

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

DANIEL HENRIQUE DE SOUSA OBATA

**Investigação de Métodos de Transmissão e Sincronização de Sinais
para uso em um Detector de Vazamentos em Tubulações Enterradas por
meio de Correlação Cruzada**

Ilha Solteira

2019

DANIEL HENRIQUE DE SOUSA OBATA

**Investigação de Métodos de Transmissão e Sincronização de Sinais
para uso em um Detector de Vazamentos em Tubulações Enterradas por
meio de Correlação Cruzada**

Tese de Doutorado apresentada à
Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha
Solteira - UNESP como parte dos requisitos
para obtenção do Título de Doutorado em
Engenharia Mecânica. Área do conhecimento:
Mecânica dos Sólidos.

Michael John Brennan
Orientador

Ilha Solteira

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- O1221 Obata, Daniel Henrique de Sousa .
Investigação de métodos de transmissão e sincronização de sinais para uso em um detector de vazamentos em tubulações enterradas por meio de correlação cruzada / Daniel Henrique de Sousa Obata. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
128 f. : il.
- Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2019
- Orientador: Michael John Brennan
Inclui bibliografia
1. Detecção de vazamentos. 2. Sincronia de tempo por Gps. 3. Correlação cruzada de sinais.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Investigação de Métodos de Transmissão e Sincronização de Sinais para uso em um Detector de Vazamentos em Tubulações Enterradas por meio de Correlação Cruzada

AUTOR: DANIEL HENRIQUE DE SOUSA OBATA

ORIENTADOR: MICHAEL JOHN BRENNAN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Mecânica dos Sólidos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. AILTON AKIRA SHINODA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. FABRICIO CESAR LOBATO DE ALMEIDA

Departamento de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã

Prof. Dr. FELIPE SILVA BELLUCCI

Departamento de Tecnologias Estruturantes / Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações

Prof. Dr. ADRIANO SILVA BORGES

Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ilha Solteira, 29 de agosto de 2019

Agradecimentos

Agradeço a FAPESP, FEPISA, SABESP e UNESP por apoiarem este trabalho. Aos discentes envolvidos na equipe deste projeto: Pedro Ayala, Fábio Kroll, Oscar Scussel e Maurício Iwanaga. Também ao Fabrício Lobato e em especial aos orientadores Michael Brennan e Amarildo Tabone.

RESUMO

A água é vida e no mundo 30% de água potável é perdida em vazamentos. No Brasil este número alcança 70% em algumas cidades. Os vazamentos representam perdas financeiras e ambientais, podem também apresentar riscos para construções, pavimentação e estradas. Técnicas vibro-acústicas de detecção são aplicadas para a detecção local de uma falha, a correlação cruzada de sinais se encontra no estado da arte da detecção do vazamento calculando o atraso de tempo entre a chegada do sinal de vazamento até os pontos de coleta de dos sinais e a consequente distância de vazamento. Técnicas de acústica são facilmente aplicadas em tubos de metal, porém o material mais utilizado para tubos de transporte de água no Brasil e no mundo é o plástico. Tubos plásticos apresentam elevada atenuação do sinal por conta das propriedades do material e por ruídos de fundo decorrentes do local. Atualmente os Correlacionadores de sinais são caros e têm operação complexa e o sucesso na aplicação de correlacionadores de sinal está relacionado com a experiência do operador. O uso de sistemas digitais vem simplificando e barateando o custo de equipamentos complexos, bem como conectando os dispositivos ao nosso redor a rede mundial de computadores no novo conceito de IoT, apesar da geração de atrasos de tempo indesejados e falta de sincronia. A tendência atual também inclui a utilização de modernos sensores do tipo MEMS que podem oferecer baixo custo e serão aqui avaliados. O objetivo principal deste trabalho é através dos modelos de Gao et al (2004), Brenan et al. (2018) e as técnicas de processamento de sinal propostas por Almeida (2013) é desenvolver um Detector de Vazamentos por Correlação de Sinal adaptado ao cenário Brasil, simples, acessível às empresas de vazamento e eficaz.

Palavras chave: Detecção de vazamentos. Correlação cruzada de sinais. Sincronia de tempo por gps.

ABSTRACT

Water is life and in the world 30% of drinking water is lost in leaks. In Brazil this value reaches 70% in some cities. Leaks represent financial and environmental losses, and can also pose risks to buildings, paving and roads. Vibro-acoustic detection techniques are applied for local detection and the Signal Cross Correlation is the state of the art of leak detection, giving the time delay of the signals and the consequent leakage distance. Acoustics techniques are easily applied to metal pipes, but the most used material for water transport pipes in Brazil and the world is plastic, plastic pipes have high signal attenuation due to the material properties and background noise. of the place. These devices are expensive and complex to operate, today the success in applying of signal correlators is related to operator experience. The use of digital systems has simplified and cheapened the cost of complex equipment, as well as connecting things around us to the network in the new IoT concept, despite the generation of unwanted time delays and lack of sync. The current trend also includes the use of modern MEMS-type sensors that can offer low cost and will be evaluated here. The main objective of this work is through the models of Gao et al (2004), Brennan et al. (2018) and the signal processing techniques proposed by Almeida (2013) is to develop a Signal Correlation Leak Detector adapted to the Brazil scenario, simple, accessible to leakage companies and effective.

Key words: Leak detection. Signal cross correlation. GPS time synchronization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de vazamentos na tubulação.	16
Figura 2 - Técnicas acústicas para detecção e localização de vazamentos	17
Figura 3 - Detecção de Vazamentos por Correlação de Sinais.	18
Figura 4 - Colocação de sensores do correlacionador: válvula(a); hidrante (b).	18
Figura 5 - Correlacionadores comerciais e interfaces complexas	19
Figura 6 - Modos radiais (n) e axiais (m) da tubulação	26
Figura 7 - Posição do sensor em função do local do vazamento	26
Figura 8 - Relação entre a Correlação Cruzada e o Atraso do sinal	29
Figura 10 - Hidrofone.	31
Figura 11 - Acelerômetros piezoelétricos.	31
Figura 12 - Geofone montado diversos invólucros (a); Detalhe do sensor (b).	32
Figura 13 - Dispositivo de simulação de vazamentos no Campo de Provas de Blitfield.	33
Figura 14 - Desenho esquemático da simulação de vazamentos no campo de provas.	34
Figura 15 - (a) Sistema de Pressurização. (b) válvulas de controle.	35
Figura 16 - (a) Centro de Exames e Qualificação. (b) Pontos de acesso	35
Figura 18 - (a) Predição das Bandas de Frequência dos vazamentos	37
Figura 19 - Desenho esquemático dos pontos de acesso e vazamento simulado.	38
Figura 20 - Visão superior de um dos pontos de acesso com sensor fixado.	38
Figura 21 - Densidade espectral do sinal nos pontos de acesso.	40
Figura 22 - Densidades Espectrais e Correlações dos sinais dos Pontos de Acesso.	42
Figura 23 - Mudanças de direção na tubulação, possíveis fontes de reflexão.	43
Figura 24 - Acelerômetros MEMS, Analog Devices e Colibrys.	45
Figura 25 - Placa de desenvolvimento do acelerômetro ADXL327.	46
Figura 26 - Esquema do experimento de análise do acelerômetro MEMS.	46
Figura 27 - Experimento de teste do Acelerômetro MEMS.	47
Figura 28 - Sensores de Referência e do tipo MEMS no Domínio do tempo em 10m/s ² .	47
Figura 29 - PSD dos sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s ² .	48
Figura 30 - Fase da CPSD dos sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s ² .	48
Figura 31 - Coerência entre os dois sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s ² .	49
Figura 32 - Sensores de Referência e do tipo MEMS no Domínio do tempo em 10m/s ² .	49
Figura 33 - PSD dos sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s ² .	50

Figura 34 - Fase da CPSD dos sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s ² .	50
Figura 35 - Coerência entre os dois sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s ² .	51
Figura 36 - Comparação do efeito da atenuação e interferência na transmissão de sinais.	54
Figura 37 - Checagem dos dados na transmissão TCP/IP.	55
Figura 39 - Execução de Tarefas em um Sistema Operacional.	57
Figura 40 - Execução das Tarefas ao Longo do Tempo	57
Figura 41 - Sistema de localização via satélite baseado em diferenças de tempo	59
Figura 42 - Saída Pulso por Tempo do módulo GPS.	60
Figura 43 - Relação entre a saída de referência de tempo e a saída UART.	60
Figura 44 - Esquema do Ensaio de incerteza de referência de tempo entre módulos GPS.	61
Figura 45 - Circuito de sincronização.	63
Figura 46 - Diagrama de tempo do circuito de sincronia.	63
Figura 47 - Circuito de controle da chave sincronizadora.	64
Figura 48 - Esquemático do experimento de determinação de atraso no circuito da chave.	64
Figura 49 - Ensaio do circuito de chave de sincronização.	65
Figura 50 - Sinais sem corte e sinais com corte sincronizado.	65
Figura 51 - Incerteza no tempo em sistemas com clock não sincronizado.	66
Figura 52 - Placa Orange Pi Zero.	67
Figura 53 - Circuito de Condicionamento de Sinais para acelerômetro ICP®.	68
Figura 54 - Módulo amplificador LM358.	68
Figura 55 - Diagrama do Protótipo 01.	69
Figura 56 - Sistema de Aquisição do Protótipo 01 em seu gabinete/caixa transporte.	69
Figura 57 - Sistema de Aquisição do Protótipo 01.	70
Figura 58 - Componentes do Correlacionador de Sinais.	70
Figura 59 - Esquema de teste de sincronização do protótipo.	71
Figura 60 - Sinais no Tempo do Teste do Protótipo 01 em Laboratório.	72
Figura 61 - Correlação Cruzada dos Sinais do Protótipo 01 em teste de Laboratório.	72
Figura 62 - Representação da Tubulação.	74
Figura 63 - Sinais coletados com o Sistema de Referência LMS Scadas XS®.	74
Figura 64 - Sinais no domínio do tempo adquiridos com o Protótipo 01.	75
Figura 65 - Detalhe: transição de sincronização inicial do sinal do correlacionador.	76
Figura 66 - Densidade de Potência Espectral (PSD):.	77
Figura 67 - Densidade Espectral Cruzada dos sinais..	78

Figura 68 - Fase entre os sinais os pontos de medição..	78
Figura 69 - Coerência entre os sinais.	79
Figura 70 - Correlação Cruzada entre os sinais:.	80
Figura 71 - Fluxograma da Aquisição de Sinais do Dispositivo.	84
Figura 72 - Placa de Desenvolvimento com ESP32.	85
Figura 73 - Esquemático do Protótipo 02.	85
Figura 74 - Detalhe da placa principal e módulos do Protótipo 02.	86
Figura 75 - Par de Sistemas do Protótipo 02 montados já com a caixa.	86
Figura 76 - (a) Vista em corte do invólucro do sensor; (b) Sensor de Vibração.	87
Figura 77 - Esquema de teste de sincronização do protótipo.	88
Figura 78 - Teste de atraso, Protótipo 02 Resultados no domínio do Tempo.	88
Figura 79 - Teste de atraso, Protótipo 02. Densidades Espectrais.	89
Figura 80 - Teste de atraso, Protótipo 02. Coerência.	89
Figura 81 - Teste de atraso, Protótipo 02. Correlação Cruzada.	90
Figura 82 - Esquemático do Ensaio do Protótipo 02 com Vazamento Simulado.	91
Figura 83 - Ensaio do Protótipo 02 com Vazamento Simulado.	91
Figura 84 - Vazamento simulado, Protótipo 02. Resultados no domínio do Tempo.	92
Figura 85 - Vazamento simulado, Protótipo 02. Densidades Espectrais.	92
Figura 86 - Teste com Vazamento simulado, Protótipo 02. Coerência.	93
Figura 87 - Teste com Vazamento simulado, Protótipo 01. Correlação Cruzada.	93
Figura 93 - Diagrama dos componentes do circuito do Protótipo 01.	101
Figura 94 - Circuito impresso do Protótipo 01.	102
Figura 95 - Diagrama dos componentes do circuito do Protótipo 02.	103
Figura 96 - Circuito Impresso do Protótipo 02.	104

LISTA DE SIGLAS

ADC	- <i>Analog to Digital Conversor</i> (Conversor analógico-digital)
BNC	- <i>Bayonet Neill Concelman</i> (Conector tipo baioneta)
BNDES	- Banco Nacional do Desenvolvimento
CPSD	- <i>Cross Power Spectral Density</i> (Densidade Espectral de Pot.Cruzada)
FAPESP	- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
GPS	- <i>Global Position System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
IoT	- <i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IP	- <i>Internet Protocol</i> (Protocolo de Internet)
MCTIC	- Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MENS	- Micro-Electro-Mechanical Systems (Sistemas Micro-eletromecânicos)
PITE	- Programa de Apoio à Pesquisa em Parceria para Inovação Tecnológica
PPS	- <i>Pulse per Second</i> (Pulso por Segundo)
PSD	- <i>Power Spectral Density</i> (Densidade espectral de Potência)
PVC	- Policloreto de Vinila
SABESP	- Empresa de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SNIS	- Sistema Nacional de Informações de Saneamento
TCP	- <i>Transmission Control Protocol</i> (Protocolo de controle de Transmissão)

LISTA DE SÍMBOLOS

a	-	Raio do tubo
c	-	Velocidade de propagação do ruído de vazamento
c_a	-	Velocidade de onda da água
d_1	-	Distância entre o vazamento até o ponto de acesso 01
d_2	-	Distância entre o vazamento até o ponto de acesso 01
g	-	Filtro passa faixa no domínio do tempo
h	-	Espessura da parede do tubo
i	-	Número imaginário
k	-	Número de onda
k_a	-	Número de onda da água
t	-	Tempo
B_a	-	Módulo de Bulk da água
E	-	Módulo de Young do material do tubo
$E[\]$	-	Esperança Matemática
$F\{ \}$	-	Transformada de Fourier
$F^{-1}\{ \}$	-	Transformada Inversa de Fourier
F_a	-	Frequência de amostragem
G	-	Filtro passa faixa no domínio da frequência
G_s	-	Módulo de cisalhamento do solo
H	-	Função resposta em frequência
K_w	-	Rigidez dinâmica da água
K_t	-	Rigidez dinâmica do tubo
K_s	-	Rigidez dinâmica do solo
$R_{x_1x_2}$	-	Correlação cruzada entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$
$S_{x_1x_2}$	-	Densidade espectral cruzada entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$
β	-	Atenuação da parede do tubo
η	-	Fator de perda da parede do tubo

- $\rho_{x_1 x_2}$ - Coeficiente de correlação cruzada entre os sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$
- τ - Vetor do tempo de atraso entre os sinais
- ω - Frequência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PERDAS NA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO	15
1.2	AS TÉCNICAS USUAIS DE DETECÇÃO	16
1.3	TRANSMISSÃO DOS SINAIS NO CORRELACIONADOR	20
1.4	PROJETO PITE	21
1.5	OBJETIVOS	22
1.5	CONTRIBUIÇÕES	23
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	ESTUDO VIBRO-ACÚSTICO DO VAZAMENTO	25
2.1	INTRODUÇÃO	25
2.2	SINAL DE VAZAMENTO	25
2.3	CORRELAÇÃO CRUZADA DE SINAIS	28
2.4	SENSORES DE VIBRAÇÃO	30
2.5	CAMPO DE PROVAS SABESP	34
2.5.1	Predição teórica	36
2.5.2	Ensaio Experimental	37
2.6	SENSORES MEMS DE BAIXO CUSTO	43
2.6.1	ADXL 327	45
2.6.2	Conclusões	51
2.7	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	52
3	INVESTIGAÇÃO DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DO MÉTODO DE SINCRO- NIZAÇÃO GPS	53
3.1	INTRODUÇÃO	53
3.2	TRANSMISSÃO DE SINAIS VIA RÁDIO	53
3.3	SISTEMAS OPERACIONAIS	56
3.4	O SISTEMA GPS	58
3.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	61
4	PROTÓTIPO 01: SINCRO- NIZAÇÃO POR CIRCUITO EXTERNO.	62
4.1	INTRODUÇÃO	62
4.2	MÉTODO DE SINCRO- NIZAÇÃO	62
4.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	66

4.4	TESTES DE ATRASO	71
4.5	TESTE COM VAZAMENTO REAL	73
4.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	81
5	PROTÓTIPO 02: SINCRONIZAÇÃO POR INTERRUPÇÃO EXTERNA	82
5.1	INTRODUÇÃO	82
5.2	MICROCONTROLADORES	82
5.2	MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO	83
5.3	HARDWARE	84
5.3	TESTE DE ATRASO	87
5.4	TESTE COM VAZAMENTO SIMULADO	90
5.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	94
6	CONCLUSÕES FINAIS DO TRABALHO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
6.1	CONCLUSÕES FINAIS	95
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A CIRCUITOS PROTÓTIPO 01	101
	APÊNDICE B CIRCUITOS PROTÓTIPO 02	103
	APÊNDICE C ROTINAS PROTÓTIPO 01	105
	APÊNDICE D ROTINAS PROTÓTIPO 02	109
	APÊNDICE E ROTINAS DE COMUNICAÇÃO DA UNIDADE PRINCIPAL	117

1 INTRODUÇÃO

Apesar de muitas vezes percebida como algo banal em países com maior abundância de recursos hídricos como o Brasil, a água é a substância mais notável da natureza. Nós somos cercados de dois terços de água e necessitamos de água para viver. A vida como conhecemos não poderia ter evoluído sem a água, as secas causam fome e sem água, morreremos. (CHAPLIN, 2001)

Enquanto nos países considerados desenvolvidos a média de perda considerada pelas concessionárias é cerca de 15%, a média global é de 30% e no Brasil este número alcança 38% e representando um prejuízo de cerca de 1 bilhão de dólares (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

A revolução digital a cada dia permite que dispositivos ao nosso redor recebam sistemas digitais e possam ser diretamente conectadas a rede mundial de computadores, esse conceito chamado de Internet das Coisas é conhecido também por seu acrônimo em língua inglesa *IoT - Internet of Things* (SANTOS, 2018) e permite que não só possuamos o controle de diversos dispositivos a nossa volta, mas que também consigamos monitorar o ambiente ao nosso redor de uma forma nunca antes vista. Desde 2016 o governo brasileiro em conjunto do MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações juntamente com o BNDES - Banco Nacional do Desenvolvimento vêm estudando a aplicação, regulação e o impulsionamento do IoT no país e, em junho de 2019 foi lançado o Plano Nacional de Internet das Coisas (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES- MCTIC, 2019).

Estima-se pela SABESP, companhia de saneamento que atua na capital do estado de São Paulo em mais de 370 municípios do interior - parceira deste projeto - uma perda real de água de cerca de 25,6%. A atual política da empresa visa reduzir esta perda de 17% até final da década, em seu plano de redução de perdas, pretende inspecionar 150.000 quilômetros de tubulação. (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO- SABESP, 2013).

Esta tese é fruto do Projeto 50412-3/2013 do Programa de Apoio à Pesquisa em Parceria para Inovação Tecnológica (PITE) entre a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e a Empresa de Saneamento Básico de São Paulo (SABESP)

que pretende desenvolver um Detector de Vazamento por Correlação de Sinais de baixo custo e fácil operação para ser utilizado em tubulações plásticas, enterradas e dentro do território nacional.

1.1 PERDAS NA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO

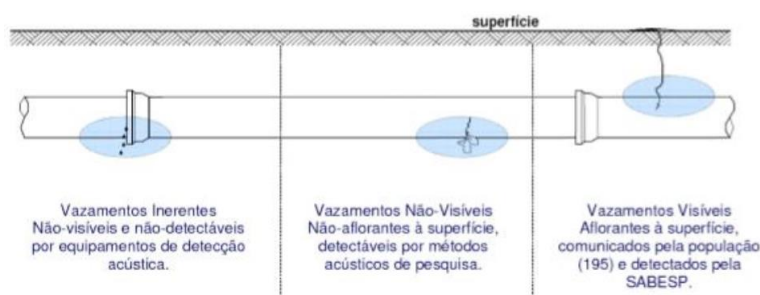
Acompanhando os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento- SNIS (2019) que aponta os dados do ano de 2017, no Brasil foi produzido 16 bilhões de metros cúbicos de água potável, passando por mais 640 mil quilômetros de tubulação. No entanto apenas 10 bilhões de metros cúbicos chegam ao consumidor final, representando 38,4% de perda no sistema nacional de distribuição. Em alguns casos esta perda atinge 70,4% como na cidade de Porto Velho e 73,9% em Macapá.

Os números se tornam mais preocupantes pois além do aumento da rede de distribuição a porcentagem de perda de água cresce em torno de 1% ao ano. SNIS (2019, 2017,2015,2013).

As perdas consideradas pelas empresas de saneamento são consideradas como perdas aparentes as que se originam por ligações não regulares ou devido medidores de consumo defeituosos casos esses que não podem ter o consumo faturado do total de água consumido, e considera como perdas reais aquelas relacionadas ao volume de água que foi tratado, mas não alcançou o consumidor final (TSUTIYA, 2004).

Os vazamentos ocorrem em sua maioria na junção entre os tubos e por danos ocasionados na tubulação ao longo durante o tempo. Também é possível classificar os vazamentos entre: vazamentos visíveis que são aqueles com manifestação acima da superfície e, portanto, podem ser facilmente detectados; e vazamentos não visíveis, que se encontram geralmente ocultos abaixo da superfície em tubulações enterradas e assim necessitam de técnicas e instrumentos especiais para localização e reparo (TSUTIYA, 2004). Na Figura 1 é exemplificado estes tipos de vazamentos.

Figura 1 - Tipos de vazamentos na tubulação.



Fonte: Sabesp (2015).

Os vazamentos são a principal causa das perdas reais de água, e podem se manifestar ao longo de todo o sistema de captação, tratamento e distribuição da água (LYSA, 1993). Uma investigação realizada na região metropolitana da cidade de São Paulo apontou que cerca de 90% das falhas ocorrem em ramais de destruição aos consumidores finais e apenas 10% das falhas se manifestam na rede primária e secundária da concessionária (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO- SABESP, 2003).

1.2 AS TÉCNICAS USUAIS DE DETECÇÃO

Existem técnicas bem conhecidas para detecção de vazamentos, tais como o balanço de carga que compara o volume de água tratada e água consumida e assim pode indicar a existência de perdas ao longo do circuito de distribuição (FARLEY, 2001). Mesmo com a divisão em várias seções através do uso de medidores de fluxo ao longo da tubulação não é possível conhecer com precisão o local de um vazamento.

Para a detecção do local do vazamento, são utilizadas técnicas que podem ser divididas entre técnicas acústicas e não acústicas. As técnicas acústicas baseiam-se na propagação do sinal vibro-acústico gerado pelo vazamento ao longo da tubulação enquanto as técnicas não acústicas costumam utilizar sistemas que indicam a mudança de características do solo ao redor do vazamento com o uso de termografia, gás traçante e até mesmo radares de solo (LIMA, 2014).

As técnicas acústicas se mostram muito eficientes quando se trata da detecção e localização de vazamentos. Hastes de escuta e geofones podem ser utilizados nesta etapa. Na

Figura 2 são mostradas a utilização da haste de escuta (Figura 2a), do geofone eletrônico sem uma interface gráfica com o usuário (Figura 2b) e do geofone com uma interface gráfica com o usuário mais elaborada (Figura 2c).

Figura 2 - Técnicas acústicas para detecção e localização de vazamentos: haste de escuta (a), geofone eletrônico (b) e geofone eletrônico com interface elaborada (c).



Fonte: HWM (2015) e Sewerin (2015).

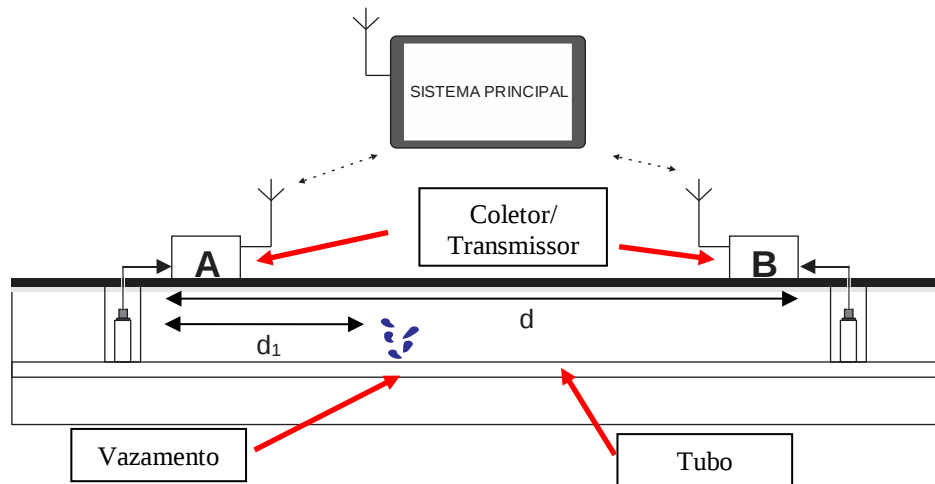
Técnicas de análise acústica e de vibração vem sendo aplicadas na localização de vazamento nos últimos 80 anos (RIEHLE; FUCHS, 1991). A principal técnica delas baseia-se na correlação cruzada entre sinais de vibração próximos a falha, determinando-se o atraso de tempo da chegada da vibração do vazamento aos locais onde estão posicionados os sensores e através da velocidade de propagação estimando a distância entre o vazamento e os pontos de medição.

Após a determinação do atraso de tempo por correlação de sinais, a determinação do local do vazamento baseia-se na Equação (1), obtida através da velocidade média e do tempo envolvidos, a distância do vazamento ao ponto 1 (d_1) é calculada através da distância total entre os dois pontos (d) subtraída do produto da velocidade de propagação da onda (c) com o atraso de tempo (T_0).

$$d_1 = \frac{d - cT_0}{2} \quad (1)$$

A aplicação do sistema é exemplificada na forma de esquema na Figura 3.

Figura 3 - Detecção de Vazamentos por Correlação de Sinais.



Fonte: Próprio autor.

Os sensores devem ser posicionados em pontos de acesso à tubulação, estes pontos podem incluir desde pontos na superfície como cavaletes e hidrantes, como válvulas e registros que estão em caixas de acesso sob a superfície e até mesmo a própria tubulação caso esta esteja acessível. Na Figura 4 é mostrado um sensor posicionado em uma válvula (a) e na é demonstrado um sensor posicionado diretamente em um hidrante (b).

Figura 4 - Colocação de sensores do correlacionador: válvula(a); hidrante (b).



(a)



(b)

Fonte: Primayer (2018), Echologics (2019).

As técnicas de detecção de vazamentos através da correlação cruzada são facilmente aplicadas em tubos de metal onde as vibrações são propagadas com maior velocidade, porém são mais complexas de se aplicar em tubulações plásticas (GAO *et al.*, 2004). Devido ao seu baixo custo as tubulações plásticas são as mais utilizadas na distribuição de água no mundo

(SANDERS *et al.*, 2013), mas o sinal de vazamento não se propaga bem neste tipo de tubulação uma vez que a atenuação causada pela dissipação de energia no plástico é muito alta (MUGGLETON *et al.*, 2002; MUGGLETON; BRENNAN, 2005). Uma vez que o sinal de vazamento possui baixa energia e está situado em baixas frequências, o sinal é facilmente contaminado por ruídos de fundo como passagem de pedestres, trânsito de veículos ou similares, características ambientais como o tipo de solo envolvido também podem interferir na propagação de vibração.

No Reino Unido um teste realizado com 16 diferentes tipos de correlacionadores de sinal comercialmente fornecidos mostrou que a eficácia da detecção de vazamentos está mais relacionada com a experiência do operador em avaliar a banda de frequência correta do sinal do que com a qualidade do equipamento (LOVEDAY, 2011). Correlacionadores de sinal são equipamentos de operação complexa, no Brasil, a tarefa de localizar defeitos nas redes de distribuição de água é rotineiramente executada por equipes com baixa qualificação, nota-se assim uma demanda não apenas por treinamentos bem aplicados afim de capacitar os operadores, mas também por equipamentos que possuam fácil operação e sejam capazes de definir automaticamente as melhores configurações de detecção, reduzindo assim a interferência e subjetividade do operador. Na Figura 5 estão presentes alguns correlacionadores comerciais das empresas Sewerin, Subsurfaceleak, Truelocal e Watermarker Solutions.

Figura 5 - Correlacionadores comerciais e suas interfaces complexas



Fonte: Sewerin, Subsurfaceleak, Truelocal e Watermarker Solutions (2015).

Durante um processo de localização do vazamento com o uso de Correlacionadores de Sinais a porção do sinal referente ao vazamento possui correlação em ambos os pontos de detecção e assim após processada gera valores altos no coeficiente de correlação cruzada (HUNAIDI, 1999). Qualquer evento que de alguma maneira possa também ser captado mutuamente em ambos os pontos, como passos, a passagem de veículos, derivações na tubulação e o uso de ferramentas próximas à região de detecção podem também gerar resultados no coeficiente de correlação e impedir a correta interpretação da posição do vazamento. Para minimizar a ação interferente desse tipo de sinal indesejado, pode ser realizada a aplicação de filtros nos sinais de entrada afim de manter apenas as frequências principais provenientes do vazamento (MUGGLETON, 2002).

Contribuições realizadas por Almeida (2013) por meio de técnicas eficientes no processamento de sinal permitem ao *software* definir automaticamente a melhor banda de frequências para realizar a correlação cruzada, desta forma o sucesso da detecção de vazamentos exige menos da experiência do operador. Há a carência no mercado nacional de um equipamento que seja acessível financeiramente, adaptado as características de tubulação e solos brasileiros e eficaz na localização de vazamentos mesmo quando operado por operadores não tão experientes.

1.3 TRANSMISSÃO DOS SINAIS NO CORRELACIONADOR

Uma vez que a localização de vazamentos por correlação cruzada envolve pontos de medição que podem estar distantes vários metros uns dos outros, o uso de transmissão cabeada no sistema dificulta a instalação do equipamento e pode causar transtorno ao trânsito natural da via (pedestres, veículos e obstáculos diversos). Até o momento, os sistemas de rádio com transmissão analógica são empregados na maioria dos equipamentos correlacionadores, esta escolha representa na maioria dos casos dispositivos grandes, com alto consumo de energia, com a necessidade de circuitos complexos e robustos pois podem sofrer a ação de ruídos, interferência e atenuação que degradam o sinal transmitido (IBBOTSON, 1998).

A utilização de circuitos digitais pode apresentar vantagens diante dos sistemas puramente analógicos. O sinal quando transmitido de forma digital possui maior imunidade à ruídos e os sistemas digitais permitem que os dispositivos possam estar conectados não apenas a um único dispositivo, mas até mesmo à uma rede externa de comunicação como a Internet. Dá-se o nome ao conceito de conectar sensores e demais dispositivos simples à rede afim de monitoramento e controle do ambiente de IoT do inglês *Internet of Things* - Internet das Coisas (KURNIAWAN, 2019).

A técnica de detecção de vazamentos por correlação cruzada dos sinais demanda precisão e sincronia entre os sinais coletados, porém o processamento digital dos sinais pode inserir atrasos de tempo indesejados e até mesmo de duração desconhecida entre aquisição e transmissão dos sinais, obstáculos que afetariam a eficiência da técnica de correlação. A implementação de sistemas digitais nos equipamentos de detecção de vazamentos por correlação necessita de especial atenção a respeito da temporização dos sinais, mas pode representar equipamentos mais baratos, modulares e de fácil substituição.

O desenvolvimento de equipamentos digitais para o uso de correlação de sinais pode servir de base para outros tipos de sistemas detecção de vazamento e para equipamentos de aquisição, transmissão, sincronização e processamento de sinais utilizados em outras áreas da engenharia onde existam necessidades parecidas de coleta e transmissão sincronizada de sinais, como por exemplo o monitoramento e análise de estruturas.

1.4 PROJETO PITE

Os estudos realizados são desdobramentos do Projeto PITE 2013/50434-7 que tem como objetivos realizar o levantamento das características da tubulação no Brasil, na região de atuação da empresa de saneamento Sabesp. Desenvolver um equipamento de detecção de sinais acessível financeiramente e de fácil operação e projetar um equipamento portátil de simulação de vazamentos para treinamento e teste de equipamentos correlacionadores.

Os testes nas tubulações foram realizados no campo de provas da empresa de saneamento SABESP localizado na cidade de São Paulo.

Maurício Iwanaga em sua pesquisa trata do desenvolvimento do sistema de simulação e treinamento conhecido como *test rig*. Em seu trabalho ele procura compensar as características dinâmicas do transdutor a fim de entregar como saída de vibração um sinal fidedigno ao que seria capturado em um sistema real com vazamentos.

Fábio Lima investiga a respeito da caracterização dos sinais vibro-acústicos das tubulações nacionais, investiga o uso de um transdutor para mensurar a velocidade de propagação da onda na tubulação, bem como um sistema de cálculo para determinar a velocidade de propagação do ruído de vazamento.

Pedro Ayala aborda o efeito da conversão analógico-digital com poucos bits, até chegar apenas 1 bit de resolução e saturação no resultado da correlação cruzada dos sinais. Ele também desenvolveu um índice de qualidade para a detecção e no desenvolvimento de uma interface gráfica para o software do correlacionador de sinais;

Oscar Scussel pesquisa os efeitos do solo na propagação de onda e comparou os resultados nacionais com testes realizados no Reino Unido.

Alisson Costa averigua o uso de hardware do tipo FPGA na coleta de dados.

1.5 OBJETIVOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- Investigar as características do sinal de vazamento na tubulação do campo de teste da SABESP (São Paulo/SP), tais como: amplitude, faixa de frequência, e outros fatores que possam ter influência e dificultar a de detecção de vazamento bem como a influência na direção em que o sensor é posicionado.
- Investigar o uso de sensores do tipo MEMS de baixo custo em relação aos sensores de aceleração do tipo piezoelétrico tradicionais.
- Investigar métodos de sincronização de sistemas remoto através do sinal de satélites GPS e que possam ser utilizados no dispositivo de coleta e transmissão dos sinais do Correlacionador compatível com o conceito de *IoT*.
- Desenvolver um protótipo do dispositivo de coleta do correlacionador.

- Integrar o *hardware* do dispositivo de coleta de sinais sincronizados com o *software* desenvolvido por Ayala (2019) para criação do Sistema de Detecção de Vazamentos em Tubulações Enterradas por Correlação Cruzada de Sinais.

1.5 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho possui como principais contribuições científicas:

- A determinação de características dos sinais de vazamento em solo brasileiro.
- O desenvolvimento de uma forma de transmissão e sincronização de sinais para uso em detecção de vazamentos por correlação cruzada.

Como contribuições tecnológicas:

- Tecnologias para o desenvolvimento de um Sistema de Correlacionador de Sinais Nacional.
- Fundamentos para o desenvolvimento de outros equipamentos para a detecção de vazamento e para aquisição, transmissão e sincronia que possam ser utilizados em sistemas de coleta de sinais e de Internet das Coisas.

Como contribuições socioambientais:

- Fundamentos para o desenvolvimento do Sistema de Detecção de Vazamentos, adaptado ao cenário nacional, de baixo custo, mais acessível e de fácil operação.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho por se referir a vários temas correlatos entre si, porém de natureza distinta, é dividido de forma que cada seção contém introdução, desenvolvimento e conclusão a respeito do assunto tratado. A estrutura do trabalho é dividida da seguinte forma:

- **Capítulo 01 - Introdução:** trata das motivações, realiza introduções teóricas e apresenta os objetivos da tese.

- **Capítulo 02 - Estudo Vibro-acústico:** estuda o vazamento e a tubulação à cerca do sinal vibro acústico, apresenta modelos para o vazamento e para a correlação cruzada, faz experimentos no campo de provas da SABESP e investiga a performance de sensores do tipo MEMS de baixo custo.
- **Capítulo 03 - Investigação dos Sistemas de Transmissão e Método de Sincronia via GPS:** aborda as vantagens e desvantagens do uso de sistemas digitais e apresenta uma alternativa de sincronização de tempo por meio de módulos GPS.
- **Capítulo 04 - Protótipo 01:** desenvolvimento do Protótipo 01, com uso de placa de computação genérica em miniatura e circuito sincronização por chaveamento externo.
- **Capítulo 05 - Protótipo 02:** desenvolvimento do Protótipo 02, com a utilização de microcontrolador e sincronia de tempo através de interrupção externa controlada por GPS.
- **Capítulo 06 - Conclusões Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros.**

2 ESTUDO VIBRO-ACÚSTICO DO VAZAMENTO

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será realizando um estudo do vazamento representando um sinal vibro-acústico. O vazamento representa uma fonte de ruído que se propaga ao longo da tubulação, serão investigadas as formas de propagação da vibração na estrutura, o modelo que representa o vazamento e a tubulação, bem como a velocidade de propagação que pode ser calculada através de modelos como o de GAO *et al.* (2004), pode ter seu valor mensurado experimentalmente ou proveniente de listas e tabelas (ALMEIDA *et al.*, 2015).

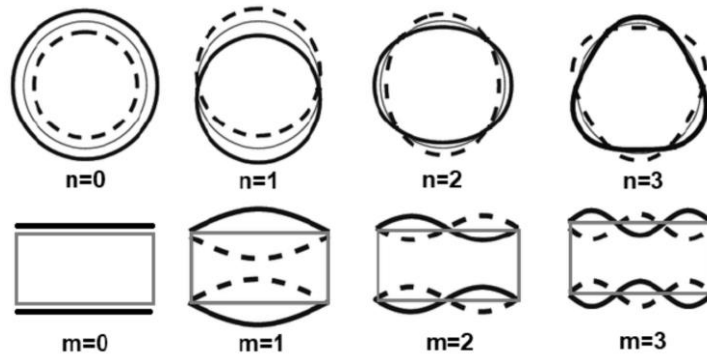
2.2 SINAL DE VAZAMENTO

O sinal vibro-acústico proveniente do distúrbio causado pelo vazamento tem características semelhantes às de um sinal de caráter aleatório e se propaga em frequências geralmente abaixo de 1000 Hz (FUCHS; RIEHLE, 1990).

A condição das tubulações pode ser considera como um tubo preenchido em sua totalidade por um fluído e possui modos de vibrar que são relacionados com as deformações na direção radial e a ao longo de sua extensão na direção axial, cada um dos modos radiais pode estar relacionado a diversos modos axiais (PAVIC, 1991).

Na Figura 6 são mostrados os modos radiais e axiais de vibração. O modo radial $n=0$ que é resultado do acoplamento do tipo fluído-estrutura com os modos axiais $m=1$ e $m=2$ que são referentes a propagação devido ao deslocamento do fluído e a onda de compressão ocasionada, o modo $n=1$ é relacionado a flexão do tubo ao longo do eixo axial (PINNINGTON; BRISCOE, 1994).

Figura 6 - Modos radiais (n) e axiais (m) da tubulação

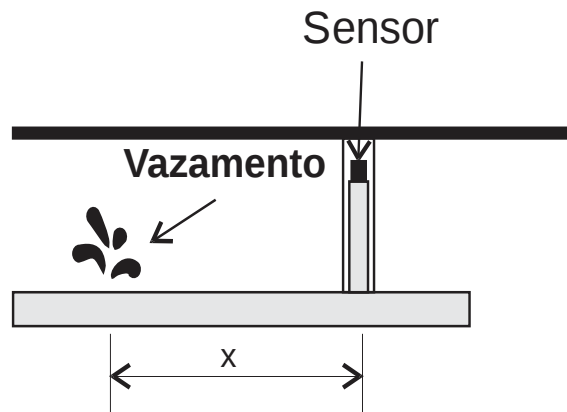


Fonte: Adaptado de Pinnington e Briscoe (1994).

Os modos de vibração de ordem superior se apresentam em frequências elevadas e não estão presentes na faixa de excitação do vazamento. O principal modo onde há o transporte de energia é o modo $m=1$ (MUGGLETON *et al.*, 2002) uma vez que os outros estão presentes em alta frequência ou sofrem restrição pelo o solo.

Pode-se determinar a pressão ao longo da tubulação em uma distância x a contar a partir do vazamento como apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Posição do sensor em função do local do vazamento



Fonte: Próprio autor.

É possível determinar a pressão presente em x através da Equação (2) (PINNINGTON; BRISCOE, 1994).

$$p(x) = P_0(\omega)e^{-ikx} \quad (2)$$

sendo x a posição de interesse, P_0 a pressão no local de origem do vazamento e k o número de onda, valor complexo relativo ao transporte de energia no sistema fluido estrutura.

Ao longo do desenvolvimento deste projeto utiliza-se no modelo de predição do número de onda k que foi proposto por Gao et al. (2004), este modelo posteriormente foi adaptado por Brennan *et al.* (2018) e resultou na Equação (3) que descreve a número de onda da tubulação:

$$k = k_{\acute{a}gua} \left(1 + \frac{k_{\acute{a}gua}}{k_{tubo} + k_{solo}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

sendo $k_{\acute{a}gua}$ a rigidez dinâmica da água, k_{tubo} a rigidez dinâmica do tubo à seco e k_{solo} a rigidez dinâmica do solo.

Do modelo de Gao *et al.* (2004) em que ainda não se leva em conta a ação do solo deriva-se a seguinte Equação (4):

$$k = k_{\acute{a}gua} \left(1 + \frac{2B_a a}{Eh + i\eta Eh} \right)^{1/2} \quad (4)$$

sendo B_a o módulo de *Bulk* referente a elasticidade da água, a é o raio médio da tubulação, E é o módulo de elasticidade do material do tubo, h é a espessura do tubo, i representa um número complexo e η o fator de perda da parede de sua parede.

A partir desse modelo é possível se encontrar a velocidade teórica de propagação da onda na tubulação que é expressa a seguir na Equação (5):

$$c = c_a \left(1 + \frac{2B_a a}{Eh} \right)^{-1/2} \quad (5)$$

O fator de atenuação da tubulação pode ser determinado através da Equação (6):

$$\beta = \frac{1}{c} \frac{\frac{\eta B_a a}{Eh}}{\left(1 + \frac{2B_a a}{Eh} \right)^{1/2}} \quad (6)$$

Por meio dessas formulações é possível calcular a Densidade Espectral Cruzada $S_{x_1x_2}$, e assim, determinar a faixa de frequências onde o sinal do vazamento estará situado como apresentado na Equação (7).

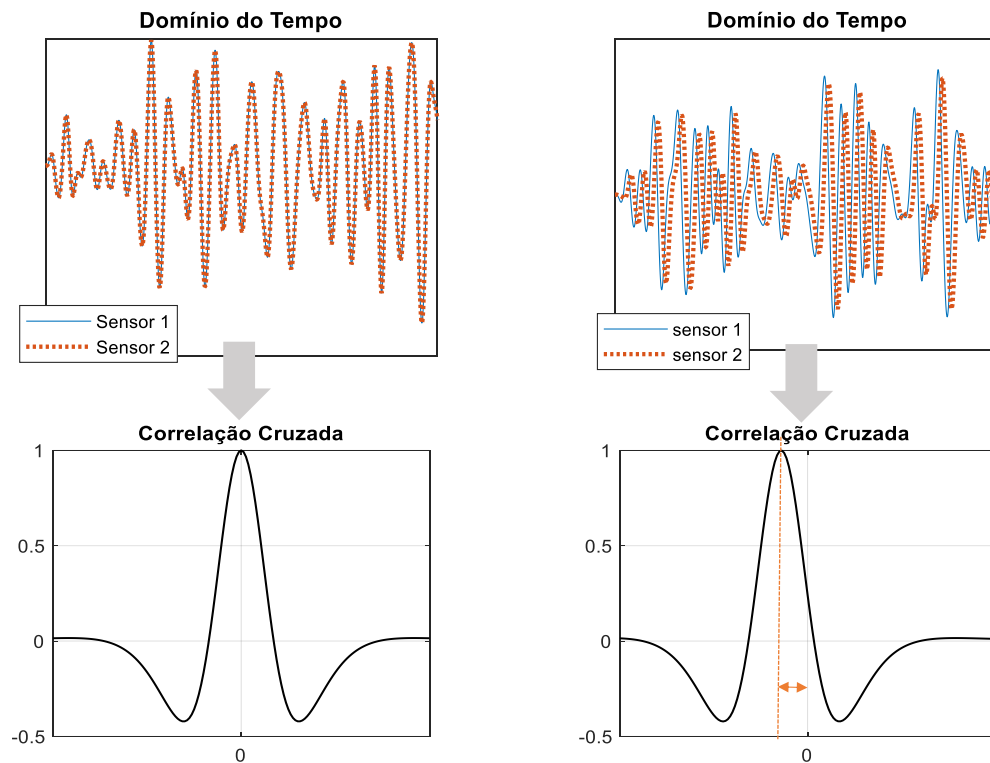
$$S_{x_1x_2}(\omega) = \omega^4 \cdot e^{-\omega\beta d} \quad (7)$$

Os detalhes dessas formulações bem como discussões e aplicações podem ser encontrados nos trabalhos de Gao *et al.* (2004) e Brennan *et al.* (2018).

2.3 CORRELAÇÃO CRUZADA DE SINAIS

Através das explicações de Chitode (2009), é possível compreender que a técnica de correlação cruzada busca determinar o quanto de um sinal está contido em outro, desta maneira consegue-se determinar não só o grau de similaridade entre ambos, mas também o atraso de tempo que pode existir entre eles. Estes conceitos são expressos na Figura 8a para facilitar a visualização, por conveniência dois sinais idênticos são analisados assim o pico da função de Correlação Cruzada tem valor igual a 1, por estarem sobrepostos o pico é situado na posição 0 de atraso no tempo. Na Figura 8b também são analisados dois sinais iguais, logo o pico da correlação cruzada também recebe seu valor máximo, porém por estarem levemente defasados o pico da correlação se situa em um valor diferente de 0, denotando atraso entre eles.

Figura 8 - Relação entre a Correlação Cruzada e o Atraso do sinal (a) sinais sem atraso. (b) sinais com atraso.



(a) - sinais idênticos sobrepostos

(b) - sinais idênticos com atraso

Fonte: Próprio autor.

Segundo Kihong e Hammond (2008) uma vez assumidos dois sinais aleatórios, estacionários e com média igual a zero a Correlação Cruzada entre os dois Sinais pode ser expressa através da Equação (8)

$$R_{x_1x_2}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t + \tau)] \quad (8)$$

na qual $R_{x_1x_2}$ é a Correlação Cruzada, τ é o tempo de atraso entre os sinais, x_1 e x_2 os sinais no domínio do tempo e τ o atraso de tempo entre ambos e E é o operador esperança, que em outras palavras é um operador estatístico que busca mensurar o quanto de um sinal está contido em outro.

Pode-se determinar a Correlação Cruzada entre os sinais utilizando-se formulações presentes no domínio do tempo, porém ao longo deste projeto a técnica é aplicada situando-se no domínio da frequência onde a Função de Correlação é determinada através da Transformada Inversa de Fourier ou *Inverse Fourier Fast Transform (IFFT)* da média do

produto do conjugado do sinal do transdutor 1 (X_1^*) e sinal do transdutor 2 (X_2), tal operação é definida por Gao *et al.* (2004) e expressa a seguir na Equação (9).

$$R_{x_1x_2} = IFFT(\overline{X_1^*X_2}) \quad (9)$$

Este processo é sujeito a ruídos que porventura podem se apresentar correlacionados a ambos os sinais e pela ação de reflexões que são provenientes de descontinuidades existentes no sistema como curvas, conexões, reparos e até mesmo descontinuidades no solo ao redor. As perturbações citadas, podem afetar o módulo e a fase da Densidade de Potência Espectral Cruzada desta maneira resultando em picos considerados espúrios no resultado da função de Correlação, estes picos que não são relacionados diretamente ao vazamento dificultam e causam incertezas na determinação do atraso τ , por esta razão o uso de filtros que permitam a passagem das frequências relacionados ao vazamento são desejáveis para evitarem a ação desses artefatos (GAO *et al.* 2009; ALMEIDA, 2013).

Durante o processo de determinação da Correlação Cruzada dos Sinais, onde os sinais temporais dos sensores recebem a aplicação do filtro que atenua as faixas frequência não relacionadas com o vazamento, são convertidos ao domínio da frequência e processados segundo as formulações anteriores para a obtenção dos coeficientes de correlação.

2.4 SENSORES DE VIBRAÇÃO

Uma das maneiras de realizar a captação do sinal vibro-acústico proveniente da propagação da energia do vazamento por meio da tubulação é diretamente através da variação da pressão no fluido, aos sensores que percebem esta variação se dá o nome de hidrofones. Os hidrofones são pouco utilizados, uma vez que necessitam de acesso direto ao fluido, geralmente necessitam da existência prévia de pontos de acesso e seu uso e manuseio podem gerar contaminações no sistema de distribuição de água (HUNAIDI, 1999). Na Figura 9 é mostrado um exemplo de hidrofone com adaptador para uso em conexões de rosca.

Figura 9 - Hidrofone.



Fonte: SebaKMT (2019).

Já através de meio sólido, a captação do sinal pode ser realizada diretamente através das paredes da tubulação, ou até mesmo por qualquer outra estrutura anexa a esta capaz de propagar a vibração. Podem então ser utilizados sensores de vibração que meçam variações como as de deslocamento, velocidade ou aceleração (SMITH, 1984). Os tipos mais utilizados na detecção de vazamentos são os acelerômetros que medem a variação da aceleração, também podem ser empregados sensores de velocidade comumente conhecido por geofones (HUNAIDI, 1999).

Acelerômetros são sensores de vibração que respondem a aceleração imposta aos mesmos e retornam uma saída elétrica proporcional e são utilizados nas mais diversas áreas onde se é necessário realizar a medição de vibrações. Os acelerômetros mais utilizados são os do tipo piezoelétrico, mas existem sensores que utilizem outras tecnologias. Os acelerômetros são capazes de operar em uma grande faixa de frequências (ASZKLER, 2005). Alguns exemplos de acelerômetros piezoelétricos são apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Acelerômetros piezoelétricos.



Fonte: Sensing (2018).

Geofones são sensores que respondem a variação de velocidade, são desenhados para captar deslocamentos muito pequenos do solo (KROHN, 1984), são compostos de um mecanismo eletromagnético onde uma massa suspensa através de uma mola é capaz de gerar sinais elétricos proporcionais a variação de velocidade, geralmente são empregados no estudo do solo na área geológica, na pesquisa de terremotos e na exploração de óleo e gás (ASZKLER, 2005). Na Figura 11a são mostrados exemplos de geofones montados em diversos invólucros e na Figura 11b é mostrado um geofone em detalhe.

Figura 11 - Geofone montado diversos invólucros (a); Detalhe do sensor (b).



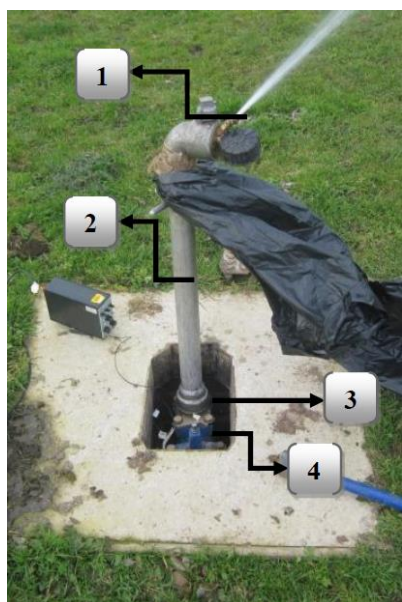
Fonte: Sunfun (2017)

Os geofones possuem sua faixa de trabalho inferior definida através de sua frequência de ressonância que geralmente varia entre 1 e 500 Hz dependendo do modelo e aplicação. Sua faixa de trabalho superior é limitada pela região onde começa a ocorrer a presença de frequências espúrias que varia entre 100 e 1000 Hz. Os geofones possuem fabricação mais simples que a dos acelerômetros o que representa também um custo inferior, porém possuem maior limitação na banda de frequências (FABER; MAXWELL, 1997).

Almeida (2003) utilizou os três tipos de sensor supracitados para captação do sinal de vazamento por meio de Correlação Cruzada de Sinais em um campo de provas com vazamentos simulados situado em Blitfield no Reino Unido. O local contava com tubulações plásticas de PVC e simulava os vazamentos através de válvulas que aspergiam a água na superfície. Na Figura 12a é apresentado o dispositivo utilizado no campo de Blitfield, onde (1) é a válvula que promove a simulação do vazamento, (2) é apenas um tubo de conexão, (3) é a conexão tipo hidrante que conecta a válvula de vazamento a tubulação principal e (4) a

válvula principal que controla o hidrante, e na Figura 12 (b) é mostrado o dispositivo em funcionamento.

Figura 12 - Dispositivo de simulação de vazamentos no Campo de Provas de Blitfield.



(a)



(b)

Fonte: Almeida (2003).

Almeida (2014) publicou uma investigação sobre o desempenho de cada tipo de sensor utilizado, para isso utilizou o módulo e a fase da Densidade Espectral Cruzada, a Coerência e o resultado da função de Correlação Cruzada para casos onde os vazamentos eram considerados como forte e para casos onde os vazamentos eram considerados fracos. De maneira geral os três tipos de sensores apresentaram boas estimativas na situação onde o vazamento tinha força maior, enquanto os sensores do tipo geofone e acelerômetro apresentaram melhores estimativas quando o vazamento era considerado como fraco, ainda assim os acelerômetros apresentaram maior faixa dinâmica de frequências.

Desta maneira, não só por apresentarem resultados inferiores, mas também por necessitarem de pontos específicos para conexão hidráulica os hidrofones inviabilizam seu uso na maioria das situações e seu uso foi descartado neste trabalho, optou-se então por utilizar os sensores do tipo acelerômetro que além de contar com maior versatilidade em seu uso foram também os que apresentaram melhores resultados segundo a bibliografia.

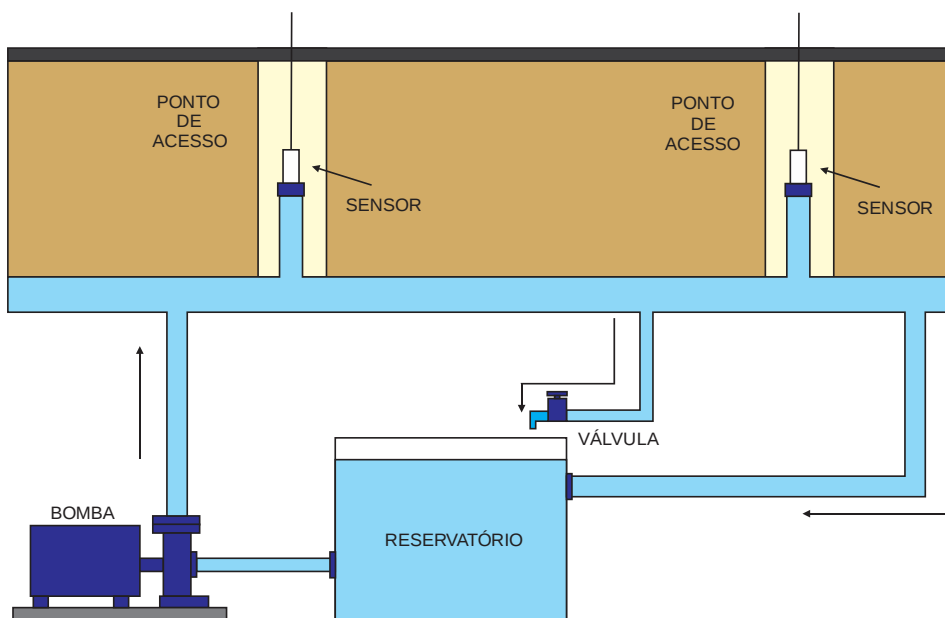
2.5 CAMPO DE PROVAS SABESP

A SABESP possui um campo de provas que faz parte de seu Centro de Teste e Qualificação, o centro é utilizado para o treinamento e avaliação de funcionários e de equipamentos que possam ser aplicados na empresa na detecção de vazamentos.

A instalação simula a presença das falhas por meio de um circuito fechado de recirculação de água, este circuito conta com bomba de recirculação, reservatório, uma seção de tubulação composta por PVC e outra seção de tubulação metálica.

Não há desperdício de água e o desenho esquemático deste circuito pode ser observado na Figura 13. A presença dos vazamentos é simulada com o desvio da água do circuito principal através de derivações que conduzem o fluido diretamente ao reservatório do circuito e são controladas nesta extremidade por meio válvulas e torneiras. A turbulência gerada no local das derivações em função da turbulência decorrente do desvio do fluxo é similar ao sinal vibro-acústico produzido por um vazamento real.

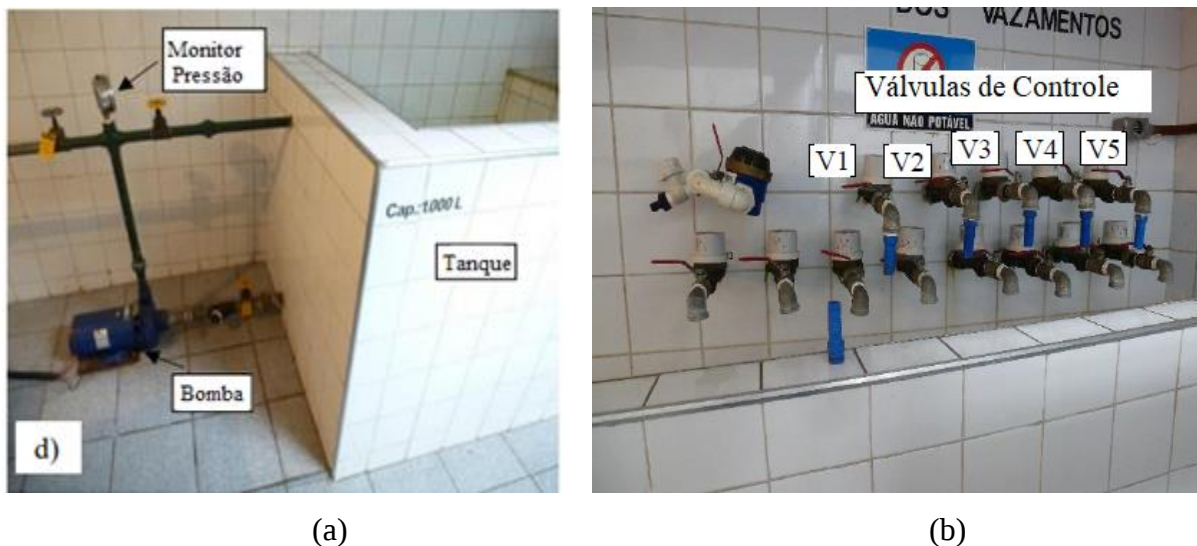
Figura 13 - Desenho esquemático da simulação de vazamentos no campo de provas.



Fonte: Próprio autor.

O sistema de pressurização e o tanque são mostrados na Figura 14 (a) e as válvulas que controlam os vazamentos simulados são apresentados na Figura 14 (b).

Figura 14 - (a) Sistema de Pressurização. (b) válvulas de controle dos vazamentos simulados.



Fonte: Próprio autor.

O prédio principal do Centro de Exames e Qualificação é apresentado na Figura 15 (a). Este prédio serve de apoio para armazenamento de materiais para as provas e em seu subterrâneo é onde estão localizados a bomba e os controles dos vazamentos. Existem também ao longo do campo de provas pontos de acesso à tubulação para a monitoramento do ruído através de sensores e equipamentos, dois desses pontos são representados na Figura 15 (b).

Figura 15 - (a) Centro de Exames e Qualificação. (b) Pontos de acesso no Campo de Provas.



Fonte: Próprio autor.

Por se tratar de uma estrutura utilizada para testes, provas e exames, o dimensionamento das tubulações, localização dos vazamentos e pontos de acesso não serão apresentados por se tratar de dados sigilosos por parte da SABESP.

2.5.1 Predição teórica

A partir dos modelos de Gao *et al.* (2004) apresentados na Seção 2.2, a Equação (7) foi utilizada para o cálculo das Densidades Espectrais Cruzadas utilizando-se as características do campo de provas de Blitfield e de São Paulo. Na Tabela 1 estão as características de ambos os cenários: Blitfield e de São Paulo.

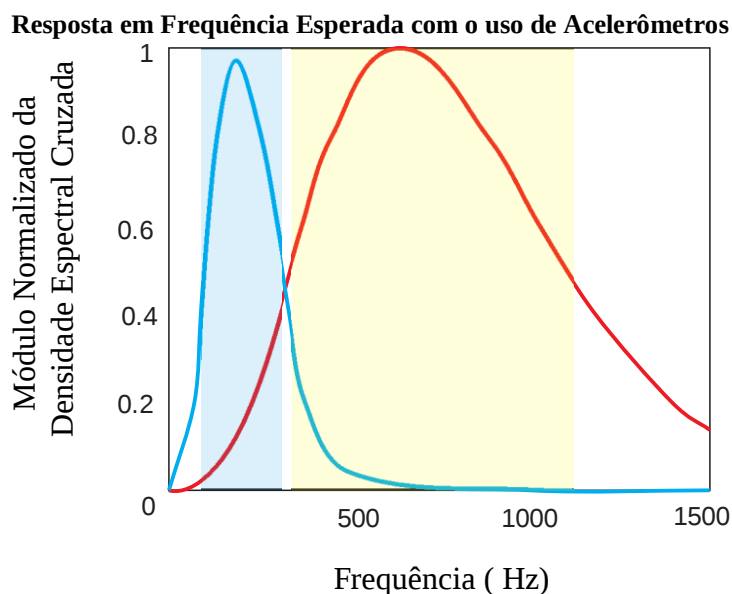
Tabela 1 – Propriedades das instalações em Blitfield e São Paulo.

Propriedade	Blitfield	São Paulo
Material	PE	PVC
Comprimento $d(m)$	30,0	7,0
Raio $a(mm)$	84,5	35,8
Espessura $h(mm)$	11,0	3,4
Módulo Elasticidade $E (N/m^2)$	2,4M	2,0M
Módulo Bulk $B(N/m^2)$	2.2M	2.2M

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 16 são apresentados resultados em vermelho da faixa de frequências esperada referentes ao Campo de Blitfield e em azul a faixa esperada para o de São Paulo para o uso de acelerômetros.

Figura 16 - (a) Predição das Bandas de Frequência dos vazamentos apresentadas por Ayala (2019) para Blitfield e São Paulo utilizando acelerômetros.



Fonte: Próprio autor.

É possível notar que em Blitfield a formulação prediz que a energia se concentra em baixa frequência na faixa de 90 a 300 Hz, enquanto no campo de provas de São Paulo espera-se encontrar a energia do vazamento monitorada através dos sensores de aceleração distribuída entre 300 e 1100 Hz.

Com a adoção dos efeitos do solo conforme proposto por Brennan *et al.* (2018) poderiam ser apresentados resultados mais acurados, porém não foram levados em consideração neste caso, por não se conhecer a fundo as características dos terrenos envolvidos.

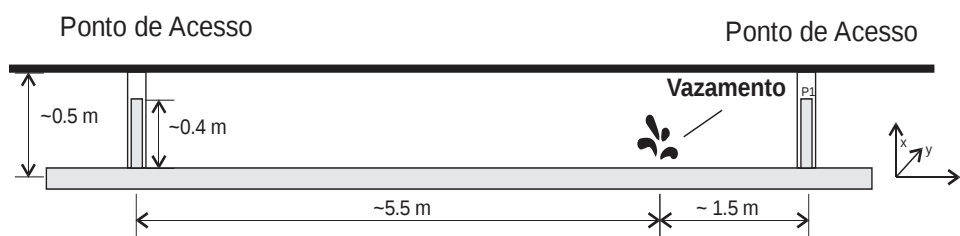
2.5.2 Ensaio experimental

O ensaio experimental no Campo de Provas de São Paulo tem como objetivos confirmar a banda de frequências em que o vazamento é situado e investigar as características da vibração nos pontos de acessos nas direções cartesianas x, y e z.

2.5.2.1 Metodologia

Na Figura 17 é mostrado um desenho esquemático da seção da tubulação em que foi realizado o ensaio no Campo de Provas da SABESP. A tubulação monitorada é composta por tubos de PVC, a distância entre os pontos de monitoramento é de aproximadamente 7 metros e o vazamento simulado por meio de derivação do fluxo se encontra cerca de 1,5 m próximo à um dos pontos de acesso.

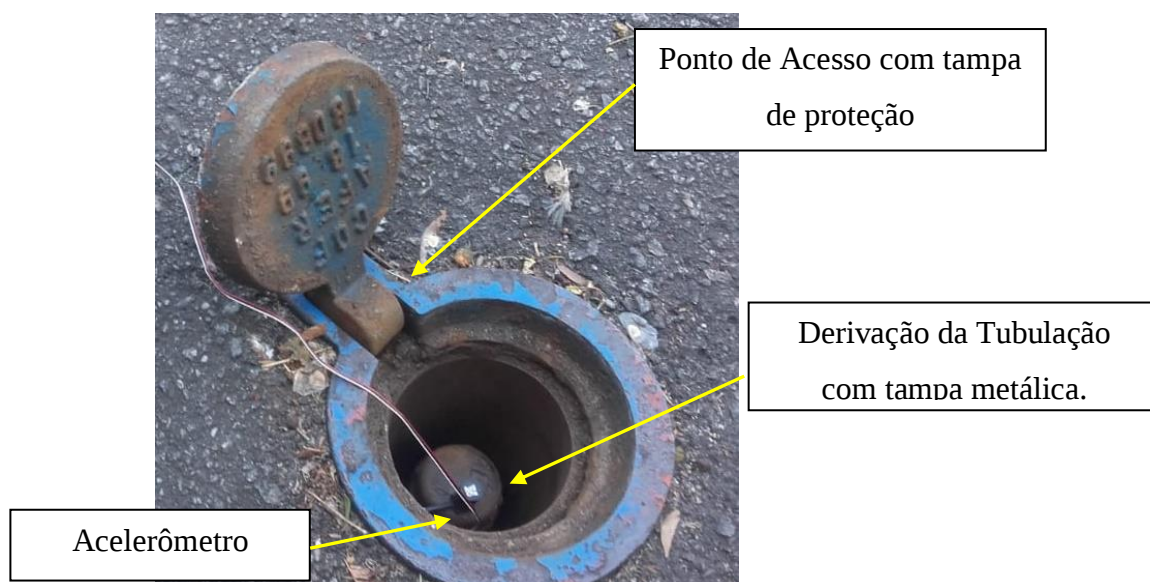
Figura 17 - Desenho esquemático dos pontos de acesso e vazamento simulado.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 18 é apresentado a visão superior de um dos pontos de acesso já com um dos sensores de vibração a ele fixado. O ponto de acesso conta com uma estrutura em ferro fundido que exerce o papel de tampa protetora quando não é utilizado, protegendo o ponto de acesso de intempéries e possibilitando a passagem de veículos uma vez que a instalação do campo de provas divide lugar com um estacionamento.

Figura 18 - Visão superior de um dos pontos de acesso com sensor fixado.



Fonte: Próprio autor.

Foram utilizados na instrumentação acelerômetros tri-axiais Bruel & Kjaer modelo 4506-B-003 com sensibilidade de 500 mV/g e um sistema de aquisição Siemens modelo LMS Scada XS. O sensor foi posicionado no topo do ponto de acesso e foram realizadas medições nas três direções x, y e z, os eixos são os mesmos indicados na Figura 17.

O ensaio compreendeu medidas do circuito da seguinte forma:

- sem operação nenhuma: quando é registrado o ruído de fundo do ambiente.
- com a circulação da água sem a simulação de vazamento: onde é registrado o ruído decorrente da bomba d'água que faz a circulação da água.
- com a circulação da água e com a simulação de vazamentos: onde é registrado o sinal produzido decorrente do vazamento.

2.5.2.2 Resultados

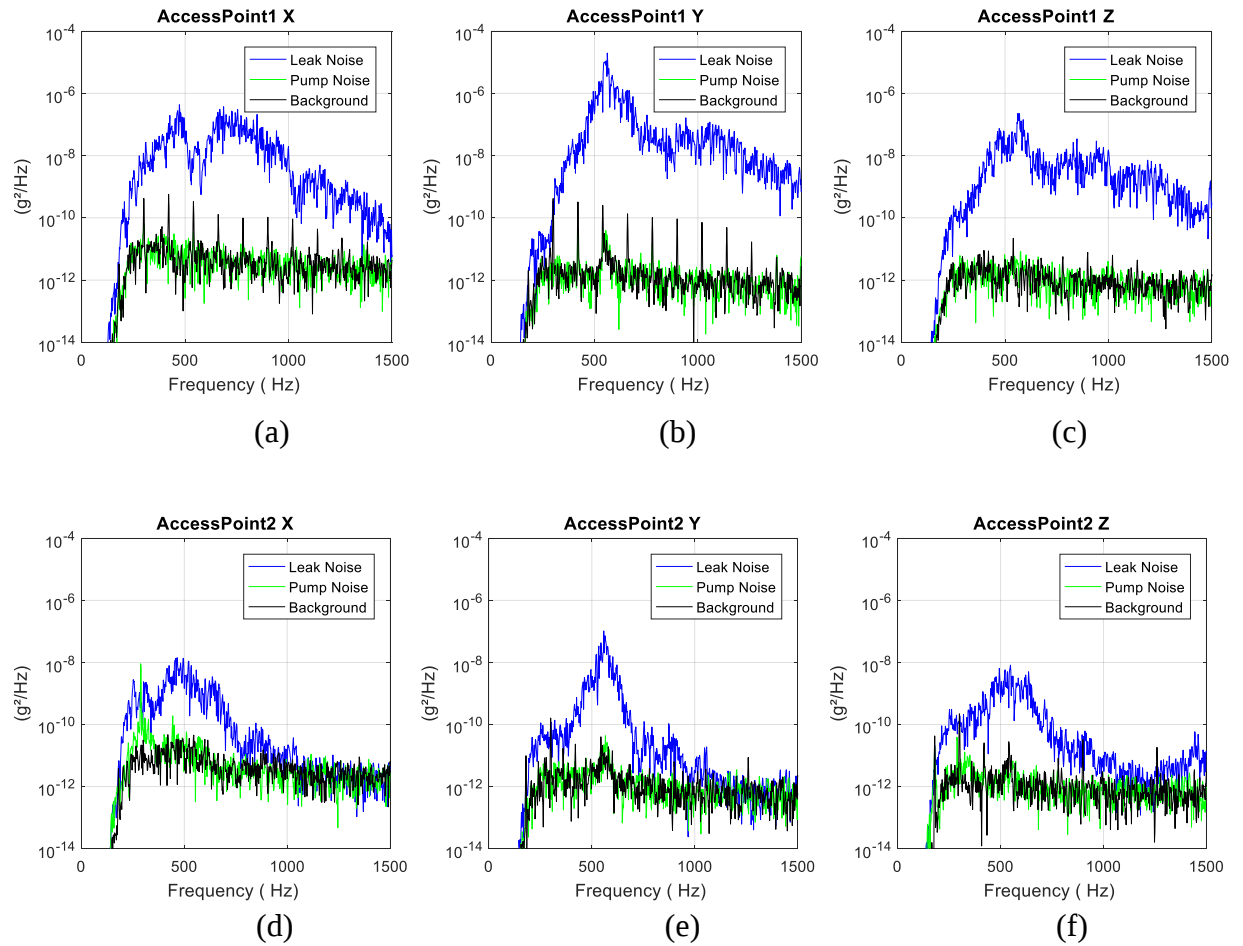
Foi observada a presença do ruído da rede elétrica em 60 Hz, por isso um filtro passa-alta com corte em 240 Hz foi utilizado, de picos nas harmônicas múltiplas de 60 Hz são observáveis pelo mesmo motivo.

Os sinais foram amostrados com a frequência de aquisição de 3072 Hz, utilizando janelamento do tipo *hanning*, 50% de *overlap* e $nfft = 1024$.

Na Figura 19 são apresentadas as Densidades Espectrais de ambos os pontos de acesso nas três situações para cada direção no primeiro e segundo ponto de acesso. A banda de frequência decorrente do vazamento apresenta maior amplitude no Ponto de Acesso 1 pois este é localizado mais próximo ao vazamento. Na Figura 19 (a) (b) e (c) a linha azul representa a Densidade Espectral do sinal na presença do vazamento simulado. Na Figura 19 em (d) (e) e (f), são representadas as Densidades Espectrais do Ponto de Acesso 2, este ponto encontra-se mais distante do vazamento, característica esta que explica a presença dos picos com menor concentração de energia e distribuição mais concentrada.

Observa-se que principalmente nas medições referentes ao Ponto de Acesso 1 existe a presença do ruído da rede em diversas harmônicas. Por meio também da Figura 19 (b), (c), (e) e (f) o pico de energia se encontra centrado em torno da frequência de 550 Hz.

Figura 19 - Densidade espectral do sinal nos pontos de acesso.



Fonte: Próprio autor.

A presença desta concentração de energia pode ocorrer por conta dos fenômenos envolvidos entre a tubulação principal e vazamento, mas também pode conter a influência das propriedades estruturais do ponto de acesso. Uma vez considerada como uma estrutura anexa à tubulação, o ponto de acesso pode conter forma e material que o façam assumir um comportamento próprio, similar a ação de uma viga engastada que possui sua própria frequência natural, para qual algumas frequências podem ser amplificadas e outras atenuadas.

Os valores eficazes da vibração do ruído de fundo, ruído da bomba e vazamento já filtrados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Níveis de vibração dos sinais ensaiados.

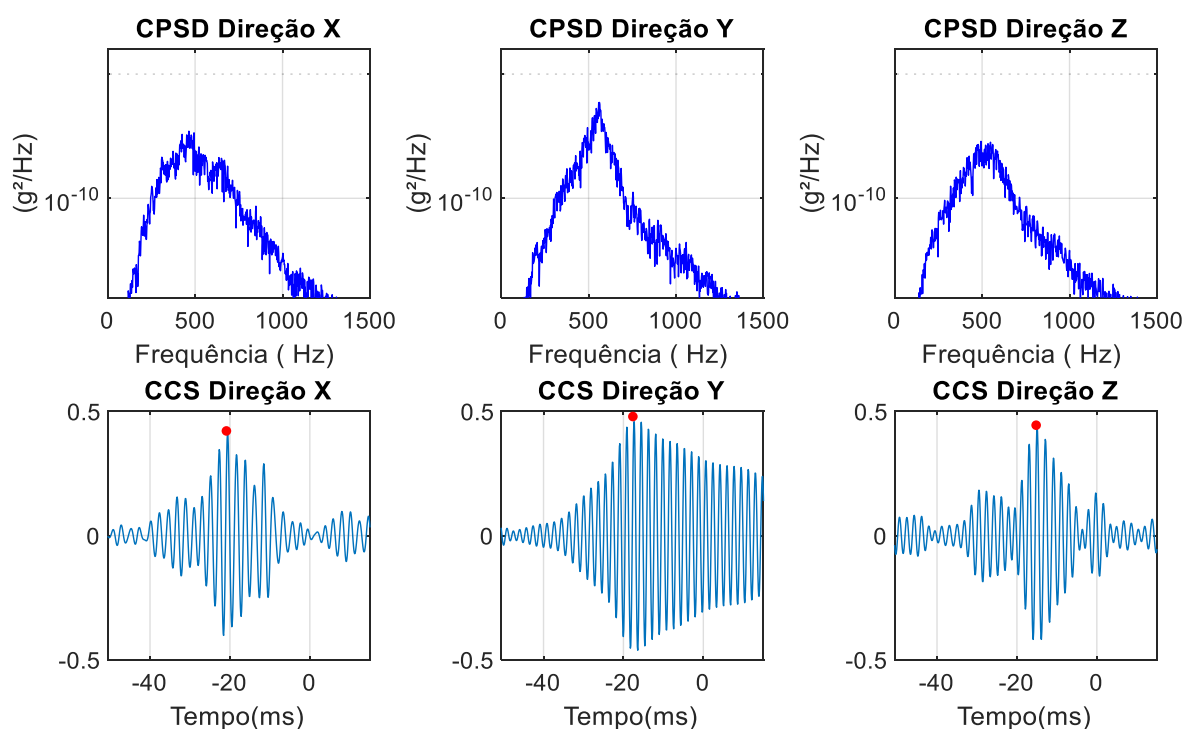
Condição	Ponto de Acesso 1 (mm/s ²)			Ponto de Acesso 2 (mm/s ²)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Ruído de fundo	001.3	000.9	00.5	001.1	00.6	00.6
Ruído da bomba	001.1	000.6	00.6	002.3	00.6	00.6
Sinal do vazamento	062.9	222.3	034.3	010.2	015.3	007.0

Fonte: Próprio autor.

É possível perceber que a influência do ruído da bomba é pouco percebida, ainda sim sua presença é mais facilmente observada no Ponto de Acesso 2 ao longo da direção X pois este se encontra mais próximo da mesma. Já a presença do sinal de vazamento que se encontra mais próximo do Ponto de Acesso 1 é facilmente notada em todas as direções.

Através da observação das faixas de frequência onde o sinal de vazamento se mostra mais evidente, foi adotada a aplicação de um filtro passa-banda entre 300 e 600 Hz. O cálculo das Densidades Espectrais Cruzadas, bem como da Correlação Cruzada entre os sinais filtrados dos Pontos de Acesso 1 e 2 nas três direções são apresentados na Figura 20 abaixo. Os pontos em vermelho denotam a posição dos picos da função da Correlação e seus valores no eixo das abscissas indicam o atraso de tempo calculado entre os sinais. Observando os resultados, é possível concluir que a concentração de energia presente no módulo das Densidades Espectrais Cruzadas dos sinais reais de vazamento estão em faixas compatíveis com aquelas calculadas e apresentadas na Figura 16. Um resultado mais acurado possivelmente pode ser obtido com a utilização dos parâmetros do solo e adoção do modelo proposto por Brennan *et al.* (2018).

Figura 20 - Densidades Espectrais Cruzadas e Correlações Cruzadas entre os sinais dos Pontos de Acesso.



Fonte: Próprio autor.

Utilizando-se os valores obtidos através da Correlação Cruzada de Sinais referentes ao atraso do sinal, adotando-se o valor de 490 m/s como velocidade encontrado por Lima (2019) e a distância conhecida entre os pontos de acesso, por meio da Equação (1) é possível determinar a posição calculada do vazamento, os valores dessa operação são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Níveis de vibração dos sinais ensaiados.

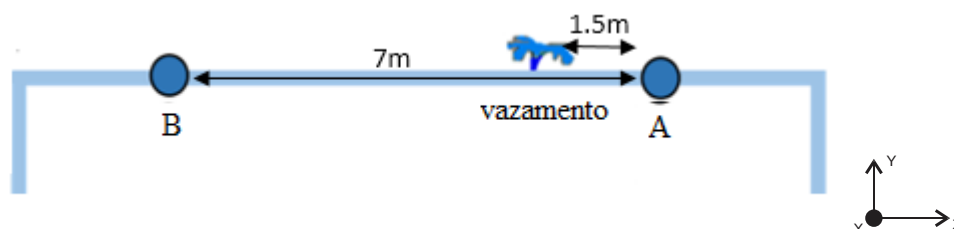
OPERAÇÃO	DIREÇÃO		
	X	Y	Z
Tempo de Atraso (ms)	-20.6	-17.3	-14.9
Distância Calculada (m)	1.55	0.73	0.16

Fonte: próprio autor.

Observa-se que o resultado obtido através da direção X tem ótima acurácia, porém as direções Y e X trazem erros que inviabilizam a utilização de seus resultados. Tal fato possivelmente deve-se a influência da ação de reflexões de ondas, pois como observado na

Figura 21, os pontos de acesso se encontram próximos a mudanças bruscas de direção na tubulação que podem fazer uma parcela da energia que se propaga ser refletida e retornar aos sensores.

Figura 21 - Mudanças de direção na tubulação, possíveis fontes de reflexão.



Fonte: próprio autor.

A direção X trata-se também da direção onde é presumida a maior rigidez do Ponto de Acesso e se encontra alinhada com a direção axial que conforme discutido na seção anterior é onde está situado o maior modo de transmissão de energia $n=0$ e $s=1$ (Figura X). Maiores discussões a respeito da presença de reflexões e fatores que provocam a diminuição da acurácia da técnica de detecção são detalhadas nos trabalhos de Ayala (2019) e Lima (2019).

2.5.2.3 Conclusões do experimento

É possível concluir que a melhor direção para monitoramento é a direção X, que é a mesma direção radial da tubulação principal e que o monitoramento nas 3 direções cartesianas não traz vantagens diretas quanto a medição apenas na direção X.

2.6 SENSORES MEMS DE BAIXO CUSTO

Os acelerômetros do tipo piezoelétricos possuem uma grande variedade de características de tamanho, peso e formato. Suas características variam conforme a aplicação na qual serão submetidos, costumam ser sensores relativamente caros quando comparados, como exemplo, aos sensores de velocidade e tem seu custo de aquisição variando na ordem entre centenas até poucos milhares de dólares a depender da sensibilidade, número de eixos e resistência do invólucro a intempéries externas.

Ismail (2018) em seu artigo cita vários trabalhos que utilizam acelerômetros como sensores na detecção de vazamento, estes sensores atuam tanto no monitoramento de ruído como na correlação de sinais, o autor dá especial atenção aos sensores do tipo MEMS, pois dependendo da aplicação este tipo de sensor pode oferecer benefícios como custo de aquisição e operação reduzido quando comparados aos piezoelétricos. O uso de acelerômetros do tipo MEMS será então investigado nesta seção.

Com o avanço da manufatura de circuitos integrados e demais componentes eletrônicos surgiram circuitos integrados que agregam estruturas mecânicas micrométricas e circuitos eletroeletrônicos, estes componentes são conhecidos pela sigla em língua inglesa: MEMS (*Micro Electrical Mechanical Systems* - Dispositivos micro eletromecânicos).

Existem acelerômetros do tipo MEMS destinados à diversas aplicações, como por exemplo a utilização em laboratórios onde a exatidão e a precisão elevadas são exigidas, em ambientes industriais onde a robustez e imunidade à ruídos se faz mais necessária, e alcançando até mesmo aplicações em linhas de distribuição de óleo e gás onde é necessária alta sensibilidade e interesse no monitoramento de baixas frequências próximas a 0 Hz (PCB, 2018). Nestas situações extremas, devido as características exigidas, o custo de sensores MEMS pode se equiparar ou até mesmo superar o custo de um sensor convencional.

Mas é na indústria de consumo que os acelerômetros e outros tipos de sensores do tipo MEMS são amplamente empregados. São utilizados na maioria dos equipamentos modernos como: celulares, tablets, notebooks, relógios inteligentes e até drones. Nesta classe de equipamentos os sensores MEMS são geralmente utilizados para determinar a orientação e a posição do aparelho, realizar o controle através de movimentos, detectar deslocamentos, queda, contagem de passos, etc (YASUURA *et al.*, 2017).

Na Figura 22 são retratados dois acelerômetros MEMS, um de baixo custo o ADXL 362 utilizado em dispositivos para usuário final custando alguns centavos de dólares, e do outro lado um sensor da Colybris® utilizado como na indústria petrolífera tendo seu custo orçado em algumas centenas de dólares. No centro da Figura 22 é mostrada uma placa de desenvolvimento de protótipos montada com o sensor ADXL.

Figura 22 - Acelerômetros MEMS, Analog Devices e Colibrys.



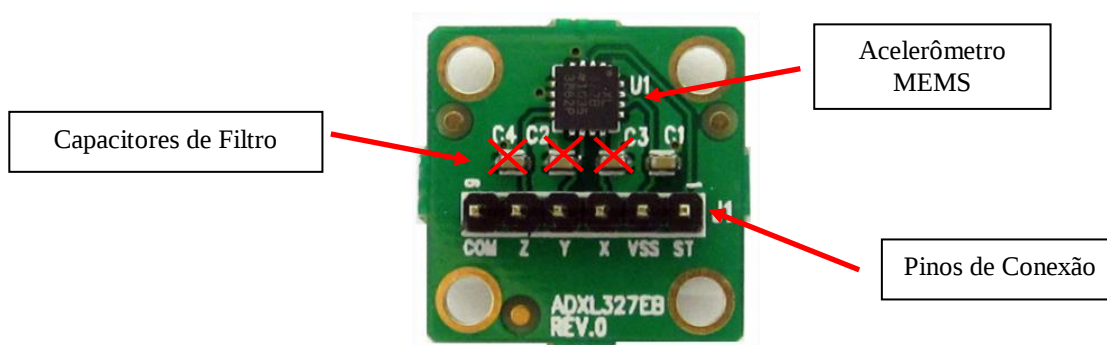
Fonte: Machine Design (2017).

Por não necessitarem de tamanha robustez e precisão nas aplicações de consumo final o tamanho dos dispositivos vem a ser reduzido, a quantidade de produção alta e desta forma custo de um sensor MEMS pode representar apenas uma pequena fração do que um sensor piezoelétrico representaria podendo então ser considerado de baixo custo.

2.6.1 ADXL 327

O sensor ADXL327 da Analog Devices é um acelerômetro tri-axial com saída analógica, amplitude de medição entre -2g a +2g indicado para trabalhar na banda de frequência de 0 a 1600 Hz de uso geral e baixo custo (ANALOG DEVICES, 2014). Na Figura 23 é representada a placa de desenvolvimento que foi utilizada no estudo. A placa é composta por sensor, capacitores e pinos para conexão elétrica, os capacitores foram removidos a fim de não mais atuarem como filtro passa baixa e desta maneira ser mensurada toda a banda de resposta do dispositivo.

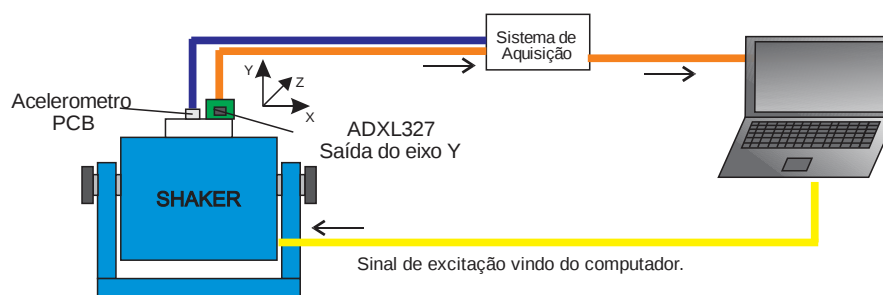
Figura 23 - Placa de desenvolvimento do acelerômetro ADXL327.



Fonte: Adaptado de Analog Devices (2014).

Para avaliar o sensor, um sinal gerado através da interface de áudio de um computador realiza a excitação de um transdutor eletrodinâmico de vibração Veb Robotron-Messelektronik modelo 11077, em sua plataforma oscilatória são fixados o sensor ADXL327 em teste e um sensor piezoelétrico de uso em laboratório modelo 333 da PCB Eletrônicos com sensibilidade de 10 mV/ms². Os dados são coletados através de um sistema de aquisição Siemens LMS Scada XS, o esquema da montagem é apresentado na Figura 24.

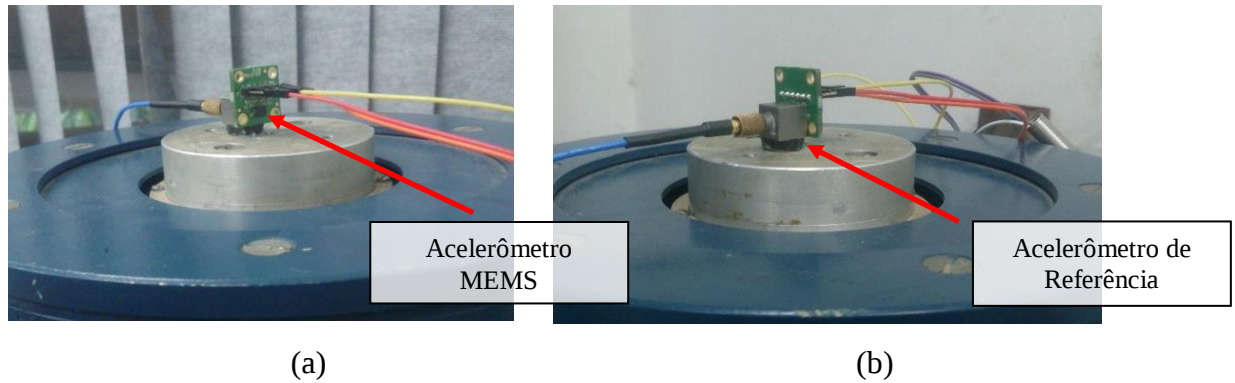
Figura 24 - Esquema do experimento de análise do acelerômetro MEMS.



Fonte: Próprio autor.

A montagem dos sensores a base do shaker pode ser observadas na Figura 25 (a) e (b). Foi utilizada a alimentação de 3,3V para o sensor MEMS, nesta situação segundo seu *datasheet* o componente tem sua sensibilidade por volta de 40 mV/ms² (ANALOG DEVICES, 2014).

Figura 25 - Experimento de teste do Acelerômetro MEMS.

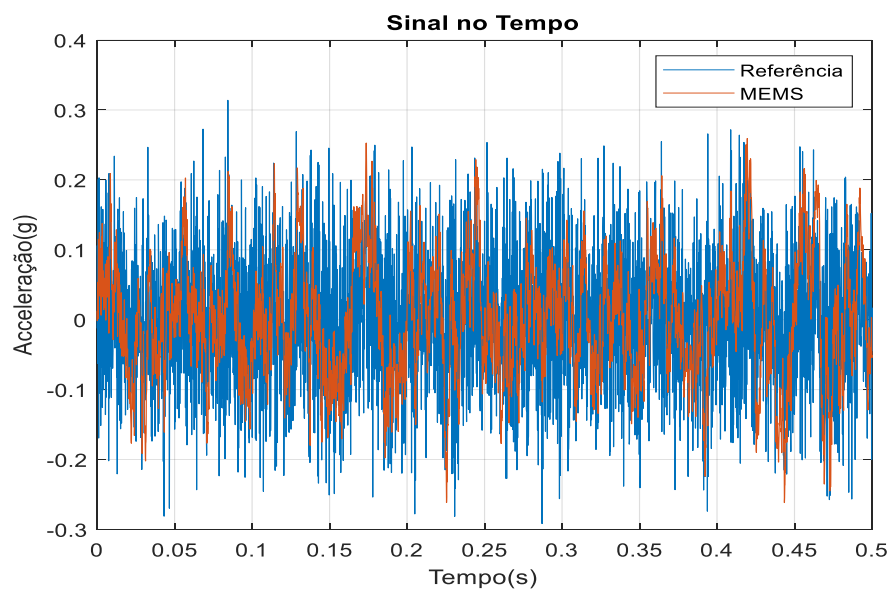


Fonte: Próprio autor.

Foi aplicado um sinal de caráter aleatório, com o nível rms em torno de 10 m/s^2 e coletado um intervalo de 30 segundos. A taxa de amostragem utilizada foi de 8.000 Hz , o que confere uma banda espectral de 0 a 4.000 Hz , representando um intervalo superior a banda de resposta do dispositivo MEMS indicada pelo fabricante. Foram utilizados 1024 pontos para o janelamento do tipo *hanning*, 50% de sobreposição entre as janelas.

Na Figura 26 são mostrados ambos os sinais no Domínio do Tempo, o Sensor de Referência em azul e acelerômetro MEMS em vermelho. Já no tempo é possível perceber que o sensor de referência apresenta maiores componentes de alta frequência do que o sensor MEMS.

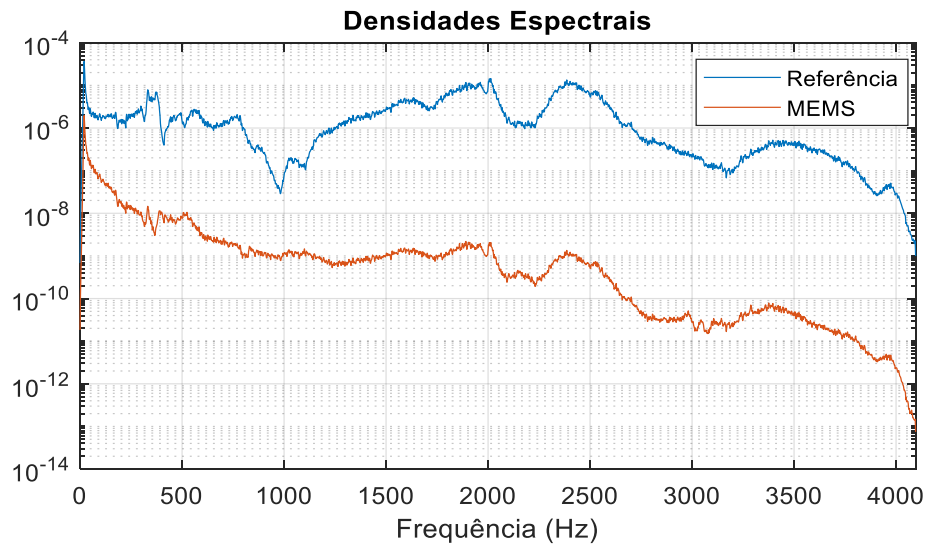
Figura 26 - Sensores de Referência e do tipo MEMS no Domínio do tempo em 10 m/s^2 .



Fonte: próprio autor.

Na Figura 27 estão presentes as Densidades Espectrais de cada um dos sensores. Pode-se notar que o sensor do tipo MEMS que apesar do esperado possui a sensibilidade inferior ao sensor de referência, não sendo representando essa situação com os dados fornecidos pelo fabricante no *datasheet*,

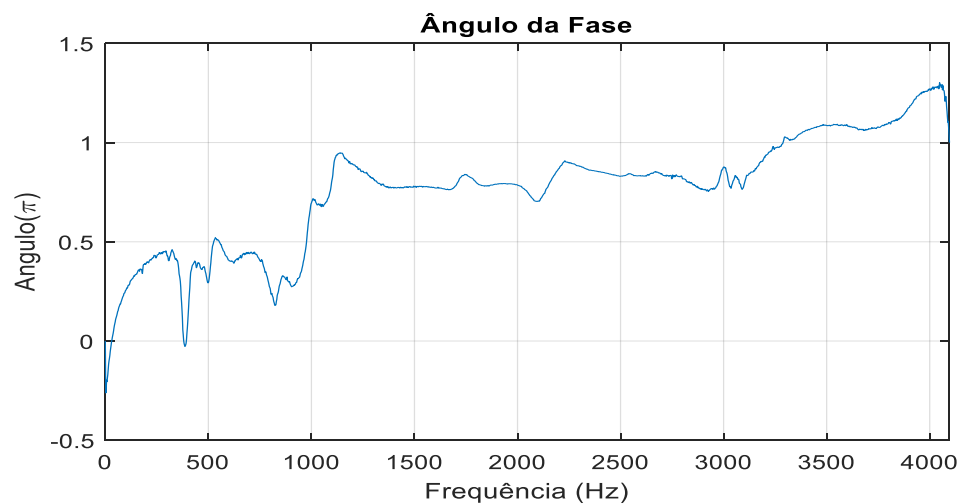
Figura 27 - PSD dos sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s^2 .



Fonte: próprio autor.

Na Figura 28 é mostrada a Fase da Densidade Espectral Cruzada entre os sensores de Referência e do Tipo MEMS, desta vez pode-se observar que a fase entre os sensores não se mantém constante ao longo das frequências do ensaio.

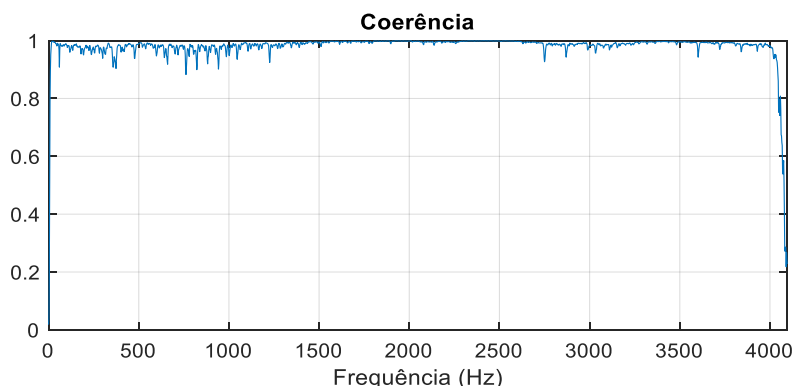
Figura 28 - Ângulo da Fase da CPSD dos sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s^2 .



Fonte: próprio autor.

Na Figura 29 é mostrada a Coerência entre os dois sensores, e desta vez nota-se que a mesma assume valor unitário ao longo de todo o espectro de teste, indicando bom comportamento entre os sensores.

Figura 29 - Coerência entre os dois sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s^2 .

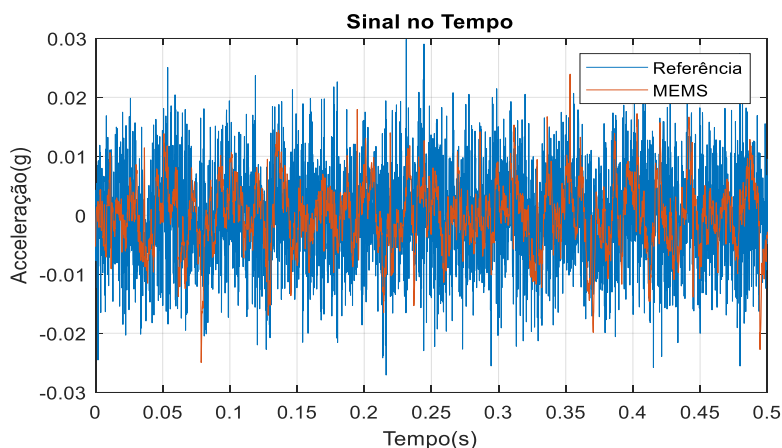


Fonte: próprio autor.

Foi determinado experimentalmente na Seção 2.5 anterior deste trabalho, que os sinais de vazamento possuem amplitudes muito baixas que podem chegar a $0,005\text{ m/s}^2$ RMS. Desta maneira, a amplitude do sinal do sinal foi reduzida para cerca de $0,010\text{ m/s}^2$ RMS e o ensaio foi realizado mais uma vez.

Na Figura 30 são mostrados ambos os sinais no Domínio do Tempo, o Sensor de Referência novamente em azul e acelerômetro MEMS também em vermelho. O comportamento de ambos os sensores se mantém como os do ensaio anterior, observa-se apenas a queda da amplitude em ambos.

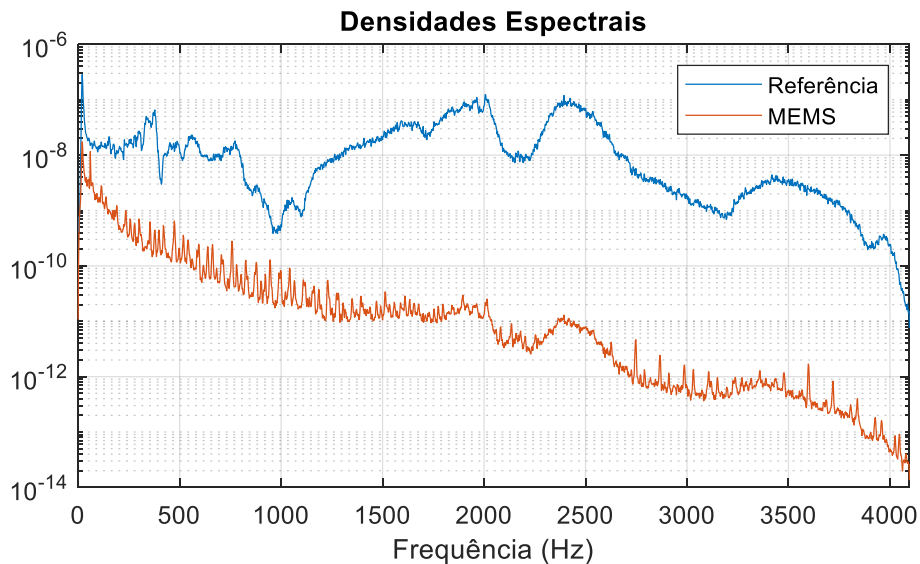
Figura 30 - Sensores de Referência e do tipo MEMS no Domínio do tempo em 10m/s^2 .



Fonte: próprio autor.

Na Figura 31 estão presentes as Densidades Espectrais dos sensores, novamente o acelerômetro MEMS apresenta uma sensibilidade inferior a esperada no datasheet, e possui um declínio conforme ocorre o aumento das frequências, observa-se também muito ruído neste sensor quando comparado com o sensor de referência.

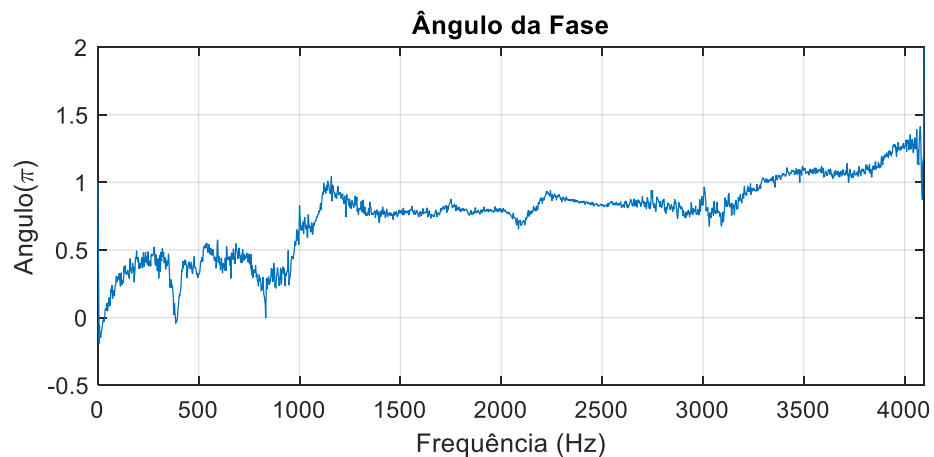
Figura 31 - PSD dos sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s^2 .



Fonte: próprio autor.

Na Figura 32 onde é mostrada a Fase da Densidade Espectral Cruzada entre os sensores, observar-se que a fase entre os sensores também não se mantém constante ao longo das frequências.

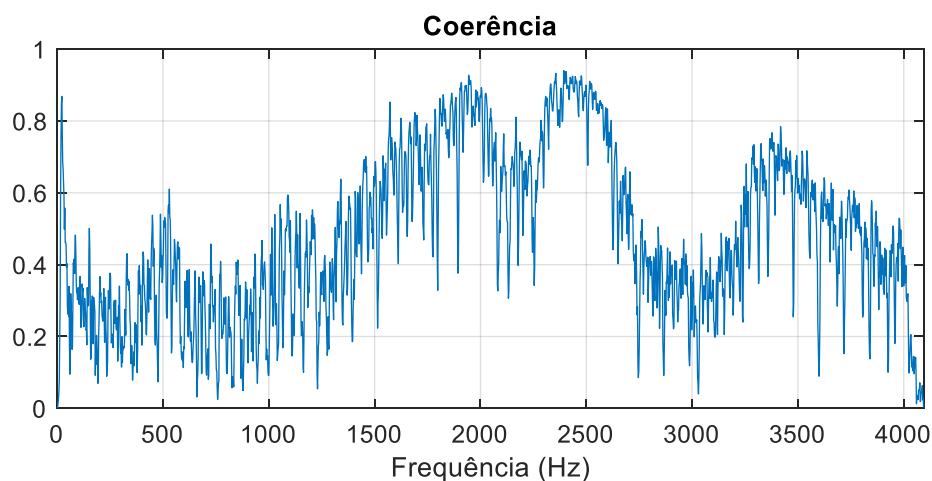
Figura 32 - Ângulo da Fase da CPSD dos sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s^2 .



Fonte: próprio autor.

Na Figura 33 é mostrada a Coerência entre os dois sensores, e desta vez nota-se que esta não se mantém em seu valor unitário, assumindo valores indesejavelmente baixos ao longo das frequências ensaiadas.

Figura 33 - Coerência entre os dois sensores de referência e do tipo MEMS em 10m/s².



Fonte: próprio autor.

A coerência encontrada por meio do ensaio na região de 0 a 1.200 Hz mesmo sendo está a faixa de trabalho indicada pelo fabricante, apresenta-se insatisfatória, uma vez que é nesta região justamente onde está localizada a energia dos sinais de vazamento. Isto indica que o uso deste sensor não é indicado para a detecção de vazamentos por meio da técnica de correlação cruzada.

2.6.2 Conclusões

Apesar de Ismail (2018) apresentar o uso por diversos autores de sensores acelerômetros de baixo custo do tipo MEMS, nos trabalhos por ele citados os sensores são utilizados para o monitoramento de vibrações muito próximos a fonte, assim possuindo alta amplitude os fenômenos monitorados se apresentam compatíveis com as faixas de utilização ótimas destes dispositivos. Na técnica de Correlação de Sinais geralmente são envolvidas grandes distâncias, que atenuam o sinal de maneira que o sensor não possui sensibilidade adequada para o uso, não sendo então recomendado o uso de sensores de baixo custo.

Tal teste não exclui a utilização de sensores do tipo MEMS para aplicação, mas denota a necessidade de modelos com características próprias para a tarefa como por exemplo os sensores Colibry®(SAFRAN, 2018) próprios para o monitoramento sísmico, porém tais dispositivos deixam de apresentar vantagens financeiras quando comparados aos acelerômetros piezo elétricos por possuir também seu custo elevado.

2.7 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Por meio da pesquisa bibliográfica e investigação experimental realizadas nesse capítulo é possível concluir que as formulações propostas por Gao *et al.* (2004) para o modelo de vazamento são eficazes e trouxeram uma boa predição da faixa de frequências onde o vazamento se mostra localizado nos pontos de monitoramento, embora possa ter seus resultados melhorados com a adoção dos parâmetros de influência do solo, conforme proposto por Brennan (2008).

Os resultados experimentais demonstraram que os vazamentos no campo de provas da SABESP estão localizados principalmente na faixa de frequência compreendida entre 300 e 600 Hz. E que a melhor direção para a instalação do sensor de vibração no ponto de acesso foi aquela alinhada à direção radial da tubulação, provavelmente por ser a direção do principal modo de transferência de energia do vazamento.

Durante a investigação sobre o uso de sensores MENS de baixo custo, foi possível notar que este tipo de sensor apresenta bom funcionamento em amplitudes maiores de vibração, porém que em torno de $0,010 \text{ m/s}^2$ valor encontrado durante os experimentos no campo de prova os sensores não apresentaram boa efetividade, sendo preferível o uso de sensores piezoelétricos convencionais.

3 INVESTIGAÇÃO DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DO MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO GPS

3.1 INTRODUÇÃO

Uma vez conhecida a faixa de frequências onde há o interesse de captação, bem como os sensores a serem utilizados na mensuração dos sinais o próximo passo é executar a aquisição e a transmissão desses sinais.

Os acelerômetros piezoelétricos bem como a maioria dos sensores de vibração convencionais, possuem saídas analógicas de tensão e possuem as mesmas características de dispositivos de captação acústica. Mediante o devido condicionamento do sinal, pode ser utilizado como dispositivo de aquisição de dados qualquer equipamento destinado a receber a entrada de som, como exemplo a placa de som de um computador, a interface de som de um *smartphone*, *tablet* ou o conversor analógico-digital de sistema IoT.

Esse capítulo trata do funcionamento de sistemas digitais, do funcionamento de sistemas digitais bem como dos métodos de sincronização via satélite.

3.2 TRANSMISSÃO DE SINAIS VIA RÁDIO

Existem várias maneiras de se realizar a transmissão de dados sem fios, a luz por exemplo é utilizada na maioria dos controles remotos de aparelhos domésticos modernos e em fibras óticas, sinais ultrassônicos podem ser utilizados para este fim, mas as ondas eletromagnéticas na forma de sinais de rádio ainda se encontram como a maneira mais usual (SOARES NETO, 2015).

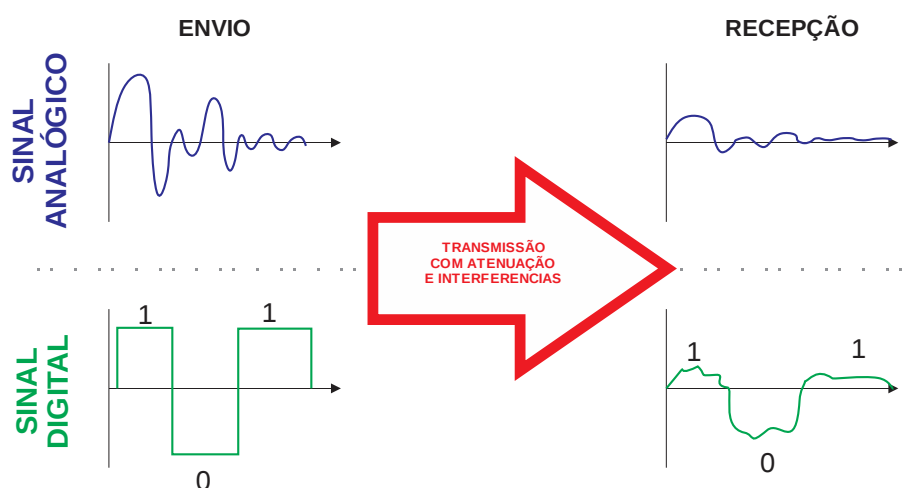
Na transmissão de sinais por rádio existem transmissores de sinais com sistemas analógicos e transmissores de sinais com sistema digitais. Os transmissores analógicos possuem transmissão contínua do sinal, relacionada diretamente com a amplitude do fenômeno que foi adquirido. Este tipo de transmissão tem como sua principal característica relevante a este projeto: possuir a transmissão instantânea e sem atrasos de tempo introduzidos pelo sistema. Como fator negativo, para garantirem bom alcance e ausência de

interferências que afetam a fidelidade da informação e interrupções no sinal, necessitam de projetos sofisticados (IBBOTSON, 1998), geralmente resultam em custo elevado ou necessidade de licença para transmissão em determinadas faixas específicas e com níveis altos de potência.

Já os transmissores digitais convertem toda a informação em apenas dois estados ao longo do tempo, estes dois estados são chamados de bits e representam 0 ou 1. Toda a informação é codificada e se torna mais fácil garantir o alcance e qualidade do sinal a longas distâncias (IBBOTSON, 1998), uma vez que uma parte dos dados sejam afetados por interferência externa há ainda a possibilidade dos mesmos ainda serem interpretados, em caso negativo podem haver até mesmo a retransmissão e checagem da informação de forma que nenhuma informação seja perdida (SOARES NETO, 2015). Os transmissores digitais são equipamentos que possuem ampla utilização tanto no setor comercial, industrial e doméstico. Apesar de sua complexidade, por contar com ampla oferta no mercado, geralmente não apresentam custo muito elevado.

Na Figura 34 é apresentada uma comparação entre a transmissão de sinais analógicos e digitais, bem como o efeito da atenuação e de interferências externas. É possível observar que uma vez sofrendo a atenuação do sinal analógico, o mesmo pode perder sua forma e informação original.

Figura 34 - Comparação do efeito da atenuação e interferência na transmissão de sinais analógicos e digitais.



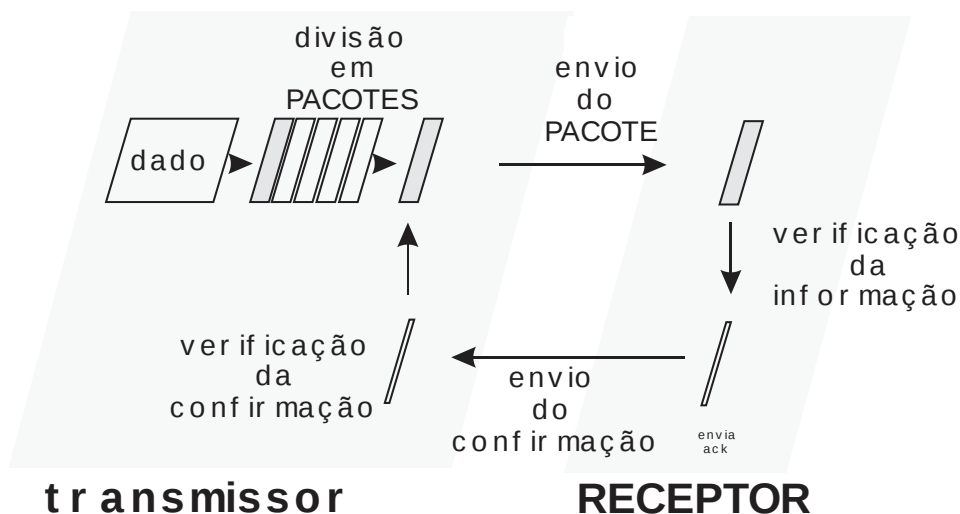
Fonte: Próprio autor.

Já o sinal digital, mesmo sofrendo de atenuação e interferência de ruídos, enquanto é possível a interpretação de seus estados lógicos, mesmo que distorcido consegue ainda carregar a informação original.

Existem vários tipos de transmissão utilizando rádios digitais, cada uma pode utilizar diferentes tipos de protocolos de transmissão. Como padrões mais conhecidos de uso doméstico e comercial pode-se citar o *Bluetooth* e o *Wi-fi*, porém existem diversos outros como por exemplo o protocolo industrial *Zig-bee*. Por ser de fácil implementação, ter grande largura de transmissão de dados e possuir diversos dispositivos no mercado, nesse trabalho optou-se pela transmissão sem fio utilizando a comunicação por rádio digital *Wi-fi*, em sua especificação 802 e transmissão via TCP/IP (LUGLI; SANTOS, 2013).

No protocolo TCP/IP, os pacotes de dados são transmitidos e a integridade de seu conteúdo é checada em seu destino através da conferência dos dados recebido com algum tipo de norma de recepção (MOTA FILHO, 2013). Por exemplo, um pacote de informação final contendo a soma numérica de todos os bits recebidos, a confirmação de sucesso de transmissão é enviada ao transmissor e se houver divergências a informação será enviada novamente. Com este tipo de verificação, contanto que não haja uma falha permanente de comunicação, os pacotes podem ser transmitidos e retransmitidos até haver a certeza que todos os dados chegaram de maneira íntegra do transmissor ao receptor. O esquemático deste tipo de transmissão está presente na Figura 35.

Figura 35 - Checagem dos dados na transmissão TCP/IP.



Fonte: Próprio autor

Uma característica inerente à transmissão em TCP/IP é a latência. A latência pode ser entendida como o período em que um pacote de dados demora para ser transmitido. Este período depende do processo de transmissão e verificação da informação, da qualidade de transmissão e dos demais processos que estejam sendo executados nos dispositivos de transmissor e receptor (MOTA FILHO, 2013).

Baseando-se no uso da técnica de Correlação Cruzada de Sinais, conhecendo-se exatamente o momento em que a aquisição do sinal que está sendo transmitido foi realizada, os efeitos desconhecidos de latência normal do sistema e retransmissão por conta de falhas não representam um problema ao sistema de correlação.

3.3 SISTEMAS OPERACIONAIS

A utilização do *Wi-fi* para a transmissão de dados digital e a possibilidade de se utilizar conversores de áudio para a captura dos sinais convidam ao uso no Correlacionador Sinais de sistemas computacionais comuns que se utilizam de microprocessadores e Sistemas Operacionais.

Os computadores são máquinas que possuem processador, memória e a conexão com alguns periféricos de entrada e saída de dados. Embora seja comum pensar em computadores apenas como aqueles *desktops* e *notebooks* que ocupam nossas mesas, ambos utilizando arquitetura x86 com alto poder de processamento e armazenamento, esses não são os únicos sistemas computacionais disponíveis. Existem em nossa volta uma infinidade de computadores utilizados para os mais variados fins, como é o caso dos tablets e smartphones, e mesmo alguns sistemas computacionais de processamento mais modesto que quase não são reconhecidos como computadores, como por exemplo: modems, roteadores, televisões inteligentes, receptores de satélite, centrais multimídia de veículos, e até alguns equipamentos médicos (HARRIS; HARRIS, 2015). Estes dispositivos menores em sua maioria utilizam no processamento a arquitetura ARM®.

Tanto os computadores convencionais, como os dispositivos diversos citados acima, realizam diversas tarefas de forma que aparentam ocorrer simultaneamente, esses sistemas são conhecidos como sistemas multitarefas. Os sistemas multitarefas, na maioria das vezes,

apenas compartilham o tempo de processamento entre as tarefas, não as executando simultaneamente, mas sim de forma sequencial como pode ser observado na Figura 36.

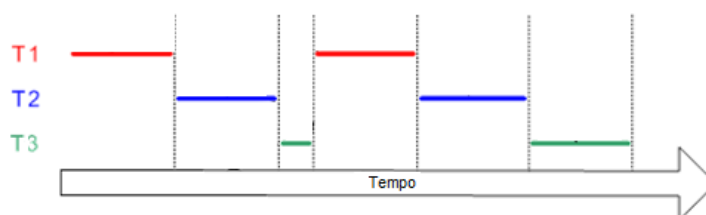
Figura 36 - Execução de Tarefas em um Sistema Operacional.



Fonte: adaptado de FreeRTOS (2016).

Porém a execução das tarefas não ocorre de forma regular como apresentado na Figura 36. O momento em que cada tarefa será executada, bem como o tempo dedicado à sua execução são determinados pelo sistema operacional em uso, levando em consideração parâmetros como a prioridade da tarefa a ser executada e a fila de espera das tarefas que aguardam a execução pelo sistema. A Figura 37 representa um diagrama de tempo e ordem de execução.

Figura 37 - Execução das Tarefas ao Longo do Tempo



Fonte: adaptado de FreeRTOS (2016).

Embora não aparente ao usuário final do sistema, é possível notare que a sincronização em um sistema multitarefas, observada em uma escala de tempo pequena é algo complexo e que insere atrasos de tempo não determinados na execução das tarefas.

É possível conhecer o tempo de execução de tarefas através de sistemas designados como *RTOS*, acrônimo em inglês *RTOS - Real Time Operation System* (Sistemas Operacionais de Tempo Real), este tipo de sistema operacional executa as tarefas em ordem e intervalos de tempo predeterminados (FREERTOS, 2016). Como ponto negativo, a

implementação de sistemas RTOS costuma ser específica para cada tipo de *hardware* utilizado, exigindo conhecimentos específicos dos componentes utilizados o que torna o projeto custoso e de difícil portabilidade para sistemas físicos diferentes.

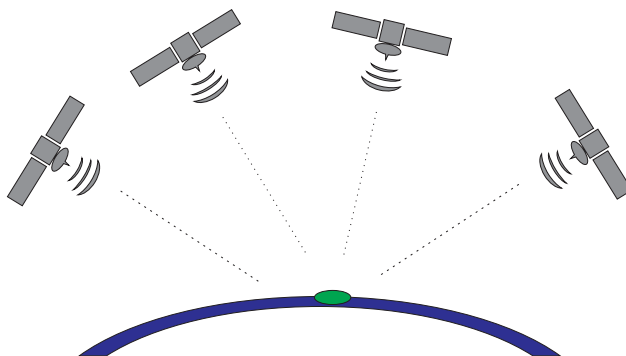
Embora a utilização de um Sistema Operacional de Tempo Real possa não carregar a incerteza de tempo gerada no início das tarefas em um Sistema Operacional comum, este último ainda tem preferência de uso pois permite a maior facilidade do uso e portabilidade entre dispositivos de diversas natureza, todavia de alguma maneira a incerteza no tempo deve ser contornada a fim de que não haja a geração de atrasos que possam influenciar e trazer problemas à Técnica de Correlação.

3.4 O SISTEMA GPS

O Sistema de Posicionamento Global em língua inglesa: *Global Positioning System* mais conhecido por seu acrônimo *GPS*, é um sistema de rádio navegação de propriedade dos Estados Unidos da América (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION- NASA, 2017), que provê acurácia de cerca um metro para latitude, longitude e altitude e cerca de nano segundos para referência temporal em aplicações comuns.

Segundo Kaplan e Hegarty (2017), o sistema consiste em um conjunto de satélites em órbita da terra que quando em contato com o receptor na terra recebem o nome de constelação, cada satélite da constelação possui posição instantânea conhecida no momento da transmissão e conta com um relógio atômico em seu interior. O sistema funciona de tal forma que ao menos 4 satélites são visíveis em qualquer ponto da superfície terrestre. O receptor em terra por meio cálculos utilizando o tempo de atraso na comunicação com cada satélite e a posição informada pelos mesmos consegue definir sua posição em terra como esquematizado na Figura 38.

Figura 38 - Sistema de localização via satélite baseado em diferenças no tempo de recepção



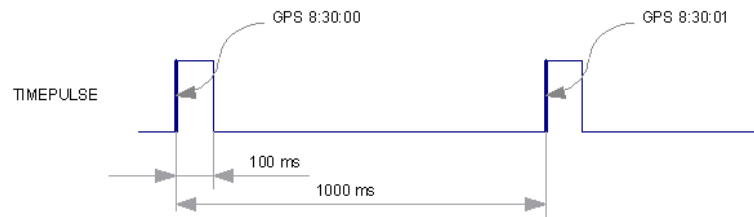
Fonte: Próprio Autor.

Existem vários modelos de receptores GPS, neste trabalho resolveu-se utilizar o Ublox Neo-6, por seu preço e facilidade de compra. Segundo a empresa Ublox (2011), entre outras características, este módulo possui como uma das formas de comunicação a interface serial UART amplamente utilizada em dispositivos eletrônicos, o módulo conta também com uma saída para pulso de tempo sincronizado com a constelação o que o interessante a esse projeto.

Durante o processo de comunicação utilizado na interface UART são causados alguns atrasos de tempo no módulo, estes atrasos se devem ao cálculo de posição geográfica e na codificação dos dados. Posteriormente mais atrasos podem ocorrer durante a transmissão e recepção da informação no dispositivo receptor, estes atrasos podem ocorrer por conta da execução desta tarefa em si ou até mesmo por conta de outras tarefas que podem estar sendo executadas paralelamente pelo sistema operacional.

Para contornar estes atrasos e permitir a sincronização de tempo entre dispositivos, existe no módulo uma saída de referência do tipo Pulso Por Tempo. Em sua configuração padrão esta saída é configurada para fornecer um pulso de 100 ms em nível lógico alto durante a passagem de um segundo ao outro sempre em que há sincronia com os satélites da constelação, assim essa saída também é chamada de PPS (*Pulse per Second*). O comportamento da saída PPS segue a representação demonstrada no diagrama da Figura 39.

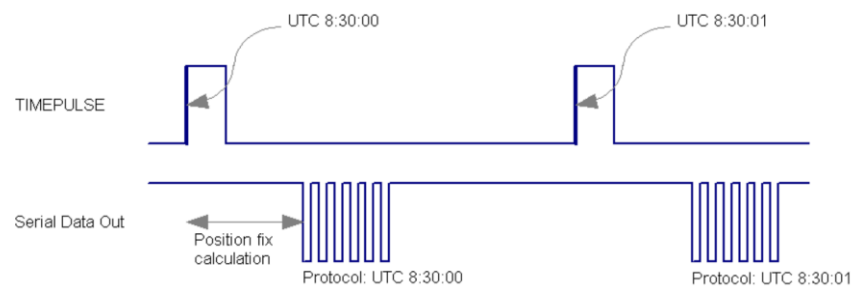
Figura 39 - Saída Pulso por Tempo do módulo GPS.



Fonte: Ublox (2011).

A comparação do tempo presente entre o fim do pulso sincronizado e o envio dos dados através da UART é representada na Figura 40. Nesta figura encontramos a referência PPS da representação dos instantes de tempo entre UTC 8:30:00 h e 8:30:01, e o atraso de tempo na mudança de nível do sinal de referência de tempo e o início da transmissão serial.

Figura 40 - Relação entre a saída de referência de tempo e a saída UART.



Fonte: Ublox (2011).

Em ensaios realizados com o auxílio de um osciloscópio foi possível observar que o tempo de processamento entre o fim do pulso sincronizado e o início da posição geográfica é de cerca de 60 ms, porém apresenta uma variação de mais ou menos 10 ms como apresentado na Tabela 4, não podendo desta forma o início da transferência por UART ser utilizado como referência acurada de tempo para as necessidades deste projeto.

Tabela 4 - Tempos de atraso do circuito.

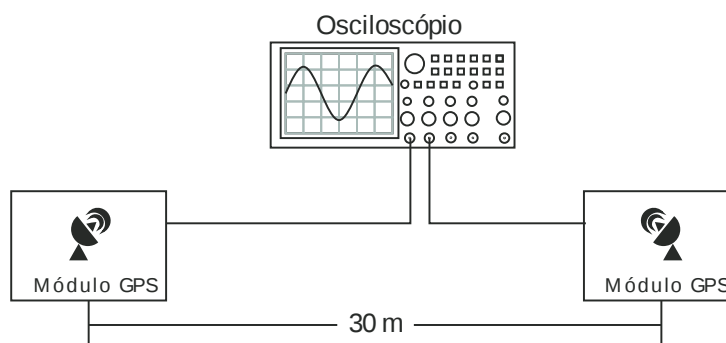
	Atraso Mínimo	Atraso Máximo
PPS - UART	55 ms	65 ms

Fonte: próprio autor.

Para se verificar a incerteza entre a referência temporal de dois módulos do modelo escolhido, os sinais PPS de dois módulos GPS distantes 30m entre si foram comparados utilizando-se o osciloscópio. Alimentados de maneira independente através de baterias, foram

conectados cada um a um canal do osciloscópio através de cabos. O esquema do ensaio é descrito na Figura 41.

Figura 41 - Esquema do Ensaio de incerteza de referência de tempo entre módulos GPS.



Fonte: Próprio autor.

Como resultado deste ensaio temos uma diferença entre os sinais de pulso por tempo dos módulos de ± 200 ns como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Incerteza de tempo dos módulos GPS.

	Atraso Mínimo	Atraso Máximo
PPS - UART	50 ns	250 ns

Fonte: Próprio autor.

Foram utilizados cabos coaxiais para a conexão dos módulos, tendo um dos cabos o comprimento de 1 metro e o outro o comprimento de 30 metros. Mesmo com o possível atraso de tempo causado em decorrência da capacitância do cabo, considerando a velocidade de propagação da onda vibro-acústica do vazamento em torno de 500 m/s, a incerteza média de 200 ns encontrada no experimento representa uma incerteza de ± 10 μ m na posição do vazamento, que é desprezível para a aplicação.

3.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A adoção de transmissão e sistemas digitais pode reduzir o custo e permitir a conexão do dispositivo a rede, o que permite a conexão ponto a ponto de sistemas e a adoção do conceito de IoT permitindo até mesmo o envio de dados dos sensores à nuvem. Porém o processamento e transmissão causam atrasos indesejados e muitas vezes desconhecidos, este obstáculo pode ser contornado por meio de um circuito de sincronização externa, uma alternativa a referência de tempo é o uso de módulos GPS.

4 PROTÓTIPO 01: SINCRONIZAÇÃO POR CIRCUITO EXTERNO

4.1 INTRODUÇÃO

Afim de desenvolver um sistema de sincronização que possa ser utilizado não só para um conjunto de sistemas de aquisição de dados desenvolvidos especificamente para a utilização em Correlacionadores de Sinais, mas também uma técnica que possa ser empregada em quaisquer dispositivos capazes de promover a coleta remota de sinais analógicos, porém que não contem com sistemas de sincronização própria, como é o caso da maioria dos sistemas de aquisição de sinais, ou até mesmo no uso de dispositivos como computadores, tablets e até smartphones foi estudado um tipo circuito para sincronia externa, que controla a passagem do sinal coletado de sua fonte ao dispositivo de coleta de forma sincronizada através do sinal GPS.

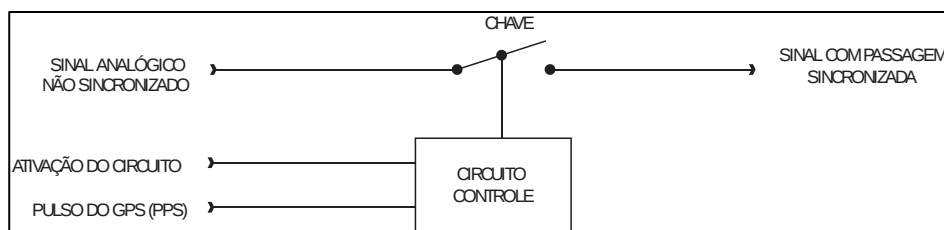
Neste capítulo será descrito o desenvolvimento e testes de um protótipo de coletor de dados utilizando dispositivos baseados em IoT - *Internet of Things* - e sincronização via satélite.

4.2 MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO

Como visto no capítulo anterior através os módulos de GPS são capazes de prover um pulso de 100 ms sincronizado com a passagem de tempo em cada período de 1 segundo, este sinal denominado PPS pode ser utilizado para a sincronização e disparo de circuitos na coleta de dados.

O circuito de sincronia foi construído tendo como objetivo controlar o início da passagem do sinal analógico proveniente do sensor até o dispositivo de coleta de dados. Para este fim foram utilizados uma chave e um circuito de controle para a mesma, o controle conta como entradas: um sinal de ativação do circuito e o disparo através do sinal PPS. Na Figura 42 abaixo está presente o diagrama esquemático desse circuito.

Figura 42 - Circuito de sincronização.

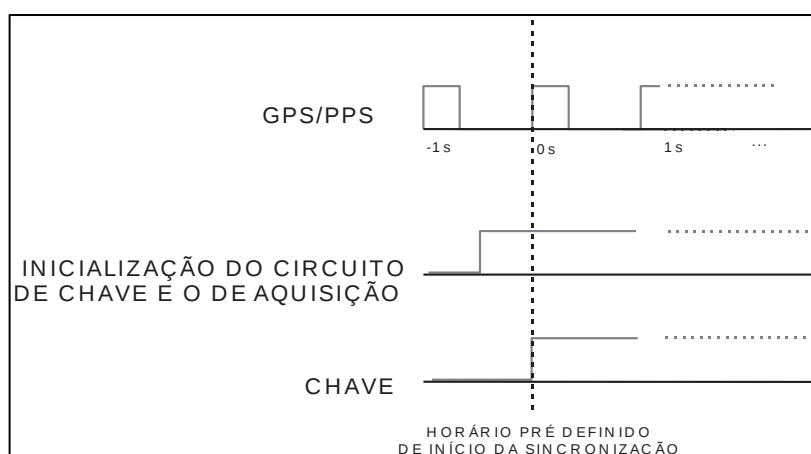


Fonte: Próprio autor

A aquisição consiste primeiramente na definição de um horário de início para sincronização da coleta de dados. Uma vez que o sinal PPS tem seus pulsos gerados a cada 1 segundo, o sistema de aquisição e o circuito de controle da chave serão inicializados imediatamente após o pulso anterior ao horário pré-definido, desta maneira a gravação é iniciada de forma não sincronizada, porém uma vez em que não há a passagem através da chave de sincronia o sinal adquirido durante este período inicial se mantém com amplitude próxima a zero.

No momento definido para o início sincronizado da aquisição, o pulso do sinal PPS dispara o circuito de controle da chave que se mantém em posição fechada deste momento em diante, permitindo a passagem do sinal analógico até o sistema de aquisição de dados. Na Figura 43 é possível observar o diagrama dos eventos relacionados a sincronia do sinal no tempo.

Figura 43 - Diagrama de tempo do circuito de sincronia.

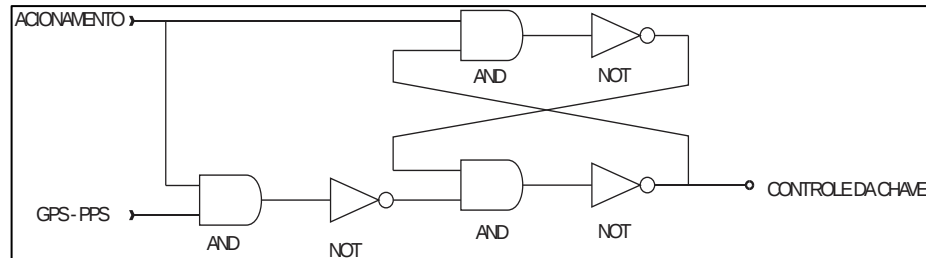


Fonte: Próprio autor

O circuito de controle da chave foi realizado através de portas lógicas do tipo NOT e AND que correspondem aos circuitos integrados 7004 e 7008 respectivamente, o arranjo

funciona semelhante a um circuito tipo *latch* com retenção. O diagrama deste circuito é apresentado na Figura 44 abaixo.

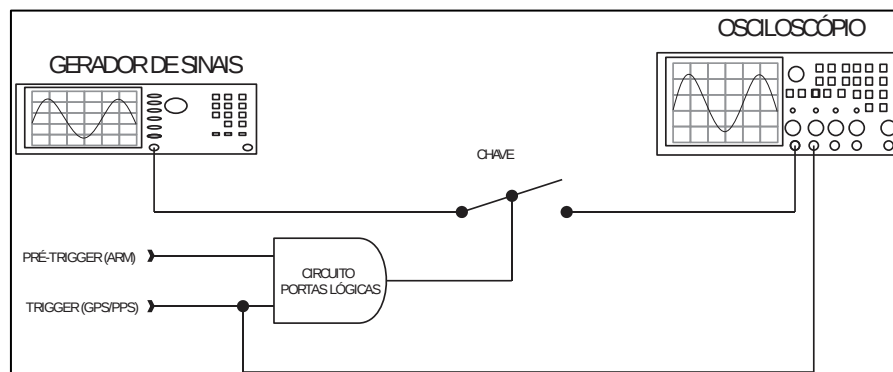
Figura 44 - Circuito de controle da chave sincronizadora.



Fonte: Próprio autor

Como chave foi utilizada o circuito integrado 4051 que na realidade trata-se de um multiplexador, logo pode ter suas funções estendidas em revisões futuras do *hardware*. O atraso decorrente do acionamento desta chave foi investigado através de um sinal proveniente de um gerador de sinais e monitorado por um osciloscópio, o diagrama deste experimento pode ser visto na Figura 45.

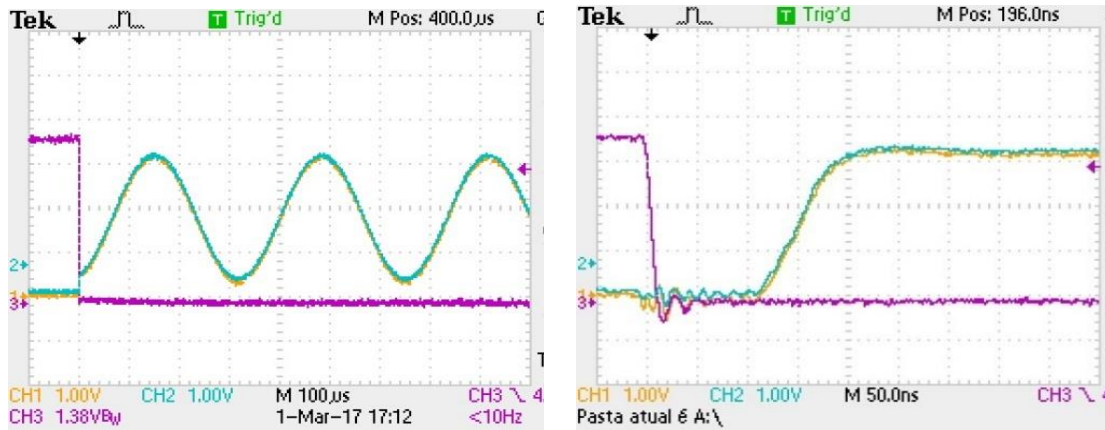
Figura 45 - Esquemático do experimento de determinação de atraso no circuito da chave.



Fonte: Próprio autor

A forma de onda apresentada no osciloscópio é apresentada na Figura 46, o sinal em magenta corresponde ao sinal de acionamento PPS e o sinal em verde e amarelo corresponde ao sinal analógico sendo chaveado. Em (a) cada graticula corresponde ao intervalo de tempo de 100 μ s e em (b) existe o detalhamento da transição da chave onde cada graticula corresponde a 50 ns.

Figura 46 - Ensaio do circuito de chave de sincronização.

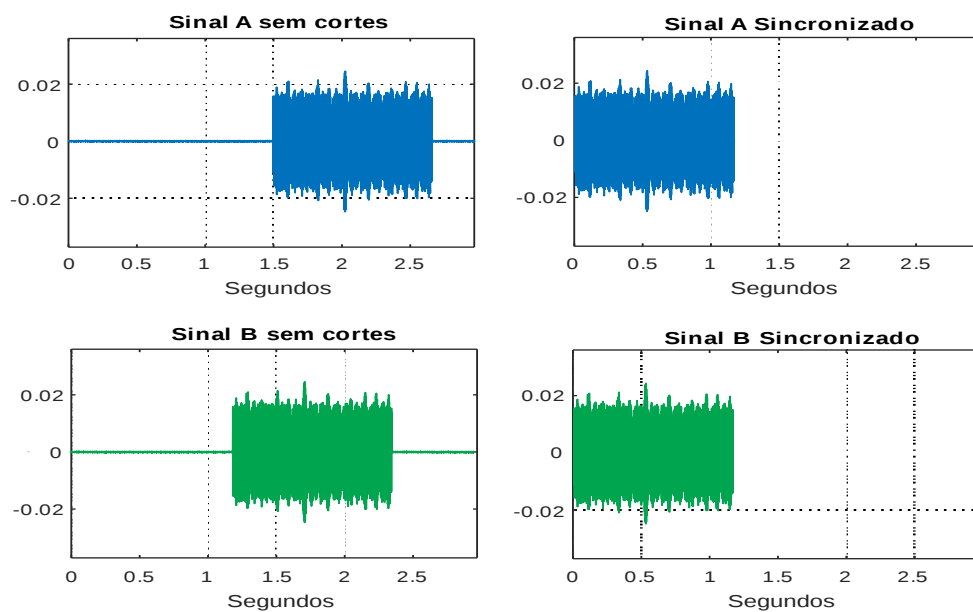


Fonte: Próprio autor.

O tempo médio de atraso encontrado foi de cerca de 100 ns atraso que pode ser considerado desprezível para a Correlação de Sinais, uma vez como visto no capítulo anterior corresponderia a apenas alguns milímetros ao longo da tubulação.

Com o uso deste método espera-se adquirir por meio de dois conjuntos independentes de aquisição, sinais que apesar de não possuírem tempo simultâneo de coleta, podem ser sincronizados através da remoção de seu período inicial nulo, resultando assim em um par de sinais sincronizados como demonstrado na Figura 47.

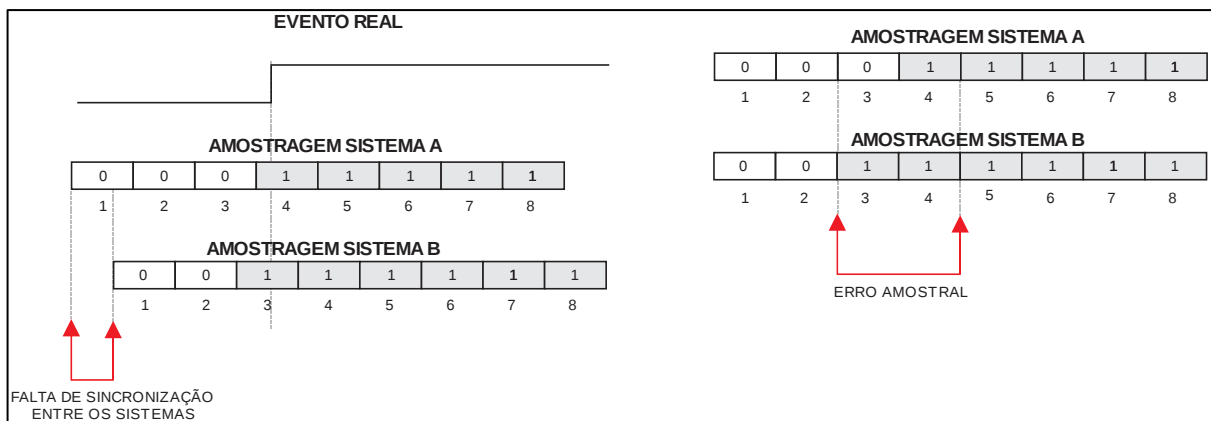
Figura 47 - Sinais sem corte e sinais com corte sincronizado.



Fonte: Próprio autor.

Tal técnica possui como incerteza o período de tempo de 200 ns relativo a incerteza dos módulos GPS como investigado no capítulo anterior, acrescido de 100 ns relativos ao funcionamento do circuito de chave do sinal analógico investigado nessa seção. Como a principal fonte de incerteza temporal está compreendida a incerteza referente à alocação do evento real nas amostras, realizada através dos sistemas de aquisição dos dados, por não haver sincronia entre os *clocks* destes sistemas no mesmo evento, como demonstrado na abaixo.

Figura 48 - Incerteza de alocação do evento no tempo em sistemas com clock não sincronizado.



Fonte: Próprio autor.

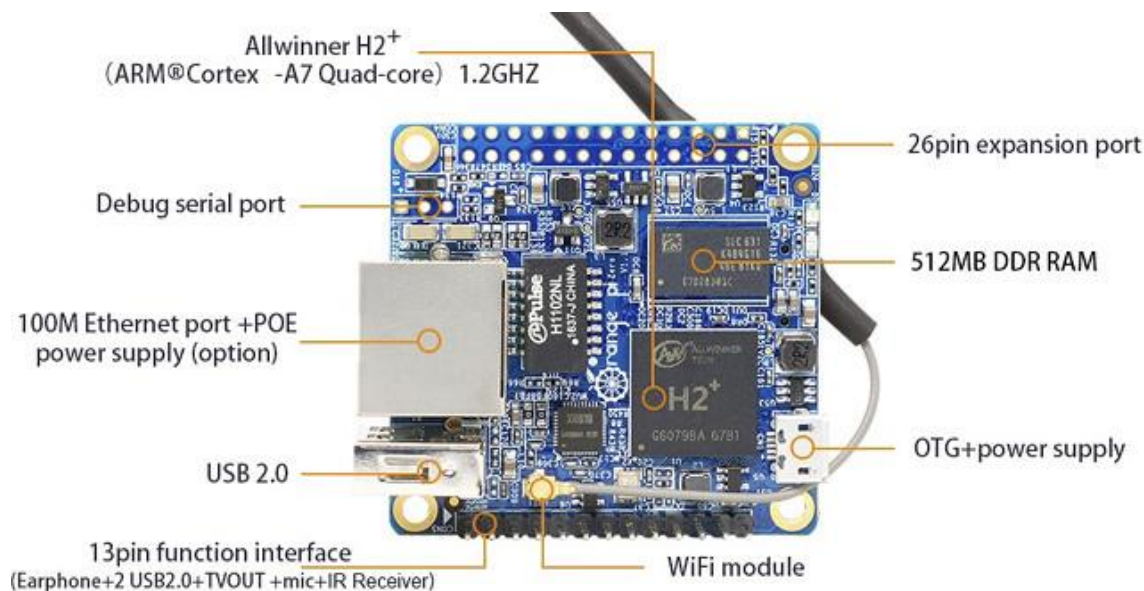
Como exemplo desta situação, podemos imaginar um conjunto de sistemas que opere com frequência de aquisição de 1.000 Hz, logo cada amostra possui período de 1 ms e a incerteza temporal estará sujeita a esta ordem de grandeza. Aplicando-se a frequência de amostragem de 100.000 kHz, cada amostra corresponde ao período de 0,01 ms diminuindo então a incerteza temporal. Assim é possível notar que quanto maior a frequência de amostragem, menor será a incerteza na alocação do evento entre as amostras dos sistemas de aquisição e menor a incerteza de tempo envolvida no processo.

4.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Como sistema de aquisição de dados, para o controle do circuito de sincronia e para a transmissão de dados via *Wi-fi*, foi escolhida uma placa de computação em miniatura modelo *Orange Pi Zero*, mostrada na Figura 49. Essa placa possui um processador *Sunxi H3* de arquitetura ARM® Cortex A7 Quad Core de 32 bits de 1GHz, 512MB de memória RAM, tem

seu armazenamento em cartão SD, possui interfaces ethernet, usb, Wi-fi, pinos de GPIO (*General Purpose Input/Output*) e interface de som que será utilizada para a coleta dos sinais analógicos provenientes dos sensores (ORANGE PI, 2017).

Figura 49 - Placa Orange Pi Zero.



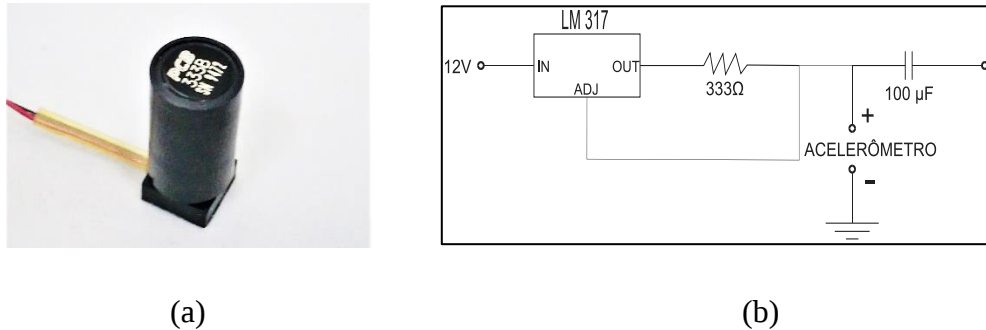
Fonte: Orange Pi (2017).

A escolha da placa *Orange Pi Zero* se deu por conta de suas configurações superiores às necessidades do projeto, ao seu baixo custo de aquisição e disponibilidade no mercado local durante o período de realização deste projeto. A placa já foi desenvolvida como um computador em miniatura e para ser utilizada em dispositivo conectado à rede segundo a filosofia *IoT*. Demais tipos de equipamentos capazes de fazerem captura de sinais analógicos e transmissão de sinais poderiam também ser empregados uma vez que a sincronia é realizada por circuito externo.

A aquisição de dados será realizada através dos conversores analógicos digitais originalmente destinados à interface de som da placa por meio da entrada especificada para conexão de microfones, a conversão será realizada com taxa de amostragem de 16 kHz e 16 bits. Como sensor vibro-acústico será empregado um acelerômetro piezoelétrico ICP® modelo 333B da empresa PCB Piezotronics®, este acelerômetro possui a sensibilidade de 10 mV/m/s² compatível com a amplitude dos sinais encontradas na Seção 2 e representado na Figura 50 (a). Os sensores do tipo ICP® necessitam de um circuito condicionador de sinais capazes de fornecer corrente de alimentação em torno de 4 mA e de entregar o sinal mensurado em sua saída. O circuito de condicionamento representado na Figura 50 (b) baseia-

se como fonte de corrente o circuito integrado LM317 e um resistor de ajuste de $333\ \Omega$, utiliza também um capacitor em sua saída para promover o desacoplamento entre sinal do sensor e alimentação.

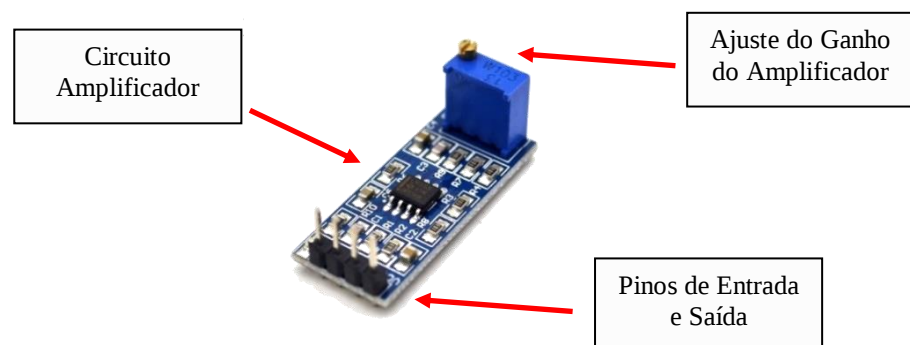
Figura 50 - Circuito de Condicionamento de Sinais para acelerômetro ICP®.



Fonte: Próprio autor.

Uma vez que os sinais captados através do sensor possuem amplitude muito baixa, foi utilizado um amplificador operacional LM358 fornecido já em forma de módulo, apresentado na Figura 51 para tornar a amplitude dos sinais coletados com o nível de operação do conversor analógico digital da placa Orange Pi. O amplificador foi ajustado para ganho de 100x, esta operação amplifica não só o sinal, porém também o ruído presente no sinal entregue pelo sensor.

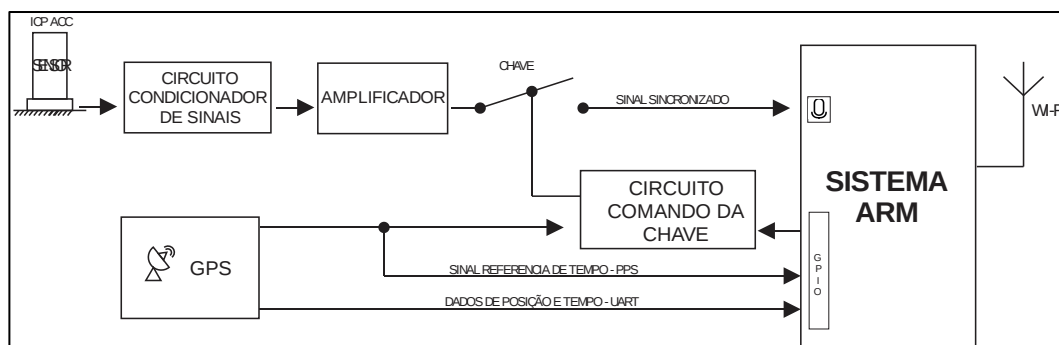
Figura 51 - Módulo amplificador LM358.



Fonte: próprio autor.

O diagrama geral da montagem do Protótipo 01 é apresentado na Figura 52. No diagrama é possível observar a composição dos sistemas através da união de vários subconjuntos: sensor e circuito de condicionamento de sinais, módulo GPS, circuito de controle, chave de sincronização e placa Orange Pi Zero que é utilizada como sistema de aquisição e transmissão de sinais, o bloco correspondente ao Circuito de Comando da Chave foi descrito em detalhes na Figura 44.

Figura 52 - Diagrama do Protótipo 01.



Fonte: próprio autor.

O sistema é alimentado por baterias de lítio. Foi inicialmente empregado o uso de três baterias do tipo 18650 pra prover alimentação da parte analógica que consiste no Circuito Condicionador de Sinais amplificador e um módulo conversor dc-dc de 12V para 5V afim de promover a alimentação da parte digital onde fazem parte a placa Orange Pi Zero e o módulo GPS. Esta montagem apresentou a forte presença de ruídos nos sinais adquiridos, foi então adotado dois conjuntos de baterias, um para alimentação do circuito digital.

Na Figura 53 (a) é apresentado o Sistema de Aquisição do Protótipo 01 montando em sua própria caixa. A caixa quando fechada se transforma em maleta de transporte e na parte traseira foi feito uma abertura para passagem do ar do sistema de ventilação para troca de calor, como pode ser observado na Figura 53 (b).

Figura 53 - Sistema de Aquisição do Protótipo 01 em seu gabinete/caixa transporte.

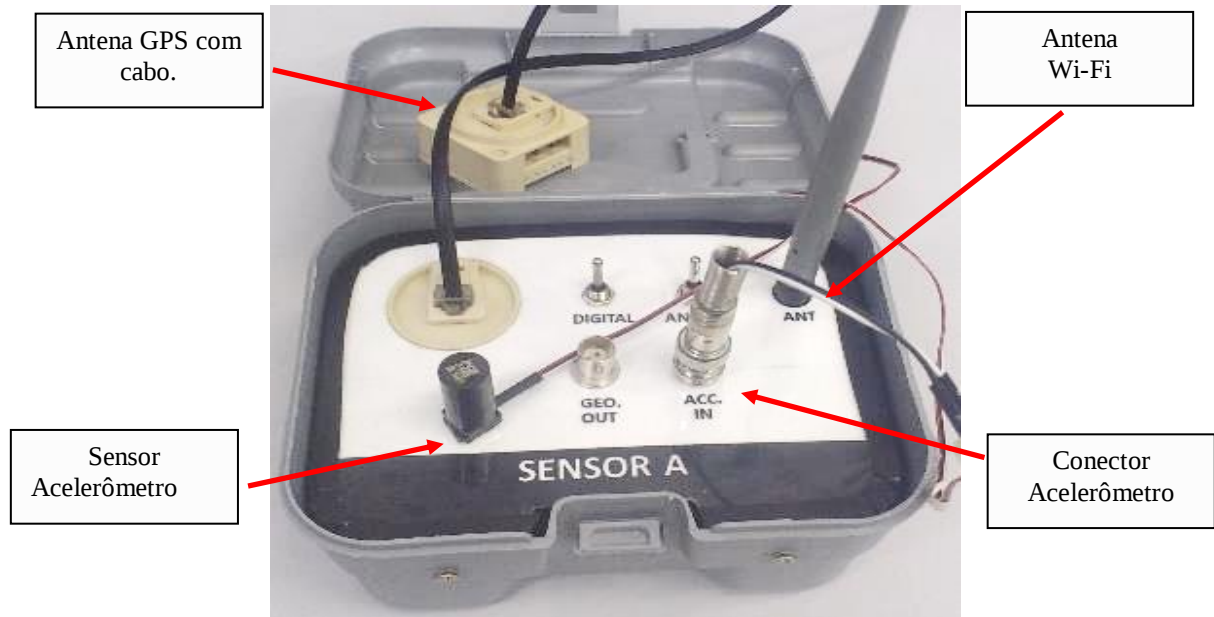


Fonte: próprio autor.

Nesta montagem para possibilitar testes em laboratório que se trata de ambiente fechado e sem visada aos satélites, os módulos GPS foram montados como módulos externos ao sistema e conectados através de cabos de 4 vias que promovem a alimentação e conferem a

passagem do sinal digital e da referência PPS ao sistema. A conexão entre o sensor e o sistema é realizada através de conectores do tipo BNC.

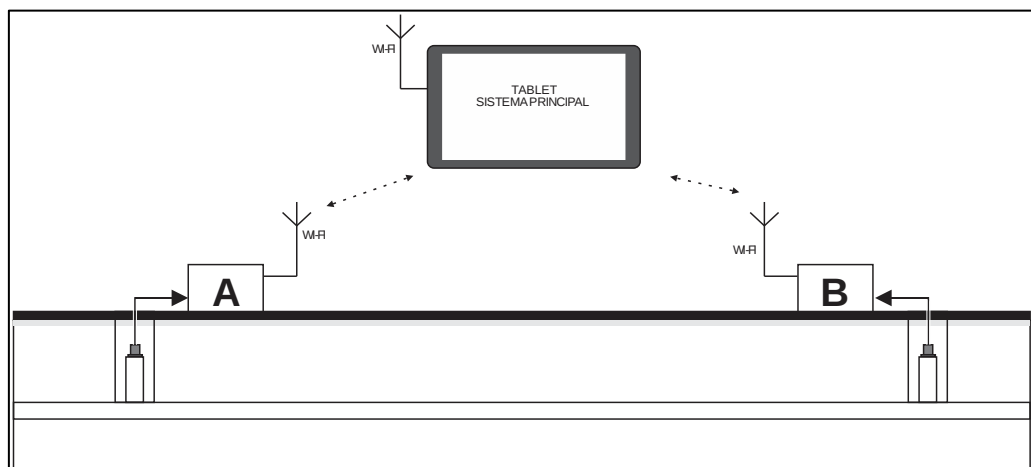
Figura 54 - Sistema de Aquisição do Protótipo 01.



Fonte: próprio autor.

Para o uso como Correlacionador de Sinais o sistema será composto essencialmente por dois conjuntos que realizam a aquisição dos dados em pontos distintos da tubulação e um sistema principal onde é realizado o processamento e onde também existe a interface gráfica para controle e apresentação dos dados ao usuário, o esquema desse sistema pode ser observado na Figura 55.

Figura 55 - Componentes do Correlacionador de Sinais.



Fonte: próprio autor.

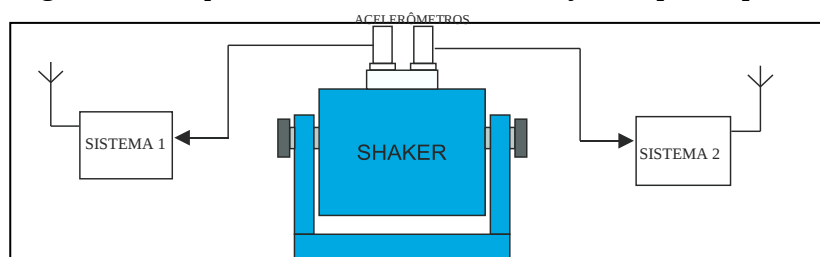
Os sistemas de aquisição operam com as placas Orange Pi Zero executando como sistema operacional uma versão Linux para arquitetura ARM[®] denominado Armbian[®], e executam uma rotina em Python que é responsável pela comunicação e controle do sistema de sincronização.

No computador principal a aplicação de interface é executada em Matlab[®] e opera com sistema operacional o Windows[®] 10.

4.4 TESTES DE ATRASO

Para o teste do protótipo que utiliza o circuito externo de sincronização foi desenvolvido um ensaio onde os sensores de vibração de cada sistema de aquisição/transmissão foram fixados a base de um transdutor eletromecânico de vibração conhecido como *shaker*, Veb Robotron-Messelektronik modelo 11077. O mesmo foi alimentado por um gerador de sinais que forneceu uma fonte de excitação de caráter aleatório. O esquema dessa montagem é mostrado na Figura 56.

Figura 56 - Esquema de teste de sincronização do protótipo.

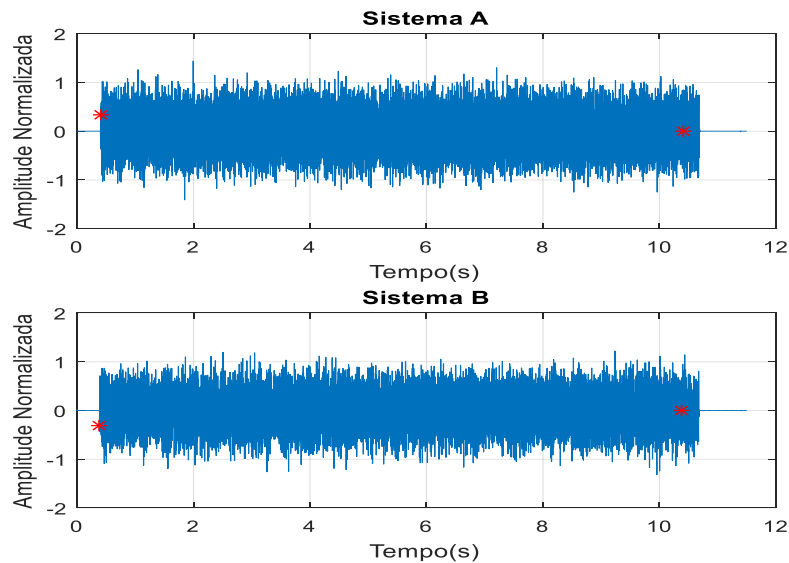


Fonte: próprio autor.

A aquisição foi realizada a fim de se obter 10 segundos de amostras de tempo sincronizadas. Utilizou-se um sinal de 16 kHz e 16 bits de resolução como previamente escolhido para a amostragem dos dados pelo sistema. Após a coleta em ambos os dispositivos o sinal foi normalizado e foi realizado o corte da região inicial do sinal, aquela sem sinal útil que é coletada antes da ação da chave sincronizadora. Nesta situação, por se tratar da mesma fonte de vibração, o atraso encontrado entre os dois sinais deve idealmente se apresentar nulo.

Na Figura 57 são apresentados os sinais no tempo coletados por meio dos dois sistemas, os locais onde o corte de sincronização é realizado são denotados através dos asteriscos vermelhos.

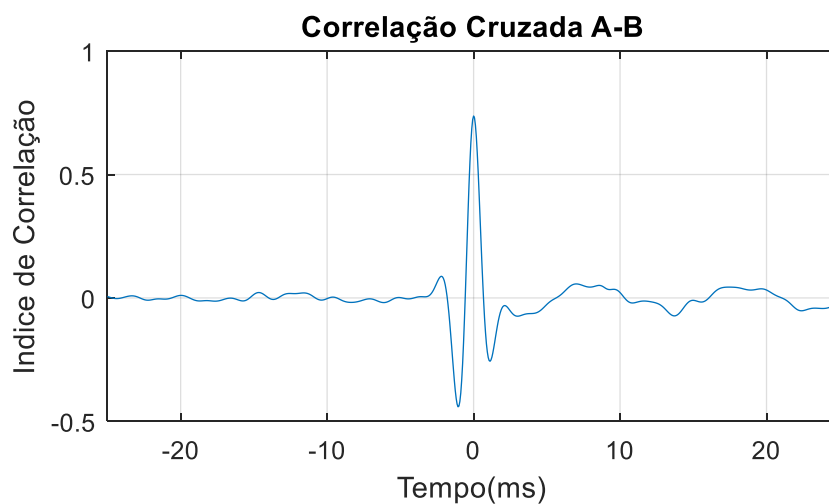
Figura 57 - Sinais no Tempo do Teste do Protótipo 01 em Laboratório.



Fonte: próprio autor.

O resultado da Correlação Cruzada dos sinais é apresentado na Figura 58 a seguir, com o pico na região nula do gráfico, representando um resultado muito satisfatório.

Figura 58 - Correlação Cruzada dos Sinais do Protótipo 01 em teste de Laboratório.



Fonte: próprio autor.

O teste foi realizado ao todo 10 vezes e os tempos de atrasos encontrados neste ensaio podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 - Atraso na coleta da mesma fonte de sinal por dois sistemas.

	Mínimo	Médio	Máximo
Tempo de Atraso	-125 μ s	0 μ s	125 μ s

Fonte: próprio autor.

Uma vez que a aquisição é realizada em 16 kHz, cada amostra corresponde ao intervalo de 62,5 μ s, os erros máximos e mínimos correspondem então a ± 2 amostras de tempo. O erro superior ao esperado de ± 1 amostra na alocação do evento no tempo durante a conversão dos sinais analógicos para digitais nos sistemas de aquisição possivelmente deve-se a erros devido ao algoritmo de corte da região não sincronizada do sinal.

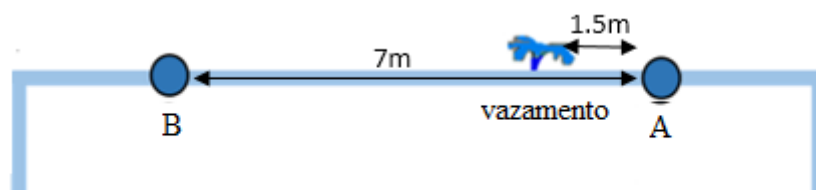
Com os valores máximos de incerteza apresentados e utilizando-se a velocidade de propagação do sinal vibro-acústico ao longo da tubulação determinada por Lima (2019) que se encontra na ordem de 500 m/s, o valor da incerteza na possível localização do vazamento corresponde a cerca de ± 6 cm de erro, sendo este um nível tolerável para este tipo de aplicação.

4.5 TESTE COM VAZAMENTO REAL

Os testes de detecção de vazamento foram realizados no Campo de Provas da Sabesp, para a coleta de dados foi realizada uma comparação entre o Protótipo 01 desenvolvido neste capítulo e um sistema de aquisição comercial LMS Scadas XS® utilizando sensores do tipo acelerômetro modelo 333 da empresa PCB Piezotronics® com sensibilidade de 10 mv/m/s² utilizado como referência.

Na Figura 59 é mostrado um desenho esquemático da tubulação onde são representados os pontos de acesso A e B e as distância aproximadas entre os pontos A e B e entre o ponto A e o vazamento..

Figura 59 - Representação da Tubulação.

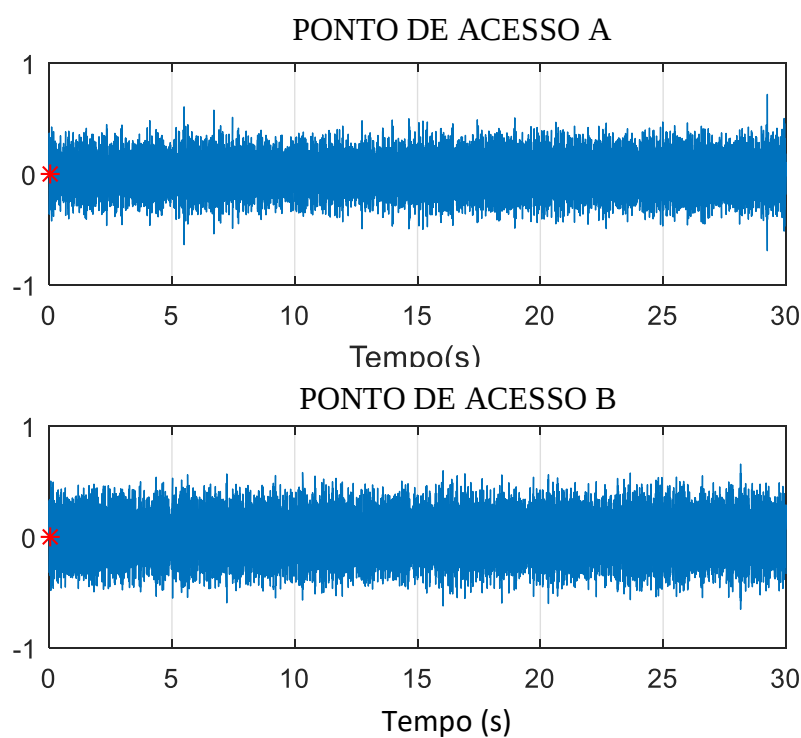


Fonte: próprio autor.

Os sensores do Protótipo e do LMS Scadas XS[®] foram posicionados lado a lado nos pontos de acesso e fixados com cola do tipo cianoacrilato. O horário de início das aquisições foi configurado no Protótipo e neste mesmo momento, de forma manual, também iniciava-se a coleta de dados no sistema de referência LMS Scadas XS[®].

A Figura 60 apresenta os sinais no domínio do tempo coletados através do sistema LMS Scadas XS[®]. No eixo da abcissa é representado o tempo de coleta e na ordenada é representada a amplitude do sinal de aceleração em m/s^2 .

Figura 60 - Sinais no domínio do tempo coletados com o Sistema de Referência LMS Scadas XS[®].

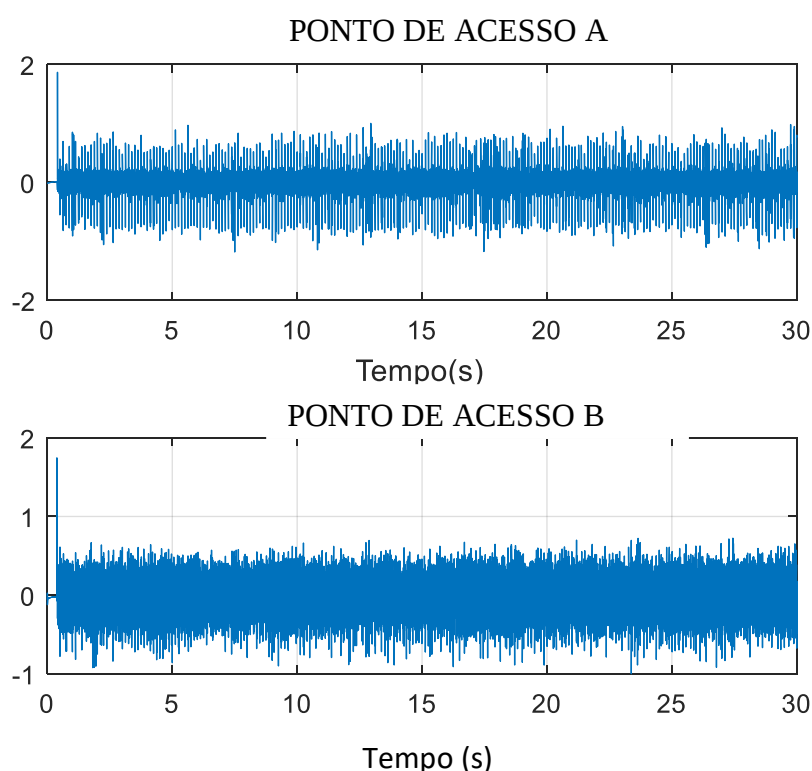


Fonte: próprio autor.

É possível notar que a amplitude do sinal coletado no Ponto de Acesso A é ligeiramente menor que a amplitude do sinal coletado no Ponto de Acesso B, indicativo que o sinal de vazamento se encontra mais próximo a este local perdendo menos energia ao longo do caminho.

A Figura 61 apresenta os sinais no domínio do tempo coletados através do Protótipo 01 nos Pontos de Acesso A e B. No eixo da abcissa é representado o tempo de coleta e na ordenada é representada a amplitude do sinal de aceleração em m/s^2 .

Figura 61 - Sinais no domínio do tempo adquiridos com o Protótipo 01.

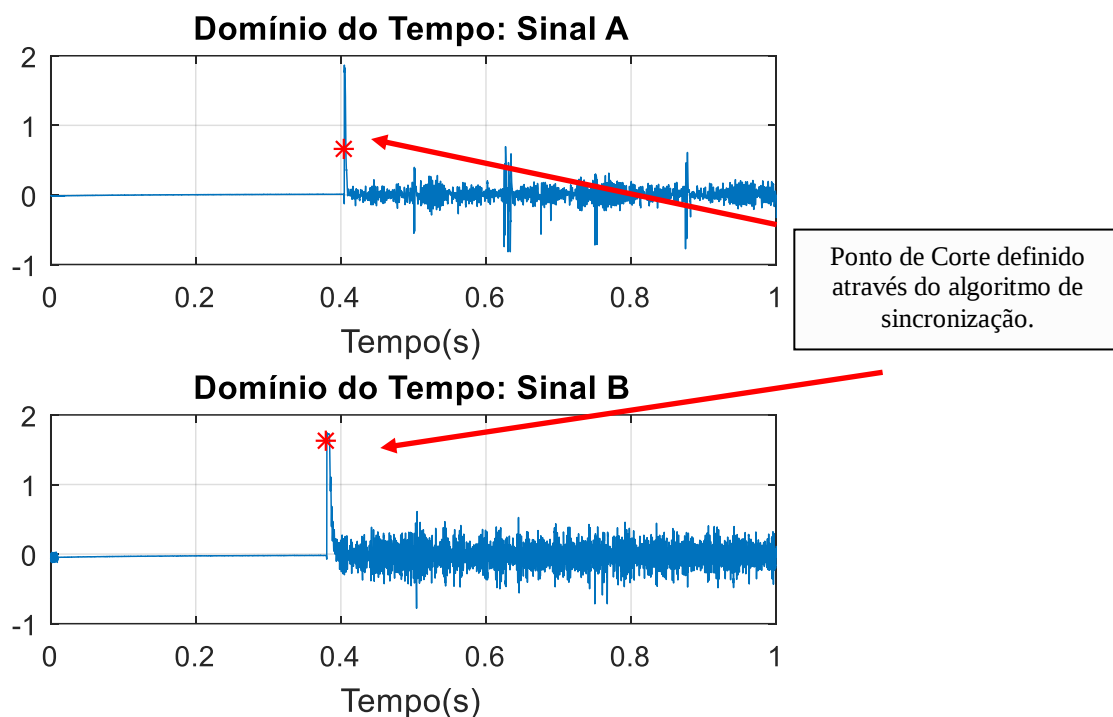


Fonte: próprio autor.

Desta vez é possível notar a presença de ruído no sinal coletado no Ponto de Acesso A, o ruído é produzido no próprio circuito do protótipo onde podem estar ocorrendo instabilidades na alimentação da parte analógica do circuito. Este ruído, embora indesejável não interfere na determinação do tempo de atraso, uma vez que sua presença ocorre apenas em um dos sinais coletados e não há componentes de correlação com o outro sinal a ser processado.

Na Figura 62 são apresentadas em detalhe a transição entre as regiões não sincronizadas e as regiões sincronizadas dos sinais coletados por meio do Protótipo 01. O aumento de amplitude superior ao limiar de comparação é detectado através do algoritmo de sincronização e o início dos dados sincronizados, que são efetivamente utilizados para a correlação, é representado através de asteriscos vermelhos.

Figura 62 - Detalhe: transição de sincronização inicial do sinal do correlacionador.

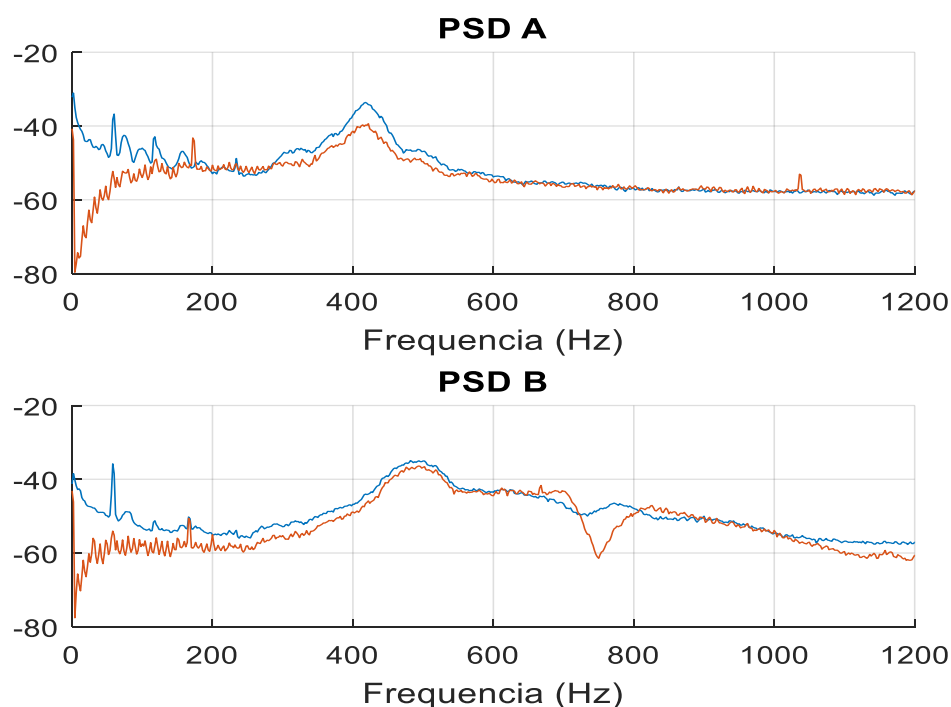


Fonte: próprio autor.

Para realizar a comparação entre o Protótipo 01 e o sistema de referência LMS Scadas XS[®], todos os sinais foram normalizados e tiveram seus pontos médios centrados em zero.

Foi então calculada a Densidade Espectral de Potência (PSD) dos sinais do Protótipo e do Sistema de Referência. Na Figura 63 são apresentadas as PSD's sobrepostas de ambos os casos, os sinais referentes ao Protótipo 01 são exibidos em vermelho e em azul são exibidos os sinais de referência.

Figura 63 - Densidade de Potência Espectral (PSD): --- Protótipo 01, -- Sistema de Referência.

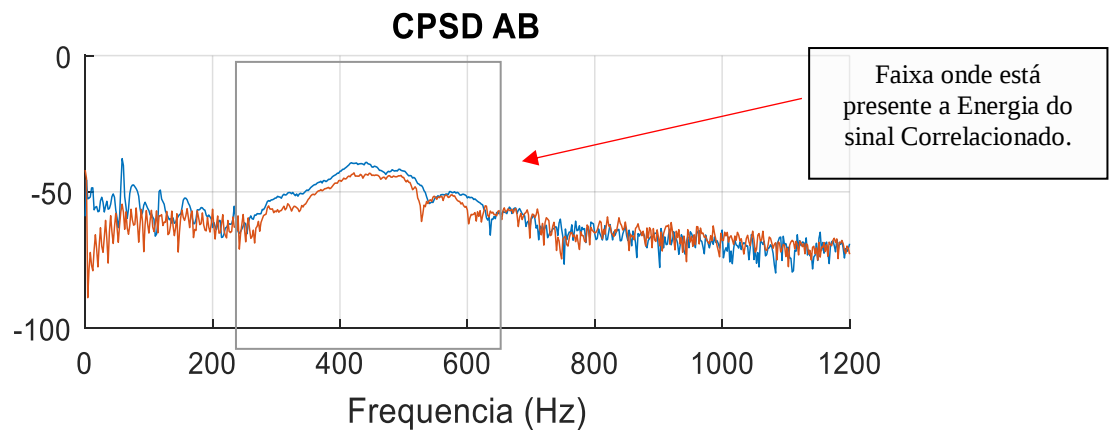


Fonte: próprio autor.

É possível notar um decaimento na densidade espectral dos dados coletados por meio do Protótipo 01 abaixo de 100 Hz, tal fato deve-se possivelmente por conta do um filtro passa-alta ocasionado por capacitores de desacoplamento existentes entre o circuito condicionador de sinais e módulo amplificador. Uma vez que a faixa de frequências onde está situada a maior densidade de energia do vazamento não se encontra nesta região essa característica não dificulta o funcionamento do protótipo. Nas demais faixas de frequência o sinal do protótipo é semelhante ao do sistema de referência e em torno de 750 Hz existe um decaimento de energia que não foi possível determinar sua procedência.

Na Figura 64 são mostradas as Densidades de Potência Espectral Cruzadas entre os canais A e B do Protótipo 01 em vermelho e do Sistema de Referência em azul. Verifica-se que ambos os sinais se mantem com características bem próximas em ambos os dispositivos. A região entre 300 e 600 Hz apresenta maior amplitude e menor nível de ruído, indicando uma região onde os sinais podem estar correlacionados, sendo também a região prevista para a faixa de frequências de vazamento na Seção 2, entende-se que esta é a região onde o espectro do vazamento está presente.

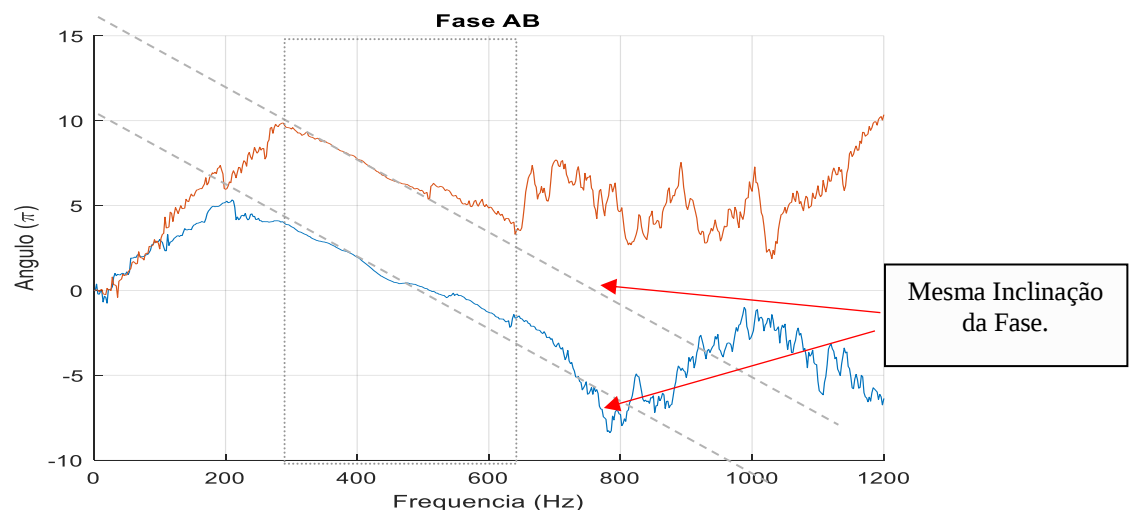
Figura 64 - Densidade Espectral Cruzada dos sinais. --- Protótipo 01, -- Sistema de Referência.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 65 podemos observar a Fase entre as Densidades Espectrais Cruzadas dos pontos de medição através do uso do Protótipo em linha vermelha e do Sistema de Referência em azul. As fases não estão sobrepostas por conta da ação do ruído presente nas baixas frequências que prejudica a correção do ângulo da fase nesta faixa e faz com que apesar de possuir a mesma angulação a faixa de frequências correlacionadas não se sobreponham. Porém ambos os sistemas apresentam a mesma angulação na região onde está concentrada a energia do vazamento indicando que o atraso mensurado por meio dos dois sistemas é o mesmo.

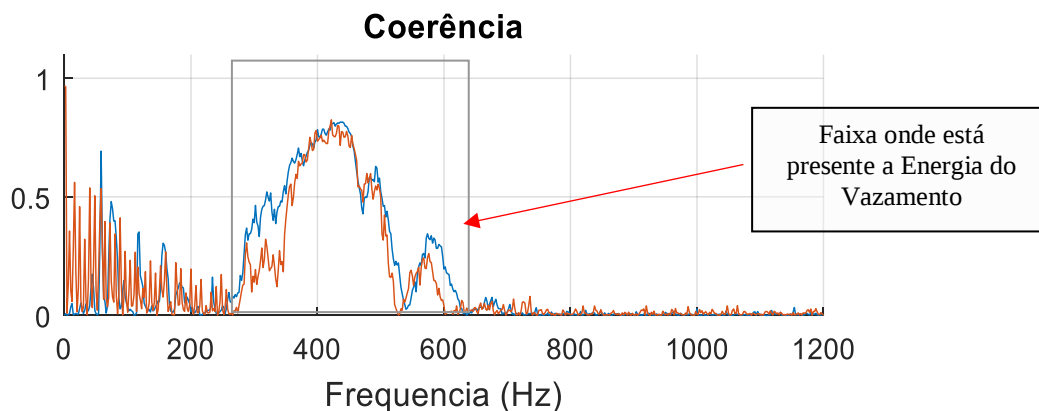
Figura 65 - Fase entre os sinais os pontos de medição. --- Protótipo 01, -- Sistema de Referência.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 66 é mostrada a Coerência entre os pontos medidos. Pode-se observar que os valores mais altos e com menor presença de ruído estão na faixa onde é localizada a energia do vazamento captada por meio dos sensores.

Figura 66 -Coerência entre os sinais. --- Protótipo 01, -- Sistema de Referência.

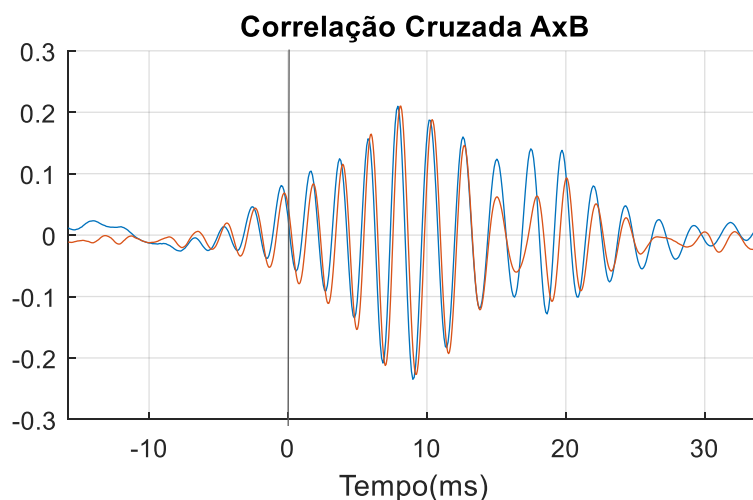


Fonte: próprio autor.

Através da análise do módulo do CPSD da Fase e da Coerência entre os sinais dos sensores é possível concluir que a energia do vazamento está situada principalmente entre 300 e 600 Hz, assim todos os sinais foram submetidos a um filtro passa banda do tipo Butterworth de 4ª ordem nesta faixa de frequência antes de se realizar o processo de Correlação Cruzada, as características desse filtro foram escolhidas por conveniência, uma vez que seus valores são os mesmos adotados no software do correlacionador por Ayala (2019) e Lima (2019) obtendo-se bons resultados.

Na Figura 67 são mostrados os resultados do coeficiente de tempo da Correlação Cruzada em vermelho para o protótipo e em azul para o sistema de referência, em ambos os casos é possível observar que foram encontrados resultados semelhantes, as pequenas diferenças na amplitude da correlação podem se dar a sensibilidades diferentes entre cada sistema de medição.

Figura 67 - Correlação Cruzada entre os sinais: --- Protótipo 01, -- Sistema de Referência.



Fonte: próprio autor.

Na Correlação Cruzada notamos a presença de uma região principal com pico próximo a 10 ms e de uma segunda região logo adiante concentrada em 20 ms, este fenômeno pode indicar a presença de outro ruído correlacionado.

Na Tabela 7 são apresentados os coeficientes de tempo encontrados através da correlação com o uso Protótipo 01 e do sistema de referência. A pequena diferença em questão deve referente a uma incerteza no tempo decorrente ao erro de sincronia na amostragem dos protótipos.

Tabela 7 - Tempo de atraso entre sinais coletados no Teste em Campo.

Equipamento	Atraso de Tempo
LMS Scada XS	7,91 ms
Protótipo Correlacionador	8,06 ms
Diferença:	1,9 %

Fonte: próprio autor.

O atraso de tempo é a base de cálculo para a estimativa da posição do vazamento, sendo seu resultado muito importante para o projeto.

4.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Na comparação dos dados coletados entre o Protótipo 01 e o sistema comercial LMS Scadas XS[®], os valores do tempo de atraso divergiu apenas 1,9%, apresentando resultado satisfatório. O que demonstra que o método de sincronização externa pode ser aplicado em Sistemas de Localização de Vazamentos por Correlação Cruzada de Sinais.

Já o *hardware* do protótipo demonstrou ter pontos que necessitam de melhoria do sistema, principalmente referente a apresentação de um alto índice de ruídos no sinal coletado que embora não interfiram no cálculo da Correlação de Sinais inviabilizam o uso de outras técnicas como por exemplo o monitoramento sonoro dos sinais pelo operador.

Outras características técnicas do Protótipo 01 que não foram discutidas e são pontos a serem melhorados é a constatação de elevada dissipação térmica, o que denota alto consumo de energia, e a necessidade de circuitos separados de alimentação para redução de ruído.

5 PROTÓTIPO 02: SINCRONIZAÇÃO POR INTERRUPÇÃO EXTERNA

5.1 INTRODUÇÃO

O sistema proposto no Capítulo 4 conta com um circuito externo que promove a sincronização do sinal e assim permite a utilização de qualquer sistema de aquisição de dados analógicos como coletor de sinais para a Correlacionador.

Nesta nova abordagem será investigado no Protótipo 2 o uso de um microcontrolador também com a referência de tempo proveniente do sistema GPS, mas utilizado um recurso interno conhecido como interrupção externa no lugar de aplicações que rodam sobre Sistema Operacional e circuitos externos como no Protótipo anterior. A adoção de um sistema microcontrolador, confere maior simplicidade e maior controle sobre o *hardware*. Os microcontroladores também apresentam menor consumo de energia e são sistemas indicados no desenvolvimento de produtos que executem tarefas mais simples, geralmente de forma dedicada e que não necessitam de processamento massivo, características do dispositivo que fará a coleta e envio do sinal para a unidade de processamento do Sistemas de Detecção de Vazamento.

5.2 MICROCONTROLADORES

Os microcontroladores são circuitos integrados que possuem em seu interior um vasto conjunto de componentes e podem ter seu funcionamento regido através de um programa interno conhecido como *firmware* (KURNIAWAN, 2019). Nos microcontroladores estão presentes unidade de processamento, barramento de comunicação, memória e periféricos de entrada e saída que monitoram e controlam os níveis lógicos dos seus terminais externos e podem conter periféricos diversos como os que podem realizar a conversão entre sinais analógicos e digitais conhecidos por sua sigla na língua inglesa ADC (*Analog to Digital Converter*), enquanto sistemas com microprocessadores geralmente tem seu *clock* interno operando na ordem de alguns giga-Hertz e possuem os módulos citados em componentes separados, os microcontroladores direcionados a aplicações mais simples operam com *clock*

na ordem de mega-Hertz, e são destinados a tarefas de baixo-nível computacional (KURNIAWAN, 2019).

Dependendo da sua configuração também é possível a execução de pequenos Sistemas Operacionais em microcontroladores, mas na maioria das aplicações se dá apenas a execução de um conjunto sequencial de instruções dentro do microcontrolador.

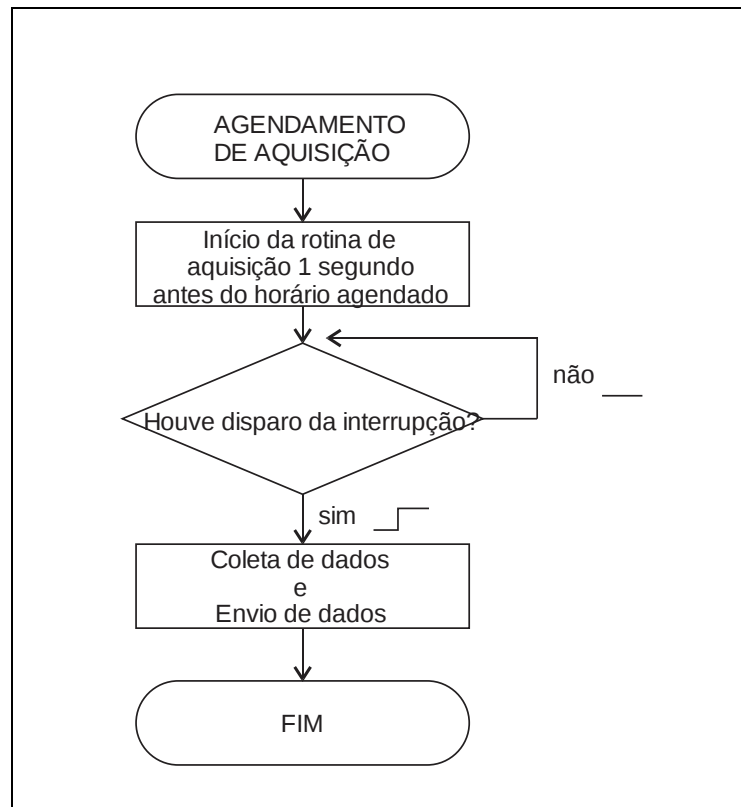
As interrupções são ferramentas que desviam o fluxo de execução do programa em execução e controlam o disparo de determinadas tarefas, os microcontroladores contam com interrupções internas e externas (KURNIAWAN, 2019).

As interrupções internas se dão a partir de algum evento proveniente do próprio microcontrolador, como é o caso da finalização de uma tarefa ou da contagem de tempo através de registradores. Já as interrupções externas são aquelas geradas a partir de eventos do mundo exterior ao microcontrolador, e geralmente são provenientes da mudança de estado de um pino de entrada, o que denota um evento como o pressionar de um botão ou o início de recebimento de dados em uma rede.

5.2 MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO

O método de sincronização atual também é baseado na referência de tempo proveniente de um módulo GPS através do sinal tipo PPS, porém desta vez o processo de captura do sinal de vazamento é realizado pelo ADC interno do microcontrolador e tem sua execução controlada através de interrupção externa. A interrupção começa a monitorar o estado do sinal PPS pouco antes do período agendado para o início da coleta e dispara o início do processo de conversão assim que ocorre a mudança do nível lógico do sinal na passagem de tempo esperada. O fluxograma da aquisição é apresentado na Figura 68.

Figura 68 - Fluxograma da Aquisição de Sinais do Dispositivo.



Fonte: próprio autor.

O programa em execução no microcontrolador possui fluxo sequencial e por não contar com tarefas concorrentes sendo executadas paralelamente como nos sistemas operacionais convencionais, os intervalos de tempo entre o disparo da interrupção e o início da aquisição são dessa maneira constantes e dependem apenas da execução das instruções de máquina pelo microcontrolador. Uma vez em que em ambos os sistemas as instruções são as mesmas, desta maneira a incerteza no tempo fica restrita ao erro presente em apenas alguns ciclos de *clock*, que nesse caso opera em 360 MHz.

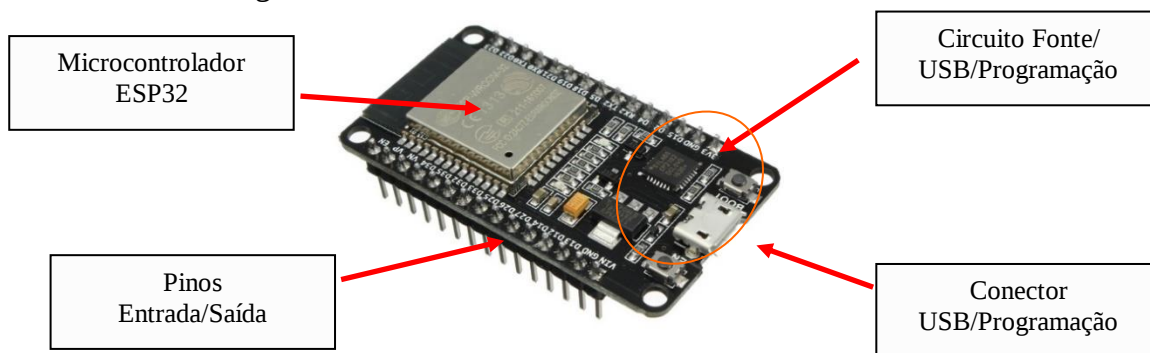
Para a rotina de programação foi utilizada a linguagem em C, o ambiente de programação foi o VisualStudio juntamente com plataforma de desenvolvimento PlatformIO.

5.3 HARDWARE

O microcontrolador que será utilizado neste protótipo é o ESP32 da empresa Espressif. O microcontrolador é um componente de alta performance, algumas características relevantes são: CPU Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6, memória RAM 520 Kbytes, *clock* máximo de

240 MHz, Wi-fi e Bluetooth integrados, conversor analógico digital de 10 bits. O microcontrolador quando comparado a sistemas concorrentes é de fácil acesso no mercado nacional. Na Figura 69 é apresentada a placa de desenvolvimento utilizada, composta pelo microcontrolador, antena, interface USB para programação e pinos de entrada e saída.

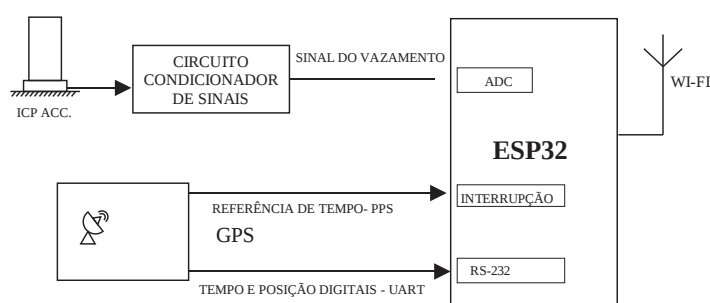
Figura 69 - Placa de Desenvolvimento com ESP32.



Fonte: próprio autor.

A aquisição dos dados é realizada através do próprio conversor analógico digital presente no microcontrolador, o sensor vibro acústico é o mesmo presente no Protótipo 1 descrito no Capítulo 4. O esquemático do sistema é descrito na Figura 70 .

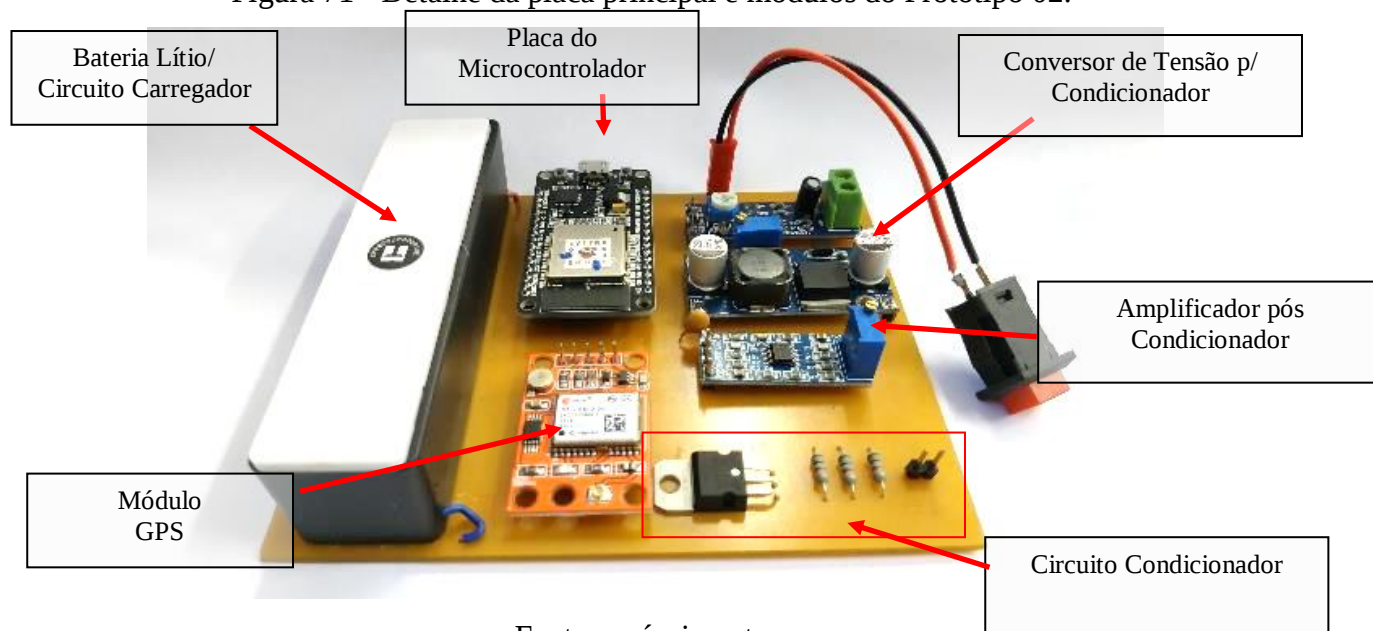
Figura 70 - Esquemático do Protótipo 02.



Fonte: próprio autor.

O protótipo conta um sistema de alimentação composto por uma bateria de lítio e circuito de carregamento, placa de desenvolvimento contendo o microcontrolador ESP32, módulo GPS, circuito condicionador de sinais composto por amplificador operacional e conversor de tensão para alimentação, a visualização desta montagem está presente na Figura 71.

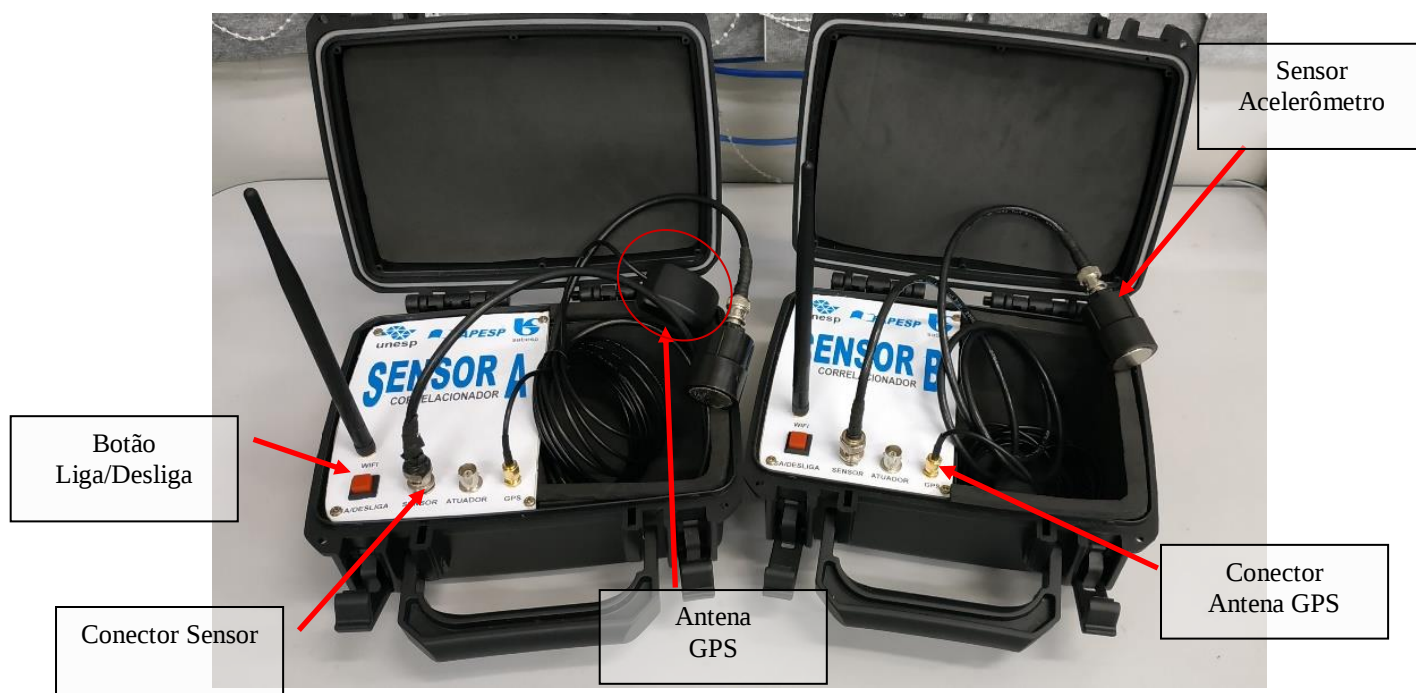
Figura 71 - Detalhe da placa principal e módulos do Protótipo 02.



Fonte: próprio autor.

O par de sistemas montados já em sua caixa/maleta de transporte, pode ser observado na Figura 72, nesta montagem foram utilizadas antenas de *Wi-fi* para aumentar o ganho de sinal, e antenas externas de GPS com cabo para possibilitar a utilização em ambientes fechados uma vez que a antena pode ser posicionada fora do ambiente para recepção do sinal dos satélites.

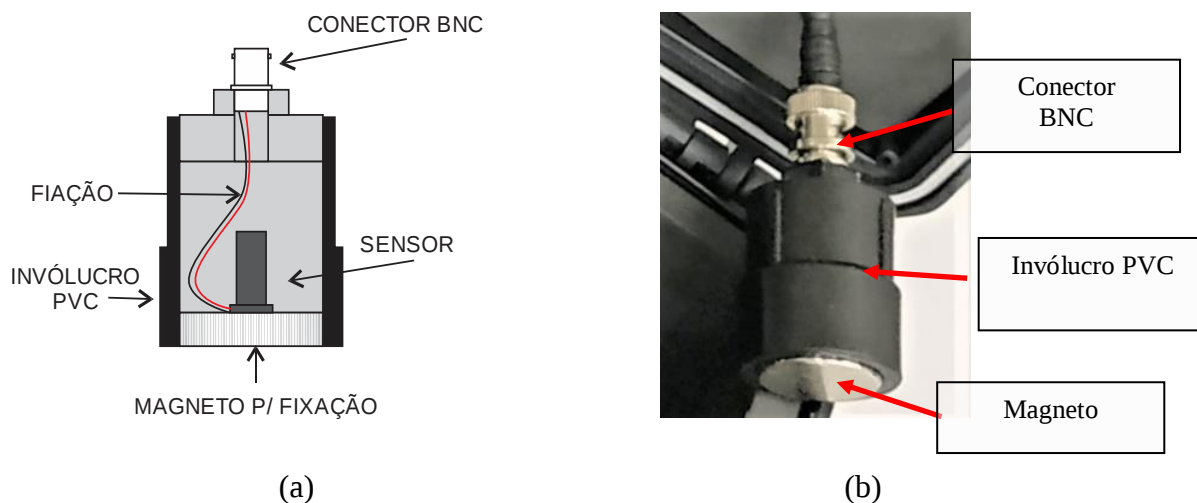
Figura 72 - Par de Sistemas do Protótipo 02 montados já com a caixa.



Fonte: próprio autor.

O desenho detalhado com vista em corte, assim como a imagem da montagem em detalhe podem ser observados na Figura 73 (a) e (b).

Figura 73 - (a) Vista em corte do invólucro do sensor; (b) Sensor de Vibração.



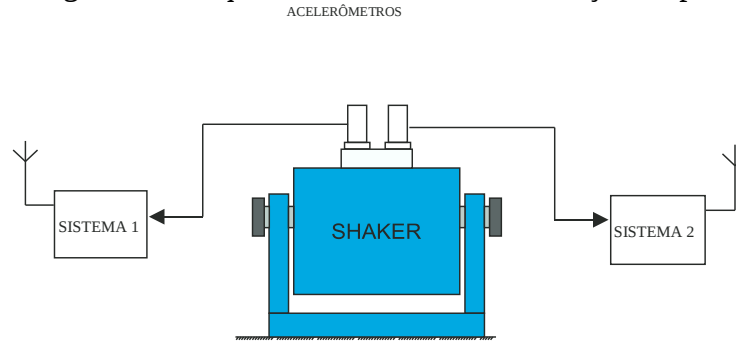
Fonte: Próprio autor.

Os sensores foram os mesmos utilizados no Protótipo 01, porém desta vez receberam um invólucro de PVC com o intuito de proteger o sensor de choques mecânicos e da ação de água e umidade. Foi adotado um magneto na região inferior do invólucro para fácil fixação aos pontos de acesso, uma vez que na maioria das vezes estes são confeccionados em materiais ferrosos. Foi utilizado um conector do tipo BNC para permitir que o cabo possa ser removido e substituído.

5.3 TESTE DE ATRASO

Inicialmente, o Protótipo 02 foi submetido ao mesmo teste de sincronia realizado com o Protótipo 01 utilizando um *shaker*, ambos os sensores tiveram aplicado o mesmo sinal de caráter aleatório e espera-se encontrar sinais os mais sincronizados quanto possível. O esquemático do ensaio pode ser revisto na Figura 74.

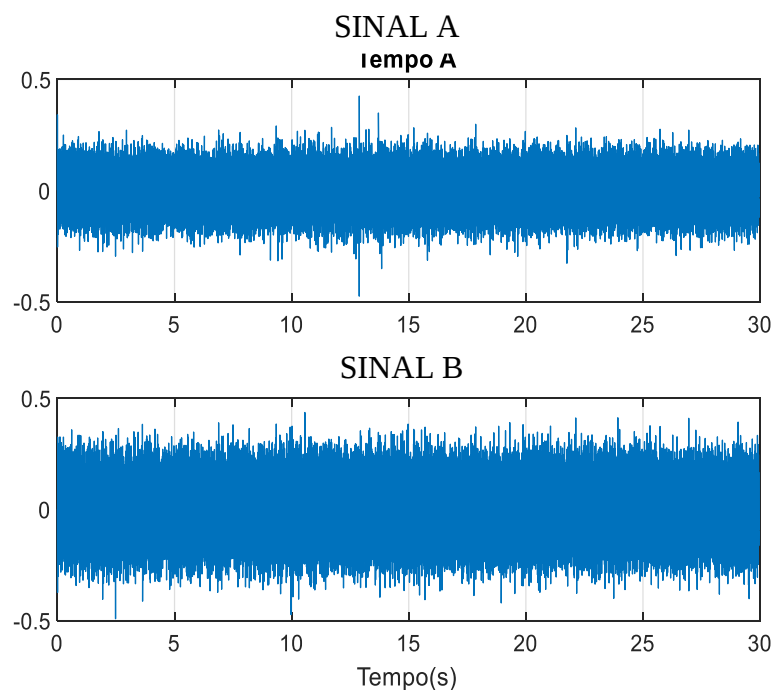
Figura 74 - Esquema de teste de sincronização do protótipo.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 75 são apresentados os resultados do teste de sincronia no domínio do tempo, é possível observar-se que o Sinal A possui nível RMS ligeiramente menor que o Sinal B, este fato pode ser corrigido através do ajuste do ganho no módulo amplificador de sinal pós condicionador de sinal presente no hardware do Protótipo.

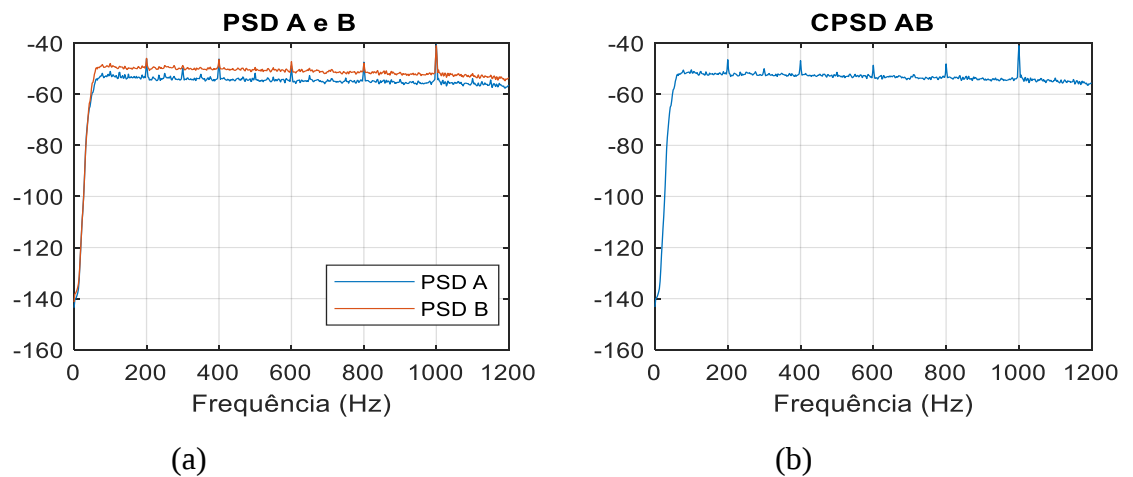
Figura 75 - Teste de atraso, Protótipo 02 Resultados no domínio do Tempo.



Fonte: próprio autor.

As Densidades Espectrais são apresentadas na Figura 76 em (a), e a Densidade Espectral Cruzada é apresentada em (b). É possível notar a presença de ruído nas frequências múltiplas a 100 Hz, apesar disso o dispositivo conta com resposta consideravelmente uniforme ao longo da faixa de operação.

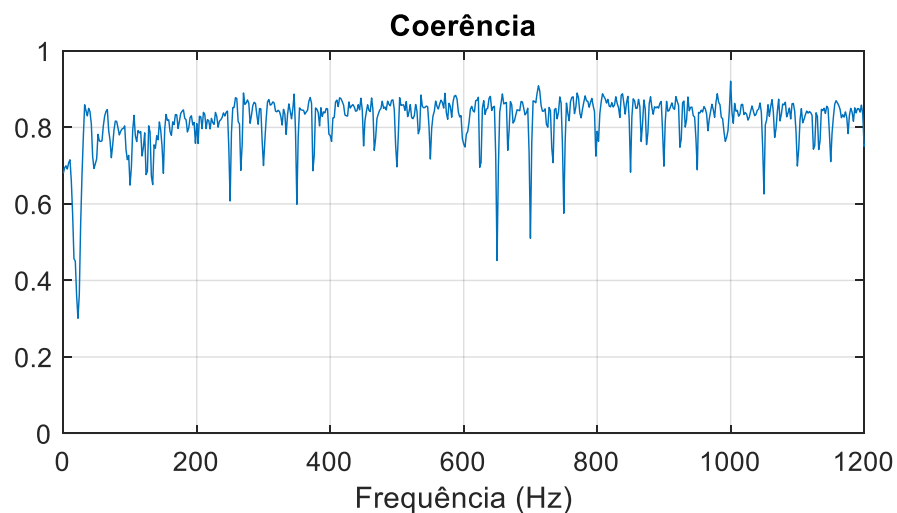
Figura 76 - Teste de atraso, Protótipo 02. Densidades Espectrais e Densidade Espectral Cruzada.



Fonte: próprio autor.

Embora não possua o ranque máximo, que seria o valor unitário, é possível observar através da Figura 77 que a coerência entre os sinais se mantém elevada e constante ao longo de toda a faixa espectral analisada.

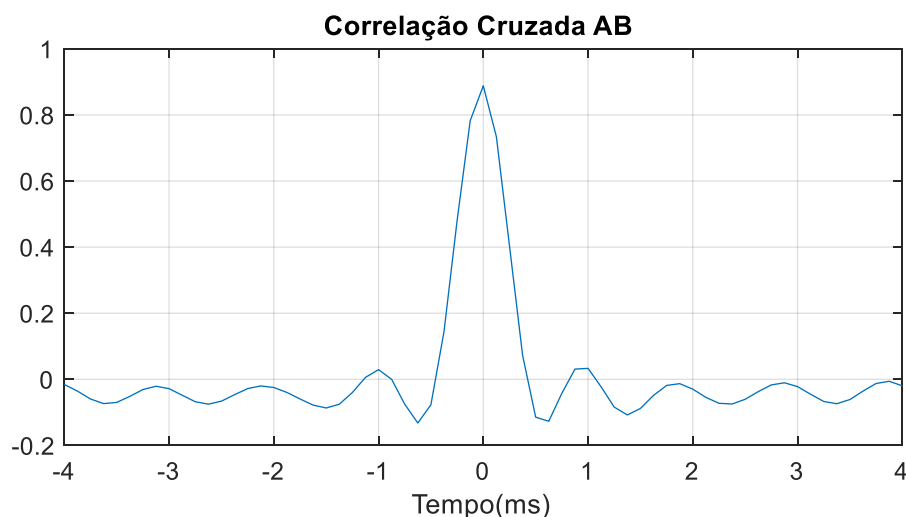
Figura 77 - Teste de atraso, Protótipo 02. Coerência.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 78 é apresentado o resultado da Correlação Cruzada, na qual mostra o pico máximo da função em 0 segundos, o que denota a ausência percebida de atraso de tempos inerentes ao sistema.

Figura 78 - Teste de atraso, Protótipo 02. Correlação Cruzada.



Fonte: próprio autor.

A partir dos resultados encontrados durante o teste de sincronia, analisando a resposta em frequência e o atraso inexistente na Função de Correlação Cruzadas é possível concluir que o sistema apresentou bons resultados e será submetido a um Teste de Detecção de Vazamentos.

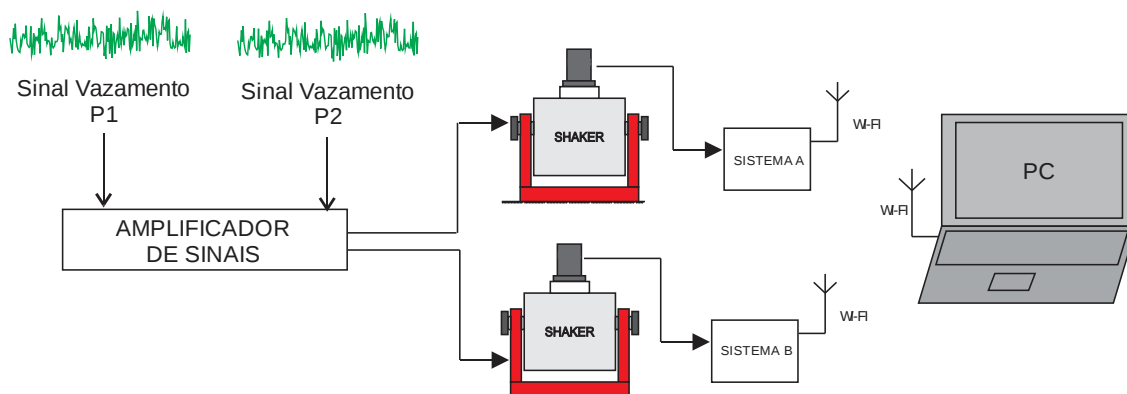
5.4 TESTE COM VAZAMENTO SIMULADO

Para a segundo teste de funcionamento do Protótipo 02 foi utilizado o Sistema de Testes desenvolvido por Iwanaga (2019), neste sistema através do modelo de Gao et al. (2004) foram gerados dois sinais correspondentes à vibração medida nos pontos de acesso de uma situação real e o sinal é compensado através de filtros digitais que removem a influência elétrica e mecânica dos componentes de amplificação do sinal e do transdutor a fim de que o sinal seja o mais próximo do sinal virtual gerado pelo modelo.

A utilização de um sinal previamente mensurado em situação real também seria possível, mas foi escolhido realizar o teste com um sinal simulado por possuir menor ação de ruídos e maior amplitude na banda de frequências envolvidas, facilitando assim a avaliação do Protótipo 2.

Na Figura 79 é apresentado o esquemático do sistema, onde os sinais gerados através do modelo de vazamentos e já corrigidos por meio do algoritmo compensador são enviados para um amplificador que é capaz de entregar a energia necessária aos transdutores de vibração.

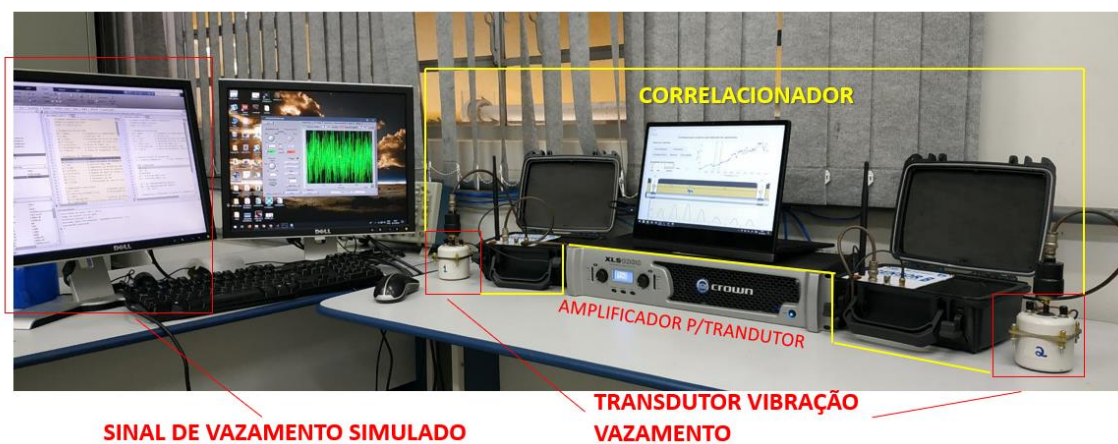
Figura 79 - Esquemático do Ensaio do Protótipo 02 com Vazamento Simulado.



Fonte: próprio autor.

Os sensores do Protótipo 02 são então fixados nos transdutores de vibração e o sistema faz a coleta do sinal e transmissão via *Wi-fi* para o *tablet* onde a aplicação principal do Correlacionador é executada e os dados são salvos para análise no software Matlab®. Ao final do experimento espera-se que seja possível determinar o atraso de tempo correto através do sinal coletado através do Protótipo 02. Uma imagem do experimento é apresentada na Figura 80

Figura 80- Ensaio do Protótipo 02 com Vazamento Simulado.

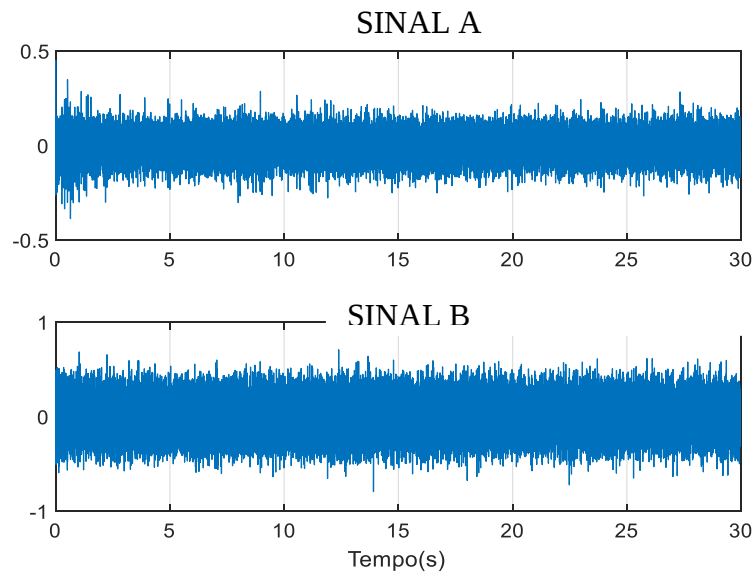


Fonte: próprio autor.

Uma vez na presença com os transdutores de vibração devidamente alimentados por meio dos seus respectivos sinais, o funcionamento do Protótipo 02 foi controlado diretamente

com o uso da aplicação de Detecção de Vazamentos e o tempo de amostra foi configurado para 30 segundos. Na Figura 81 são apresentados os sinais coletados no domínio do tempo.

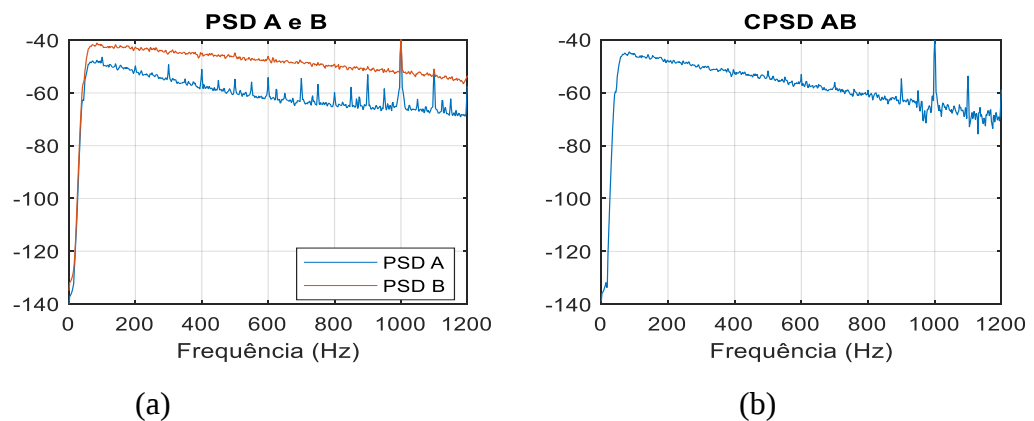
Figura 81 - Teste com Vazamento simulado, Protótipo 02. Resultados no domínio do Tempo.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 82 (a) pode-se observar as Densidades Espectrais dos Sensores A e B, onde é encontrada a atenuação esperada tanto devido a frequência, como devido a distância simulada dos pontos de acesso, já na Figura 82(b) a Densidade Espectral Cruzada apresenta certo ruído em 1000 Hz, porém o mesmo se encontra fora da faixa de frequências onde é esperada a concentração de energia do vazamento conforme determinado no Capítulo 2, logo não representa prejuízos a detecção.

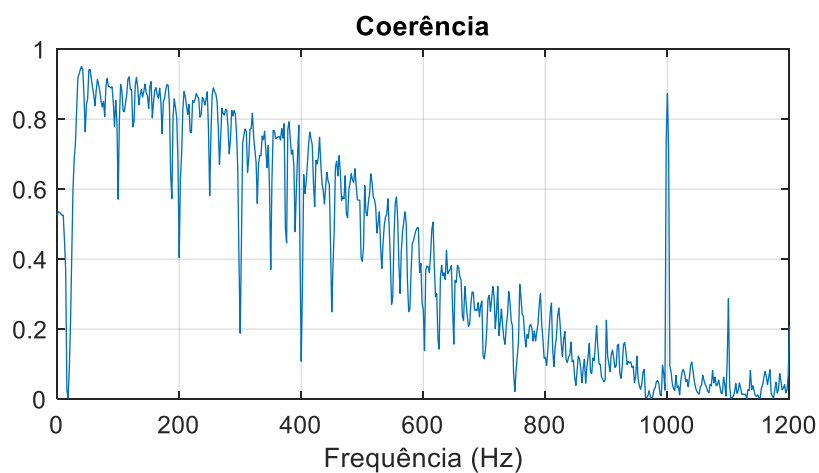
Figura 82 - Teste com Vazamento simulado, Protótipo 02. Densidades Espectrais e Densidade Espectral Cruzada.



Fonte: próprio autor.

A Coerência entre os sinais é representada na Figura 83, a queda de valor conforme o aumento da frequência é esperada devido a atenuação presente no modelo numérico da tubulação e experimentalmente encontrada no Capítulo 2, o ruído encontrado se mantém com as mesmas características apresentadas durante o Teste de Atraso.

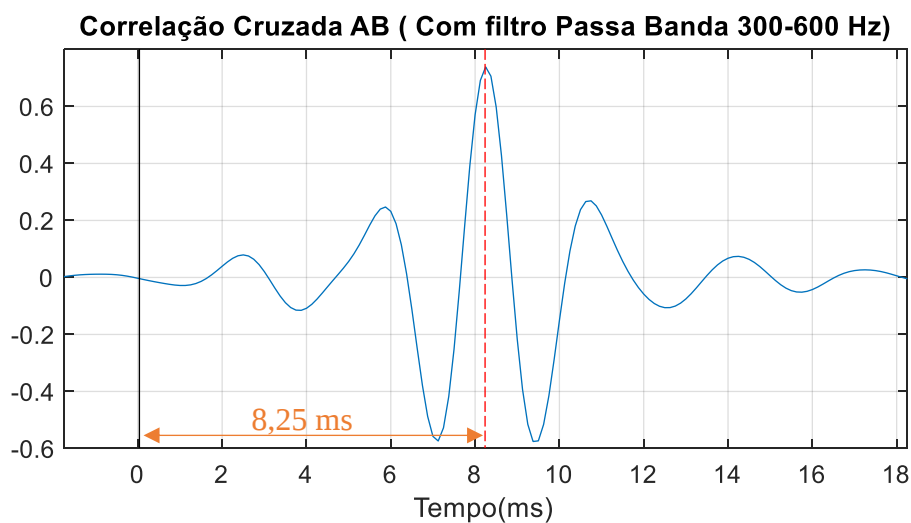
Figura 83 - Teste com Vazamento simulado, Protótipo 02. Coerência.



Fonte: próprio autor.

O resultado da Correlação Cruzada por fim é demonstrado na Figura 84, onde o pico da função está localizado em 8,25 ms, justamente o resultado aguardado para os dados informados à simulação do vazamento utilizada.

Figura 84 - Teste com Vazamento simulado, Protótipo 01. Correlação Cruzada.



Fonte: próprio autor.

Por conveniência foi aplicado ao sinal antes da função de correlação um filtro passa-banda na região entre 300-600 Hz, a mesma dos vazamentos experimentais a fim do

formato da Função de Correlação ficar próximo àquela fornecida pela interface do Correlacionador.

5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Os para determinação do Atraso entre os canais submetidos a mesma fonte de vibração e os testes realizados por meio dos Vazamentos Simulados, demonstraram que em ambos os casos resultados satisfatórios indicam a capacidade do Protótipo 02 para o uso na detecção de vazamentos.

O invólucro adotado pelo sensor, não trouxe prejuízo ao sinal coletado.

O Protótipo 02 apresenta quando comparado com o Protótipo 01 maior simplicidade, menor índice de ruído, utiliza apenas um circuito de alimentação e não necessita de sistema de dissipação térmica.

O Protótipo 02 pode necessitar de regulagem na etapa de amplificação do sinal, porém está apto para o uso na detecção de vazamentos.

6 CONCLUSÕES FINAIS DO TRABALHO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

O modelo do vazamento proposto por Gao *et al.* (2004) se mostrou eficaz em prever a banda do sinal de vazamento no Campo de Provas de São Paulo com o uso de sensores piezoelétricos, valores ainda mais acurados são possivelmente atingidos através do modelo proposto por Brennan *et al.* (2018) uma vez que este leva também em consideração a ação do solo no sistema.

A partir dos dados experimentais foi possível notar que a direção preferencial de medição nos pontos de acesso do Campo de provas foi aquela alinhada à direção radial da tubulação. A amplitude dos menores sinais de vazamento se encontrou na ordem de $0.010 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$, dessa maneira o sensor do tipo MENS de baixo custo que foi investigado não se demonstrou indicado para a aplicação uma vez que não demonstrou bom comportamento com sinais semelhantes ao do vazamento com amplitude abaixo de $1 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$.

A aquisição e transmissão digitais de sinais pode reduzir o custo dos equipamentos e torná-los compatíveis com novas tecnologias de transmissão e compartilhamento de informação como o conceito de *Internet of Things*. Desta forma os coletores de sinais podem ser empregados nos Correlacionadores de Sinal como no foco deste trabalho, bem como em outras aplicações como as que lidam com *Big Data* e processamento em nuvem. Toda via, a digitalização dos sinais do tempo causa a inserção de atrasos de tempo e incertezas. O uso de sincronização dos sinais coletados através da referência por módulos GPS se mostrou eficaz para sinais de vazamento.

O Protótipo 01, que fez o uso de uma placa de computação em miniatura e do circuito de sincronização por chaveamento da passagem do sinal de entrada apresentou bons resultados na coleta e correlação dos sinais de vazamentos. Porém a utilização da placa *Orange Pi Zero* apresentou alto consumo de energia, necessidade de um circuito ativo para a dissipação térmica e alto índice de ruído que gera artefatos no sistema analógico de condicionamento e chaveamento do sinal.

O Protótipo 02, uma vez utilizando um sistema microcontrolado e contando com o início da conversão do sinal controlado por uma interrupção externa disparada através do sinal de GPS, apresentou ótimos resultados. Este protótipo apresentou menor aquecimento não necessitando desta forma de circuito de refrigeração, menor consumo de energia, menor nível de ruído elétrico e maior simplicidade.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para trabalhos futuros é possível listar:

- Utilizar o método de sincronização por circuito externo com chave de sincronização para outros tipos de dispositivo de coleta de sinais tais como: sistemas de aquisição, smartphones ou demais dispositivos de IoT.
- Avaliar o Protótipo 02 no Campo de Prova, a fim de investigar seu funcionamento fora do laboratório.
- Investigar outros métodos de sincronização que não os por meio de GPS.
- Investigar o de outros sensores tais como outros modelos de acelerômetros ou mesmo geofones.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. C. L. **Improved acoustic methods for leak detection in buried plastic water distribution pipes**. 2013. Tese (PhD) - Mechanics College - University of Southampton, England, 2013.

ALMEIDA, F. C. L.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; WITHFIELD, S.; DRAY, S.; PASCOALLINI, A. T. On the acoustic filtering of the pipe and sensor in a buried plastic water pipe and its effect on leak detection: an experimental investigation. **Journal Sensors Basel**, Southampton, v. 14, p. 5595-5610, 2014.

Analog Devices. **Small, low power, 3-axis +-2g accelerometer**. Norwood: [s.n.], 2014. Disponível em:
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl327.pdf> .
 acessado em: 2 maio 2016,

ASZKLER, C. CHAPTER 5: Acceleration, shock and vibration sensors. **Sensor technology**. Amsterdã: Elsevier, 2005. p. 137-159.

BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; MUGGLETON, J. M.; GAO, Y. **Some recent research results on the use of acoustic methods to detect water leaks in buried plastic water pipes**. Southampton: [s.n.], 2005. ISVR Technical Memorandum.

CHAPLIN, M. F. Water: its importance to life. **Biochemistry and Molecular Biology Education**, Amsterdã, v. 29, p. 54-59, 2001.

CHITODE, J. S. **Signals and systems**. Pune: Technical Publications, 2009.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO- SABESP. **Controle de perdas**. São Paulo: [s.n.], 2013. Disponível online:
<http://site.SABESP.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=37>. Acesso em: 2 abr 2015.

ECHOLOGICS. **Leak finders**. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em:
<https://www.echologics.com/products/leakfinderst/>. Acesso em: 10 jul 2018.

FARLEY, M. **Leakage management and control: a best practice training manual**. Geneva: World Health Organization, 2001.

FUCHS, H. V.; RIEHLE, R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. **Applied Acoustics**, Amsterdã, v. 33, p. 1-19, 1991.

FREERTOS. **Multitasking**. Seattle: [s.n.], 2003. Disponível em:
<https://www.freertos.org/implementation/a00004.html> . Acesso em: 12 mar 2016.

GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; MUGGLETON, J. M.; HUNAIDI, H. A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes. **Journal of Sound and Vibration**, Amsterdã, v. 227, p. 133-148, 2004.

HARRIS, S.; HARRIS, D. **Digital design and computer architecture: ARM edition**. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2015.

HUNAIDI, O; CHU, W. T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. **Journal of Applied Acoustics**, Amsterdã, v. 58, p. 235-254, 1999.

HUNAIDI, O. **Detecting leaks in water-distribution pipes**. Canada: National Research Council, 2000. p. 6. (Construction Technology Update, 40).

IBBOTSON, L. **The fundamentals of signal transmission**. Burlingtom: Elsevier, 1999.

IWANAGA, M. K.; BRENNAN, M. J.; SCUSSEL, O. Development of a compensated frequency response function for electromagnetic exciters. In: SYMPOSIUM OF INTELLIGENT MATERIALS AND CONTROL- SIMC, 5., 2018, Ilha Solteira. **Proceedings** [...] Ilha Solteira: [s.n.], 2018. p. 18-19.

KIHONG, S.; HAMMOND, J. K. **Fundamentals of signal processing**. New York: John Wiley & Sons, 2008. p. 403.

KURNIAWAN, A. **Internet of things projects with ESP32: Packet**. Birmingham, [s.n.], 2019.

KROHN, C. E. **Geophone ground coupling**. Tulsa: Geophysics, Society of Exploration Geophysics, 1984.

LOVEDAY, M.; TOOMS, S.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; ALMEIDA, F. C. L. **Leak detection on plastic pipes**. Southampton: [s.n.], 2011. (UKWIR Technical report, 12/WM/08/47). ISBN: 1 84057 647 2.

LUGLI, A.; B.; SANTOS, M. M. D. **Redes sem fio para automação industrial**. São Paulo: Érica, 2013.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES - MCTIC. **Notícia**. Brasília: [s.n.], 2018. Disponível em: https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/salaImprensa/noticias/arquivos/2019/06/Decreto_que_institui_o_Plano_Nacional_de_Internet_das_Coisas_e_publicado.html. Acesso em: 29 jun 2019.

MOTA FILHO, J. E. **Análise de tráfego em redes TCP/IP**. São Paulo: Novatech, 2013.

MRAZ, S. **NIST develops way to precisely characterize MEMS accelerometers**. machinedesign. Sarasota: [s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.machinedesign.com/motion-control/nist-develops-way-precisely-characterize-mems-accelerometers>. Acesso em: dia dez 2018.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J.; PINNINGTON, R. J. Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection, **Journal of Sound and Vibration**, Amsterdã, v. 249, p. 934-954, 2002.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J.; LINFORD, P. W. Axisymmetric wave propagation in fluid-filled pipes: measurements in *in-vacuo* and buried pipes. **Journal of Sound and Vibration**, Amsterdã, v. 270, p. 171-190, 2004.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J. Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes. **Journal of Sound and Vibration**, Amsterdã, v. 278, p. 527-537, 2004.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J.; PINNINGTON, R. J.; GAO, Y. A novel sensor for measuring the acoustic pressure in buried plastic water pipes. **Journal of Sound and Vibration**, Amsterdã, p. 295, p. 1085-1098, 2006.

MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J.; GAO, Y. Determining the location of buried plastic water pipes from measurements of ground surface vibration. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdã, v. 75, p. 54-61, 2011.

SOARES NETO, V. **Sistemas de comunicação: serviços, modulação e meios de transmissão**. São Paulo: Érica, 2015.

PRICE, M.; REED, D. W. The influence of mains leakage and urban drainage on groundwater levels beneath conurbations in the UK. **Inst. Civ. Eng. Proceedings**, Southhampton, v. 86, p. 31-19, 1989.

PRIMAYER. **Leak noise loggers for leak location**. Hampshire: [s.n.], 2014 Disponível em: <https://www.primayer.com/products/enigma/>. Acesso em: 13 maio 2018.

PINNINGTON, R. J.; BRISCOE, A. R. Externally applied sensor for axisymmetric waves in a fluid filled pipe. **Journal of Sound and Vibration**, Amsterdã, v. 173, n. 4, p. 503-516, 1993.

SAFRAN. **MEMS accelerometer, reference in accuracy**. Yverdon-les-Bains: [s.n.], 2015. Disponível em: <https://www.colibrys.com/pro-cats/mems-acceleration/>. Acesso em: dia fe 2018.

SANDERS, J. M.; DEAR, J. P.; BELMONTE, H.; SHEPHERD, M. **Chemical and mechanical evaluation of polymer pipe to determine remaining life**. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: http://www.ppxiv.com/posters/sanders_poster.pdf. Acesso em: 14 abr, 2013.

SANTOS, S. **Introdução a IoT**. Joenvile: Clube dos autores, 2019.

SEBAKMT. **Hidrophone**. Marseille: Baunach, 2018. Disponível em: <http://www.directindustry.com/prod/sebakmt/product-91633-1738065.html>. Acesso em: 5 jan 2019.

SEWERIN. Localização de vazamentos de água. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: <http://www.sewerin.co.uk/products/water-leak-location/secorr-08>. Acesso em: 20 maio, 2015.

SIMITH, J. D. **Vibration mesurement & analysis**. London: Butterworths, 1989.

SISTEMA NACIONAL DE SANEAMENTO- SNIS. **Diagnóstico de água e esgotos**. Brasília: [s.n.], 2018. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2017> . Acesso em: 20 de jan 2019.

SUBSURFACELEAK. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: http://www.subsurfaceleak.com/lc2500_prod_pg.html Acesso em: 19 abr, 2015.

TRUELOCAL. **Incline**. Village: [s.n.], 2013. Disponível em: <http://www.truelocal.com.au/business/gutermann-leak-detection-pty-ltd/mascot/photos>. Acesso em: 24 abr, 2015.

U-BLOX. **Neo-6. Datasheet**. Thalwil: [s.n.], 2011. Disponível em: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf . Acesso em: 29 jan 2017.

YASUURA, H.; KYUNG, C.; LIU Y.; LIN, Y. **Smart sensors at the Iot frontier**. Basel: Springer, 2018.

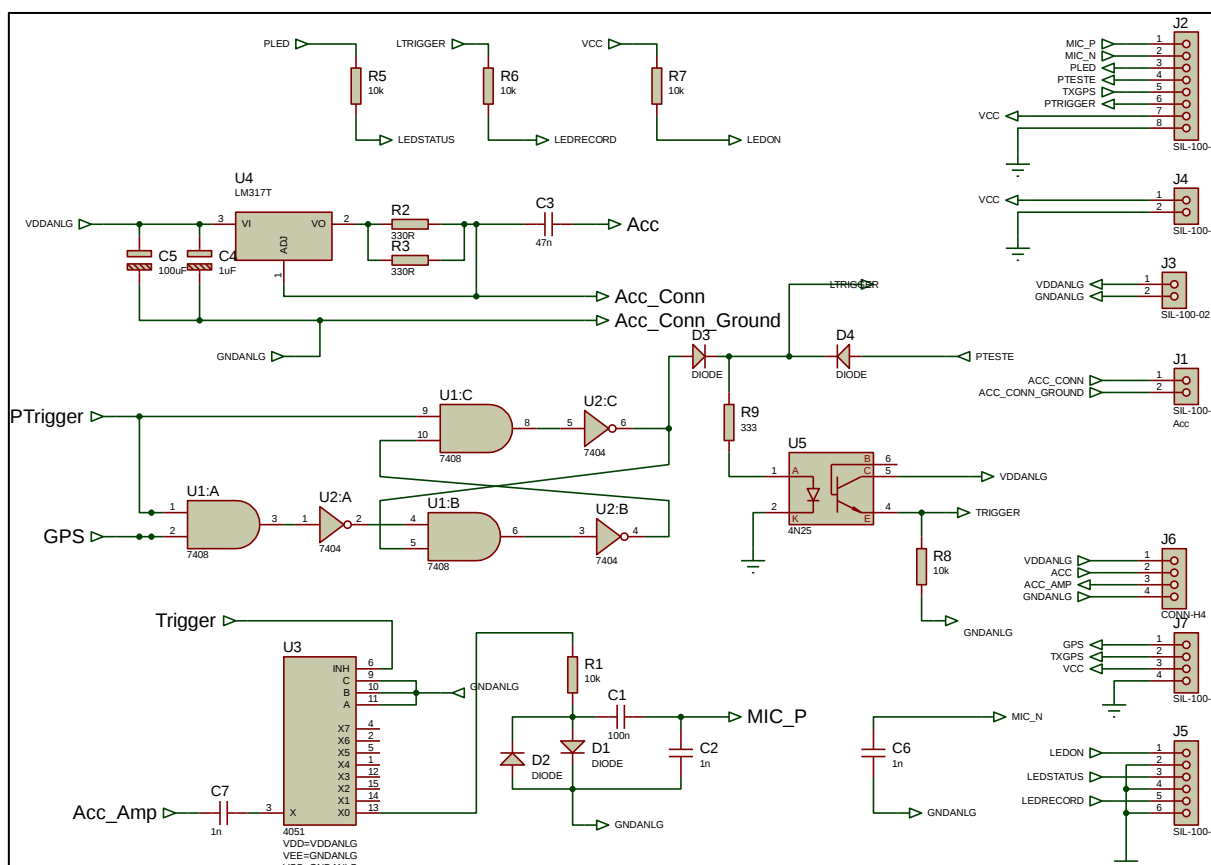
WATERMARKSOLUTIONS. Ontario: [s.n.], 2014. Disponível em: <http://www.watermarksolutions.ca/hwm/>. Acesso em: 02 abr 2015.

APÊNDICE A

CIRCUITOS PROTÓTIPO 01

Para a confecção do Protótipo 01 diversos componentes foram utilizados a fim de construir os circuitos de condicionamento de sinal e de sincronização por chaveamento. O diagrama dos componentes pode ser visto abaixo na Figura 85.

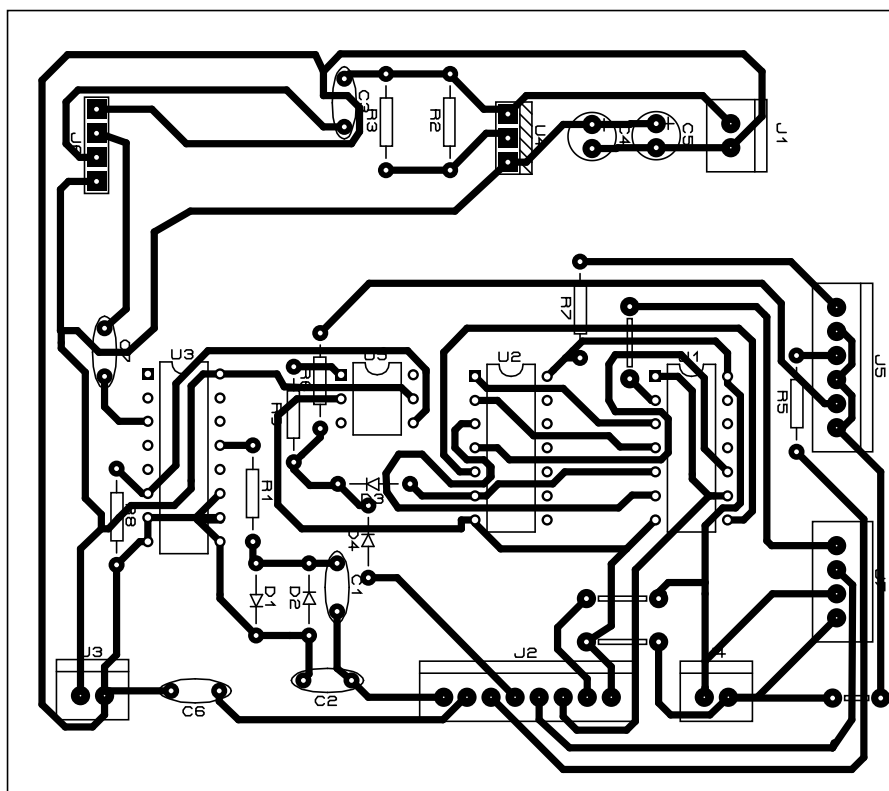
Figura 85 - Diagrama dos componentes do circuito do Protótipo 01.



Fonte: próprio autor.

Tanto o diagrama dos componentes bem como o desenho a ser impresso na placa de circuito foram realizados com a utilização do software Proteus®. O desenho das trilhas da PCB pode ser conferido na Figura 86

Figura 86 - Circuito impresso do Protótipo 01.



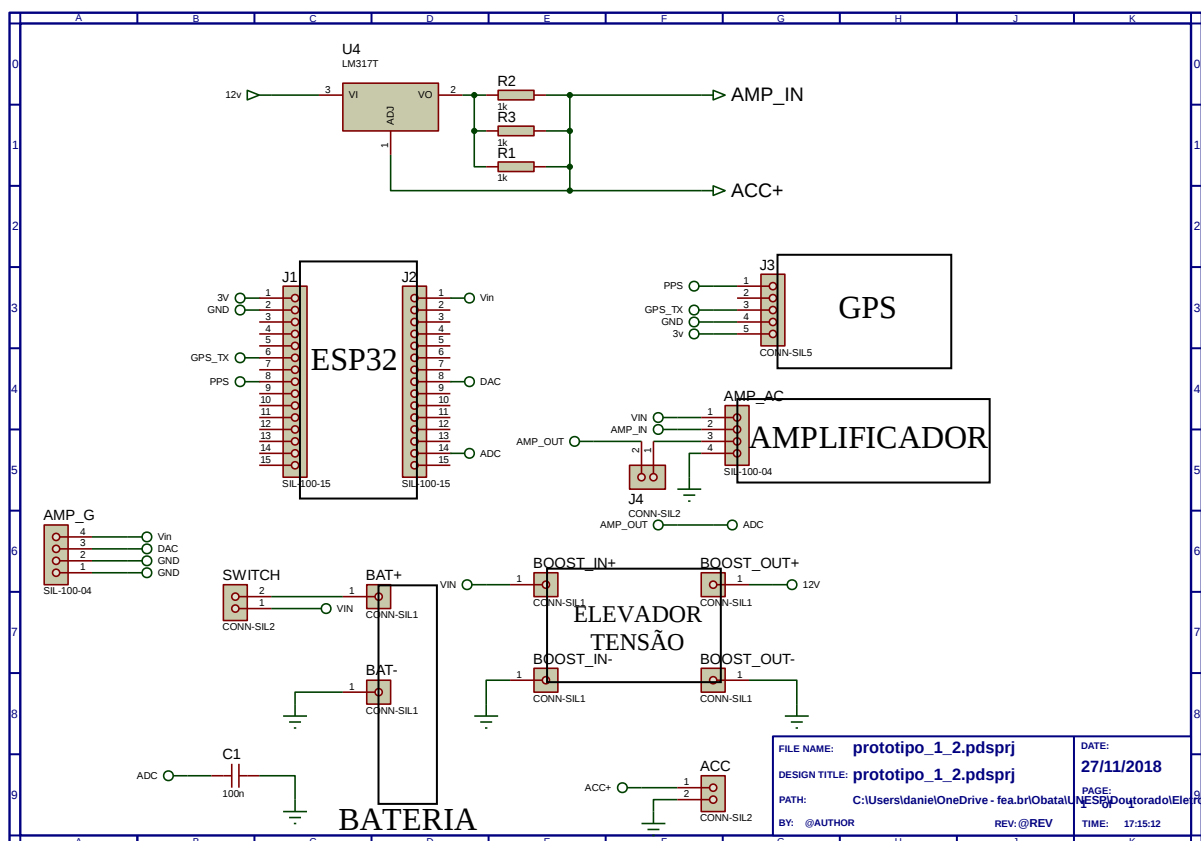
Fonte: próprio autor.

APÊNDICE B

CIRCUITOS PROTÓTIPO 02

O diagrama dos componentes do Protótipo 02 é apresentado na Figura 87.

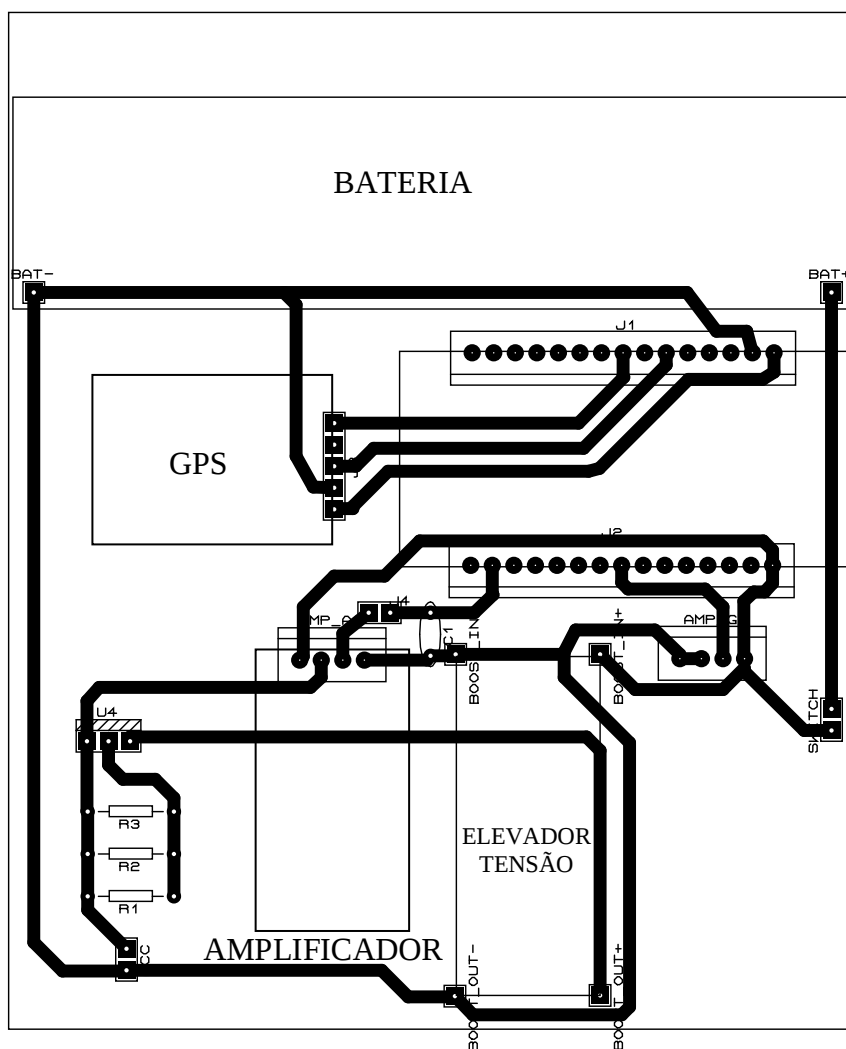
Figura 87 - Diagrama dos componentes do circuito do Protótipo 02.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 88 é apresentado o circuito presente na PCB do Protótipo 02.

Figura 88 - Circuito Impresso do Protótipo 02.



Fonte: próprio autor.

APÊNDICE C

ROTINAS PROTÓTIPO 01

O Protótipo 01 conta com o Sistema Operacional Linux, logo ao ser iniciado há a execução de um script que permite que os dados coletados através da placa de som sejam direcionados a uma porta de comunicação TCP/IP para qualquer dispositivo que se conecte ao protótipo, desta maneira é que são enviados os sinais dos sensores.

Abaixo segue o código deste script que também é responsável por configurar alguns pinos de comunicação como entrada e saídas, realizar a configuração do *wi-fi* e por fim a conexão da placa de som com a porta de comunicação da rede.

```
# Orange Pi Zero Wifi RESET
GATEWAY=`route -n | grep "^0.0.0.0" | tr -s " " | cut -f2 -d" "`
ifconfig wlan0 down
ifconfig wlan0 up
route add default gw $GATEWAY wlan0

# USB SOUND CARD>TCP
socat tcp-l:7000,reuseaddr,fork, system:"arecord -r16000 -fS16_LE" &
```

Após a inicialização do sistema é executada uma rotina em Python responsável em receber os comandos da Unidade Principal do Correlacionador via TCP/IP, coletar os dados de hora e data do módulo GPS e habilitar o circuito controlador da chave sincronizadora. No quadro abaixo está contido esta rotina.

```
#!/usr/bin/python

# Serial
import serial
# Network
import socket
import select
# Time
from time import sleep

# GPIO
from pyA20.gpio import gpio
from pyA20.gpio import port

#GPIO setup
led = port.PG7
pps = port.PG6
```

```

#gpio init
gpio.init()
gpio.setcfg(led, gpio.OUTPUT)
gpio.setcfg(pps, gpio.INPUT )
gpio.pullup(pps, 0)

#network setub
host = ''
port = 7001
tcp = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
tcp.bind((host, port))

#serial setup
gps = serial.Serial("/dev/ttyS2", baudrate=9600, timeout=2)

newRecord      = 0
recordRunning  = 0
SW              = 0
monitorMode    = 0

while 1:
    try:
        print 'A espera de clientes...'
        tcp.listen(1)
        tcpConn, addr = tcp.accept()
        #tcpConn.settimeout(0.010)
        print 'Conexao realizada:' , addr

        gps.reset_input_buffer()
        GPGGA = 0

        while 1:
            # gps data verification
            if gps.inWaiting() != 0:
                # gps line read read
                gpsLine = gps.readline()
                gpsPieces = gpsLine.split(',')
                # gps cycle init, gpgga reset
                if gpsPieces[0]== '$GPRMC':
                    GPGGA = 0
                    # GPGGA verification
                if gpsPieces[0] == '$GPGGA':
                    GPGGA = 1
                    # time verification
                    gpsAbsSecond = 0
                    if gpsPieces[1]:
                        gpsTime = gpsPieces[1]
                        gpsHour = int( gpsTime[0:2] ) - 3
                        gpsMinute = int( gpsTime[2:4] )
                        gpsSecond = int( gpsTime[4:6] )
                        gpsAbsSecond = gpsHour * 60 * 60
                        gpsAbsSecond += gpsMinute * 60
                        gpsAbsSecond += gpsSecond
                    # get fix
                    gpsFix = int( gpsPieces[6] )
                    # gps mensage to central program
                    gpsState = str(gpsAbsSecond )+', '+str(gpsFix)+'\n'
                    if monitorMode == 1:
                        tcpConn.sendall(gpsState)

            # Network Data Receive

```

```

readable,[],[] = select.select([tcpConn], [], [],0.001 )
if readable:
    tcpData = tcpConn.recv(512)
    if not tcpData:
        print 'Fim da conexao'
        break
    ### Read commands
    # Monitor Mode
    if tcpData[0:3]=='MN,':
        monitorMode = int(tcpData[3])
    # GPS State
    if tcpData[0:3]=='GS,':
        tcpConn.sendall(gpsState)
    # New Record
    if tcpData[0:3]=='NR,':
        # split commands between ','
        command=tcpData.split(',')

        startRecord = int(command[1])
        stopRecord  = int(command[2])

        if newRecord or recordRunning:
            tcpConn.sendall('000,Err,record on running\n')
            elif ((startRecord < gpsAbsSecond) and (startRecord >
86400)):
                tcpConn.sendall('001,Err,No valid start time.\n')
            elif ((stopRecord < startRecord ) and (stopRecord >
86400)):
                tcpConn.sendall('002,Err,No valid stop time.\n')
            else:
                newRecord      = 1
                preTrigger      = 0
                recordRunning = 0
                tcpConn.sendall('100,Advice,record programed\n')
        # On new record programmed
        if newRecord:
            # if 1 second before starts
            if gpsAbsSecond == (startRecord - 1) and gpsFix and not
preTrigger:
                gpio.output(led,1)
                preTrigger = 1
                tcpConn.sendall('101,Advice,Pre-trigger record\n')
            # if in the start time
            if gpsAbsSecond == startRecord and GPGBGA:
                # if have pretrigger and gps ok
                if preTrigger and gpsFix:
                    recordRunning = 1
                    tcpConn.sendall('102,Advice,Start of Record\n')
                # if dont have trigger or gps signal
                else:
                    tcpConn.sendall('003,No GPS FIX on record start time\n')
                # clear record flags
                newRecord = 0
                preTrigger = 0
            # if later start but have pretrigger
            if gpsAbsSecond > startRecord and preTrigger:
                newRecord = 0
                tcpConn.sendall('004,Err, Loose start time\n')
        # if is on record
        if recordRunning:
            if gpsAbsSecond >= stopRecord:

```

```
        recordRunning = 0
        gpio.output(led,0)
        tcpConn.sendall('103,Advice,End of Record\n')

        # If break gps network while
        tcp.shutdown(1)

    except socket.error:
        break

    except KeyboardInterrupt:
        print 'Programa finalizado via teclado'
        tcp.close()
        gps.close()
        gpio.output(led,0)
```

APÊNDICE D

ROTINAS PROTÓTIPO 02

O Protótipo 02 conta com o uso de um microcontrolador. A rotina em C que compõe o firmware responsável por receber os comandos da Unidade Principal do Correlacionador, receber os dados de data e hora do módulo GPS, lidar com a interrupção externa proveniente do sinal PPS do módulo GPS e controlar o conversor ADC é apresentada abaixo.

```
#include "Arduino.h"
#include <WiFi.h>

const char* ssid      = "SU";
const char* password  = "sabespunesp";
const char* host      = "192.168.168.100";
const int

class mGPS
{
    private:
        void _read();
        uint _gsecond;
        uint _gfix;
        uint _hour;
        uint _minute;
        uint _second;
        uint _hverao=0;
    public:
        void begin();
        void update();
        String timeprint();
        uint fix();
        uint gsecond();
        uint hour();
        uint minute();
        uint second();
        void setVerao(int _hverao);
};

void mGPS::begin()
{
    Serial2.begin(9600);
}

void mGPS::_read() {
    if(Serial2.available()) {
        char sbuf[256];
        int n=Serial2.readBytesUntil('\r', sbuf, 256);
        String str = "";
        str +=sbuf;

        if(str.indexOf("$GPGGA")!=-1) {
            //Serial.write(sbuf, n);
            str = str.substring(8,n);
            int i2 = str.indexOf(',',0);
            int i3 = str.indexOf(',',i2+1);
            int i4 = str.indexOf(',',i3+1);
```

```

        int i5 = str.indexOf(',', i4+1);
        int i6 = str.indexOf(',', i5+1);
        int i7 = str.indexOf(',', i6+1);

        _hour   = str.substring(0,2).toInt()+_hverao;
        _minute = str.substring(2,4).toInt();
        _second = str.substring(4,6).toInt();

        _gsecond = _hour*60*60 + _minute*60 + _second;
        _gfix = str.substring(i6+1,i7).toInt();
    }
}

void mGPS::update() {
    _read();
}

uint mGPS::fix() {
    return _gfix;
}

uint mGPS::gsecond() {
    return _gsecond;
}

uint mGPS::second() {
    return _second;
}

uint mGPS::minute() {
    return _minute;
}

uint mGPS::hour() {
    return _hour;
}

class Record{
public:
    int start      = 0;
    int stop       = 0;
    bool newr      = 0;
    bool running   = 0;
    bool pretrigger = 0;
    bool trigger   = 0;
    long buffer    = 0;
    long buff_done = 0;
};

#define signalport 7000
#define commandport 7001
WiFiServer signalServer (signalport);    // cria porta que mandara sinal (
legado da versao anterior)
WiFiServer commandServer(commandport);    // cria porta de comandos
WiFiClient signal;                        // cria cliente 1
WiFiClient command;                       // cria cliente 1

```

```

Record      record;                // cria objeto de controle da gravação

mGPS gps;

#define AUDIO_BUFFER_MAX 1024
uint8_t audioBuffer[AUDIO_BUFFER_MAX];
uint8_t transmitBuffer[AUDIO_BUFFER_MAX];
uint32_t bufferPointer = 0;

volatile bool transmitNow = false;

hw_timer_t * timer = NULL; // our timer
portMUX_TYPE timerMux = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED;

#define pps_pin 5
String msg="";
long pretrigger_start_time;

void IRAM_ATTR onTimer()
{
    portENTER_CRITICAL_ISR(&timerMux); // says that we want to run
    critical code and don't want to be interrupted
    digitalWrite(2, 1);

    if (record.newr)
    {
        if((record.start-1) == (gps.gsecond()))
        {
            if (gps.fix())    // momento de pretrigger
            {
                pretrigger_start_time = micros();
                record.pretrigger = 1;
                record.newr = 0;
                msg = "101,Advice,Pre-trigger record";
            }
            else{
                record.newr = 0;
                msg = "003,No GPS FIX on record start time";
            }
        }
    }

    if (record.pretrigger)
    {
        // Inicia nova aquisicao
        if(micros() > (pretrigger_start_time+100)  &&
digitalRead(pps_pin))
        {
            digitalWrite(15,1);
            record.running      = 1;
            record.pretrigger = 0;
            msg = "102,Advice,Start of Record";
        }
        // Sinalisa aquisicao perdida ( sem pps)
        if(micros() > (pretrigger_start_time + 1000000) ) // pretrigger
ativado depois do inicio da gravacao = erro
        {
            record.pretrigger = 1;

```

```

        msg = "003,No GPS FIX on record start time";
    }
}

if(record.running)
{
    int adcVal = 0;

    for(int i=0;i<8;i++)
    {
        adcVal += analogRead(A0);
    }

    adcVal = adcVal >> 3;

    audioBuffer[bufferPointer+1] = ( uint8_t ) (adcVal &
0b0000000001111111);
    audioBuffer[bufferPointer]   = ( uint8_t ) ((adcVal &
0b1111111100000000) >> 8);
    bufferPointer+=2;

    if (bufferPointer == AUDIO_BUFFER_MAX)
    {
        // when the buffer is full
        bufferPointer = 0;
        memcpy(transmitBuffer, audioBuffer, AUDIO_BUFFER_MAX); // copy
buffer into a second buffer
        transmitNow = true; // sets
the value true so we know that we can transmit now
        record.buff_done++;
    }

    if(record.buff_done == record.buffer)
    {
        digitalWrite(15,0);
        record.running = 0;
        record.newr = 0;
        record.buff_done = 0;
        msg = "103,Advice,End of Record.";
    }

}

digitalWrite(2, 0);
portEXIT_CRITICAL_ISR(&timerMux); // says that we have run our
critical code
}

void interruptBegin()
{
    pinMode(2, OUTPUT); // led da placa
    pinMode(pps_pin, INPUT); // pino pps

    timer = timerBegin(0, 80, true); // 80 Prescaler
    timerAttachInterrupt(timer, &onTimer, true); // binds the handling
function to our timer
    timerAlarmWrite(timer, 125, true);
    timerAlarmEnable(timer);
}

```

```

}

void networkBegin()
{
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.begin(ssid, password);

    Serial.print("\n \nConnecting");
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("");

    signalServer.begin();
    commandServer.begin();

    Serial.println("Connected to the WiFi network!");
    Serial.println(WiFi.localIP());
    Serial.print("Signal Port: ");
    Serial.println(signalport);
    Serial.print("Command Port: ");
    Serial.println(commandport);
}

void adcBegin()
{
    analogSetAttenuation(ADC_11db);
}

void adc_transmit()
{
    if(transmitNow)
    {
        transmitNow = false;
        //digitalWrite(2, HIGH);
        signal.write((const uint8_t *)transmitBuffer,
sizeof(transmitBuffer)); // sending the buffer to our server
        //digitalWrite(2, LOW);
    }
}

void client_read()
{
    if (command.connected())//Detecta se há clientes conectados no
servidor.
    {
        if (command.available() > 0)//Verifica se o cliente conectado tem
dados para serem lidos.
        {
            Serial.print("\nMensagem Recebida: ");
            while (command.available() > 0) //Armazena cada Byte
(letra/char) na String para formar a mensagem recebida.
            {
                char z = command.read();
                msg += z;
            }
        }
    }
}

```

```

        }
        Serial.println(msg);
    }

}

else//Se nao houver cliente conectado,
{
    //Disponibiliza o servidor para o cliente se conectar.
    command = commandServer.available();
    delay(1);
}

if(!signal.connected()) //Se nao houver cliente conectado,
{
    //Disponibiliza o servidor para o
cliente se conectar.
    signal = signalServer.available();
    delay(1);
}

}

void msgrsp()
{

    if(msg.length() <= 0) // Se não tiver mensagem para tratar
    {
        return;          // sai da rotina
    }

    String rsp = "";          // string para resposta

    if(msg.indexOf("GS")!=-1) // solicitação GPS Status ?
    {
        rsp = (String) gps.gsecond() + ',' + (String)gps.fix(); // FIX
+ GSECOND
        command.println(rsp); //
envia cliente rede
        Serial.println(rsp); //
envia serial
        msg = "";
    }

    if(msg.indexOf("NR")!=-1) // solicitação nova aquisição ?
    {
        int i2 = msg.indexOf(',',3); // posição virgula
segundo campo
        int i3 = msg.indexOf(',',i2+1); // posição virgula
terceiro campo

        int mstart = msg.substring(3,i2).toInt(); // tempo para
começo
        int mstop = msg.substring(i2+1,i3).toInt(); // tempo de fim

        msg = ""; // limpa mensagem
a ser tratada

        // Manda solicitação por serial
        Serial.println("Record request: " + (String)mstart + " - " +
(String)mstop);

        if(record.newr ) // existe aquisição programada?

```

```

        {
            rsp = "000,Err,record on running";          // mensagem
            command.println(rsp);                        // envia mensagem
rede
            Serial.println(rsp);                        // envia mensagem
serial
        }
        else if((mstart < gps.gsecond()) || (mstart > 86400)) // tempo de
início é futuro e no mesmo dia?
        {
            rsp = "001,Err,No valid start time.";
            command.println(rsp);
            Serial.println(rsp);
        }
        else if((mstop < gps.gsecond()) || (mstop > 86400) || (mstop <=
mstart))
        {
            rsp = "002,Err,No valid stop time.";
            command.println(rsp);
            Serial.println(rsp);
        }
        else // tudo certo!
        {
            record.newr = true;          // nova gravacao
            record.start = mstart;        //tempo de inicio
            record.stop = mstop;          // tempo de fim

            record.buffer = ((record.stop - record.start)*8000)/
(AUDIO_BUFFER_MAX/2);
            Serial.print("Record buffer: " + (String)record.buffer );

            rsp = "100,Advice,record programed.";
            command.println(rsp);
            Serial.println(rsp);
        }

        command.println(msg); //
envia cliente rede
        Serial.println(msg); //
envia serial
        msg = "";
    }
}

void setup()
{
    gps.begin();          // inicia gps
    Serial.begin(115200); // inicia serial

    adcBegin();           // inicia ADC
    networkBegin();        // inicia rede
    interruptBegin();      // inicializa interrupção

    pinMode(15,OUTPUT);
}

int mlength=0;

```

```
int buff = 0;

void loop(){
  adc_transmit();      // transmite sinal houver
  client_read();       // lê mensagens do cliente
  msgrsp();            // responde mensagens se houver (do cliente ou do
                        // programa)
  // se não estiver durante ou esperando uma aquisição
  if( !(record.running || record.pretrigger))gps.update(); // atualiza
  estado do GPS

  // remendo!
  if( msg.length() != mlength && msg.length() > 0)
  {
    mlength = msg.length();
    Serial.println(msg);
    command.println(msg);
  }
}
```

APÊNDICE E

ROTINAS DE COMUNICAÇÃO DA UNIDADE PRINCIPAL

O software utilizado na Unidade Principal do Correlacionador é o Matlab. O desenvolvimento da interface gráfica é de responsabilidade principal de Ayala(2019) com auxílio da equipe. Já as rotinas de comunicação com as unidades coletoras/transmissoras do sinal foram desenvolvidas neste trabalho e seus códigos são apresentados a seguir.

Rotina de Configuração da Rede

```
function f_network_setup()
%% Init TCP communication
clear, clc

% Clear communication Ports
% ports = instrfind; % possiveis portas abertas
% try
%     fclose(ports); % fecha possiveis portas abertas
% catch
% end
% clear ports % limpa objeto de portas abertas
instrreset()
% Global Variables
global commandPortA commandPortB signalPortA signalPortB buffer
conexao rate
conexao = 0;

% Setup Port
disp('configurando portas')
commandPortA = tcpip('0.0.0.0', 1001, 'NetworkRole', 'server'); %
porta de comandos
commandPortB = tcpip('0.0.0.0', 2001, 'NetworkRole', 'server');
signalPortA = tcpip('0.0.0.0', 1000, 'NetworkRole', 'server'); %
porta de sinal
signalPortB = tcpip('0.0.0.0', 2000, 'NetworkRole', 'server');

rate = 8000;
buffer = 1024;

signalPortA.InputBufferSize = buffer;
signalPortB.InputBufferSize = buffer;
```

Rotina de Conexão Inicial

```
% --- Execuates on button press in conection.
function [gpsHour, gpsMinute, gpsSecond]=f_conexao()
% hObject handle to conection (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
```

```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Collect GPS Sync Data
global commandPortA commandPortB signalPortA signalPortB conexao
gpsAbsSecond
gpsHour        = 0;
gpsMinute      = 0;
gpsSecond      = 0;

%% Open the network Ports
if conexao == 0
    ports = instrfind();
    fclose(ports);
    pause(1)
    disp('Abrindo portas')
    disp('command A')
    try
        fopen(commandPortA);
    catch
        errordlg( 'Dispositivo A não disponível.', 'Erro de Conexão')
        return
    end
    disp('Signal A')
    try
        fopen(signalPortA);
    catch
        errordlg( 'Dispositivo A não disponível.', 'Erro de Conexão')
        return
    end
    disp('command B')
    try
        fopen(commandPortB);
    catch
        errordlg( 'Dispositivo B não disponível.', 'Erro de Conexão')
        return
    end
    disp('signal B')
    try
        fopen(signalPortB);
        conexao = 1;
    catch
        errordlg( 'Dispositivo B não disponível.', 'Erro de Conexão')
        return
    end
end

pause(1)

% Flush rubbish data
pause(1) %% tempo necessário para o python realizar o flush

flushinput(commandPortA)
flushinput(commandPortB)
flushinput(signalPortA)
flushinput(signalPortB)

%% GET AbsSeconds and GPS Status

```

```

disp('adquirindo gps')
[gpsStatusA, gpsStatusB, gpsAbsSecond] = f_leituraEstado(commandPortA,
commandPortB);

if (gpsAbsSecond == 0 || gpsStatusA == 0 || gpsStatusB == 0)
    errordlg( 'Erro de sincronia entre os módulos!')
    return
end

if (gpsAbsSecond == 0 || gpsStatusA == 0 || gpsStatusB == 0)
    errordlg( 'Erro de sincronia entre os módulos!')
    return
end

if (gpsAbsSecond == 0 || gpsStatusA == 0 || gpsStatusB == 0)
    return
end

%% Convert AbsSeconds(A) to format: HH:MM:ss, and print in edits tags
if gpsAbsSecond > 0
    % Calculate Time
    gpsHour = floor ( gpsAbsSecond / (60*60));
    gpsMinute = floor ( (gpsAbsSecond - gpsHour * (60*60)) / 60 );
    gpsSecond = gpsAbsSecond - (gpsHour * (60*60)) - (gpsMinute * 60);
end

```

Rotina de Leitura do Estado das Unidade Coletoras/Transmissoras

```

function [gpsStatusA, gpsStatusB,
gpsAbsSecond]=f_leituraEstado(commandPortA, commandPortB)
%%Init Variables
gpsStatusA = 0;
gpsStatusB = 0;
gpsAbsSecond = 0;

%% Read GPS State and Date
% Flush rubbish data
flushinput(commandPortA)
flushinput(commandPortB)

% Request data System A
disp('Solicitando informações GPS do Sistema A')
try
    fprintf(commandPortA, 'GS,');

catch
    errordlg('Falha de transmissão em A, encerrando o programa')
    return

```

```

end
% Request data System B
disp('Solicitando informações GPS do Sistema B')
try
    fprintf(commandPortB, 'GS,');
catch
    errordlg('Falha de transmissão em B, encerrando o programa')
    return
end

% Receive data A
disp('Recebendo informações GPS do Sistema A')
try
    dataA = strsplit(fscanf(commandPortA, '%s'),',,')
catch
    errordlg('Falha de recepção, encerrando o programa')
    return
end

% Receive data B
disp('Recebendo informações GPS do Sistema B')
try
    dataB = strsplit(fscanf(commandPortB, '%s'),',,')
catch
    errordlg('Falha de recepção em B, encerrando o programa')
    return
end

% GPS Status and Day Time em Seconds
try
    gpsStatusA      = str2double(dataA(2));
    gpsAbsSecondA    = str2double(dataA(1));
catch
    errordlg('Dados invalidos recebidos de A, encerrando o programa')
    return
end

try
    gpsStatusB      = str2double(dataB(2));
    gpsAbsSecondB    = str2double(dataB(1));
catch
    errordlg('Dados invalidos dos dados recebidos de B, encerrando o
programa')
    return
end

% Network Data Test A
disp('Testando consistencia dos dados GPS')
if not((gpsStatusA>=0 && gpsStatusA<3)&& (gpsAbsSecondA>=0
&&gpsAbsSecondA<86400))
    errordlg('Falha de Comunicacao com A! Finalizando programa.')
    return
end

% Network Data Test B
if not((gpsStatusB>=0 && gpsStatusB<3)&& (gpsAbsSecondB>=0
&&gpsAbsSecondB<86400))
    errordlg('Falha de Comunicacao com B! Finalizando programa.')
    return
end
end

```

```

% GPS Link Test A
if gpsAbsSecondA == 0 || gpsStatusA==0
    errordlg('Sinal de GPS A indisponível no momento! Finalizando
programa.')
    return
end

% GPS Link Test B
if gpsAbsSecondB == 0 || gpsStatusB==0
    errordlg('Sinal de GPS B indisponível no momento! Finalizando
programa.')
    return
end

% Sync Test A-B
if gpsAbsSecondA ~= gpsAbsSecondB
    errordlg('Falta de sincronia entre os módulos A e B. 161')
    return
end

gpsAbsSecond = gpsAbsSecondA;

```

Rotina de Configuração de Aquisição

```

% --- Executes on button press in start.
function [signAc,signBc] = f_iniciar_aquisicao()
% hObject      handle to start (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Acquisition_window
global commandPortA commandPortB conexao gpsAbsSecond signalPortA
signalPortB rate buffer t
    signAc = 0;
    signBc = 0;
%% Rodar rotina de conexão
[gpsHour,gpsMinute,gpsSecond] = f_conexao();

fprintf('GPS Time: %2d:%2d:%2d \n', gpsHour,gpsMinute,gpsSecond)

if (gpsHour+gpsMinute+gpsMinute) == 0
    errordlg( 'Erro de conexão.', 'Erro de Conexão')
    return
end

%% Setup Signal Acquisition
    %disp('Configurando nova aquisicao')

    offset          = 0;
    plus time to cut signal ( 1 second and a bit)
    timeWindow      = t; % time to acquisition

```

```

    timeStartDelay = 3; %
    time to start the acquisition
    acquisitionTime = timeWindow + offset; %
    total acquisition time

    % Start the Acquisition

    [signA, signB] = f_aquisicao(gpsAbsSecond,
    timeStartDelay,acquisitionTime,commandPortA, commandPortB,signalPortA,
    signalPortB, rate, buffer);

    if conexao == 0
        instrreset()
        return
    end

    save('lastsignal.mat','signA','signB')
    % signAc = f_corte(signA, timeWindow,rate);
    % signBc = f_corte(signB, timeWindow,rate);

    signAc = signB-mean(signB);
    signBc = signA-mean(signA);

    signAc = signAc ./ max(max(abs([signAc signBc])));
    signBc = signBc ./ max(max(abs([signAc signBc])));
    % figure
    % subplot 211, plot(signAc),subplot 212, plot(signBc)

    % Save Signals
    date=clock();

    wav_save_filename=strcat('leak_',num2str(date(1)),'_',num2str(date(2)),'_',
    num2str(date(3)),'_',num2str(date(4)),'_',num2str(date(5)),'.wav');
    audiowrite(wav_save_filename,[signAc; signBc]',rate)

```

Rotina de Aquisição dos Dados

```

function [signA,signB]=f_aquisicao(currentTime,
timeStartDelay,timeWindow,commandPortA, commandPortB,signalPortA,
signalPortB, rate, buffer)
global conexao
conexao = 0;
%% Initi Variables
    acquisitionTime = timeWindow;
    n_packets = floor(2*acquisitionTime*rate/buffer); % Total number of
packets
    packetSize = buffer/2;
    signA = zeros(1,n_packets*packetSize); % Signal A ( zeros)
    signB = zeros(1,n_packets*packetSize); % Signal B ( zeros)

%% Send NewRecord commands

```

```

% Send Reccording command
    startTime = currentTime + timeStartDelay;
    endTime    = currentTime + timeStartDelay + timeWindow;

% Flush rubbish data
    flushinput(commandPortA)
    flushinput(commandPortB)

%Send System A
    try
        fprintf(commandPortA, 'NR,%0.0f,%0.0f\n', [startTime,
endTime]);

    catch
        errordlg('Falha envio para Sistema A, encerrando o programa',
'Erro de Conexão');
        return
    end
%Send System B
    try
        fprintf(commandPortB, 'NR,%0.0f,%0.0f\n',
[startTime,endTime]);
    catch
        errordlg('Falha envio para Sistema B', 'Erro de Conexão');
        return
    end

%% Received confirm Data A
%disp('Recebendo confirmação Sistema A')
    try
        dataA = strsplit(fscanf(commandPortA),',');
        if cellfun('isempty', dataA), ERROR, end
    catch
        errordlg('Falha resposta Sistema A', 'Erro de Conexão')
        return
    end
    fprintf('%s: ',dataA{2}), disp(dataA{3})
% Received confirm Data B
%disp('Recebendo confirmação Sistema B')
    try
        dataB = strsplit(fscanf(commandPortB),',');
        if cellfun('isempty', dataB), ERROR, end
    catch
        errordlg('Falha resposta Sistema B', 'Erro de Conexão')
        return
    end
    fprintf('%s: ',dataB{2}), disp(dataB{3})

% On error A:
    if str2double(dataA{1})<100
        errordlg('Falha no sinal de GPS A!', 'Erro de GPS')
        return
    end
% On error B:
    if str2double(dataB{1})<100
        errordlg('Falha no sinal de GPS B', 'Erro de GPS')
        return
    end
end

```

```

%% Waiting for Pre Trigger and Start Signal Transmission
    %disp('Aguardando Pré-Trigger')
    flushinput(commandPortA)
    flushinput(commandPortB)
    %Start timer counter
    tic
    %Waiting....
                                % (BytesAvailable == 0, no data)

    while ((commandPortA.BytesAvailable == 0) || (
commandPortB.BytesAvailable == 0))
        pause(0.01)
        % caso não haja pretriger em timestartdelay + 2s
        if toc > (timeStartDelay + 2)
            disp(toc)
            disp(timeStartDelay + 2)
            disp('Falha recebimento Pretriger.')
            if commandPortA.BytesAvailable == 0
                errordlg('Falha em A', 'Erro inicio da aquisição')
            end
            if commandPortB.BytesAvailable == 0
                errordlg('Falha em B', 'Erro inicio da aquisição')
            end
            return
        end
    end
    end
    [~,] = toc;

    %disp('Lendo confirmação de PreTriger A')
    % Read A
    dataA = strsplit(fscanf(commandPortA),',');
    fprintf('%s: ',dataA{2}), disp(dataA{3})
    % Read B
    %disp('Lendo confirmação de PreTriger B')
    dataB = strsplit(fscanf(commandPortB),',');
    fprintf('%s: ',dataA{2}), disp(dataA{3})

    % On error A:
    if str2double(dataA{1})<100
        errordlg('Erro recepção dos dados do Sistema A','Erro de
Recepção')
        return
    end
    % On error B:
    if str2double(dataB{1})<100
        errordlg('Erro recepção dos dados do Sistema A','Erro de
Recepção')
        return
    end

    % se estiver tudo ok!
    % disp('Abrindo portas de sinal!')
    % if strcmp(dataA{1},'101') && strcmp(dataB{1},'101')
    %     % Open Signal Port
    %     fopen(signalPortA);
    %     fopen(signalPortB);
    % end

```

```

%      disp('Iniciando aquisicao')
%% Signal acquisition
% start time transfer
tic
%      fprintf('Adquirindo %g segundos...\n',timeWindow)
% Clear previous data
flushinput(commandPortA)
flushinput(commandPortB)
%flushinput(signalPortA)
%flushinput(signalPortB)
%      fread(signalPortA,64,'int16'); % read wave headromm
%      fread(signalPortB,64,'int16'); % uint8 -> buffer, S16_LE ->
buffer/2

% Receive loop
f = waitbar(0,'Please wait...');          %%% waitbar
drawnow
tic

for i=1:n_packets;
    wbt = (toc/timeWindow);                %%% waitbar
    waitbar(wbt,f,'Adquirindo dados...');  %%% waitbar
    drawnow
    % Check for GPS errors A
    if commandPortA.BytesAvailable > 0
        data = strsplit(fscanf(commandPortA),',');
        if str2double(data{1})<100
            errordlg('Erro recepção dos dados do Sistema A','Erro de
Recepção')
            fclose(signalPortA );
            fclose(signalPortB );
            return
        end
    end
    % Check for GPS errors B
    if commandPortB.BytesAvailable > 0
        data = strsplit(fscanf(commandPortB),',');
        if str2double(data{1})<100
            errordlg('Erro recepção dos dados do Sistema A','Erro de
Recepção')
            fclose(signalPortA);
            fclose(signalPortB);
            return
        end
    end
    %if all is ok!
    packetA=fread(signalPortA,packetSize,'int16');          % uint8 ->
buffer, S16_LE -> buffer/2
    packetB=fread(signalPortB,packetSize,'int16');          % uint8 ->
buffer, S16_LE -> buffer/2
    signA(1+(i-1)*packetSize:i*packetSize) = packetA';      %sign =
sign + packet
    signB(1+(i-1)*packetSize:i*packetSize) = packetB';      %sign =
sign + packet
end

waitbar(1,f,'Aquisição completa. ');    %%% waitbar
drawnow

```

```

% End of acquisition

disp('Aquisição completa.')
beep

% Stop time transfer
%t_transf=toc;
%fprintf('Tempo decorrido: %g s. \n',t_transf)
conexao = 1;
close(f)   %%% waitbar

```

O Protótipo 01 que utiliza o circuito externo de sincronização por chaveamento do sinal, tem no início do sinal coletado uma parte com amplitude desprezível e não sincronizado no tempo. Para a remoção deste artefato é utilizada a rotina abaixo que detecta o local de corte baseada na amplitude do sinal.

Rotina de Corte do Sinal não Sincronizado

```

function [signC,i_clack]=f_corte(sign,timeWindow, rate)

% Variables
for i=1:rate
    if abs(sign(i)) > 10000
        i_clack = i;
        break
    end
end

%Signal Cut
signC = sign(i_clack:i_clack+timeWindow*rate);

```

A rotina acima não é necessária quando utilizado o Protótipo 02, uma vez que a coleta do sinal por meio deste dispositivo já é sincronizada.