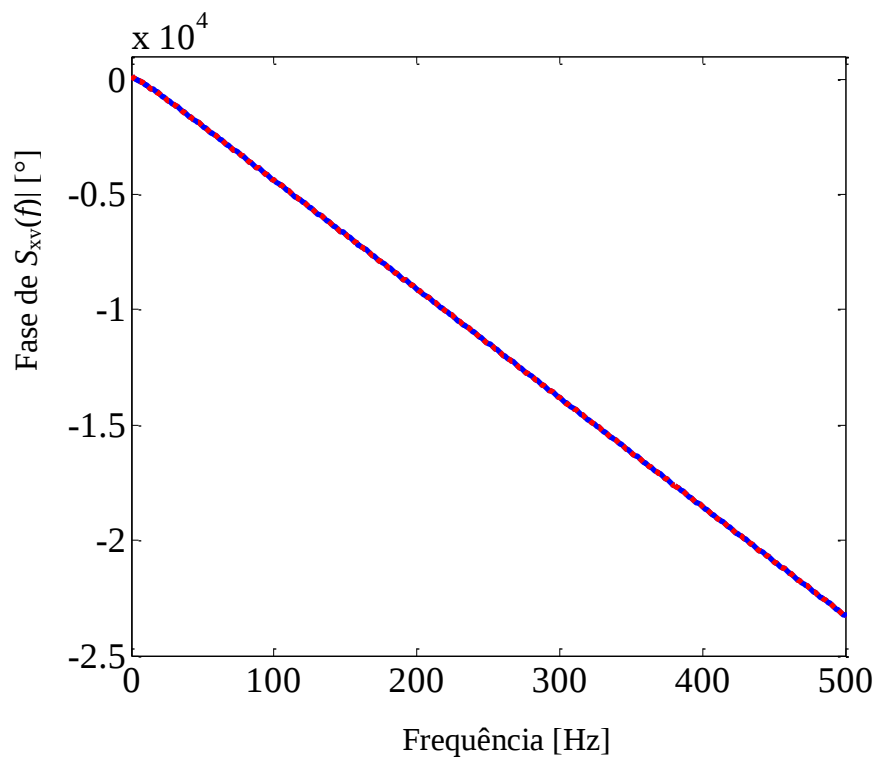
Figura 4.6 – Densidade espectral cruzada (a) sendo o módulo e (b) representando a fase;

— x e x_{c_1} ; ··· x e x_{c_2} .

a)

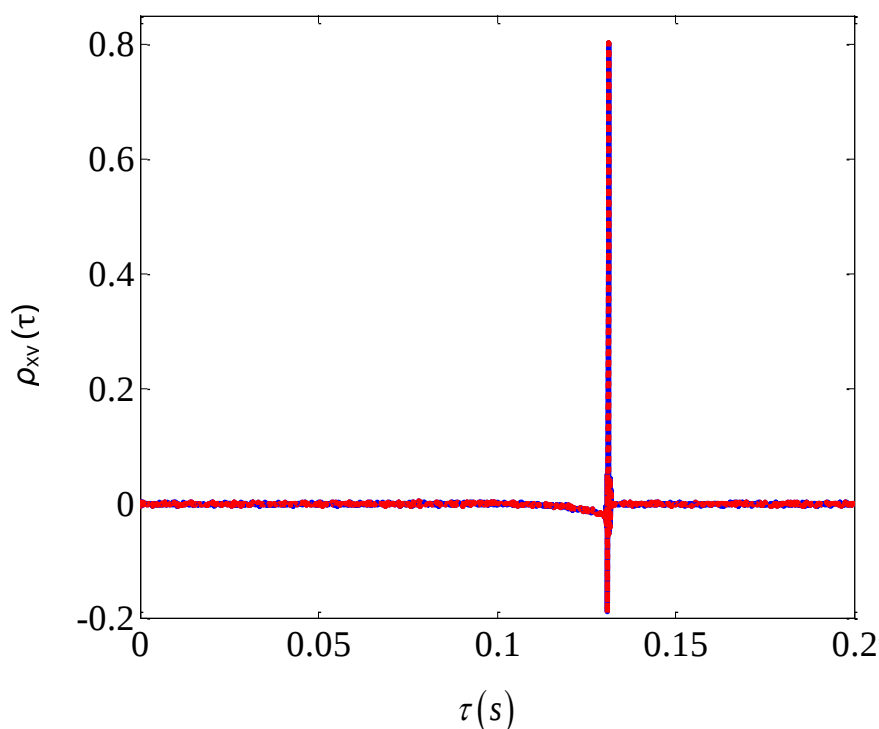


b)



De forma a comprovar o valor do tempo de atraso obtido através da análise da fase da densidade espectral cruzada, pode-se comparar com o valor de atraso obtido através da correlação cruzada entre os sinais enviados e recebidos, onde o resultado gráfico é mostrado na Figura 4.7. Observa-se que em ambos os canais, o tempo de atraso obtido, foi o mesmo obtido através da análise na densidade espectral cruzada, com o valor de 0.13 segundos.

Figura 4.7 – Coeficiente de correlação cruzada entre os sinais enviados e recebidos pelo sistema de áudio do notebook; — Canal 01; ••• Canal 02.



Fonte: Elaborado pelo autor

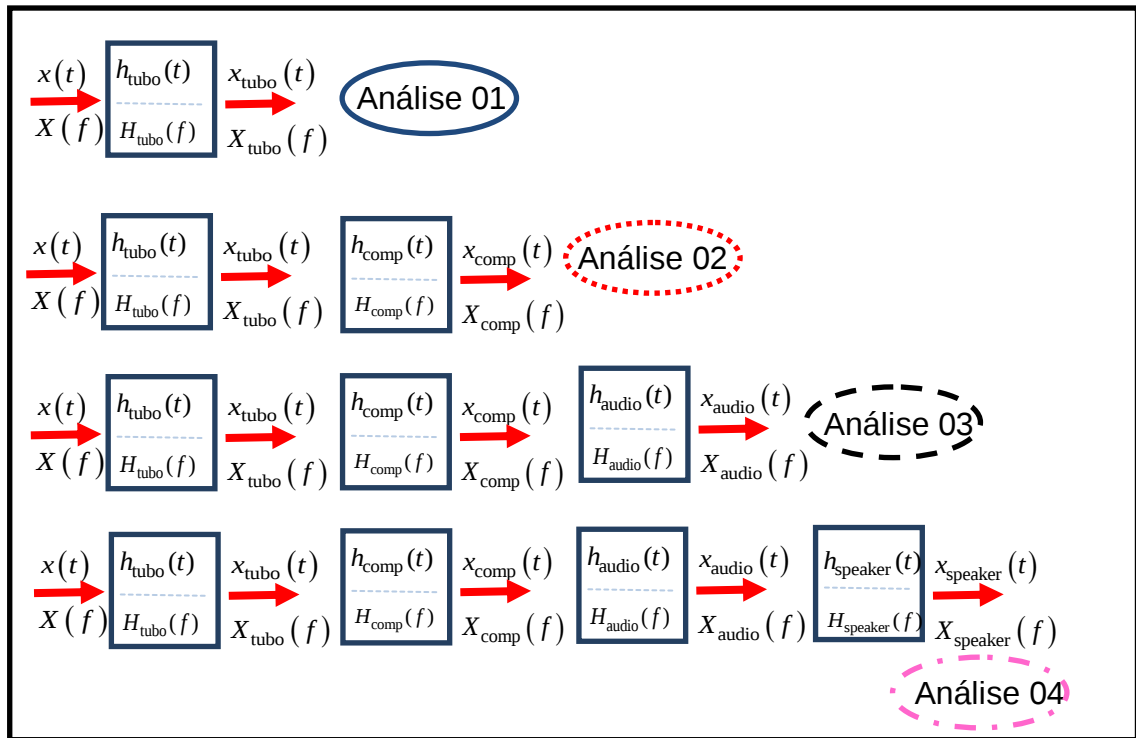
Como o tempo entre o envio e recebimento ocorre em ambos os canais, não é necessário realizar compensação para eliminar este atraso. Uma vez que, o tempo de atraso existente entre os dois ruídos de vazamentos, utilizados na estimativa da localização do vazamento, será o mesmo, portanto não influenciando a estimativa de atraso dos sinais simulados dado pelo gerador de sinais, que é o foco principal deste trabalho.

4.2.2 Análise dos Componentes do Sistema

O presente tópico tem como objetivo analisar o comportamento dos elementos que compõem o “Simulador Virtual de Vazamento”, onde foi realizado o experimento, utilizando como parâmetros do sistema, os valores mostrados na Tabela 2.1 para gerar os ruídos de

vazamento. A Figura 4.8 mostra a esquemática utilizada na realização deste estudo, investigando o comportamento do sistema ao acrescentar gradativamente os componentes do simulador.

Figura 4.8 – Esquemática da análise realizada para compreensão dos componentes do SVV



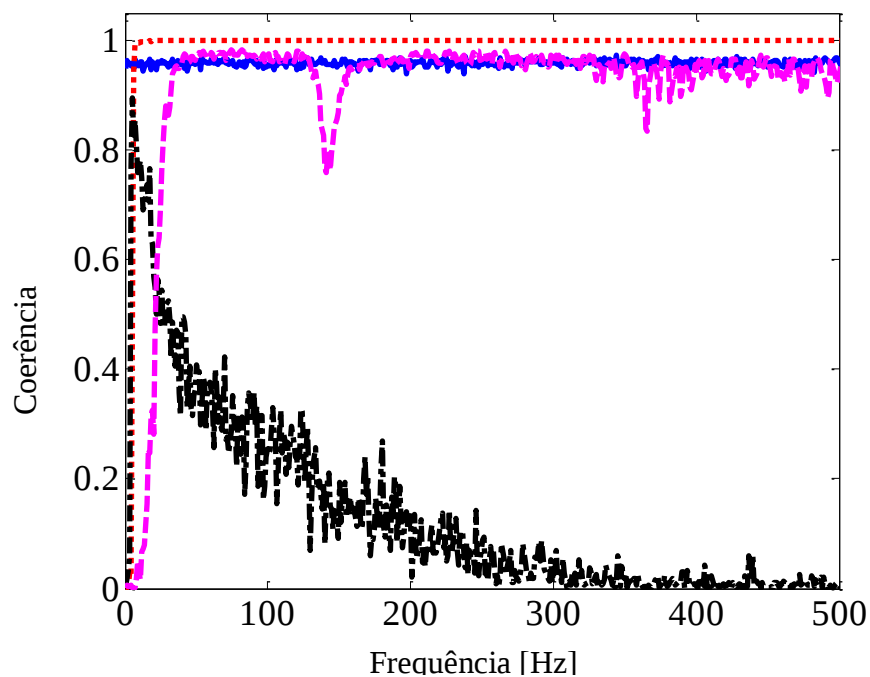
Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro estudo a ser realizado se refere à coerência, como mencionado anteriormente, e é utilizado para mensurar o grau de linearidade entre a entrada e saída de um sistema. Na figura 4.9 são mostrados os resultados gráficos da coerência, sendo a figura 4.9 (a) a coerência entre os sinais de entrada e saída, quando analisados os componentes do sistema individualmente. Já na Figura 4.9(b), é mostrado o resultado da coerência quando, gradativamente, são acrescentados os elementos que compõem o simulador, conforme mostrado na Figura 4.8. Ao realizar este estudo inicial, foi observado que os ruídos de vazamento, ao passarem pelo elemento correspondente ao sistema de áudio do laptop, sofreram uma grande alteração em sua estrutura, conseqüentemente, os sinais enviados à caixa de som serão sinais afetados por tal interferência.

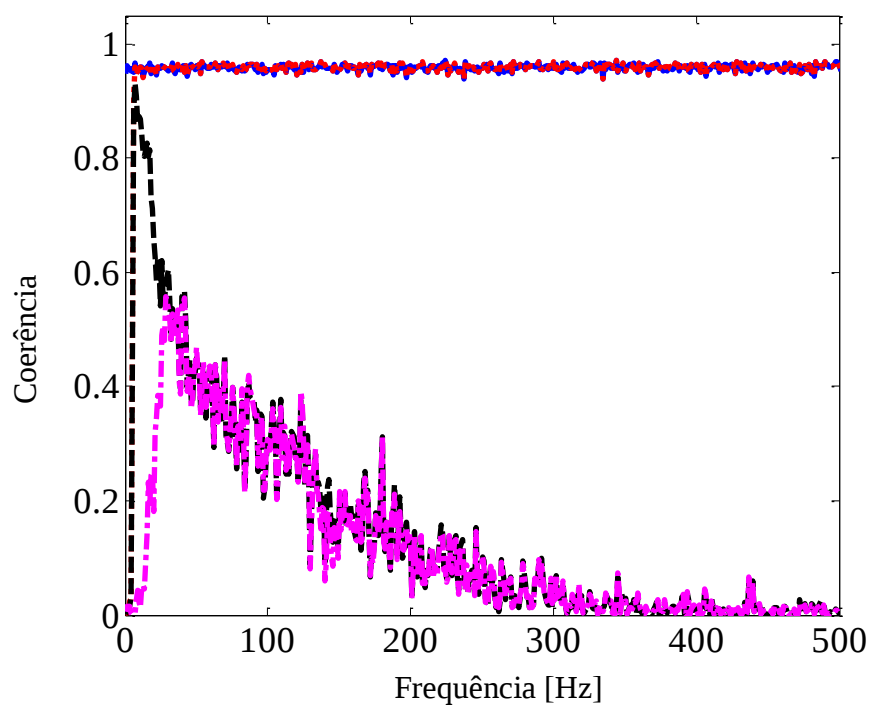
Figura 4.9 – Coerência calculada; (a) para cada um dos componentes que compõem o SVV;

— Tubo; Compensador; — Áudio; — Caixa de Som.

a)



b) acrescentando os elementos gradativamente que compõem o simulador; — análise 01; análise 02; — análise 03; — análise 04;



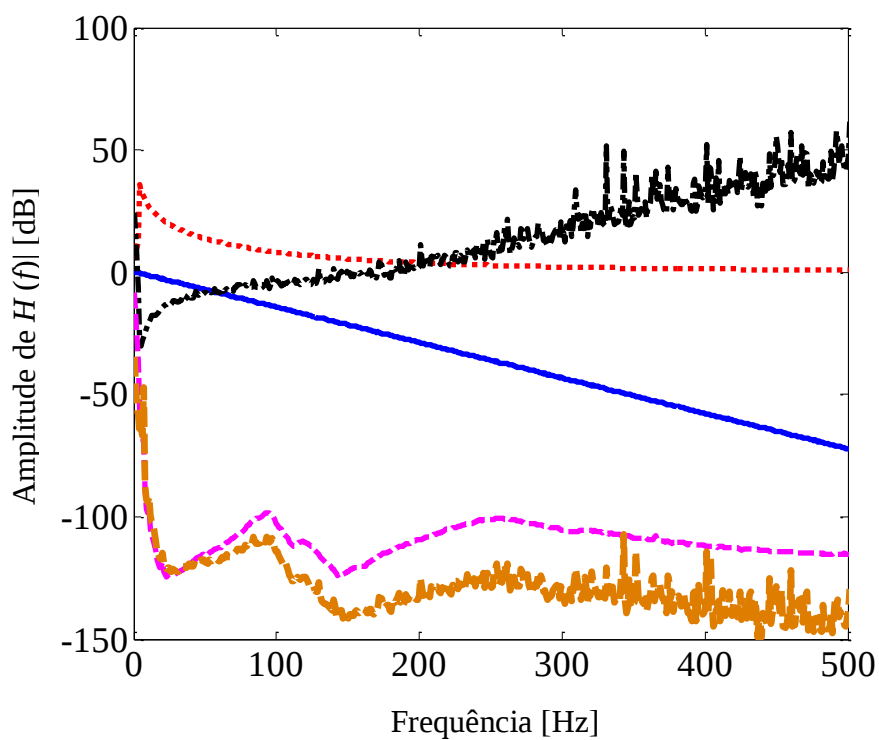
Após as constatações obtidas através do estudo da coerência entre os sinais, realizou-se a análise das FRFs dos elementos que compõem o simulador e também a resultante da junção de todos os elementos do sistema, com intuito de compreender o seu funcionamento ao longo da frequência.

A figura 4.10(a) mostra o módulo da função resposta em frequência dos elementos que constituem o simulador. Ao analisar a FRF referente ao comportamento da caixa de som, nota-se a existência de um pico de ressonância em aproximadamente 100 Hz e uma antirressonância em 150 Hz. O que pode ser considerado como um possível fator influente no resultado fornecido pelo simulador, uma vez que, os ruídos de vazamento são encontrados em frequências menores que 200 Hz, situando-se então, na faixa de frequência onde as caixas de som apresentam um comportamento anormal. Já na Figura 4.10(b) pode ser visualizado o comportamento da fase de cada integrante do simulador, vale ressaltar que os únicos elementos que proporcionam tempo de atraso no sinal são: o modelo analítico do tubo e o sistema de áudio do computador.

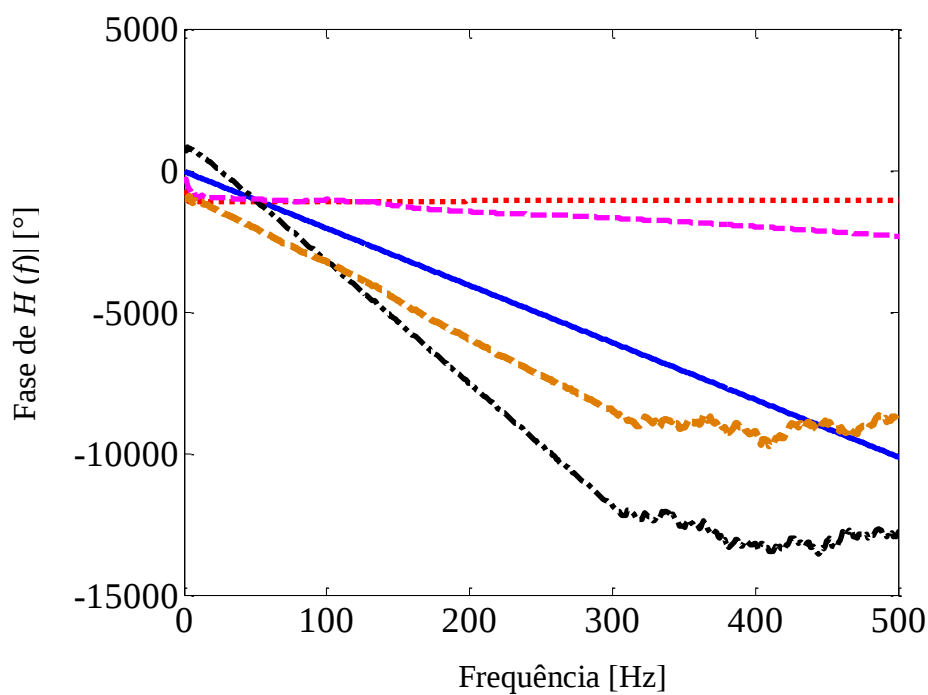
Figura 4.10 – Função resposta em frequência do sistema bloco a bloco sem aplicação do filtro passa-faixa, (a) módulo (b) fase; — Tubo; Compensador; — Áudio; — Caixa de Som;

— Resultante.

a)



b)



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 ESTIMATIVA DO ATRASO E DISTÂNCIA

A seguir serão demonstrados os resultados obtidos com simulador quando adotados os parâmetros descritos no capítulo 02, sendo estes, dados experimentais descritos por Almeida et al (2014) em sua pesquisa. Tais valores são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados utilizados na simulação.

Dados	Valor	Unidade
Frequência de Amostragem [F_a]	8000	Hz
Período [T]	5	s
Número de onda de um fluído livre [k_f]	1200	---
Fator de perda da parede do tubo [η]	0.1	---
Raio do Tubo [a]	75	mm
Espessura da parede do tubo [h]	9.85	mm
Módulo de Young do material do tubo [E]	$2 \cdot 10^9$	N / m
Módulo de Bulk do fluído [B]	$2.2 \cdot 10^9$	N / m
Distância 01 [d_1]	20	m
Distância 02 [d_2]	30	m
Velocidade de onda do fluído [c_f]	1500	m / s
Velocidade da onda [c]	356.0218	m / s

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a apresentação dos resultados obtidos através do simulador, os mesmos serão demonstrados através de uma comparação, utilizando diferentes valores para a faixa de frequência do filtro passa-faixa, quando aplicados nos sinais coletados. Também será verificada a influência do compensador na estimativa fornecida pelo simulador, quando este se faz presente ou não.

As faixas de frequência utilizadas na caracterização do filtro passa-faixa correspondem de 20 a 80 Hz e de 20 a 1000 Hz. O intuito de utilizar estas duas faixas de frequência, é a de realizar uma análise referente à influência do pico de ressonância e antirressonância, encontradas na FRF da caixa de som, na estimativa do tempo de atraso entre os sinais de vazamento obtidos através do simulador. A Figura 4.11 mostra a fase da densidade espectral cruzada entre os ruídos de vazamento, quando aplicado um filtro passa-faixa, sendo em (a) a faixa de 20 a 80 Hz e em (b) a faixa de 20 a 1000 Hz. Uma vez que,

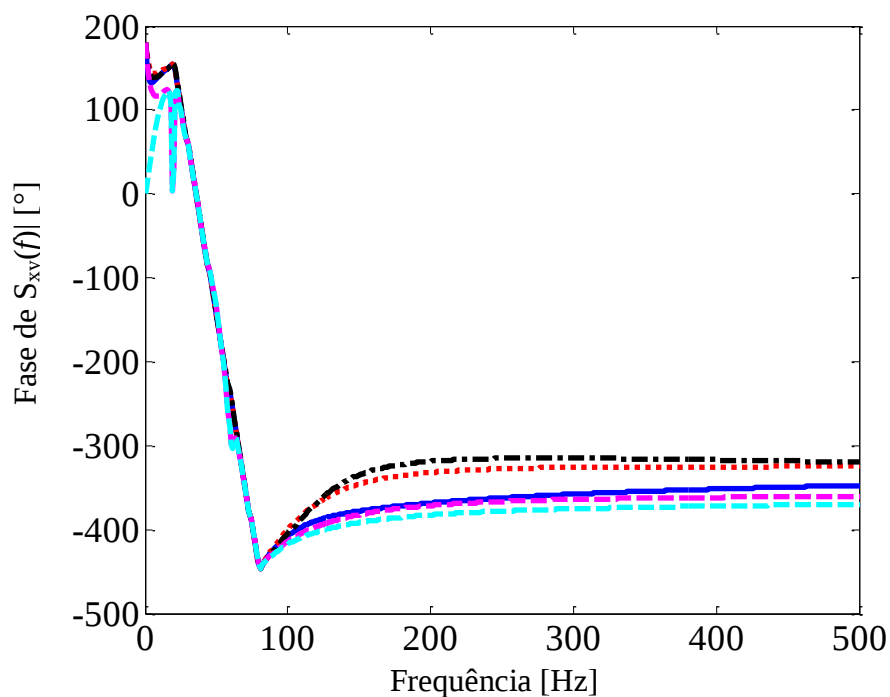
como já dito anteriormente, é possível estimar o tempo de atraso entre dois sinais através da declividade da reta da fase da densidade espectral.

Observa-se que os resultados encontrados, para ambas as faixas de frequência utilizadas no filtro passa-faixa, referentes à declividade da fase da densidade espectral dos ruídos de vazamentos em cada um dos componentes do simulador, apresentaram valores de declividade muito próximos.

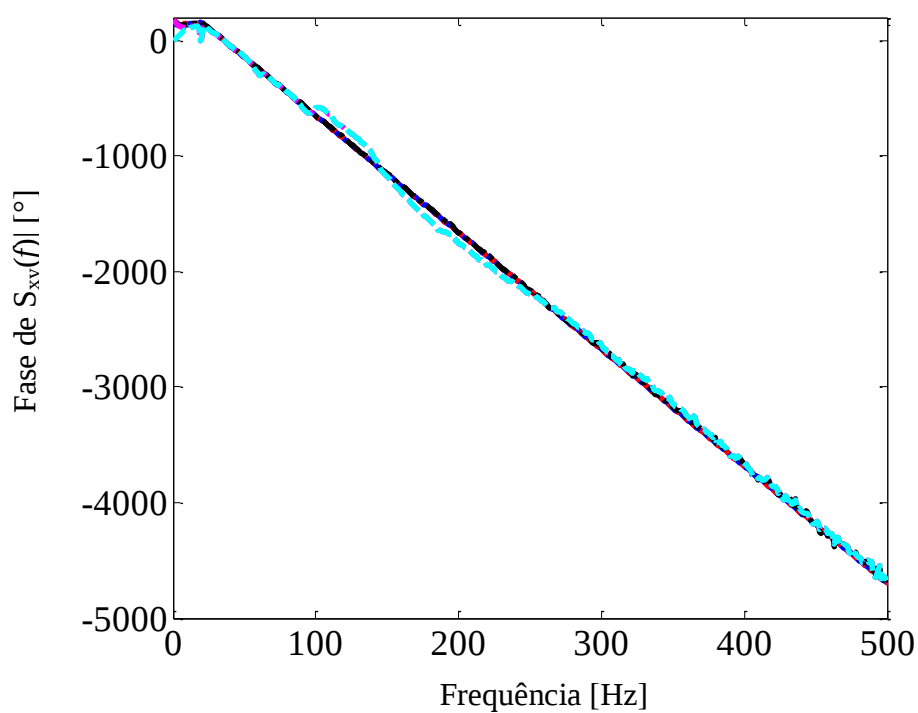
Figura 4.11 – Fase da densidade espectral cruzada dos sinais de vazamento 01 e 02, quando aplicado um filtro passa-faixa de (a) de 20 a 80 Hz e (b) de 20 a 1000 Hz; —Tubo;Compensador;

— Áudio; — Caixa de Som Compensada; — Caixa de Som sem Compensação.

a)



b)



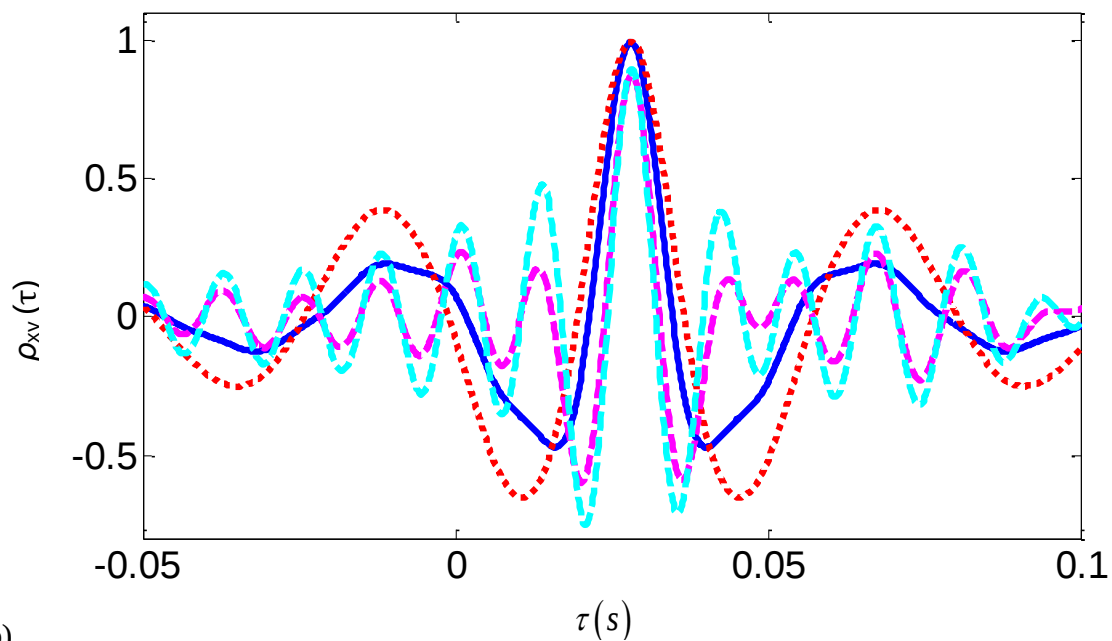
Na figura 4.12 (a) são mostrados os resultados da correlação cruzada, para a faixa de frequência aplicada no filtro correspondente a 20 até 80 Hz, o resultado da correlação cruzada dos sinais obtidos através do modelo da tubulação apresentou valor igual à 0.02813 segundos. Este resultado é o mesmo resultado obtido pela correlação dos sinais de saída da FRF do compensador e da placa de áudio. Para esta faixa de frequência, concluiu-se que, aplicando ou não a compensação, os resultados obtidos pelos sinais coletados nas caixas de som foram os mesmos, sendo este de 0.02825 segundos.

Os resultados obtidos anteriormente se repetem quando aplicado um filtro de 20 a 1000 Hz como pode ser visualizado na figura 4.12 (b).

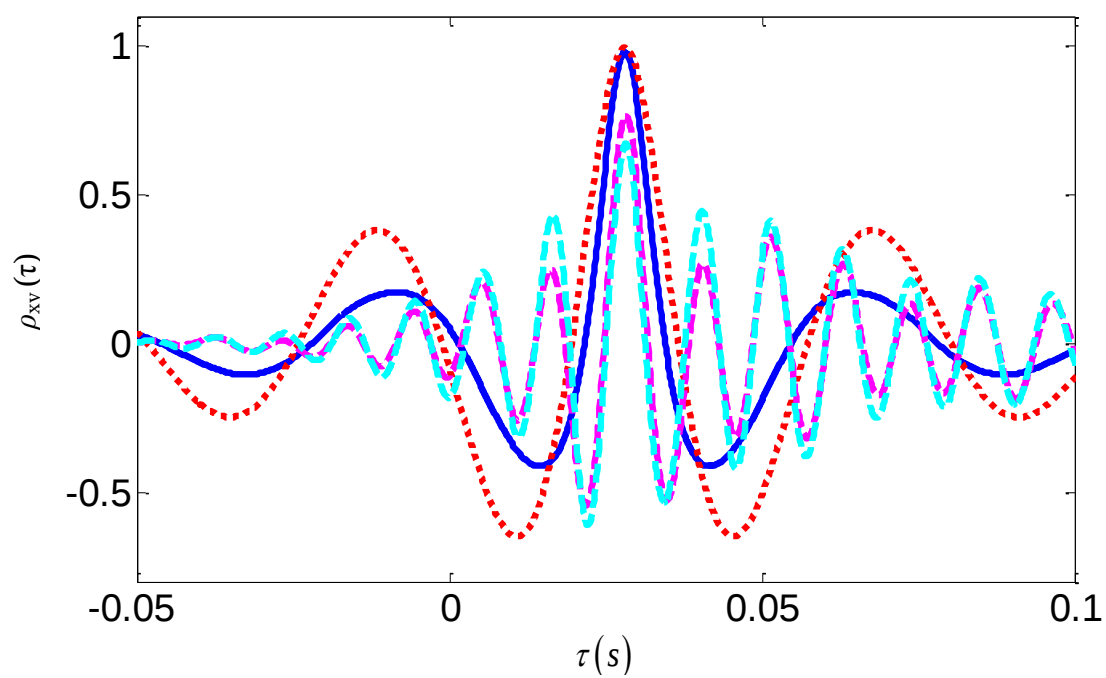
Figura 4.12 – Correlação Cruzada dos ruídos de vazamento, aplicando filtro passa-faixa (a) de 20 a 80 Hz e (b) de 20 a 1000 Hz. ; —Tubo;Compensador; — Caixa de Som Compensada;

— Caixa de Som sem Compensação.

a)



b)



Os resultados obtidos referentes ao tempo de atraso dos ruídos de vazamento são mostrados na Tabela 4.3, onde apresentaram uma margem de erro muito pequena, quando comparado o resultado teórico com os resultados adquiridos através da simulação e os resultados.

Tabela 4.3 – Estimativa dos resultados para localização do vazamento.

Análise	Tempo de Atraso – T_o [s]	Erro Percentual
Teórica	0.02808	--
Simulação	0.02813	0.1780%
Experimental	0.02825	0.6054%

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 COMPARATIVO DOS RESULTADOS ENTRE SINAIS REAIS DE VAZAMENTO E SINAIS DO SIMULADOR VIRTUAL DE VAZAMENTO

Com o objetivo de comprovar o funcionamento do SVV, realizou-se um estudo comparativo entre os resultados obtidos, quando analisado os ruídos de vazamento adquiridos em campo, pelo SVV e gerados pela simulação computacional.

Os ruídos reais de vazamentos utilizados neste estudo foram adquiridos por Almeida et al (2013) em sua pesquisa. Tais sinais foram coletados em um sistema de tubulação de água, denominado Blithfield, localizado no Reino Unido. Os parâmetros do sistema de tubulação com vazamento e os dados referentes à taxa de amostragem dos sinais são descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros do sistema da tubulação.

Dados	Valor	Unidade
Frequência de Amostragem [F_a]	5000	Hz
Período [T]	60	s
Número de onda de um fluído livre [k_f]	1200	---
Fator de perda da parede do tubo [η]	0.1	---
Raio do Tubo [a]	80	mm
Espessura da parede do tubo [h]	9.85	mm
Módulo de Young do material do tubo [E]	$1 \cdot 10^9$	N / m
Módulo de Bulk do fluído [B]	$2.2 \cdot 10^9$	N / m
Distância 01 [d_1]	56.8817	m
Distância 02 [d_2]	63.1183	m
Velocidade de onda do fluído [c_f]	1500	m / s
Velocidade da onda [c]	247.4828	m / s

Fonte: Almeida (2013).

Primeiramente, é essencial garantir que os sinais adquiridos pelos sensores sejam da mesma natureza (deslocamento, velocidade ou aceleração) para, assim, ser realizada uma análise de sinais consistente. Sabe-se que, dependendo do tipo de sensor, obtêm-se um sinal de medida em determinada grandeza como, por exemplo, vibração medida por sensor do tipo hidrofone refere-se à pressão acústica, enquanto a medição feita pelo vibrômetro denota à velocidade, já os sinais fornecidos pelo acelerômetro indicam à aceleração.

No presente estudo, os ruídos reais de vazamento e os ruídos do SVV utilizados foram obtidos através de acelerômetro, entretanto os ruídos de vazamento usados na simulação computacional foram gerados a partir da FRF da pressão acústica, o que faz necessária uma adequação destes sinais para poder comparar com os demais. Para acelerômetros temos que a resposta em frequência é dada por (MUGGLETON et al., 2005):

$$H^{\text{acel}}(\omega, x) = (i\omega)^n A_n (e^{-i\omega x/c} e^{-\omega\beta x}) \quad (4.1)$$

onde dependendo do valor assumido para n (0,1 ou 2) será obtida a função resposta em frequência da pressão acústica, velocidade e aceleração respectivamente, e o valor de A_n para os diferentes valores de n se dá através de $A_0 = 1$ e $A_1 = A_2 = a^2 / (Eh)$.

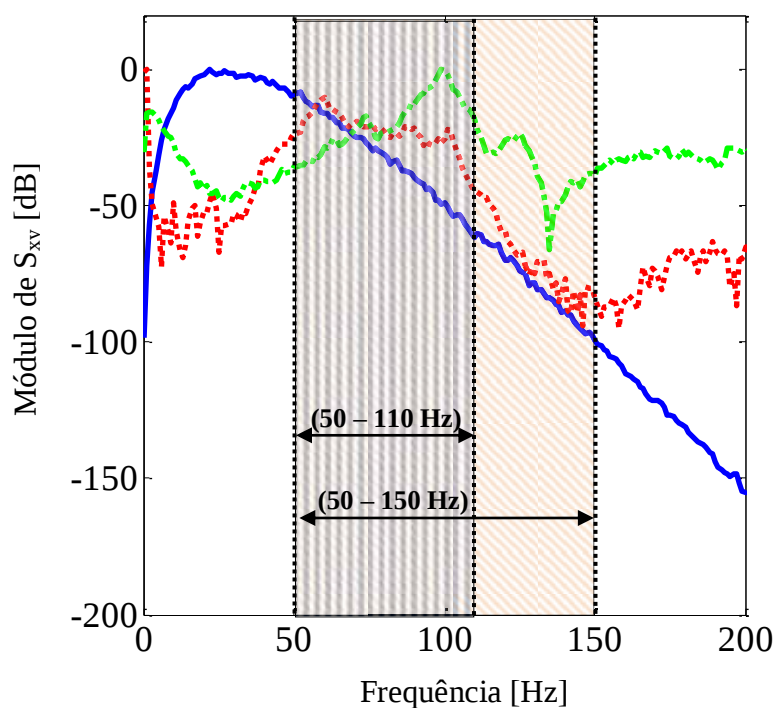
A Figura 4.13(a), (b) e (c) mostra o módulo da densidade espectral, a fase da densidade espectral e a coerência, respectivamente, para casos de sinais de vazamentos utilizando a equação 4.1 (linha azul sólida), sinais reais de vazamento adquiridos em Blithfield (linha vermelha pontilhada) e os sinais adquiridos na membrana acústica por acelerômetros (linha verde tracejada). Ainda é possível observar duas faixas de frequência destacadas nas figuras: uma faixa entre 50 – 110 Hz e outra faixa entre 50 – 150 Hz. Estas faixas de frequência serão utilizadas como bandas de filtragem de sinais para posterior análise da correlação cruzada.

Observa-se na Figura 4.13(a) que a densidade espectral cruzada dos ruídos de vazamento gerados pelo SVV (linha verde tracejada) localizada na faixa de frequência entre 110 e 150 Hz exibe um comportamento atípico, de forma que o módulo da densidade espectral decai repentinamente. Já na Figura 4.13(b) mostra que a fase gerada pelo SVV (linha verde tracejada) possui um comportamento não linear (“pulo” da fase) entre 110 e 150 Hz. Como a correlação cruzada é função do módulo e da fase da densidade espectral, conforme mostra a equação 2.2, tais comportamentos atípicos podem então influenciar a estimativa do atraso de sinais dada pela correlação cruzada.

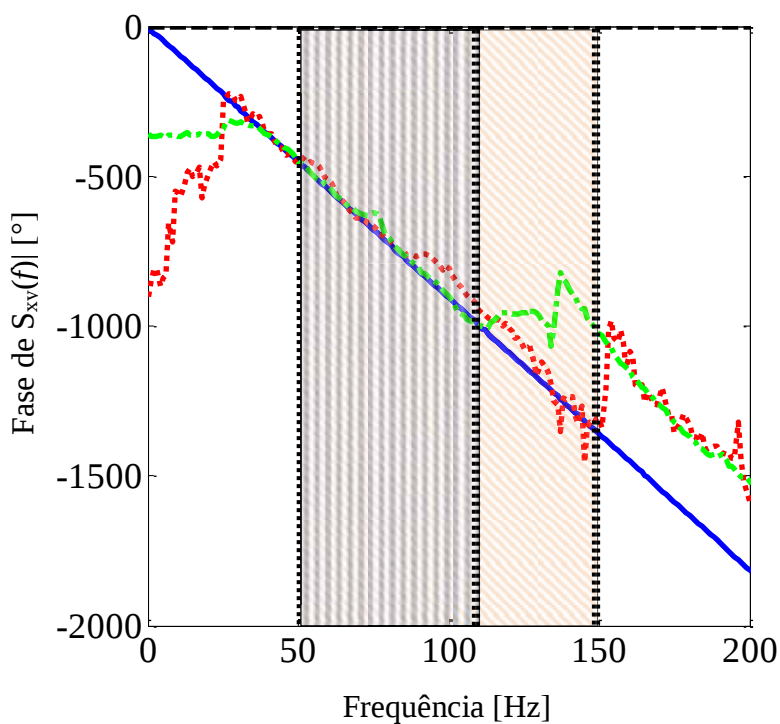
A razão para este comportamento atípico deve-se ao fato de existir justamente nesta faixa de frequência, a presença de dois picos de ressonância e um de antirressonância na FRF do atuador. Em parágrafos posteriores será mostrado que tais bandas de filtragem serão utilizadas para filtrar os sinais, antes de efetuar a correlação cruzada, obtendo então uma análise de sua influência na forma da correlação.

Figura 4.13 – Densidade espectral cruzada e coerência dos ruídos de vazamento; (a) Módulo de S_{xy} ; (b) Fase de S_{xy} ; (c) Coerência, — Simulação Computacional, ··· Ruídos reais de vazamento obtidos em campo; — Ruídos de vazamento obtidos utilizando o Simulador Virtual de Vazamento.

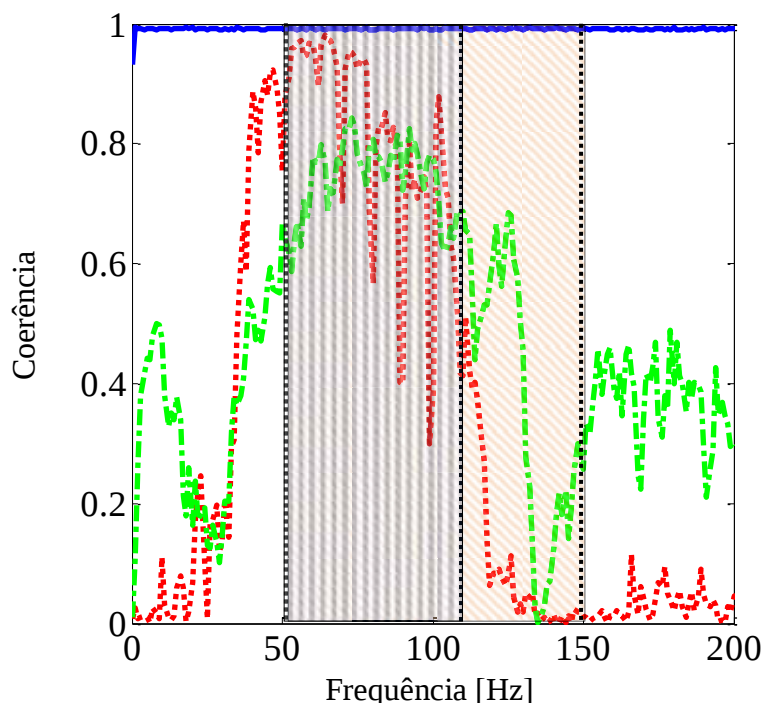
a)



b)



c)



Fonte: Elaborado pelo autor.

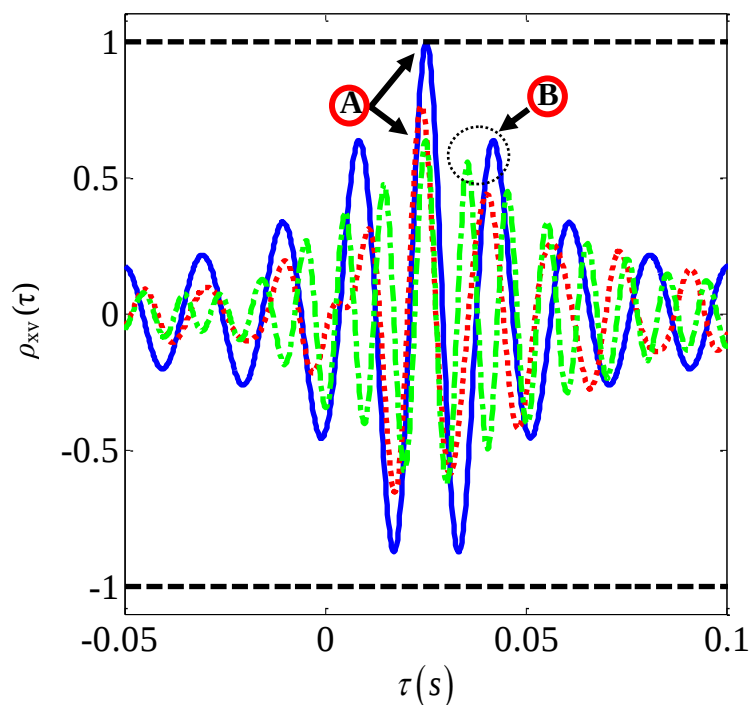
A Figura 4.14 (a) e (b) mostra os gráficos referentes ao coeficiente de correlação cruzada dos ruídos de vazamento filtrados de 50 a 150 Hz e de 50 a 110 Hz, respectivamente, adotando as mesmas representações das linhas utilizadas na análise anterior. Em ambos os gráficos, dois pontos são destacados: o ponto A e o ponto B. O ponto A é relativo à região onde o pico do coeficiente de correlação cruzada se encontra. Já o ponto B mostra os picos secundários que ficam localizados ao redor do pico principal (ponto A). Estes pontos serão utilizados para um melhor entendimento sobre a diferença existente entre os resultados teórico e experimental. Também é possível evidenciar a influência do atuador eletromecânico do SVV nos ruídos de vazamento, sendo necessário alterar a faixa de frequência do filtro passa-faixa a ser aplicado nos ruídos de 50 a 110 Hz ao invés de 50 a 150 Hz.

Nota-se que a utilização do filtro de 50-110 Hz ou a de 50-150 Hz não acarretou nenhuma diferença significativa na posição dos lóbulos laterais. Entretanto, no ponto B dos gráficos da Figura 4.14, é possível notar a diferença existente na altura dos lóbulos laterais do coeficiente de correlação cruzada, principalmente do sinal medido na membrana acústica da caixa de som (linha verde tracejada). Isto porque o módulo da densidade espectral para este sinal é maior (maior dB) quando comparado com os outros dois casos (sinal real e sinal simulado), conforme observado na Figura 4.13(a). Para o pico principal, onde a informação

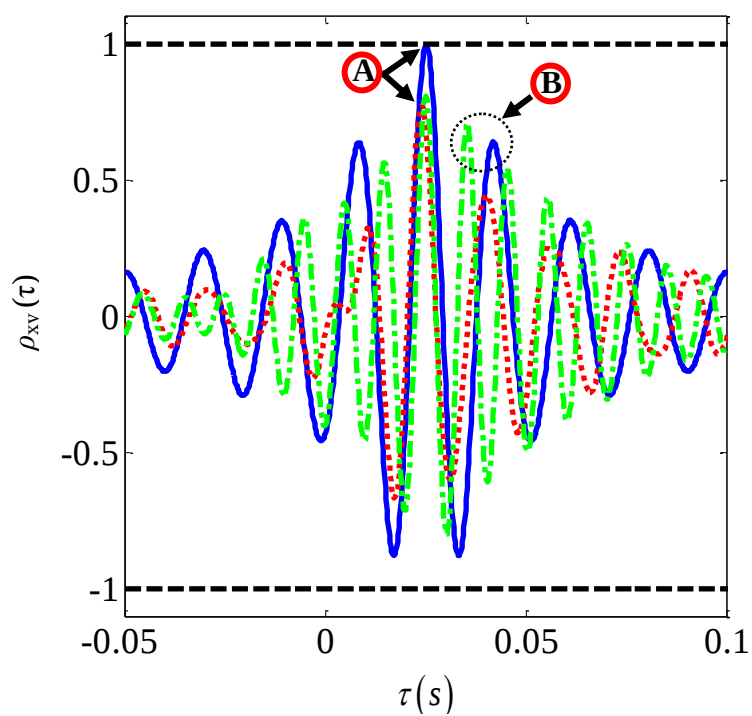
do atraso de sinal está localizada, nota-se que a faixa de frequência utilizada não alterou o resultado. Entretanto, nota-se que o pico do coeficiente de correlação cruzada para o sinal simulado e os sinais adquiridos na membrana acústica não são exatamente idênticos. Isto porque certas características dinâmicas do atuador eletromecânico não foram atenuadas por completo.

Figura 4.14 – Coeficiente de Correlação Cruzada dos ruídos de vazamento; (a) 50 – 150 Hz; (b) 50 – 110 Hz; — Simulação computacional; Ruídos de vazamento reais obtidos em campo; — Ruídos de Vazamento obtidos utilizando o Simulador Virtual de Vazamento;

a)



b)



No ponto A dos gráficos mostrados na Figura 4.14, nota-se a diferença de amplitude do pico entre os coeficientes de correlação cruzadas calculados. Para o valor simulado (linha azul sólida) observa-se que o valor da amplitude do pico é próximo de 1, o que era esperado, pois este valor pode ser comprovado através da equação 4.2, utilizando os valores do sistema da tubulação mostrados na Tabela 4.4 (GAO,2004).

$$\rho_{x_1x_2}(T_0) = \frac{2\sqrt{d_1d_2}}{d} \cdot \frac{1 - e^{-\Delta\omega\beta d}}{(1 - e^{-2\Delta\omega\beta d_1})^{1/2} (1 - e^{-2\Delta\omega\beta d_2})^{1/2}} \quad (4.2)$$

Substituindo os valores das características da tubulação dados na Tabela 4.4 e a faixa de frequência 50 – 110 Hz e 50 – 150 Hz, os valores dos picos dos coeficientes de correlação cruzadas são aproximadamente iguais a 0.99, consistente com as correlações cruzadas mostradas nas Figuras 4.14(a) e 4.14(b).

Por fim, os tempos de atraso dos ruídos de vazamento são mostrados na Tabela 4.5, apresentando uma margem de erro pequena, quando comparado o resultado da simulação computacional, com os resultados adquiridos através da análise dos ruídos reais de vazamento e os ruídos de vazamento do SVV.

Tabela 4.5 – Estimativa dos resultados do tempo de atraso entre os ruídos de vazamento.

Análise	Tempo de Atraso – T_0 [s]	Erro Percentual
Modelo Teórico	0.0252	--
Sinais Reais	0.0240	4.8%
Simulador Virtual de Vazamento	0.0250	0.8%

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste capítulo foi descrever e validar experimentalmente o simulador virtual de vazamentos. Inicialmente, comentou-se sobre o funcionamento do Simulador Virtual de Vazamento e o procedimento para a montagem do protótipo. Em seguida um detalhamento aprofundado sobre seu funcionamento foi abordado. Finalizou-se o capítulo realizando um teste onde foram utilizados dados reais de um sistema de tubulação a fim de validar o Simulador. Os resultados obtidos foram muito próximos do resultado desejado, com uma pequena margem de erro mostrando um resultado satisfatório para um primeiro protótipo deste tipo.

5 CONCLUSÕES

5.1 RESUMO DA DISSERTAÇÃO

Este capítulo resume todo o trabalho desenvolvido nesta dissertação e apresenta as principais conclusões obtidas e também as recomendações para trabalhos futuros. O principal objetivo desta dissertação é a investigação e desenvolvimento de um simulador de vazamento através de um modelo analítico de vazamento teórico. Para atingir estes objetivos a dissertação foi dividida da seguinte forma:

No capítulo 01 introduziu-se a problemática, envolvendo o vazamento em redes de distribuição de água, comentando sobre algumas das principais causas desses vazamentos. Diversas técnicas foram criadas para detecção de vazamentos, técnicas acústicas e não acústicas, onde algumas das técnicas mais usualmente conhecidas foram comentadas brevemente.

O capítulo 02 iniciou um estudo mais aprofundado sobre o método acústico de correlação, mostrando as equações desenvolvidas capazes de descrever a correlação cruzada, densidade espectral cruzada e função resposta em frequência que descreve o comportamento da tubulação. Geraram-se ruídos de vazamento a partir de parâmetros de um sistema real de vazamento em uma tubulação e, através de simulações computacionais, pode-se comparar os resultados gráficos entre as equações e o processamento de análise de sinais quando aplicadas nos ruídos de vazamento.

No Capítulo 03 mostrou-se a esquemática do Simulador Virtual de vazamento, seus componentes e seu princípio de funcionamento. Também foi realizada uma modelagem do atuador eletromecânico (caixas de som), visando obter um melhor entendimento quanto ao seu comportamento dinâmico, entretanto, constatou-se a necessidade de realizar uma espécie de compensação, a fim de preparar o sistema contra alguma possível interferência devido aos efeitos dinâmicos relacionados à sua característica construtiva.

No capítulo 04 é mostrada a metodologia adotada para a concepção do protótipo do simulador de vazamento, os procedimentos a serem seguidos para testar os correlacionadores, utilizando o simulador, e os equipamentos utilizados para a construção do protótipo. Também se realizou um estudo referente aos elementos que constituem o simulador, a influência do compensador no resultado da estimativa do tempo de atraso entre os sinais e finalizou-se o capítulo comparando os resultados referentes ao tempo de atraso obtido através do

equacionamento teórico, análise dos ruídos de vazamento de um sistema real e o resultado obtido através do SVV.

5.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Neste estudo foi realizada uma breve revisão bibliográfica das principais causas de vazamento em tubulações subterrâneas, mostrando a necessidade do desenvolvimento de técnicas de detecção de vazamento mais eficientes. Existem dois tipos de técnicas: as acústicas e as não acústicas, entretanto as técnicas acústicas apresentam um desempenho melhor. Um dos métodos mais empregados na indústria e empresas de fornecimento de água é o chamado de correlação cruzada, isto porque tal técnica possui uma boa precisão na detecção e localização de vazamentos. Entretanto alguns fatores podem influenciar em sua efetividade como, por exemplo, a alta atenuação do sinal de vazamento ao longo da tubulação, especialmente as de plástico.

Visando uma melhor investigação da técnica da correlação cruzada em problemas envolvendo detecção de vazamentos, foi proposto um modelo analítico responsável por gerar ruídos de vazamentos simulados, para isso utilizaram-se parâmetros provenientes de um site experimental encontrado na literatura. Verificou-se que o tubo funciona como um filtro atenuando o sinal em altas frequências; notou-se também que, quanto maior for a distância entre o vazamento e o ponto de medição do mesmo, mais difícil é sua localização.

Como alternativa para avaliação de correlacionadores e treinamento de pessoal, foi proposto um dispositivo, aqui chamado de Simulador Virtual de Vazamento, responsável por simular sinais de vazamento utilizando atuadores eletromecânicos. Para isso, realizaram-se medições de sua Função Resposta em Frequência visando sua caracterização, onde, interferências relacionadas à sua característica construtiva puderam ser atenuadas. Mostrou-se que, os dados obtidos utilizando sinais coletados na saída do atuador eletromecânico (membrana da caixa de som), quando correlacionados, apresentam um atraso de sinal próximo ao sinal gerado pelo simulador de vazamentos. Entretanto, a forma da correlação cruzada não é exatamente igual à simulada, especialmente quando afastada de seu pico, ou seja, onde a estimativa do atraso está localizada. Por fim, comparou-se o sinal obtido utilizando o SVV com um sinal real de vazamento adquirido em campo. Os resultados se mostraram satisfatórios para um primeiro simulador virtual de vazamentos, entretanto uma melhor caracterização do atuador precisa ser feita.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho objetivou-se na criação de um protótipo de um simulador de vazamento, a fim de realizar testes em correlacionadores acústicos comerciais. Por se tratar de um protótipo, utilizou-se como atuador eletromecânico (caixas de som convencionais e de baixo custo).

Como proposta para trabalhos futuros, realizar-se-ia a troca das caixas de som por atuadores eletromecânicos de qualidade superior e o desenvolvimento de um sistema de controle capaz de realizar, automaticamente, a compensação dos ruídos de vazamento, dada às condições impostas pelo sistema, tais como: o peso dos sensores, o comportamento do atuador eletromecânico e outros fatores que poderiam vir a influenciar nas características do sinal e, dessa forma, garantir que a vibração mensurada nos osciladores mecânicos seja o ruído de vazamento simulado livre de interferências indesejadas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. **Improved acoustic methods for leak detection in buried plastic water distribution pipes**. 2013, 274 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Southhampton, Southhampton, 2013.
- ALMEIDA, F.; BRENNAN, M.; JOSEPH, P.; WHITFIELD, S.; DRAY, S.; PASCHOALINI, A. On the acoustic filtering of the pipe and sensor in a buried plastic water pipe and its effect on leak detection: an experimental investigation. **Sensors**, Basel, v. 14, n. 3, p. 5595-5610, 2014.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION– AWWA. **Manual M36: water audits and loss control programs**. 3. ed. Denver; [s.n.], 2009. 285 p.
- BENDAT, J. S; PIERSOL, A. G. **Random data analysis and measurement procedures**. 4. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2011. 640 p.
- BENOUAHI, M.; UEDA, S. Accountable water and sanitation governance – Japan’s experience. In: WATER IN THE ARAB WORLD – MANAGEMENT PERSPECTIVES AND INNOVATIONS, 1., 2009, Washington. **Anais...** Washington : World Bank, 2009. p. 131-156.
- CHEONG, L. C. Unaccounted for water and the economics of leak detection. In: INTERNATIONAL WATER SUPPLY CONGRESS AND EXHIBITION, 18., 1991, Copenhagen. **Anais...** Copenhagen: Dinamarca, 1991. p. 1 – 19.
- FUCHS, H. V.; RIEHLE, R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 33, p. 1-19, 1991.
- GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; MUGGLETON, J. M.; Hunaidi, O. On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water pipes. **Journal of Sound and Vibration**, Londres, v. 283, p. 927-941, 2005
- HUNAIDI, O. **Detecting leaks in water-distribution pipes: construction technology update**. Ottawa: National Research Council of Canada. n. 40, 2000.
- HUNAIDI, O.; CHU, W. T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 58, p. 235 – 254, 1999.
- HUNAIDI, O.; CHU, W.; WANG, A.; GUAN, W. Detecting leaks in plastic pipes. **Journal of the American Water Works Association**, Denver, v. 92, p. 82 – 94, 2000.
- KINSLER, L. E.; FREY, A. R.; COPPENS, A. B.; SANDERS, J. V. **Fundamentals of Acoustics**, 4. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1999. 560 p.
- MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J. The Design and instrumentation of an experimental rig to investigate acoustic methods for the detection and location of underground piping systems. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 69, n. p. 1101–1107, 2008.
- PINNINGTON, R. J.; BRISCOE, A. R. Externally applied sensor for axisymmetric waves in a fluid filled pipe. **Journal of Sound and Vibration**, Londres, , v. 173, p. 503–516, 1994.
- OPPENHEIM, A.V.; SCHAFER, R.W. **Signals & systems**. 2. ed. Nova Jersey,: Prentice Hall, 2008. 520 p.
- RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.420 p.
- REICH, G. Leak detection with tracer gases, sensivity and relevant limiting factors. **Vacuum**, Kidlington, v. 37, n. 8-9, p. 691-698, 1987.

TUBULAÇÃO velha da Sabesp causa perdas no centro de São Paulo. São Paulo: Época Negócios, 2014. Disponível em:

<<http://epocanegocios.globo.com/Informacao/Dilemas/noticia/2014/04/velha-da-sabesp-causa-perdas-no-centro-de-sao-paulo.html>>. Acesso em: 3 maio 2014.

UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT-
USAID. **SUWASA Nigeria**: water sector reforms in Bauchi State. Reportagem. Disponível em:

< <http://usaid-suwasa.org/index.php/projects-and-activities/nigeria>> . Acesso: 18 out. 2014.

APÊNDICE A

PROGRAMAÇÃO ELABORADA

Demonstra-se a seguir a programação desenvolvida no software MATLAB®, para a geração dos ruídos de vazamentos e os códigos para o envio e recebimento dos sinais através do sistema de áudio do computador.

```
% Limpar arquivos e dados armazenados
close all;clear all;clc;

% Parâmetros de Entrada
Fa = 5000;           % Frequência de Amostragem (Hz)
T = 60;             % Período (s)
dt = 1/Fa;          % Acréscimo do vetor de tempo
df = 1/T;           % Acréscimo do vetor de frequência
t = 0:dt:T-dt;      % Vetor de Tempo (s)
f = 0:df:Fa/2-df;   % Vetor de Frequência (Hz)
w = 2*pi*f;         % Vetor da Frequência (rad/s)

% Parâmetros da Tubulação
kf = 1200;           % Número de onda de um fluido livre
n1 = 0.1;            % Fator de perda da parede do tubo
a = 75;              % Raio do tubo (mm)
h = 9.85;            % Espessura da parede do tubo (mm)
E = 2*10^9;          % Módulo de Young do material do tubo (N/m)
B = 2.2*10^9;        % Módulo de Bulk do fluido (N/m)
d1 = 20;             % Distância 01 (m)
d2 = 30;             % Distância 02 (m)
cf = 1500;           % Velocidade de onda do fluido (m/s)

% Expressões auxiliares
c = cf*(1+a_h*2*B/E)^-0.5; % Velocidade de propagação do ruído
a_h = a/h;           % Relação raio/espessura
To = -(d2-d1)/c;     % Atraso de Sinal
k1 = sqrt((kf^2)*(1+a_h*((2*B)/(E+1i*n1*E)))); % Número de onda
Beta = (1/cf)*((a_h*n1*B)/E)/((1+(2*a_h*B/E))^0.5); % Atenuação da
parede do tubo

% FRF da Tubulação

H1 = exp(-i*w*d1/c).*exp(-w*Beta*d1); % FRF para a seção 01
H1a = [H1 conj(fliplr(H1))]; % FRF 01 - Espelhada
H2 = exp(-i*w*d2/c).*exp(-w*Beta*d2); % FRF para a seção 02
H2a = [H2 conj(fliplr(H2))]; % FRF 02 - Espelhada

% Filtros
% Filtro Passa Alta
RC = 1/1500; % Frequência de Corte
FPA_cut = (i*w*RC)./(1+RC*i*w); % Equação do Filtro
FPA = [FPA_cut conj(fliplr(FPA_cut))]; % Filtro espelhado

% Inversa do Filtro Passa Alta
FPB = 1./((i*w*RC)./(1+RC*i*w)); % Equação do Filtro
```

```

FPB = [FPB conj(fliplr(FPB))]; % Filtro Espelhado

% Zerando a parte inicial do filtro
posicao = find(f==5);
aux = FPB(1,posicao+1:length(f));
aux2 = zeros(1,posicao);
FPB = [aux2 aux];
FPB = [FPB conj(fliplr(FPB))];

% Gerando Sinais de Vazamentos
x = randn(1,length(t)); % Sinal Randômico (tempo)
X = fft(x); % Sinal Randômico (frequência)

% Sem compensação % Gerando Sinais sem compensação
X1_pipe = X.*H1a;
X2_pipe = X.*H2a;
x1_pipe = real(ifft(X1_pipe)); % Transformada Inversa de Fourier
x2_pipe = real(ifft(X2_pipe));

% Com compensação % Gerando Sinais com compensação
X1_comp = (X1_pipe).*FPB;
X2_comp = (X2_pipe).*FPB;
x1_comp = real(ifft(X1_comp)); % Transformada Inversa de Fourier
x2_comp = real(ifft(X2_comp));

%% Emitir Som:

y(:,1) = x1_comp; % alocando o sinal de vazamento 01 para o canal 01
y(:,2) = x2_comp; % alocando o sinal de vazamento 02 para o canal 02

% Gravando o arquivo de áudio
recObj = audiorecorder(Fs,24,2);

disp('Enviando Som')

wavplay(y,Fs,'async'); % Enviando os ruídos de vazamento pela saída de
áudio
recordblocking(recObj, T);

disp('Fim');

% Direcionando os arquivos de audio coletados para as variáveis.
P = getaudiodata(recObj);
P = P';
x1_speaker = P(1,:);
x2_speaker = P(2,:);

% Removendo o Sinal DC
x1_speaker = x1_speaker-mean(x1_speaker);
x2_speaker = x2_speaker-mean(x2_speaker);

```

APÊNDICE B

INTERFACE GUIDE

Utilizando a ferramenta GUIDE, encontrada no software MATLAB[®], é possível construir interfaces gráficas de interação com o usuário. Com a proposta desta pesquisa, elaborou-se uma interface gráfica onde o usuário poderá realizar simulações computacionais, utilizando valores inseridos, por ele mesmo, referentes a um sistema da tubulação com vazamento. Na Figura 01 é mostrada a interface criada e o detalhamento dos elementos desta pode ser visualizado na Tabela 01.

Figura 01 - Interface gráfica criada.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 01 – Detalhamento da interface gráfica criada.

Código	Função
A	Neste quadrante são mostradas as opções de análise que o usuário pode realizar. A primeira é uma simulação computacional a partir dos modelos analíticos descritos neste trabalho; a segunda opção possibilita o envio e recebimento dos ruídos de vazamento através placa de áudio do computador; enquanto que, a terceira opção, possibilita análise de arquivos contendo os sinais de vazamento.
B	Neste quadro o usuário insere as especificações quanto aos parâmetros de amostragem dos sinais.
C	Quadrante em que são mostrados os resultados gráficos.
D	Este quadro é onde o usuário especifica a faixa de frequência do filtro passa-faixa.
E	Neste quadrante o usuário insere os parâmetros referentes aos parâmetros da tubulação.
F	Quadrante mostrando os valores dos resultados obtidos através da estimativa.
G	Ao pressionar este botão, o programa será reiniciado e todos os dados armazenados serão apagados.
H	Clicando nesta tecla, é mostrado um <i>pop-up</i> , onde está descrito o procedimento para uso deste simulador.
I	Pressionando este botão serão realizados os cálculos, assim, geram-se os resultados gráficos e obtêm-se os valores referentes aos resultados da estimativa.

Fonte: Elaborado pelo autor