

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Sistema de Monitoramento da Contaminação
por Umidade em Óleos Combustíveis
através da Análise de Sinais Ultrassônicos

Carlos Eduardo Teixeira

Itajubá, Dezembro de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Carlos Eduardo Teixeira

Sistema de Monitoramento da Contaminação
por Umidade em Óleos Combustíveis
através da Análise de Sinais Ultrassônicos

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos
para obtenção do Título de Doutor em Ciências em
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétri-
cos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva
Co-Orientador: Prof. Dr. Giscard Francimeire Cintra
Velooso

Dezembro de 2019

Itajubá - MG

*Este trabalho é dedicado a meus pais, a meu irmão, a minha noiva e,
em especial, a meu anjo-da-guarda, Juninho,
que durante o doutorado estiveram ao meu lado em todos os momentos.*

Agradecimentos

A Deus, pelas oportunidades oferecidas em toda minha vida.

A meus pais, a meu irmão e a meus parentes, que me apoiaram incondicionalmente durante toda minha trajetória.

A minha noiva, pelo suporte, paciência, amor e carinho.

Aos professores Luiz Eduardo, Giscard e Germano, pelo apoio, amizade e ajuda ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao grande professor Ismael por toda ajuda e apoio. Sem ele, este trabalho não teria sido concluído.

Aos colegas de trabalho, Ramon, Mateus, Bruno, Camila e Wilson, pela ajuda no dia-a-dia.

Aos amigos da universidade e de minha cidade, pelo incentivo e colaboração.

À CAPES e ao Instituto Gnarus, pelo apoio financeiro para desenvolvimento deste trabalho.

À ANEEL, através de seu Programa de Pesquisa e Desenvolvimento, pelo suporte a este trabalho.

À empresa parceira PS Soluções, em especial, Erik e Levy, pelo acolhimento e confiança.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Se vi mais longe foi por me apoiar
sobre ombros de gigantes.”*

Isaac Newton, cientista, físico e matemático

Resumo

A capacidade de geração de usinas termelétricas (UTES) depende diretamente da qualidade do óleo combustível utilizado. Além de diminuir a eficiência da mesma, combustíveis contendo elevados níveis de contaminantes podem causar prejuízos ao próprio sistema e também ao ambiente. Devido aos danos causados quando em contato com outros contaminantes (e.g., enxofre), além da facilidade de adulteração pela simples adição da mesma, a água, solvente universal, se torna um dos contaminantes mais críticos. Assim, para análise do óleo utilizado, as UTES normalmente recorrem a testes laboratoriais. Embora esta abordagem ofereça boa precisão e bom detalhamento quanto a presença de contaminantes, longos períodos de tempo são exigidos até a obtenção dos resultados. Em posse dessas informações, este trabalho visa a analisar a contaminação por umidade presente em amostras de óleo combustível através da emissão, recepção e análise de sinais ultrassônicos. Para identificação dos níveis de contaminação e classificação das diferentes amostras de óleo, a abordagem recorre ao uso da Análise de Componentes Principais (PCA). Esta metodologia resultou em uma expressão que relaciona o valor de *score*, obtido da técnica de PCA, e a informação da razão água/óleo, possibilitando a aplicação *online* do sistema desenvolvido e, conseqüentemente, reduzindo o tempo de obtenção da informação desejada. O protótipo utilizado neste trabalho foi integralmente desenvolvido, garantindo versatilidade para os diversos testes e ajustes realizados. Este trabalho apresenta os resultados obtidos em laboratório e em campo. Foi possível comparar o sistema proposto com um sensor capacitivo. Uma diferença máxima de 0,2 ponto percentual foi verificada entre ambas as abordagens.

Palavras-chaves: ultrassom, sistema ultrassônico, óleo combustível pesado, umidade, análise de componentes principais.

Abstract

The generation capacity of thermoelectric plants depends directly on the quality of the fuel oil used. Besides reducing the efficiency, fuels containing high levels of contaminants may jeopardize the system itself and also the environment. Due to damage caused when it is in contact with other contaminants (e.g., sulfur), added to the ease of adulteration by the simple addition of it, water, the universal solvent, becomes one of the most critical contaminants. Thus, for the analysis of fuel oil, thermoelectric plants usually counts on laboratory tests. Although this approach offers good precision and good detail about the presence of contaminants, long periods of time are required until results are obtained. Upon such preliminary information, this work aims to analyze the moisture contamination of fuel oil samples by emitting, receiving and analysing ultrasonic signals. In order to identify the levels of contamination and classify the different fuel oil samples, the approach implements the Principal Component Analysis (PCA). This methodology leads to an expression that relates the score value issued from PCA and the water/oil ratio information, allowing the online application of the developed system and, consequently, reducing the time to obtain the desired information. The prototype used in this work was fully developed, guaranteeing versatility for all tests and adjustments made. We could also compare the proposed system with a capacitive sensor under field conditions. We verified a maximum difference of 0.2 percentage point between both approaches.

Key-words: ultrasound, ultrasonic system, heavy fuel oil, moisture, water content, principal component analysis.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação do sistema considerado.	16
Figura 2 – Esquema simplificado do refino do petróleo.	19
Figura 3 – Onda longitudinal.	26
Figura 4 – Onda transversal.	27
Figura 5 – Onda superficial.	27
Figura 6 – Periodicidade de uma onda transversal.	27
Figura 7 – Onda senoidal $y(0, t) = A\cos(\omega t)$	28
Figura 8 – Transdutor Reto ou Normal.	33
Figura 9 – Transdutor Angular.	33
Figura 10 – Transdutor de Duplo Cristal.	34
Figura 11 – Resposta em frequência de transdutores ultrassônicos.	35
Figura 12 – Modo contínuo.	35
Figura 13 – Modo pulsado.	36
Figura 14 – Pulso de onda quadrada.	36
Figura 15 – Pico de tensão.	37
Figura 16 – Impulso-eco ou pulso-eco.	37
Figura 17 – Transparência ou transmissão.	38
Figura 18 – Decomposição de um vetor geométrico.	40
Figura 19 – Visualização no domínio do tempo vs domínio da frequência através da Transformada de Fourier.	41
Figura 20 – Estrutura simplificada da <i>Modulation Spectra</i>	44
Figura 21 – <i>Modulation Spectra</i> do sinal exemplo.	45
Figura 22 – Direção das variâncias	48
Figura 23 – Transdutores ultrassônicos fabricados.	56
Figura 24 – Espectro de impedância do cristal piezoelétrico utilizado.	57
Figura 25 – Cubeta de vidro com os transdutores ultrassônicos.	57
Figura 26 – Sistema em análise e função de transferência.	58
Figura 27 – Pulsos ultrassônicos de interesse no modo de operação pulsado.	58
Figura 28 – Pulsos ultrassônicos obtidos com o protótipo desenvolvido.	59
Figura 29 – Pulso ultrassônico no domínio do tempo e no domínio da frequência.	59
Figura 30 – Filtro de papel crepado.	60
Figura 31 – Projeções sobre a PC#1 obtida com a Transformada de Fourier no primeiro ensaio.	63
Figura 32 – Projeções sobre a PC#1 obtida com a <i>Modulation Spectra</i> no primeiro ensaio.	63

Figura 33 – Projeções sobre a PC#1 obtida com a Transformada de Fourier no primeiro ensaio.	64
Figura 34 – Projeções sobre a PC#1 obtida com a <i>Modulation Spectra</i> no primeiro ensaio.	64
Figura 35 – Composição da PC#1 obtida a partir da Transformada de Fourier. . .	65
Figura 36 – Médias dos espectros.	66
Figura 37 – Parâmetro com a maior contribuição para a formação da PC#1.	66
Figura 38 – Estimação de água de acordo com os valores de <i>score</i> para a a PC#1. .	67
Figura 39 – Instalação em campo do protótipo em um dos terminais de abasteci- mento de óleo combustível.	68
Figura 40 – Ilustração do esquema de monitoramento.	69
Figura 41 – Características da medição.	69
Figura 42 – Sensor capacitivo desenvolvido.	70
Figura 43 – Esquema de ligação do sensor capacitivo.	70
Figura 44 – Sensor capacitivo integrado ao protótipo em campo.	71
Figura 45 – Resultados obtidos a partir da sistema proposto durante o abasteci- mento ocorrido em 20/Set/2018 às 10:48.	73
Figura 46 – Resultados obtidos a partir da sistema proposto durante o abasteci- mento ocorrido em 26/Set/2018 às 07:36.	73
Figura 47 – Resultados obtidos a partir da sistema proposto durante o abasteci- mento ocorrido em 27/Set/2018 às 19:02.	73
Figura 48 – Diagrama de blocos do funcionamento do protótipo eletrônico	80
Figura 49 – Funcionamento do bloco pulsador (modo bipolar).	81
Figura 50 – Diagrama do circuito de proteção de pinos digitais.	82
Figura 51 – Diagrama do circuito de condicionamento e amplificação.	82
Figura 52 – Módulos básicos do sistema eletrônico.	83
Figura 53 – Sistema eletrônico sem o módulo de proteção.	84
Figura 54 – Sistema eletrônico com o módulo de proteção.	84
Figura 55 – Protótipo eletrônico completo.	85
Figura 56 – Protótipo eletrônico completo montado sobre plataforma.	85
Figura 57 – Plataforma de desenvolvimento STEMLab [®]	86
Figura 58 – Seleção do componente alvo no Vivado.	87
Figura 59 – IP referente ao PS Zynq [®] - 7000.	88
Figura 60 – Acesso às portas de saída pelo PS via AXI <i>Interconnect</i> e bloco AXI GPIO.	89
Figura 61 – Bloco correspondente ao módulo Verilog desenvolvido.	91
Figura 62 – Fluxograma do programa desenvolvido para controle do hardware. . . .	92
Figura 63 – Blocos do hardware desenvolvido.	97
Figura 64 – Bloco correspondente ao código Verilog desenvolvido.	98

Lista de tabelas

Tabela 1 – Frações típicas do petróleo	19
Tabela 2 – Especificação de Óleos Combustíveis.	24
Tabela 3 – Ponto de Fluides Superior, °C.	24
Tabela 4 – Ensaio de contaminação em passos de 1%.	61
Tabela 5 – Composição da PC#1 obtida a partir da Transformada de Fourier.	65
Tabela 6 – Razão água-óleo <i>versus</i> Valor de <i>score</i>	67
Tabela 7 – Resultados obtidos em campo durante o mês de Setembro de 2018.	72
Tabela 8 – Descrição dos pinos de entrada do bloco desenvolvido.	91

Lista de abreviaturas e siglas

UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
IESTI	Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologias da Informação
BIG	Banco de Informações de Geração
UTE	Usina Termelétrica
OC	Óleo Combustível
ADC	“ <i>Analog-to-Digital Converter</i> ”, conversor analógico-digital
SNR	“ <i>Signal-to-Noise Ratio</i> ”, relação sinal-ruído
SoC	“ <i>System-on-a-Chip</i> ”, sistema em um circuito integrado
GPIO	“ <i>General Purpose Input/Output</i> ”, entrada/saída de propósito geral
ESD	“ <i>ElectroStatic Discharge</i> ”, descarga eletroestática
FPGA	“ <i>Field Programmable Gate Array</i> ”, arranjo de portas programáveis em campo
PCI	Placa de Circuito Impresso
PCA	“ <i>Principal Component Analysis</i> ”, análise de componentes principais
SVD	“ <i>Singular Value Decomposition</i> ”, decomposição em valores singulares

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Considerações Iniciais	14
1.2	Motivação e Objetivos	15
1.3	Hipótese e Metodologia	15
1.4	Organização do Trabalho	16
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	18
2.1	Óleo Combustível e a ANP	18
2.1.1	Óleo combustível	18
2.1.1.1	Principais componentes e características	20
2.1.1.2	Principais contaminantes	21
2.1.1.3	Tipos de óleos combustíveis	22
2.1.2	Resoluções ANP	23
2.1.2.1	Resolução ANP N° 3 DE 27/01/2016	23
2.1.3	Adulteração	25
2.2	Técnicas Ultrassônicas	25
2.2.1	Acústica	25
2.2.1.1	Tipos de ondas	26
2.2.1.2	Ondas periódicas	27
2.2.1.3	Descrição matemática das ondas	28
2.2.1.4	Velocidade e aceleração de uma partícula em uma onda senoidal	29
2.2.1.5	Velocidade das ondas mecânicas	29
2.2.2	Ondas ultrassônicas	30
2.2.2.1	Efeito piezoelétrico	30
2.2.2.2	Velocidade e a equação das ondas ultrassônicas	31
2.2.3	Sistemas ultrassônicos	32
2.2.3.1	Tipos de transdutores ultrassônicos piezoelétricos	32
2.2.3.2	Resposta em frequência de transdutores ultrassônicos	34
2.2.3.3	Modos de operação de um transdutor ultrassônico	34
2.2.3.4	Métodos de análise	37
2.3	Transformações Matemáticas	38
2.3.1	Transformada de Fourier	41
2.3.2	<i>Modulation Spectra</i>	42
2.3.2.1	Algoritmo da <i>Modulation Spectra</i>	43
2.4	Análise de Componentes Principais	45

2.4.1	Mudança de base	46
2.4.2	Variância e o ruído	47
2.4.3	Redundância e a matriz de covariância	48
2.4.4	Decomposição em autovalores	50
2.4.5	Decomposição em valores singulares	52
2.4.6	Interpretação das componentes principais	55
3	ENSAIOS LABORATORIAIS	56
3.1	Resposta em Frequência dos Transdutores Ultrassônicos	56
3.2	Definições do Sinal de Excitação e do Sistema de Aquisição	57
3.3	Processo de Secagem	60
3.4	Processo de Contaminação Controlada	60
4	APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE PCA	62
4.1	Classificação de Amostras	62
4.2	Estimação da Contaminação por Umidade	63
5	INSTALAÇÕES EM CAMPO	68
5.1	Características da Medição	68
5.2	Sensor Capacitivo	70
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
7	CONCLUSÃO	74
7.1	Trabalhos Futuros	75
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICES	79
	APÊNDICE A – SISTEMA DESENVOLVIDO	80
A.1	Sistema Eletrônico	80
A.2	Customização da Plataforma de Desenvolvimento	86
A.2.1	Hardware	87
A.2.2	Software	92
	APÊNDICE B – SOFTWARE VIVADO®	93
	ANEXOS	99

1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

De acordo com o Banco de Informações de Geração (ou BIG) da ANEEL, cresce o número de usinas a óleo combustível (OC) e a óleo diesel, que juntas já representam quase 6% de toda a capacidade instalada em território nacional. Embora estejam associadas a pontos negativos no que concerne o meio ambiente, essas usinas termelétricas (ou UTEs) aumentam a confiabilidade do sistema devido à diversificação, principalmente em épocas de grandes secas, sendo assim essenciais.

A eficiência dessas usinas depende fortemente da qualidade do combustível utilizado. Assim, óleos com elevados níveis de contaminantes podem, além de diminuir a eficiência da geração, causar danos ao próprio sistema e ainda ao ambiente. Óleos combustíveis, por exemplo, apresentam enxofre, vanádio, sódio e outras substâncias que podem gerar componentes tóxicos e/ou corrosivos. Além destes elementos, outra substância, bastante inofensiva em alguns casos, mas demasiadamente crítica neste contexto, está presente: a água.

A água pode causar inúmeros danos, tanto de forma isolada (e.g., cavitação de bombas, pulsação na chama, aumento do consumo durante a queima, etc.) quanto de forma combinada a outros elementos (e.g., junto ao enxofre leva à formação de H_2SO_4). Através da quantidade de água presente no combustível utilizado, pode-se, inclusive, inferir a quantidade de energia gerada, ou em outras palavras, prever os lucros futuros. Como a água é parte inerente ao processo de obtenção de OCs, é essencial garantir que seus níveis não ultrapassem certos limites, tornando seu monitoramento uma das etapas fundamentais ao processo.

A Resolução ANP N° 3 de 27/01/2016 (DOU 28/01/2016) (1) estabelece as especificações dos óleos combustíveis e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional. Embora tal resolução defina os níveis máximos de alguns contaminantes, como por exemplo os níveis aceitáveis de água, tais limites podem ainda não ser adequados e não garantir a eficiência da máquina, visto que alguns modelos sugerem óleos com níveis de água inferiores aos impostos pela resolução.

Outro problema agravante em relação ao nível de água ocorre durante o transporte da distribuidora até à usina geradora. Neste ponto, vários casos de fraudes são constatados. Estas adulterações ocorrem usualmente através da retirada de determinada quantidade de óleo – para venda ilegal – e posterior adição de água.

1.2 Motivação e Objetivos

Para análise da qualidade de OCs utilizados na queima, muitas UTEs recorrem inicialmente às análises laboratoriais. Para isso, determinadas amostras são retiradas em pontos específicos do processo, como: durante abastecimento, após tratamento ou até mesmo antes de sua injeção nos motogeradores. Tal método de análise oferece boa precisão e bom detalhamento quanto a presença de contaminantes, porém longos períodos de tempo são necessários até a obtenção de um simples laudo, visto que este procedimento envolve a parada de parte do processo, transporte das amostras até os laboratórios e a execução de longos testes químicos.

Visando ao monitoramento contínuo do OC, uma UTE pode optar pelos conhecidos medidores de *water-cut*, ou medidores de conteúdo de água. A grande maioria destes dispositivos operam pelo princípio capacitivo. Devido a diferença expressiva entre a permissividade relativa do OC e da água, alterações na razão água/óleo causam variações na capacitância medida (2). Embora os resultados obtidos a partir destes dispositivos sejam satisfatórias, os custos associados à fabricação e à instalação são geralmente elevados.

Em posse dessas informações, este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia que visa à estimação da contaminação por umidade em óleos combustíveis através da geração, recepção e análise de sinais ultrassônicos, de forma que possibilite principalmente uma aplicação *online*, reduzindo substancialmente o tempo de obtenção do conteúdo de água presente. Além da metodologia em si, o desenvolvimento de um completo sistema ultrassônico, base para este trabalho, é apresentado.

1.3 Hipótese e Metodologia

A hipótese que direciona este trabalho se reside inicialmente no fato de que há possibilidade de classificação de amostras de óleo com diferentes teores de água através da análise de sinais ultrassônicos que por elas atravessam (3). O fluido é considerado o sistema em análise, enquanto os sinais emitidos e recebidos são, respectivamente, a entrada e a saída deste sistema. Espera-se que, mantendo-se o sinal de excitação constante, o sinal de saída varie de acordo com a característica da amostra, como ilustra a Figura 1.

Devido à característica não-estacionária de tais sinais, a abordagem consiste em utilizar transformações matemáticas (e.g., Transformada de Fourier) para evidenciar características que possam estar associadas à grandeza de interesse. À priori, como não se tem noção sobre quais parâmetros serão mais ou menos sensíveis à presença de água, o presente trabalho se apoia na conhecida técnica estatística chamada Análise de Componentes Principais (PCA), que buscará a sensibilidade de cada parâmetro na composição do sinal de cada amostra. Uma breve comparação entre a representação de Fourier e a

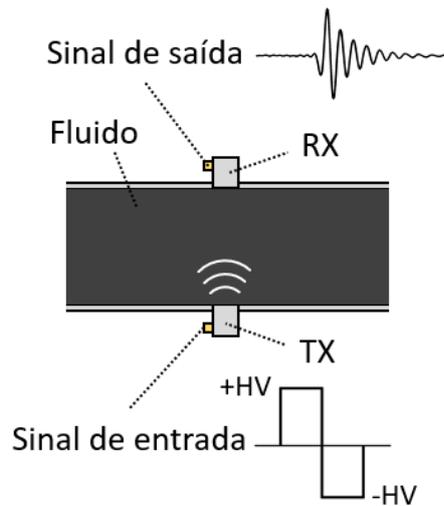


Figura 1 – Representação do sistema considerado.

representação conhecida como *Modulation Spectra* é realizada.

Além do desenvolvimento de um sistema ultrassônico, capaz de emitir, receber, condicionar e processar sinais ultrassônicos, o presente trabalho se apoiará em experimentos laboratoriais para contaminação forçada das amostras de óleo, visando a encontrar a assinatura ultrassônica de cada amostra.

Por fim, com o objetivo de validar a abordagem proposta, os resultados obtidos em campo através do sistema desenvolvido são comparados aos de um sensor capacitivo, haja vista que o princípio capacitivo é altamente sensível à presença de água.

1.4 Organização do Trabalho

Com o objetivo de fornecer todo o conteúdo necessário ao entendimento da abordagem proposta, o Capítulo 2 detalha o estudo teórico realizado, exibindo desde conceitos relacionados aos óleos combustíveis e à sua agência regulamentadora, até tópicos relacionados às ondas acústicas e sistemas ultrassônicos. Devido à falta de fontes bibliográficas e/ou à complexidade de alguns tópicos, os conceitos sobre *Modulation Spectra* e Análise de Componentes Principais são abordados.

Os experimentos laboratoriais realizados, como o processo de secagem e os ensaios de contaminação das amostras de óleo combustível, são apresentados no Capítulo 3.

O Capítulo 4 apresenta a aplicação da técnica de PCA na classificação de amostras e na estimação da contaminação por umidade em óleos combustíveis.

A partir do modelo obtido, o Capítulo 5 se concentra na etapa de instalação em campo, abordando as devidas considerações feitas, bem como o desenvolvimento do sensor capacitivo.

A verificação dos resultados obtidos a partir da metodologia proposta é feita e discutida no Capítulo 6.

A tese é finalizada no Capítulo 7 com as conclusões obtidas e propostas para trabalhos futuros.

2 Fundamentos Teóricos

2.1 Óleo Combustível e a ANP

Esta seção apresenta uma introdução sobre óleos combustíveis, além de uma discussão sobre as resoluções da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) relacionadas. Por fim, uma breve discussão sobre adulteração em combustíveis é apresentada.

2.1.1 Óleo combustível

O óleo combustível é um derivado do petróleo que, por sua vez, é uma mistura de hidrocarbonetos, tais como alcanos, ciclanos e aromáticos. Ambos contém compostos sulfurados, nitrogenados, oxigenados, metálicos e impurezas orgânicas. Os principais elementos presentes são: carbono (83 a 87%), hidrogênio (11 a 14%), enxofre (0,05 a 8%), nitrogênio (0,1 a 1,7%), oxigênio (<0,5%) e metais (<0,3%) como ferro, níquel, sódio e vanádio (4).

Devido à imensa quantidade de constituintes, é praticamente impossível separar uma amostra de petróleo em componentes puros ou até mesmo misturas. Deste modo, o petróleo é normalmente separado em frações de acordo com a faixa de ebulição dos compostos. Resumidamente, seus derivados são produtos do processamento do óleo cru em dois tipos de processos (5), como ilustra a Figura 2. São eles:

- **Destilação atmosférica:** os grupos de frações são separadas por diferença de ponto de ebulição (ou pressão de vapor), numa coluna de destilação.
- **Destilação a vácuo:** extraído no resíduo de fundo da coluna atmosférica. O resíduo de destilação a vácuo é utilizado para produção de asfalto ou complementação da produção de óleo combustível.

A qualidade e a característica do petróleo determinam a faixa de extração de cada componente principal, embora os processos adicionais como o craqueamento¹ permitam uma pequena variação do ajuste. A Tabela 1 mostra as frações típicas que são obtidas do petróleo.

O óleo combustível é, portanto, a parte remanescente da destilação das frações do petróleo predominantemente composto de cadeias longas de hidrocarbonetos, parti-

¹ **Craqueamento térmico** ou **catalítico** é a transformação de frações pesadas do óleo em frações mais leves, ajustando o perfil da produção com as necessidades de mercado consumidor.

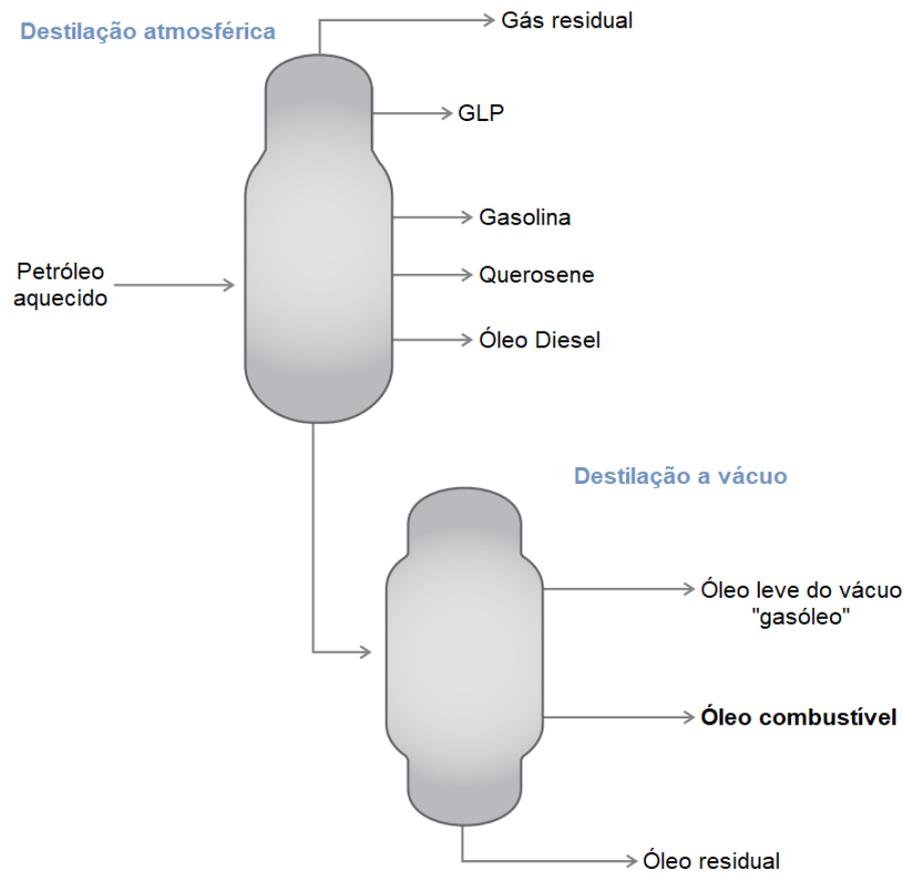


Figura 2 – Esquema simplificado do refino do petróleo. Fonte: Adaptado de (6).

Fração	$T_{ebulição}$ (°C)	Composição
Gás Residual	<40	$C_1 - C_2$
GLP		$C_3 - C_4$
Gasolina	40 a 175	$C_5 - C_{10}$
Querosene	175 a 235	$C_{11} - C_{12}$
Óleo combustível leve / diesel	235 a 305	$C_{13} - C_{17}$
Óleo combustível pesado	305 a 500	$C_{18} - C_{25}$
Lubrificantes	400 a 510	$C_{26} - C_{38}$
Resíduos	>510	C_{38+}

Tabela 1 – Frações Típicas do Petróleo. Fonte: Extraído de (7).

cularmente alcanos, cicloalcanos e aromáticos. Assim como o petróleo, possui entre estes compostos de carbono e hidrogênio, derivados que contêm enxofre, nitrogênio, oxigênio e pequenas quantidades de derivados compostos de metais como sódio, ferro, níquel, vanádio, entre outros.

Dentre suas principais aplicações, o óleo combustível é utilizado para geração de energia térmica em fornos, motogeradores e caldeiras. É conveniente que o óleo seja man-

tido aquecido no tanque para favorecer seu escoamento. Na queima, ele é novamente aquecido para reduzir sua viscosidade ao valor requerido pelo queimador, favorecendo a nebulização².

2.1.1.1 Principais componentes e características

Nesta seção, são discutidas as principais propriedades de óleos combustíveis. Os termos em inglês são colocados entre parênteses apenas para facilitar uma eventual busca do leitor na literatura.

- **Viscosidade (*Viscosity*):** medida da resistência ao escoamento a uma determinada temperatura. Está correlacionada com a consistência do óleo combustível. Quanto maior a viscosidade, mais consistente é o óleo e maiores as dificuldades de bombeio, manuseio e as pulverizações nos bicos queimadores industriais. É uma das características de maior importância do óleo combustível, que determinará as condições de manuseio e utilização do produto.
- **Ponto de Fulgor (*Flash Point*):** a temperatura máxima em que o produto pode ser armazenado e manuseado, sem risco sério de incêndio. Na antiga Portaria ANP N° 80/1999, essa propriedade é definida como “a menor temperatura na qual o produto se vaporiza em quantidades suficientes para formar com o ar uma mistura capaz de inflamar-se momentaneamente quando se aplica uma centelha”. É um dado de segurança para manuseio e também uma ferramenta de detecção de contaminação de produtos leves, como solventes e óleo diesel. Como o óleo combustível é aquecido para facilitar o deslocamento até os equipamentos de queima, a presença desses produtos mais leves provoca a emissão de vapores inflamáveis no ambiente, os quais podem irritar os olhos e as vias aéreas. Durante a queima, a presença desses vapores causa flutuações na chama.
- **Ponto de Fluidez (*Pour Point*):** temperatura mais baixa em que o combustível pode ser armazenado e ainda ser capaz de fluir sob a ação de forças muito pequenas. Na antiga Portaria ANP N° 80/1999, essa propriedade é definida como “a menor temperatura na qual o óleo combustível flui quando sujeito ao resfriamento sob condições determinadas de teste”. Estabelece condições de manuseio e estocagem. É uma indicação da temperatura na qual o óleo combustível pode ser escoado através dos dutos e equipamentos industriais, sem causar dificuldades de bombeamento ou entupimentos de filtros e linhas.

² **Nebulização** é a ruptura mecânica do líquido com o objetivo de gerar pequenas gotículas de diâmetro da ordem de $0,5\mu m$. Quanto menor o tamanho da gotícula, maior a facilidade de vaporização do produto o que é necessário para uma boa queima

- **Densidade relativa a 20/4°C (*relative density at 20/4°C*):** relação entre a massa específica do produto a 20°C e a massa específica da água a 4°C. Como dado isolado tem pouco significado no que se diz respeito ao desempenho de queima do óleo combustível. No entanto, associado a outras propriedades pode-se determinar o poder calorífico superior, e conseqüentemente a eficiência dos equipamentos em questão.
- **Índice de Aromaticidade de Carbono Calculada (*Calculated Carbon Aromaticity Index - CCAI*):** índice da qualidade de ignição de óleos combustíveis. É calculada pela expressão

$$CCAI = D - 140,7 \log(\log(V + 0,85)) - 80,6 - 483,5 \log\left(\frac{T + 273}{323}\right), \quad (2.1)$$

em que, D é a densidade a 15°C, dada em kg/m³, e V é a viscosidade cinemática, dada em mm²/s (cSt), a uma temperatura T , dada em °C. Seu valor está normalmente entre 800 e 880, sendo que os valores mais próximos de 800 representam um óleo com melhor qualidade de ignição.

Combustíveis com um CCAI maiores que 880 são frequentemente problemáticos ou ainda não utilizáveis em um motor a diesel.

2.1.1.2 Principais contaminantes

Nesta seção, são mostrados os principais contaminantes encontrados em óleos combustíveis, bem como os danos gerados.

- **Água:** normalmente encontrada na forma de umidade. Como óleos combustíveis exigem aquecimento durante armazenagem, transporte e queima, a água pode causar geração de espuma e/ou emulsões, as quais podem causar cavitação das bombas, transbordamento de tanques, devido à geração de vapor, pulsação na chama e aumento do consumo durante a queima, pois a água exige maior quantidade de energia para ser evaporada. Assim, é responsável pela corrosão, além de afetar a qualidade da queima nos queimadores.
- **Enxofre:** provavelmente o mais comum e mais conhecido contaminante. É um elemento indesejável em qualquer combustível devido à ação corrosiva de seus compostos e à formação de gases tóxicos como SO₂ (dióxido de enxofre) e SO₃ (trióxido de enxofre), que ocorre durante a combustão do produto. Na presença de água, o trióxido de enxofre leva à formação de ácido sulfúrico (H₂SO₄) que é altamente corrosivo para as partes metálicas dos equipamentos, além de ser poluente e principal causador da chuva ácida.

- **Vanádio:** forma o pentóxido de vanádio (V_2O_5), que é um catalisador da reação de formação de ácido sulfúrico. É também importante limitar sua quantidade no óleo combustível para prevenir a formação de depósitos duros, de difícil remoção. Em altas temperaturas, estes depósitos tornam-se altamente corrosivos, além de causarem a perda da eficiência térmica dos equipamentos.
- **Sódio:** é um metal alcalino geralmente encontrado na forma combinada de sal, NaCl. A presença simultânea de sódio e vanádio no óleo combustível faz aumentar os depósitos de difícil remoção, deixando-os ainda mais corrosivos, mesmo em temperaturas menores, pois estes elementos reduzem a temperatura de fusão das cinzas no óleo combustível.
- **Alumínio e Silício:** partículas duras e abrasivas, originadas na refinaria. Causam desgastes em várias partes do equipamento. São perigosas quando estão no tamanho entre 10 e 20 μm , pois tendem a ser atraídas pelas gotículas de água, tornando-se extremamente difíceis de serem removidas do óleo combustível. Por não estarem uniformemente distribuídas no óleo, são também difíceis de serem captadas em análises e testes.
- **Cinzas:** teor de resíduos inorgânicos, não combustíveis, apurado após a queima do produto. Depósitos de cinzas podem causar sobreaquecimentos localizados de superfícies metálicas, nas quais eles se aderem, levando até a corrosão das mesmas. Óleos combustíveis com baixo conteúdo de cinzas, vanádio e sódio são preferidos.

2.1.1.3 Tipos de óleos combustíveis

Os óleos combustíveis podem ser classificados com relação a sua viscosidade, basicamente em óleos combustíveis leves (menor viscosidade) e óleos combustíveis pesados (maior viscosidade). Os óleos combustíveis leves são também chamados de LFO (do inglês, *Light Fuel Oil*), enquanto os óleos combustíveis pesados são também chamados de HFO (do inglês, *Heavy Fuel Oil*).

Além disso, os óleos combustíveis podem também ser classificados quanto ao seu conteúdo de enxofre. No Brasil, são produzidos em duas variedades básicas de óleos combustíveis com relação ao seu teor de enxofre: óleos combustíveis com alto teor de enxofre (ATE) e óleos combustíveis com baixo teor de enxofre (BTE).

Por fim, os óleos combustíveis podem ser agrupados por seu ponto de fluidez em dois grupos: baixo ponto de fluidez (BPF) e alto ponto de fluidez (ABF), atendendo aos valores especificados por região e por sazonalidade de acordo com a tabela da ANP.

2.1.2 Resoluções ANP

Independentemente de sua classificação, os óleos combustíveis devem atender alguns requisitos de qualidade, os quais são determinados pela ANP. Dentre as resoluções consultadas, a Resolução ANP N° 3 DE 27/01/2016 (1) é brevemente comentada na subsecção a seguir, pois é a que aborda os requisitos de qualidade para comercialização de óleos combustíveis, informando também suas nomenclaturas usualmente encontradas no mercado.

Vale lembrar que cabe à ANP regular as atividades relativas à indústria do petróleo, gás natural e biocombustíveis e, na proteção dos interesses dos consumidores, quanto a preço, qualidade e oferta de produtos, estabelecer suas especificações. Além disso, cabe igualmente à ANP implementar a política nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis, com ênfase na garantia do suprimento de derivados de petróleo, gás natural e seus derivados e de biocombustíveis, em todo o território nacional.

2.1.2.1 Resolução ANP N° 3 DE 27/01/2016

A Resolução ANP N° 3 DE 27/01/2016 (antiga Portaria ANP N° 80 de 30/04/1999) estabelece as especificações dos óleos combustíveis e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam o produto em todo o território nacional.

A ANP, portanto, veda a comercialização dos óleos combustíveis que não se enquadrem nas especificações estabelecidas no Anexo, parte integrante desta Resolução. A Tabela 2, extraída do Anexo da Resolução, cita alguns dos requisitos abordados pela mesma.

O ponto de fluidez superior é sazonal e dependente da região, como apresenta a Tabela 3.

Em complemento, esta Resolução estabelece as seguintes nomenclaturas para o óleo combustível, conforme os limites de viscosidade e teor de enxofre definidos na Tabela 2. São elas:

- I - OCA1: óleos de maior teor de enxofre e menor limite de viscosidade;
- II - OCA2: óleos de maior teor de enxofre e maior limite de viscosidade;
- III - **OCB1: óleos de menor teor de enxofre e menor limite de viscosidade;**
- IV - OCB2: óleos de menor teor de enxofre e maior limite de viscosidade;
- V - OC3: óleos com viscosidade ou teor de enxofre superior aos limites especificados.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	TIPO				MÉTODO	
		OCB1	OCA1	OCB2	OCA2	ABNT	ASTM
Viscosidade Cinemática a 60°C, máx.	mm ² /s	620		960		NBR 10441	D445
							D1552
Teor de Enxofre, máx.	% massa	1,0	2,0	1,0	2,0	NBR 15546	D2622
							D4294
							D5453
Água e Sedimentos, máx.	% volume		2,0			NBR 14236	D95
						NBR 14938	D473
							D1796
Teor de Cinzas, máx.	% massa		Anotar			NBR 9842	D482
Resíduo de Carbono	% massa		Anotar			NBR 14318	D524
						NBR 15586	D4530
Ponto de Fulgor, mín.	°C		66			NBR 14598	D93
						NBR 7148	D1298
Massa específica a 20°C	kg/m ³		Anotar			NBR 14065	D4052
Ponto de Fluidez Superior, máx.	°C	ver Tabela 3		Anotar		NBR 11349	D97
Teor de Vanádio, máx.	mg/kg		150			-	D5863
							D5708

Tabela 2 – Especificação de Óleos Combustíveis. Fonte: Extraído de (1).

Unidades da Federação	Dez, Jan, Fev, Mar	Abr, Out, Nov	Mai, Jun, Jul, Ago, Set
DF-GO-MG-ES-RJ	27	24	21
SP-MS	24	21	18
PR-SC-RS	21	18	15
demais regiões	27	27	24

Tabela 3 – Ponto de Fluidez Superior, °C. Fonte: Extraído de (1).

A nomenclatura em destaque (OCB1) evidencia o tipo de óleo combustível utilizado nos testes e ensaios deste trabalho.

Conforme Tabela 2, verifica-se que a determinação das características dos produtos é realizada mediante o emprego de normas Brasileiras (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ou da ASTM (do inglês, *American Society for Testing and Materials*) *International*.

Por fim, a versão completa desta Resolução pode ser consultada no endereço eletrônico da ANP. Aqui foram mostrados somente alguns pontos julgados relevantes para o trabalho.

2.1.3 Adulteração

Embora a resolução mencionada defina os níveis máximos de alguns contaminantes, como por exemplo os níveis aceitáveis de água, tais limites podem ainda não ser adequados e não garantir a eficiência da máquina, visto que alguns modelos sugerem óleos com níveis de água inferiores aos impostos pela resolução. Ainda, mesmo que a distribuidora garanta um combustível dentro das especificações da máquina, este pode ser adulterado.

Adulteração em combustíveis é a adição de qualquer produto que modifique suas características originais, inviabilizando a garantia do produtor. Embora o refinador seja capaz de formular o combustível de forma a atender às especificações vigentes e às propriedades necessárias ao funcionamento adequado do motor, o óleo pode chegar com suas propriedades alteradas.

A principal e mais simples forma de adulteração de óleos combustíveis ocorre pela adição de água. Por exemplo, no caso em que enormes quantias de óleo são transportadas, torna-se quase imperceptível a remoção de pequenas quantias de óleo seguida da inserção de pequenas quantias de água. Assim, além de evitar a compra de água por preço de óleo, esta deve ser eliminada e mantida em níveis aceitáveis, de modo que não prejudique a eficiência do motor, ou ainda cause danos quando em contato com outros contaminantes.

Neste ponto, ressalta-se novamente uma das motivações para realização deste trabalho. O nível de água presente no combustível torna-se, portanto, uma informação relevante, não somente à qualidade do mesmo, mas à detecção de possíveis fraudes.

2.2 Técnicas Ultrassônicas

Para entender o fenômeno acústico produzido e captado por transdutores piezoelétricos, é importante compreender alguns aspectos relacionados à propagação de ondas acústicas. Assim, esta seção tem como objetivo definir conceitos importantes sobre ondas ultrassônicas, como suas propriedades e características, além de detalhar pontos julgados relevantes sobre sistemas ultrassônicos. Vale lembrar que a abordagem proposta se baseia na emissão, recepção e análise de sinais ultrassônicos.

2.2.1 Acústica

Acústica, a ciência do som, descreve o fenômeno das vibrações mecânicas e suas propagações em materiais sólidos, líquidos ou gasosos. No vácuo não há propagação de som pois são as partículas do próprio meio que vibram, diferentemente da luz ou de outras ondas eletromagnéticas em que o estado elétrico e magnético do espaço vazio oscila. No ar, uma onda sonora move um volume discreto de ar para frente e para trás em volta

de sua posição neutra, enquanto uma onda de luz não tem influência em seu estado de repouso (8).

Uma onda mecânica é, portanto, uma perturbação que se desloca através de um meio, no qual a onda se propaga. É normalmente classificada de acordo com sua frequência de propagação:

- **Infrassônicas:** abaixo de 20 Hz;
- **Sônicas:** entre 20 Hz e 20 kHz (audíveis pelos seres humanos),
- **Ultrassônicas:** acima de 20 kHz.

2.2.1.1 Tipos de ondas

À medida que a onda se propaga através do meio, as partículas que constituem o meio sofrem deslocamentos de diversas espécies, dependendo da natureza da onda. Ao se propagar em um meio, as ondas podem fazê-lo de três maneiras: longitudinalmente, transversalmente ou superficialmente.

As ondas que se propagam longitudinalmente são chamadas ondas longitudinais ou de compressão, e fazem com que as partículas do meio oscilem na mesma direção de propagação da onda. Na Figura 3, pode-se observar zonas de compressão (partículas próximas umas das outras) e de rarefação (partículas distantes umas das outras), criadas pela oscilação das mesmas devido à passagem da onda. Este tipo de onda pode ser transmitido em todos os meios (sólidos, líquidos e gasosos) e se propaga com maior velocidade do que os outros tipos (9).

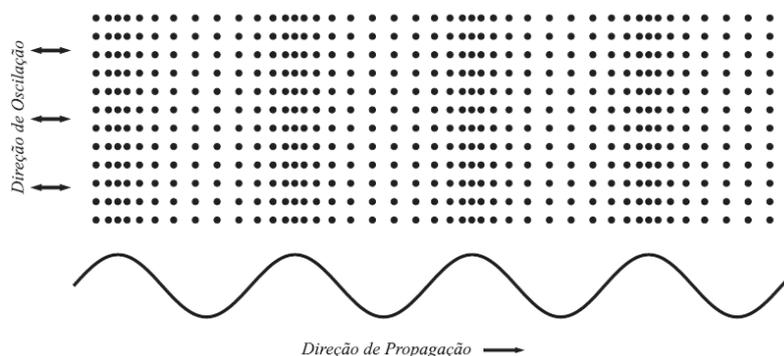


Figura 3 – Onda longitudinal. Fonte: Extraído de (10).

As ondas que se propagam transversalmente são chamadas ondas transversais ou de cisalhamento, e fazem com que as partículas do meio oscilem na direção perpendicular à de propagação da onda, como ilustra a Figura 4. A transmissão deste tipo de onda de um meio sólido para um meio líquido ou gasoso quase não ocorre. As ondas transversais se propagam com velocidade menor do que as longitudinais (9).

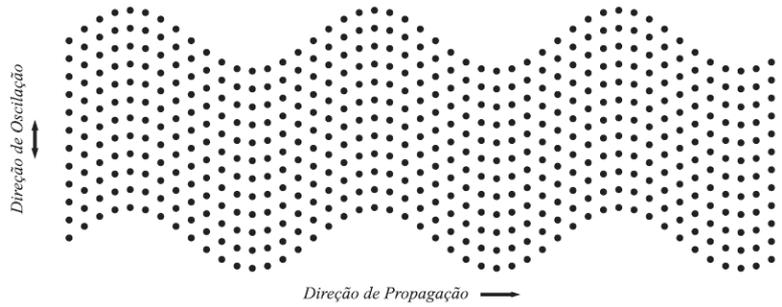


Figura 4 – Onda transversal. Fonte: Extraído de (10).

As ondas que se propagam superficialmente, chamadas ondas superficiais ou de Rayleigh, são ondas que trafegam na superfície dos meios sólidos e apresentam comportamento oscilatório nas partículas tanto perpendicular (transversal) quanto paralelo (longitudinal) à direção de propagação da onda, como ilustra a Figura 5.



Figura 5 – Onda superficial. Fonte: Extraído de (10).

2.2.1.2 Ondas periódicas

Denominam-se ondas periódicas as ondas geradas por fontes que executam oscilações periódicas.

Na Figura 6, observam-se os elementos constituintes de uma onda periódica transversal. A distância entre duas cristas consecutivas (C_1 e C_2) ou entre dois vales consecutivos (V_1 e V_2) é chamado de comprimento de onda (λ). O tempo de um ciclo completo de oscilação é chamado de período (T). O inverso do período é chamado de frequência ($f = \frac{1}{T}$). Pode-se ainda explicitar a frequência em termos angulares pela frequência angular ($\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$). A medida escalar negativa e positiva da magnitude de oscilação da onda é chamada de amplitude (A).

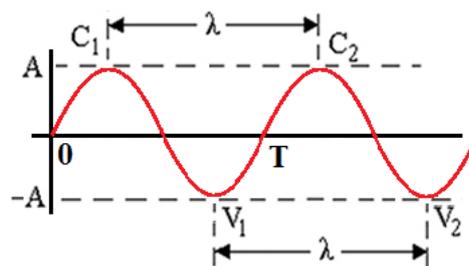


Figura 6 – Periodicidade de uma onda transversal.

Em uma onda longitudinal, cristas e vales correspondem às regiões de compressão e rarefação, respectivamente.

Em qualquer onda periódica, pode-se calcular a velocidade da onda pela seguinte expressão

$$v = \lambda f = \frac{\lambda}{T}. \quad [\text{m/s}] \quad (2.2)$$

2.2.1.3 Descrição matemática das ondas

Supondo uma onda senoidal $y(x, t)$, como exemplificada na Figura 7, ou seja, dada pela expressão

$$y(0, t) = A \cos(\omega t) \quad (2.3)$$

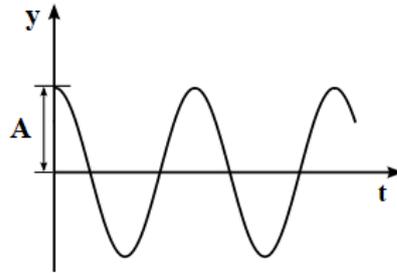


Figura 7 – Onda senoidal $y(0, t) = A \cos(\omega t)$.

Quando $x \neq 0$, tem-se

$$y(x, t) = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] = A \cos \left[\omega \left(\frac{x}{v} - t \right) \right] = A \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right], \quad (2.4)$$

em que x/v é o tempo na posição x .

Definindo-se o **número da onda** k como sendo igual a $2\pi/\lambda$, pode-se obter o deslocamento instantâneo y de uma partícula em um meio para uma posição x no instante t , dada pela chamada **função de onda**

$$y(x, t) = A \cos(\overbrace{kx - \omega t}^{\text{fase}}) \quad (2.5)$$

A **velocidade da onda** v é a velocidade com a qual um ponto deve se deslocar ao longo da onda de modo que sua fase fique constante. Portanto,

$$\frac{d}{dt}(kx - \omega t) = 0 \rightarrow v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} \quad (2.6)$$

É importante ressaltar que a velocidade da onda (Seção 2.2.1.5) não é a mesma velocidade da partícula na onda (ver Seção 2.2.1.4) deslocada pelo movimento ondulatório.

2.2.1.4 Velocidade e aceleração de uma partícula em uma onda senoidal

Conhecendo a função da onda, pode-se obter uma expressão para a **velocidade transversal** v_y de qualquer partícula em uma onda transversal. Sendo a função de onda $y(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$, então

$$v_y(x, t) = \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = \omega A \operatorname{sen}(kx - \omega t). \quad (2.7)$$

Sua **aceleração transversal** a_y é, portanto,

$$a_y(x, t) = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = -\omega^2 \overbrace{A \cos(kx - \omega t)}^{y(x, t)}. \quad (2.8)$$

Derivando em relação a x , enquanto t permanece constante, encontra-se a **inclinação** $\partial y / \partial x$ em qualquer ponto, bem como sua **curvatura** $\partial^2 y / \partial x^2$, dadas por

$$\frac{\partial y(x, t)}{\partial x} = -k A \operatorname{sen}(kx - \omega t) \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = -k^2 \overbrace{A \cos(kx - \omega t)}^{y(x, t)} \quad (2.10)$$

Através da equação da curvatura e da equação da aceleração transversal, obtém a chamada **equação de onda**, dada por

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2}. \quad (\text{Equação de onda}) \quad (2.11)$$

O conceito de equação de onda é igualmente útil no estudo de propagação de ondas longitudinais. A grandeza y continua a medir o deslocamento da partícula do meio a partir da sua posição de equilíbrio, porém agora esse deslocamento é paralelo ao eixo oX em vez de perpendicular a ele. Além disso, a perturbação não precisa ser necessariamente uma onda senoidal, ou seja, qualquer propagação de onda ao longo de um meio é descrita por essa equação (8).

2.2.1.5 Velocidade das ondas mecânicas

A expressão para a velocidade de onda possui a forma geral

$$v = \sqrt{\frac{\text{Força restauradora devolvendo o sistema ao equilíbrio}}{\text{Inércia resistindo à volta ao equilíbrio}}}. \quad (2.12)$$

Por exemplo, para o caso de ondas em uma corda (ondas transversais), a tensão T na corda desempenha o papel da força restauradora, tendendo a levar a corda de volta à sua configuração sem perturbações, ou seja, em equilíbrio. A massa da corda, mais especificamente a densidade linear μ , fornece a inércia que impede a corda de voltar instantaneamente ao equilíbrio, obtendo assim

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (2.13)$$

2.2.2 Ondas ultrassônicas

As ondas ultrassônicas são geradas através de um elemento emissor que vibra com uma frequência determinada. Existem vários métodos para geração de ondas ultrassônicas, tais como piezoelétrico, eletromagnético, laser, etc. Dentre estes, o efeito piezoelétrico, descoberto pelos irmãos Curie, é o mais utilizado.

2.2.2.1 Efeito piezoelétrico

A palavra piezoelectricidade vem do grego e significa “eletricidade por pressão”. Este nome foi proposto por Hankel em 1881 para nomear o fenômeno descoberto um ano antes pelos irmãos Pierre e Jacques Curie. Eles observaram que cargas positivas e negativas apareciam em várias partes das superfícies do cristal quando este era comprimido em diferentes direções (11).

Antes de submeter o material a forças externas, os centros de gravidade de cargas positivas e negativas de cada molécula coincidem. Portanto, os efeitos externos dessas cargas se cancelam. Como resultado, uma molécula neutra eletricamente aparece. Exercendo alguma pressão sobre o material, sua estrutura interna pode ser deformada, causando a separação dos centros de gravidade positivo e negativo das moléculas e gerando pequenos dipolos. Os polos faceados dentro do material são cancelados e uma distribuição de uma carga associada aparece nas superfícies do material, ou seja, o material se torna polarizado. Esta polarização gera um campo elétrico e pode ser usada para transformar a energia mecânica usada na deformação do material em energia elétrica (11).

No ano seguinte a descoberta, os irmãos Curie verificaram a existência do processo reverso previsto por Lippmann (1881). Se a geração de cargas elétricas (e consequentemente um campo elétrico) em certo material for chamada arbitrariamente por **efeito piezoelétrico direto**, o processo reverso, ou seja, a deformação de materiais através da aplicação de um campo elétrico será chamada de **efeito piezoelétrico reverso** (11).

Deste modo, uma deformação mecânica seria produzida em um material piezoelétrico quando uma tensão é aplicada entre os eletrodos/extremidades desse material. Esta deformação pode ser usada, por exemplo, para deslocar cargas mecânicas, transformando energia elétrica em energia mecânica.

Por exemplo, aplicando-se cargas opostas nas faces de um cristal piezoelétrico, há a deformação do mesmo. Ao inverter a polaridade das cargas aplicadas, inverte-se também a deformação (deformação positiva e negativa). Caso seja aplicada uma tensão alternada, o cristal sofrerá deformações sucessivas, passando a vibrar. A frequência de vibração mecânica será a mesma da tensão alternada aplicada. Se uma lâmina for cortada do cristal, de tal forma que sua frequência de vibração natural coincida com a frequência de vibração ou tensão que lhe for aplicada, ocorrerá o fenômeno de ressonância na lâmina

e, portanto, a amplitude de vibração será máxima (12).

2.2.2.2 Velocidade e a equação das ondas ultrassônicas

De acordo com (13), as propriedades físicas do meio que influenciam a velocidade do som são a densidade e a elasticidade, correspondendo à massa e ao enrijecimento de uma partícula vibrando em um campo sonoro. Como a onda de compressão e rarefação passa através do material, os valores de volume e densidade flutuam localmente em torno dos valores normais. Assim, as grandezas importantes são a dilatação (do inglês *dilation*, $\Delta = \delta V/V_0$), em que V é o volume instantâneo do volume local (definido como um elemento de volume infinitamente pequeno do material) e V_0 é o volume original, e a compressão (do inglês *condensation*, $s = \delta\rho/\rho_0$), em que ρ é a densidade instantânea e ρ_0 é a densidade original. Na região linear, ou seja, para deslocamentos muito pequenos, pode-se dizer que $s \approx \Delta$. O **módulo volumétrico** B (ou **módulo de compressão adiabática**) é, portanto, dado por

$$B = -\frac{\delta P}{\Delta} = -V_0 \frac{\delta P}{\delta V} \approx \frac{\delta P}{s}, \quad (2.14)$$

em que P é a pressão instantânea, δP é a tensão mecânica (do inglês *stress*), e δV é a deformação correspondente.

Basicamente, o módulo da compressão adiabática é a relação da tensão pela deformação, multiplicada pelo volume do material sendo deformado e é dado em unidades de pressão (Pa). A compressibilidade adiabática, κ de um líquido puro é então o recíproco do módulo da compressão adiabática, ou seja, $\kappa = 1/B$. Wood, em (13), mostra que a velocidade do som em gases e líquidos homogêneos é independente da frequência e é dada pela expressão

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \frac{1}{\sqrt{\kappa\rho}}. \quad (\text{Equação de Wood}) \quad (2.15)$$

Em (14), Christensen descreve a equação de onda para ondas ultrassônicas, considerando apenas ondas longitudinais se propagando em uma única direção z . A equação está em função de $P(z)$, que representa o excesso de pressão acima da pressão estática em qualquer posição z , dado que a presença da onda ultrassônica gera uma variação de pressão ao longo do eixo longitudinal do material z , devido ao movimento das partículas. Matematicamente,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial t^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial z^2} - \kappa\rho \frac{\partial^2 P(x, t)}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Quando uma onda passa de um meio para outro, a velocidade e o comprimento de onda mudam, enquanto a frequência se mantém constante, pois ela é característica da

fonte que produz a onda, obedecendo, portanto, à equação $f = v/\lambda$ (8). Esta afirmação somente é válida para ondas, cujo espectro apresenta apenas uma frequência, como é o caso de ondas geradas a partir de senoides. Isto acontece porque as matérias atuam como filtro para as ondas e, dependendo do espectro de resposta do material ou do meio, algumas frequências apresentarão atenuação diferente de outras. Por exemplo, se uma onda ultrassônica é gerada por um único pulso, aparecerão várias frequências, com a presença de conteúdo harmônico na onda ultrassônica (3).

2.2.3 Sistemas ultrassônicos

Na Seção 2.2.2 soube-se que uma tensão elétrica aplicada em um transdutor piezoelétrico gera uma onda ultrassônica. Os transdutores são construídos com cerâmica piezoelétrica e quando excitados por tensão elétrica sofrem deformações mecânicas, gerando ondas acústicas que se propagam no meio adjacente ao transdutor. Ao atingir objetos presentes no meio, as ondas acústicas são refletidas, podendo retornar ao transdutor. Quando estas retornam ao transdutor, este deforma novamente, gerando um sinal de tensão nos terminais do transdutor. Estas ondas podem viajar através do material e atingir ainda outro transdutor, que pelo mesmo efeito piezoelétrico recebe a onda acústica e a transforma em sinal de tensão elétrica (3).

Pode-se dizer que o sistema formado pelo transdutor emissor, meio de propagação e transdutor receptor forma um sistema ultrassônico básico. Nesta seção, serão descritos alguns tipos de transdutores piezoelétricos, bem como seus modos de operação e seus posicionamentos para análise. Por fim, será descrito um sistema ultrassônico de forma mais detalhada.

2.2.3.1 Tipos de transdutores ultrassônicos piezoelétricos

O transdutor, também chamado de cabeçote, é formado por cristais, por eletrodos e por uma carcaça externa. O transdutor pode ser classificado em três tipos: normal ou reto, angular e duplo-cristal.

- **Normal ou Reto**

Esses transdutores são geradores de ondas longitudinais normais à superfície de acoplamento. São construídos a partir de um cristal piezoelétrico colocado sobre um bloco rígido denominado amortecedor com a face oposta coberta por uma resina protetora, como ilustra a Figura 8. Em geral, estes transdutores normais são circulares, como diâmetros que variam de 5 a 24mm (9).

- **Angular**

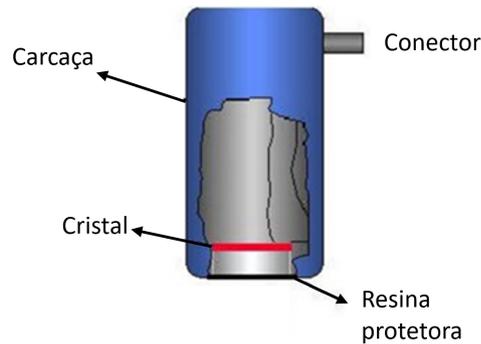


Figura 8 – Transdutor Reto ou Normal. Fonte: Extraído de (9).

O transdutor angular é assim chamado em razão de o cristal formar um determinado ângulo em relação à superfície do material, como demonstra a Figura 9. O ângulo é obtido pela inserção de uma cunha de plástico entre o cristal piezoelétrico e a superfície. A cunha pode ser fixa, sendo então englobada pela carcaça, ou intercambiável. Neste último caso, um transdutor normal é preso com parafusos que fixam a cunha à carcaça.

Uma vez que a prática é trabalhar com diversos ângulos (35, 45, 60, 70 e 80 graus), a solução de um único transdutor com várias cunhas é mais econômica. No entanto, é necessário maior cuidado no manuseio.

O transdutor angular apresenta sapatas de acrílico feitas para proporcionar ângulos de transmissão bem definidos. Entretanto, o uso contínuo e o conseqüente desgaste das sapatas poderão alterar o desempenho do transdutor. Esse problema pode ser agravado quando a pressão do dedo do operador incidir sobre as bordas do transdutor, fazendo com que o desgaste ocorra de modo irregular e alterando significativamente o ângulo nominal (9).

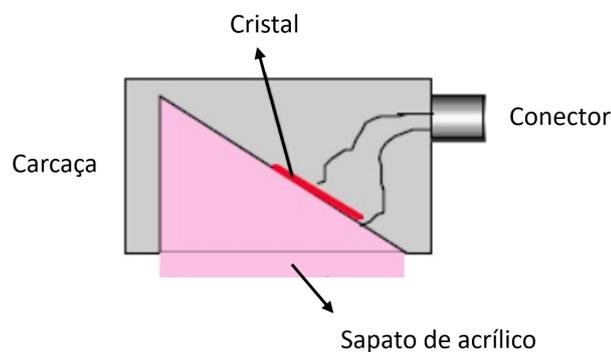


Figura 9 – Transdutor Angular. Fonte: Extraído de (9).

• Duplo Cristal

Existem problemas de inspeção que não podem ser resolvidos nem com transdutores retos nem com angulares. Quando se trata de inspecionar ou medir materiais de reduzida espessura, ou quando se deseja detectar descontinuidades logo abaixo

da superfície do material, a zona morta existente na tela do sistema impede uma resposta clara, assim o transdutor duplo-cristal é o mais indicado e largamente utilizado em tais procedimentos de medição. Apresenta dois cristais incorporados na mesma carcaça, levemente inclinados em relação à superfície de contato e separados por um material acústico isolante, como exemplifica a Figura 10. Cada um deles funciona somente como emissor ou somente como receptor, sendo indiferente qual deles exerce cada uma das funções. Os cristais são conectados ao sistema de ultrassom por um cabo duplo. O aparelho deve ser ajustado para trabalhar com dois cristais (9).

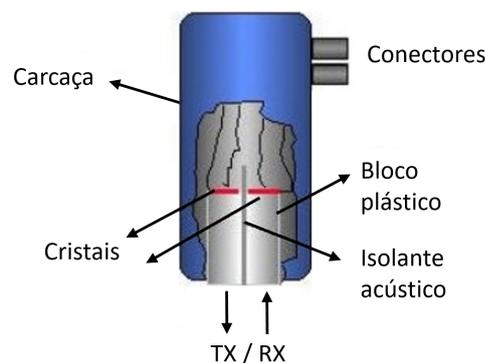


Figura 10 – Transdutor de Duplo Cristal. Fonte: Extraído de (9).

2.2.3.2 Resposta em frequência de transdutores ultrassônicos

A seleção correta do transdutor é um fator essencial para garantir um desempenho ótimo em qualquer aplicação ultrassônica. Além do tipo do transdutor (reto, angular, etc.) e sua geometria (formato, diâmetro, etc.), os quais devem se adequar ao sistema de medição, sua resposta em frequência é extremamente importante.

Por exemplo, para medições de espessura, baixas frequências ($f < 2,25$ MHz) são usadas para otimizar a penetração do sinal, sendo adequadas para materiais com alto espalhamento e atenuação. Altas frequências ($f > 5$ MHz) são recomendadas para otimizar a resolução próxima a superfície, sendo adequadas para materiais que não atenuam ou espalham o sinal.

A largura de banda de um transdutor pode ser estreita (*narrowband*), normalmente em transdutores ressonantes, ou ampla (*broadband*), conforme a Figura 11.

2.2.3.3 Modos de operação de um transdutor ultrassônico

Os modos básicos de operação de um transdutor são: contínuo, no qual o sinal não sofre interrupção na propagação, e pulsado, no qual amostras do sinal são enviadas em rajadas.

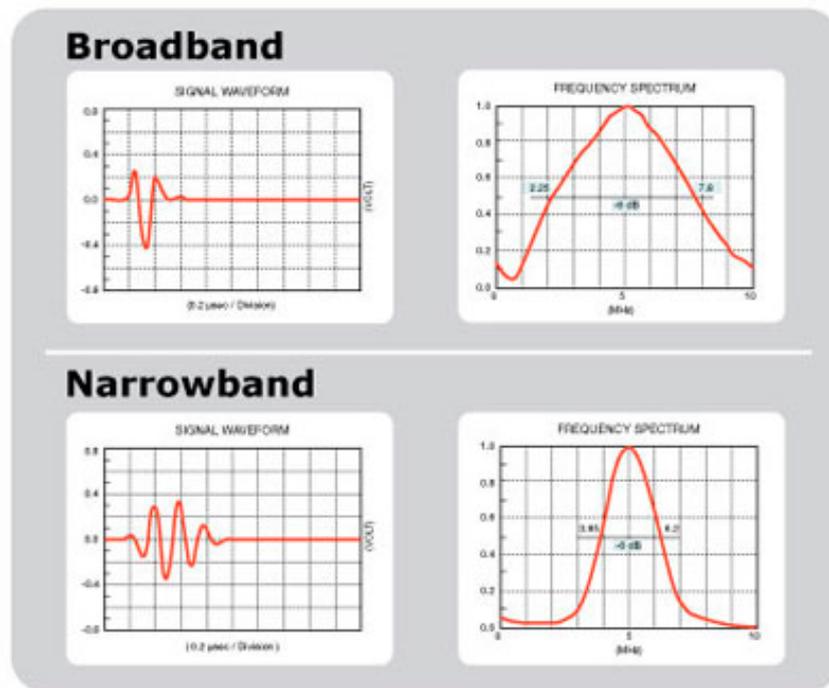


Figura 11 – Resposta em frequência de transdutores ultrassônicos. Fonte: Extraído de (15).

No modo contínuo, ilustrado na Figura 12, a excitação mais adequada é via uma tensão periódica. A escolha da frequência depende das necessidades exigidas pelo método (16). É somente utilizado para medidas de frequência ressonante (17). A frequência do transdutor coincidirá com a frequência da tensão de excitação. Embora a frequência de operação seja determinada pela frequência da fonte de tensão por questões de sensibilidade, não se deve escolher uma frequência fora da largura de banda natural do transdutor (18).

$$f_0 = \text{frequência do transdutor} = \text{frequência da tensão de excitação} \quad (2.17)$$

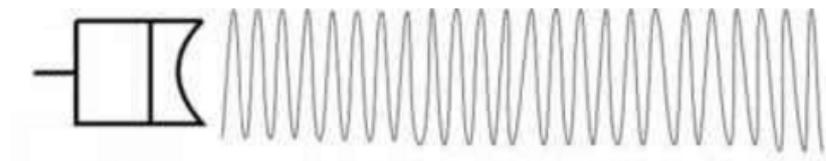


Figura 12 – Modo contínuo. Fonte: Extraído de (19).

O modo pulsado, ilustrado na Figura 13, é o mais comumente utilizado na maioria das aplicações. Pode-se usar a metade de transdutores usados no modo contínuo, pois cada transdutor pode ser usado tanto como transmissor quanto receptor. A frequência do transdutor será diretamente proporcional a velocidade de propagação no cristal e inversamente proporcional a espessura do cristal (18), de acordo com

$$f_0 = \frac{\text{velocidade de propagação no cristal}}{2 \times (\text{espessura do cristal})}. \quad (2.18)$$



Figura 13 – Modo pulsado. Fonte: Extraído de (19).

Neste modo pulsado, há ainda dois modos de excitação:

- **Pulso quadrado:** aumenta drasticamente a sensibilidade enquanto mantém o desempenho em banda larga através da sintonização da largura do pulso para a frequência ressonante do transdutor.

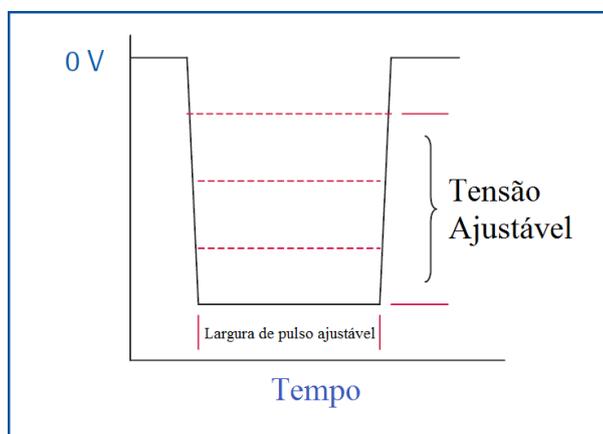


Figura 14 – Pulso de onda quadrada. Fonte: Extraído de (19).

A excitação por onda quadrada é especialmente útil em aplicações envolvendo testes de materiais espessos ou de alta atenuação com transdutores de baixa-frequência, tipicamente melhorando a capacidade de penetração e a razão sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*). A tensão e a largura do pulso são geralmente ajustadas, permitindo um controle preciso das formas do pulso (Figura 14). Sintonizando o período (largura do pulso) da onda quadrada para metade daquele da frequência central do transdutor, a energia do pulso para o transdutor em sua frequência de ressonância natural aumenta. Isso pode resultar em uma amplitude de sinal melhorada de 12dB (ou mais) quando comparada aos pulsadores por pico de tensão usando a mesma configuração de tensão. O efeito é mais evidente com transdutores de 5MHz ou menos (19).

- **Pico de tensão (*spike*):** otimiza a resposta de banda larga e a resolução próxima a superfície.

Para aplicações que envolvem testes em materiais finos com transdutores de alta frequência nas quais o tempo de resposta rápida e a resposta do transdutor para banda larga são importantes para garantir as resoluções de tempo e profundidade adequadas.

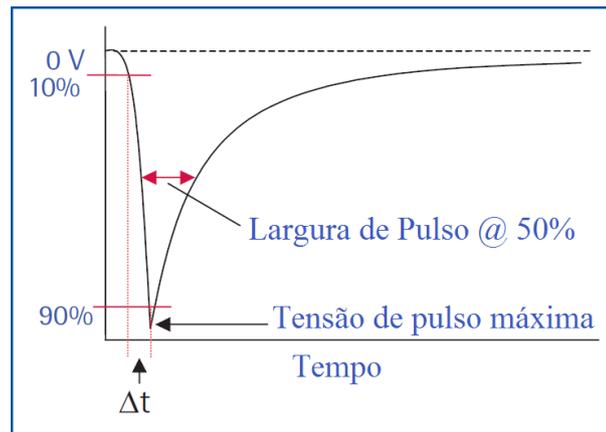


Figura 15 – Pico de tensão. Fonte: Extraído de (19).

Estes modelos usam a técnica de excitação por pico de tensão, produzindo uma transição abrupta de tensão seguida de uma recuperação até a linha de base. Tempos de subida ultrarrápidos são traduzidos em uma ampla excitação de espectro, resultando em uma resposta de banda larga. É possível otimizar a resposta do transdutor selecionando os valores de energia e amortecimento do pico de tensão, os quais ajustam o tempo de subida (Δt), largura e tensão máxima, apresentados na Figura 15. Geralmente, baixos valores de energia e resistência de amortecimento produzem menores tempos de subida resultando em uma excitação eficiente para transdutores de alta frequência (19).

2.2.3.4 Métodos de análise

A inspeção por ultrassom pode ser efetuada basicamente através de dois métodos, os quais dependem das características desejadas:

- **Técnica de impulso-eco ou pulso-eco (*echo-pulse*):** é a técnica na qual somente um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas ultrassônicas que se propagam no material, como demonstra a Figura 16.

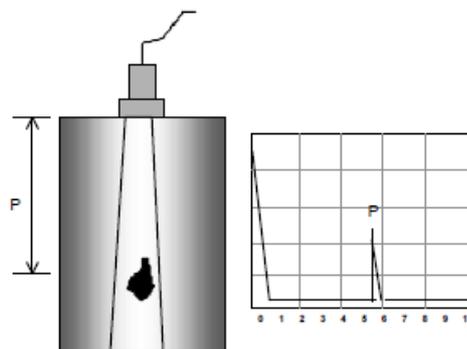


Figura 16 – Impulso-Eco ou Pulso-Eco. Fonte: Extraído de (9).

- **Técnica de transparência ou de transmissão (*thru-transmission*):** é uma técnica na qual são utilizados dois transdutores separados, um transmitindo e outro recebendo as ondas ultrassônicas, como ilustra a Figura 17. Neste caso é necessário acoplar os transdutores nos dois lados da peça, de forma que estes estejam perfeitamente alinhados.

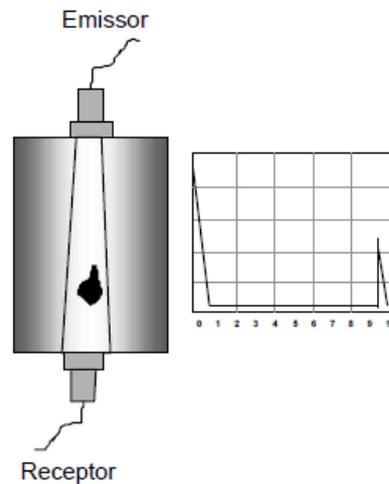


Figura 17 – Transparência ou transmissão. Fonte: Extraído de (9).

2.3 Transformações Matemáticas

Para a caracterização de fluidos, técnicas ultrassônicas que se baseiam unicamente na análise de sinais no domínio do tempo, como a técnica de Tempo de Trânsito (20), podem se tornar insuficientes. Deste modo, elas devem ser utilizadas em conjunto, ou até mesmo serem substituídas por técnicas que visualizam/analisa o sinal não somente no domínio do tempo, ou seja, por técnicas que transformam a informação. A compreensão das técnicas utilizadas neste trabalho se dá através do entendimento de transformadas matemáticas, as quais serão abordadas na sequência.

As transformações matemáticas são empregadas no mapeamento de funções de um domínio para outro. São particularmente importantes em processamento e análise de sinais, pois no domínio transformado algumas propriedades relevantes do sinal ficam mais evidentes.

Um sinal (ou função) pode ser decomposto linearmente através da expressão

$$f(t) = \sum_k a_k \Psi_k(t), \quad (2.19)$$

em que $f(t)$ é o sinal a ser decomposto, a_k são os coeficientes de expansão e $\Psi_k(t)$ forma o chamado conjunto de expansão.

A análise dos coeficientes a_k pode ser vantajosa ao explicitar características de $f(t)$ que não são evidentes. O conjunto de funções $\Psi_k(t)$ é formado por funções com as quais se

pode reconstruir $f(t)$, usando para isso os coeficientes a_k . Se a expansão for única, isto é, se para reconstruir $f(t)$ os coeficientes a_k e as funções $\Psi_k(t)$ forem combinados de forma única, então tal conjunto de expansão é chamado de base. Se esta base for ortogonal, então os coeficientes podem ser calculados através do produto interno.

O produto interno entre dois sinais definidos no intervalo de tempo (a, b) é dado por

$$\langle x(t), y(t) \rangle = \int_a^b x(t)y^*(t)dt, \quad (2.20)$$

em que $y^*(t)$ denota o conjugado de $y(t)$. Para sinais discretos e reais, o produto interno é dado por

$$\langle x(n), y(n) \rangle = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n), \quad (2.21)$$

Deve-se notar que o produto interno retorna um valor único (escalar). Além disso, uma interpretação deste valor seria o conceito de projeção geométrica. A projeção de um vetor sobre outro está relacionada a uma medida da quantidade de informação que os dois sinais têm em comum.

Quando dois sinais são perpendiculares (ou ortogonais), ou seja, quando não há a projeção de um vetor sobre outro, o produto interno destes vetores é nulo. Para sinais, a ortogonalidade mostra a independência de um sinal para com outro, ou seja, mostra que não há informação em comum entre eles. A ortogonalidade é importante na obtenção dos coeficientes de expansão e na reconstrução do sinal a partir destes coeficientes.

Deste modo, em uma base de sinais, a ortogonalidade garante que não haverá redundância na descrição de sinais a partir desta base. Haverá apenas uma representação para um determinado sinal com este conjunto e o produto interno será usado para obter os coeficientes desta representação.

Diz-se que um conjunto de sinais $\Psi_k(t)$ é uma base ortogonal se

- os sinais $\Psi_k(t)$ são mutuamente ortogonais: $\langle \Psi_m(t), \Psi_n(t) \rangle = 0 \forall m \neq n$ e
- os sinais $\Psi_k(t)$ são completos no sentido de que o único sinal que é ortogonal a todos $\Psi_k(t)$ é o sinal nulo (composto apenas de zeros), ou seja, $\langle x(t), \Psi_k(t) \rangle = 0 \forall k$, então $x(t) = 0$.

A obtenção dos coeficientes de uma expansão pode ser entendida estudando-se um caso análogo de geometria. Num plano geométrico, um vetor pode ser obtido a partir de um par de vetores ortogonais, como ilustrado na Figura 18.

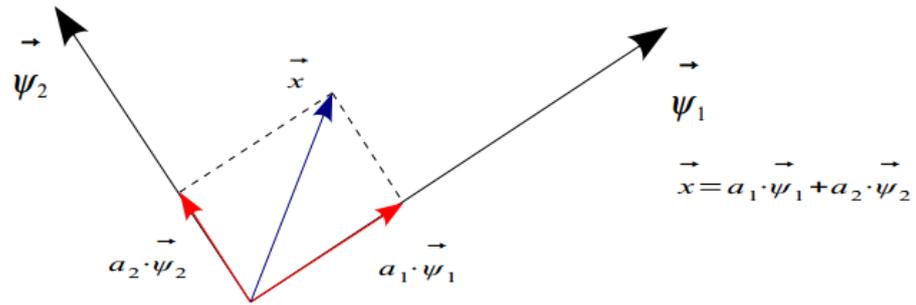


Figura 18 – Decomposição de um vetor geométrico. Fonte: Extraído de (21).

O coeficiente a_1 pode ser obtido usando-se as propriedades do produto interno e a ortogonalidade

$$\begin{aligned} \langle \vec{x}, \vec{\Psi}_1 \rangle &= \langle (a_1 \vec{\Psi}_1 + a_2 \vec{\Psi}_2), \vec{\Psi}_1 \rangle = \langle a_1 \vec{\Psi}_1, \vec{\Psi}_1 \rangle + \langle a_2 \vec{\Psi}_2, \vec{\Psi}_1 \rangle \\ \langle \vec{x}, \vec{\Psi}_1 \rangle &= a_1 \langle \vec{\Psi}_1, \vec{\Psi}_1 \rangle + a_2 \langle \vec{\Psi}_2, \vec{\Psi}_1 \rangle = a_1 \langle \vec{\Psi}_1, \vec{\Psi}_1 \rangle \end{aligned} \quad (2.22)$$

Assim,

$$a_1 = \frac{\langle \vec{x}, \vec{\Psi}_1 \rangle}{\langle \vec{\Psi}_1, \vec{\Psi}_1 \rangle}. \quad (2.23)$$

Como a norma de um sinal $x(t)$ é dada por

$$|x(t)| = \sqrt{\langle x(t), x(t) \rangle}, \quad (2.24)$$

tem-se

$$a_1 = \frac{\langle \vec{x}, \vec{\Psi}_1 \rangle}{|\vec{\Psi}_1|^2}. \quad (2.25)$$

Analogamente,

$$a_2 = \frac{\langle \vec{x}, \vec{\Psi}_2 \rangle}{|\vec{\Psi}_2|^2}. \quad (2.26)$$

No espaço de sinais, considerando o conjunto de expansão como sendo uma base ortogonal, pode-se escrever

$$a_m = \frac{\langle f(t), \Psi_m(t) \rangle}{|\Psi_m|^2}. \quad (2.27)$$

Portanto, utilizando o produto interno entre sinais, pode-se obter os coeficientes da expansão linear, operação conhecida como **análise do sinal**.

A obtenção do sinal, ou seja, a **síntese do sinal**, a partir dos coeficientes da expansão é feita através da Equação 2.19.

2.3.1 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier, idealizada pelo matemático francês Joseph Fourier, define que qualquer função periódica pode ser representada como uma soma infinita de funções exponenciais complexas periódicas, como demonstra a Figura 19.

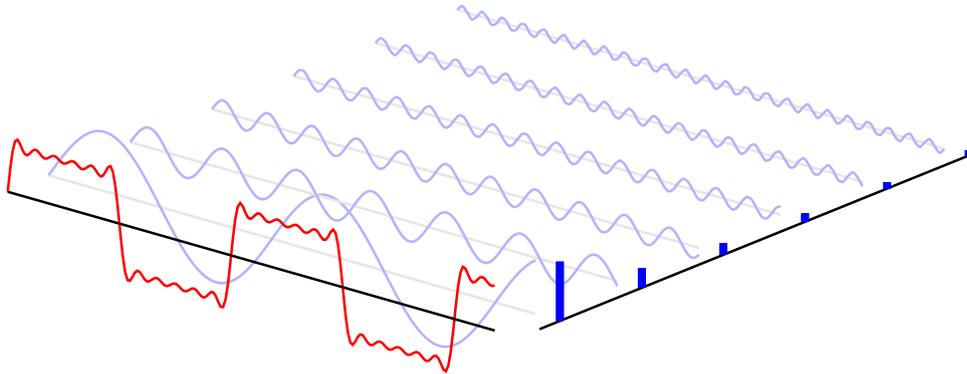


Figura 19 – Visualização no domínio do tempo vs domínio da frequência através da Transformada de Fourier. Fonte: *pgfplots.net*.

Nesta representação, uma função no domínio do tempo é mapeada em uma função no domínio da frequência. Esta transposição ocorre porque a Transformada de Fourier expande a função original em termos de funções de senos e cossenos de duração infinita.

Seja $x(t)$ uma função contínua. A Transformada de Fourier de $x(t)$, denotado por $\mathcal{F}\{x(t)\}$ ou $X(f)$, é definida por

$$\mathcal{F}\{x(t)\} = X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt, \quad (2.28)$$

ou seja, um produto interno do sinal $x(t)$ com um conjunto de exponenciais complexas, que constituem a base ortonormal.

Para uma sequência de duração finita, é possível desenvolver uma representação alternativa da Transformada de Fourier, referida como Transformada Discreta de Fourier (ou DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*). Uma vez que a Transformada de Fourier não pode ser computada, em processamento digital de sinais, a DFT, que é uma versão amostrada, permite o seu cálculo computacional, e para sinais de tempo finito a DFT é uma completa representação de Fourier do sinal.

Seja uma sequência x_n que represente N amostras consecutivas de um sinal contínuo $x(t)$. A DFT de N termos é definida por

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-jk\frac{2\pi}{N}n}. \quad (2.29)$$

Uma propriedade importante da DFT é a unicidade do par x_n e X_k , utilizando a DFT como operador, com a transformada direta (análise) e a transformada inversa (síntese) definida por

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{jk \frac{2\pi}{N} n}. \quad (2.30)$$

A DFT é, portanto, obtida através da decomposição de valores em componentes de diferentes frequências. Embora esta operação seja bastante útil, efetuar seu cálculo diretamente da definição é geralmente muito lento. Como alternativa, algoritmos mais rápidos para o cálculo da DFT foram criados, as chamadas Transformadas Rápidas de Fourier, ou FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*).

2.3.2 Modulation Spectra

Alguns sinais podem ser representados por um modelo de modulação, no qual um sinal modulante de baixa frequência, frequentemente chamado de envelope, multiplica um sinal portador de alta frequência. O conceito de frequência de modulação é então associado à Transformada de Fourier do sinal modulante. Muitos estudos acústicos mostram a importância de tais características na análise de sinais.

Um modelo de sinal mais geral, que é uma representação bi-dimensional para sinais modulados, em que a frequência de modulação existe em conjunto com frequência de Fourier convencional, vem sendo investigado em vários trabalhos (22, 23, 24, 25, 26). Os termos encontrados na literatura que designam esta representação são: *Modulation Spectra*, *Modulation Spectrum*, *Two-Dimensional Transform* ou ainda *Joint Acoustic-Modulation Frequency*. Como as traduções podem ser confundidas com outros conceitos, este trabalho adotará a primeira designação: *Modulation Spectra*.

Uma teoria geral sobre *Modulation Spectra* pode ser desenvolvida a partir das já conhecidas análises de Fourier. Ela pode ser aplicada tanto para modulação em frequência (FM, do inglês *Frequency Modulation*) quanto para modulação em amplitude (AM, do inglês *Amplitude Modulation*). Em todos os casos, é visto que os produtos de modulação são harmônicos máximos divisores comuns entre as frequências portadoras e modulantes (27).

Assim como outras inúmeras transformadas, a *Modulation Spectra* pode ser usada em diversas aplicações de filtragem, compressão de dados, reconhecimento de padrões e outras análises de dados. Neste trabalho, esta técnica será empregada para modificar a visualização dos sinais adquiridos, evidenciando (ou não) certas características desconhecidas antes de etapa de reconhecimento de padrões.

2.3.2.1 Algoritmo da *Modulation Spectra*

O processo inicialmente segmenta o sinal em janelas consecutivas sobrepostas, as quais são transformadas para o domínio da frequência e alinhadas para formar uma representação tempo-frequência. Em alguns trabalhos (23, 25, 26), os autores denominam esta frequência como a frequência acústica do sinal. Kinnunen em (26) implementa esta transformada base através da conhecida Transformada de Fourier de Tempo Curto (ou STFT, do inglês *Short-Time Fourier Transform*).

Vale lembrar que em uma STFT, um sinal $s(n)$ é analisado em pequenos quadros (ou *frames*) de superposição. Cada quadro é pré-enfatizado e multiplicado por uma janela (e.g., Hamming, Blackman, etc.) antes do cálculo da transformada. Denota-se a representação discreta tempo-frequência resultante por $S(n, f)$, em que n denota a variável de tempo discreto, e f denota a variável de frequência discreta

A seleção do tamanho da janela é crucial. Uma longa janela implica em um aumento da resolução acústica, com o custo da perda de resolução temporal. Em outras palavras, mudanças espectrais rápidas (i.e., altas frequências modulantes), não podem ser detectadas com longas janelas. Usando uma curta janela, a largura de banda do espectro de modulação é aumentada. Esta largura de banda também depende do tipo da função janela. Por exemplo, para a janela de Hamming, a largura de banda teórica do espectro de modulação é dada por $B = 2f_s/L$, em que f_s denota a frequência de amostragem e L é o tamanho da janela em amostras (26).

Sabendo que o tamanho da função janela limita a largura de banda do espectro de modulação, pode-se determinar automaticamente a taxa de *frames*. A taxa de *frames* f_r do espectrograma $S(n, f)$ é a frequência de amostragem do espectro de modulação. Visando a evitar o efeito de *aliasing*, a frequência de amostragem deve ser selecionada maior que duas vezes a largura de banda, i.e., $f_r > 2B$. Assim, dada a máxima frequência de modulação de interesse $\eta_{máx}$, pode-se definir a taxa de frames para $f_r = 2\eta_{máx}$, e usar uma janela de tamanho $L = 2f_s/\eta_{máx}$ amostras (26). Por exemplo, para $\eta_{máx} = 20Hz$ e $f_s = 8kHz$, tem-se $f_r = 40frames/s$ e $L = 800$ amostras (100ms).

Após a realização da transformada base, uma operação de detecção (e.g., Transformada de Hilbert ou magnitude quadrática) é realizada em cada sub-banda de frequência para extrair a informação do envelope do sinal. Li e Atlas em (24) implementam tal operação de detecção de forma mais complexa através de uma demodulação coerente.

Por fim, uma segunda transformada, como uma simples Transformada de Fourier, é realizada através do tempo em cada sub-banda de frequência para formar a representação frequência de modulação-frequência acústica (25), como ilustra a Figura 20.

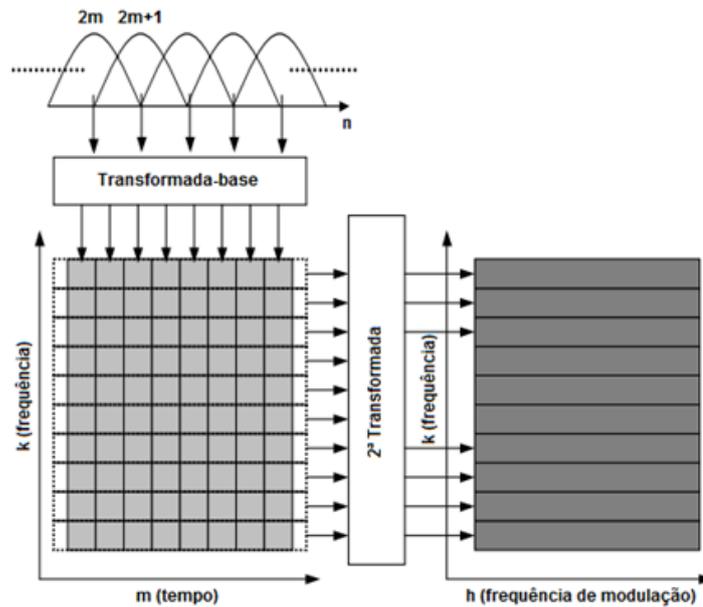


Figura 20 – Estrutura simplificada da *Modulation Spectra*. Fonte: Adaptado de (25).

Exemplo 2.1. Se um sinal for composto pela somatória de três sinais de portadoras c_1 , c_2 e c_3 , dados por

$$c_1 = 20\cos(2\pi * 1000 * t),$$

$$c_2 = 20\cos(2\pi * 2500 * t),$$

$$c_3 = 20\cos(2\pi * 4000 * t),$$

e sabendo que tais sinais são modulados em amplitude, respectivamente, pelos sinais m_1 , m_2 e m_3 , dados por

$$m_1 = 20\cos(2\pi * 20 * t),$$

$$m_2 = 20\cos(2\pi * 40 * t),$$

$$m_3 = 20\cos(2\pi * 60 * t).$$

Nota-se que as frequências de cada portadora f_{c_1} , f_{c_2} e f_{c_3} são, respectivamente, 1000 Hz, 2500 Hz e 4000 Hz e que as frequências de cada sinal de modulação f_{m_1} , f_{m_2} e f_{m_3} são, respectivamente, 20 Hz, 40 Hz e 60 Hz.

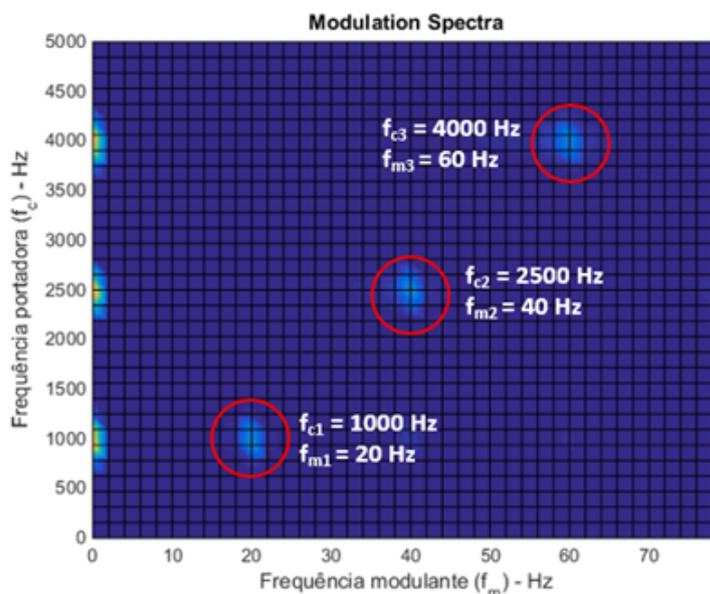


Figura 21 – *Modulation Spectra* do sinal exemplo.

Ao aplicar este sinal como entrada do algoritmo, pode-se notar que a matriz tridimensional da *Modulation Spectra* gerada, exibida sob a forma de um gráfico na Figura 21, evidencia tais frequências.

2.4 Análise de Componentes Principais

Como dito anteriormente, na caracterização de fluidos, a análise de sinais ultrassônicos no domínio do tempo pode ser insuficiente. Um único sinal não-estacionário traz consigo um grande número de informações, tendo em vista que frequências e amplitudes podem mudar a cada instante, o que torna a análise e interpretação complicadas e, muitas vezes, nem mesmo relacionadas com a variável de interesse. Desta forma, técnicas que modificam a “visualização” do sinal podem fornecer parâmetros altamente relacionados com o objetivo de interesse (e.g., nível de água em óleo). No entanto, devido ao grande número de parâmetros que surgem após a aplicação de uma transformada, tornam-se também necessárias técnicas de interpretação de resultados que evidenciem padrões e diferenças relacionadas à grandeza, variável ou componente em questão.

A Análise de Componentes Principais (ou PCA, do inglês *Principal Component Analysis*) é uma das ferramentas mais utilizadas nas modernas análises de dados em diversas áreas. Ela fornece um método de identificar padrões em dados e expressá-los de modo a destacar suas similaridades e diferenças.

O objetivo desta seção, baseada em (28), é fornecer um sentimento intuitivo sobre PCA, sem deixar de lado o devido rigor matemático para sua implementação. Além disso, é importante ver a relação matemática entre PCA e a Decomposição em Valores Singulares

(ou SVD, do inglês *Singular Value Decomposition*).

2.4.1 Mudança de base

O objetivo da PCA é identificar a base mais significativa para re-expressar o conjunto de dados. É esperado que esta nova base filtre o ruído e revele informações escondidas. A PCA permite discernir informações importantes, redundantes e ruído, fornecendo uma definição mais precisa dos dados.

Cada experimento é tratado como uma amostra individual no conjunto de dados. Em cada experimento, um conjunto de dados que consiste de múltiplas medições é registrado. Por exemplo, um experimento qualquer pode conter medições de tensão v , corrente i , temperatura T e pressão P , fornecendo, assim, um vetor coluna \vec{X} do tipo 4×1 , dado por

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} v \\ i \\ T \\ P \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

Se este experimento for repetido n vezes, obtém-se uma matriz do tipo $4 \times n$. Desta forma, esta matriz conterá n valores para cada uma das grandezas.

Assumindo agora que cada amostra \vec{X} seja um vetor m -dimensional, em que m é o número de medições/parâmetros. Equivalentemente, cada amostra é um vetor que reside no sub-espaco gerado por alguma base ortonormal. Do ponto de vista de álgebra linear, pode-se dizer que todos os vetores de medidas formam uma combinação linear deste conjunto de vetores unitários que formam a base ortonormal. Assim, esta base reflete o método que os dados são coletados.

Uma possível base trivial B pode ser generalizada através de uma matriz identidade I to tipo $m \times m$, dada por

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = I, \quad (2.32)$$

na qual cada linha é vetor base ortonormal b_i com m componentes.

Pode-se considerar esta base trivial como o ponto de partida, de modo que como todos os dados foram adquiridos nesta base e, portanto, podem ser expressados como uma combinação linear de b_i .

Com esse rigor, é possível agora declarar o que a técnica de PCA pergunta: *Existe uma outra base, a qual é uma combinação linear da base original, que melhor representa o conjunto de dados?* Note que há o pressuposto de linearidade. Com essa suposição, a PCA é agora limitada a re-expressar os dados como uma combinação linear dos seus vetores bases.

Seja X o conjunto de dados original do tipo $m \times n$, no qual cada coluna representa um experimento (ou momento no tempo) do conjunto de dados \vec{X} . Seja Y uma outra matriz $m \times n$ relacionada para transformação linear P , dada por

$$PX = Y. \quad (2.33)$$

A matriz X é, portanto, o conjunto de dados original, enquanto Y é uma nova representação desta conjunto de dados. Geometricamente, P é uma rotação e uma dilatação/contração que transforma X em Y . As linha de P são um novo vetor base para expressar as colunas de X .

Definindo p_i , x_i e y_i , respectivamente por: linhas de P , colunas de X e colunas de Y , pode-se escrever

$$PX = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1x_1 & \cdots & p_1x_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_mx_1 & \cdots & p_mx_n \end{bmatrix} = Y. \quad (2.34)$$

Desta forma, é possível ver que cada coeficiente y_i é um produto de x_i com a correspondente linha em P . Em outras palavras, o j -ésimo coeficiente de y_i é uma projeção na j -ésima linha de P . Portanto, as linhas de P são um novo conjunto de vetores (base) para representação de X .

Até o momento, é possível concluir que, ao assumir a linearidade, o problema é reduzido a simples busca da mudança de base apropriada. O vetor P , nesta transformação, se tornará as **componentes principais** de X . Neste ponto, duas questões importantes surgem. São elas:

- *Qual é a melhor maneira de re-expressar X ?*
- *Qual é uma boa escolha para a nova base P ?*

As respostas de tais questões dependem de quais características a nova matriz Y deve exibir. Para tal resposta, os tópicos seguintes devem ser discutidos.

2.4.2 Variância e o ruído

Variância é uma medida do espalhamento de dados em um vetor. Dado um vetor x contendo n elementos, cujo valor médio é representado por \bar{x} e o i -ésimo elemento é

indicado por x_i , sua variância é dada por

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}. \quad (2.35)$$

Como não há uma escala absoluta para medição de ruído, a medida mais comum é a relação sinal-ruído (ou SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*), a qual pode ser calculada pela relação da variância do sinal e do ruído, ou seja,

$$SNR = \frac{\sigma_{\text{sinal}}^2}{\sigma_{\text{ruído}}^2}. \quad (2.36)$$

O nível de ruído em qualquer conjunto de dados deve ser baixo, caso contrário, independente da técnica de análise, pouca ou nenhuma informação sobre o sinal pode ser extraída.

É razoável assumir que, para determinado conjunto de dados, direções com elevadas variâncias podem conter a dinâmica de interesse (sinal), enquanto as direções de menor variância geralmente representam o ruído de um sinal, como ilustra a Figura 22.

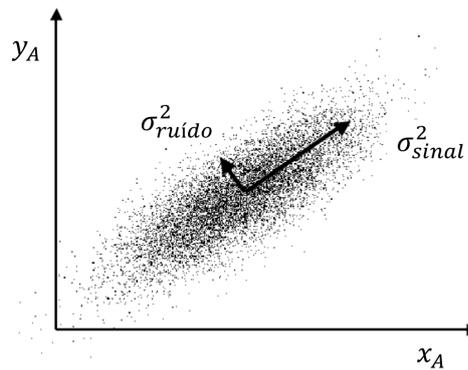


Figura 22 – Direção das variâncias. Fonte: Adaptado de (29).

Esta suposição sugere que a base de interesse não é a base trivial mencionada anteriormente, pois suas direções não correspondem às direções de máxima variância. Desta forma, maximizar a variância equivale a encontrar a rotação apropriada da base trivial.

2.4.3 Redundância e a matriz de covariância

Se durante a realização dos experimentos/medições, múltiplos sensores registram a mesma informação dinâmica, obtém-se dados redundantes. Desta forma, é possível imaginar que, em muitos casos, não há necessidade de adquirir determinadas variáveis.

Quando uma variável não for capaz de prever outra, pode-se dizer que tais variáveis são **não-correlacionadas**. Variáveis que são calculadas através da combinação de outra variável podem ser eliminadas do experimento sem que haja perda de informação. Esta é a ideal central da redução dimensional.

De modo a quantificar a redundâncias de dois sinais, considere dois conjuntos de medidas, ambos com média igual a zero, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ e $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$. As variâncias de A e B são individualmente definidas por

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i a_i^2, \quad \text{e} \quad \sigma_B^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i b_i^2. \quad (2.37)$$

Variância opera somente em uma única dimensão, de modo que seu cálculo para cada dimensão é realizada independentemente das outras dimensões. Entretanto, é útil possuir uma medida similar para descobrir quanto uma dimensão variam com relação a outra. Esta medida, é chamada de covariância, a qual é sempre medida entre duas dimensões (30).

Para os conjuntos supracitados, ambos com média zero, a covariância é dada por

$$\sigma_{AB}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i a_i b_i. \quad (2.38)$$

A covariância mede, portanto, o grau de linearidade entre duas variáveis. Um grande valor positivo indica uma grande relação positiva entre os dados, enquanto um grande valor negativo indica uma grande relação negativa entre as variáveis. Se a covariância for zero, as variáveis não são correlacionadas, ou seja, uma é independente da outra.

Convertendo A e B em vetores do tipo linha $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ e $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]$, torna-se possível expressar a covariância como o produto interno entre os vetores, ou seja,

$$\sigma_{AB}^2 = \frac{1}{n-1} ab^T. \quad (2.39)$$

Neste ponto, pode-se generalizar de dois vetores para um número arbitrário. Renomeando os vetores linha a e b para x_1 e x_2 , e ainda considerando vetores adicionais x_3, x_4, \dots, x_m , define-se a matriz X do tipo $m \times n$, dada por

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

Nesta matriz, cada linha corresponde a todas medidas de uma grandeza particular, enquanto cada coluna corresponde ao conjunto de medições de um experimento particular. Através desta matriz, pode-se definir a **matriz de covariância** C_X , dada por

$$C_X = \frac{1}{n-1} X X^T. \quad (2.41)$$

Este cálculo resulta em uma matriz simétrica $m \times m$, cuja diagonal principal corresponde às variâncias das grandezas e os termos restantes correspondem às covariâncias entre as grandezas. A matriz C_X fornece, portanto, a covariância de todos os possíveis pares de grandezas, refletindo o ruído e a redundância nas medições. Ainda, nos termos da diagonal principal, grandes valores correspondem aos valores de interesse, enquanto no restante da matriz, grandes valores correspondem à uma elevada redundância entre as grandezas.

Neste ponto, pode-se sumarizar afirmando que os objetivos são reduzir a redundância de informação, medido pela covariância, e maximizar o sinal, medida pela variância. Em outras palavras, ao fazer transformação linear P , é desejado que a matriz de covariância de $Y = PX$ seja diagonal, ou seja, que a matriz C_Y possua somente termos na diagonal principal (*cf.* Definição 2.4.1). Além disso, cada dimensão sucessiva de Y deve ser ordenada de acordo com sua respectiva variância.

Definição 2.4.1 (Matrizes diagonalizáveis). *Dizemos que uma matriz A é diagonalizável se existem matriz P e D tais que $D = P^{-1}AP$, ou equivalentemente, $A = PDP^{-1}$, em que D é uma matriz diagonal.*

Existem muitos métodos para diagonalização de C_Y . A PCA seleciona o método mais simples, ao assumir que todos os vetores bases $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ são ortonormais. O vetor P atua como uma rotação generalizada que alinha a base com o eixo de máxima variância. O primeiro vetor p_1 indica a direção em que a variância de X é maximizada. Os demais vetores p_i são encontrados subsequentemente da mesma forma, indicando a direção de máxima variância. É importante lembrar sempre da condição de ortogonalidade entre os vetores. O conjunto de vetores ordenados são as chamadas **componentes principais**.

Embora o algoritmo seja simples, é necessário agora encontrar uma solução analítica para a implementação do mesmo. Devido ao princípio de ortogonalidade é possível encontrar uma solução elegante para este problema.

2.4.4 Decomposição em autovalores

Pode-se derivar uma solução algébrica para a PCA baseada em uma importante propriedade da decomposição em autovalores e autovetores (*cf.* Definição 2.4.2).

Definição 2.4.2 (Autovalores e autovetores). *Um número real λ é chamado de autovalor de uma matriz A , se existe um vetor não nulo V tal que*

$$AV = \lambda V. \quad (2.42)$$

Um vetor não nulo que satisfaça a equação anterior é chamado de autovetor de A .

Dado o conjunto de dados X , uma matriz $m \times n$, em que m é o número de grandezas medidas e n é o número de amostras coletadas de cada grandeza, ou seja, o número de experimentos realizados. Aqui, a intenção é encontrar uma matriz ortonormal P que execute a transformação linear $Y = PX$ de modo que a matriz de covariância C_Y seja diagonal. As linhas de P são as componentes principais de X .

Re-escrevendo C_Y em termos das variáveis desconhecidas, tem-se

$$\begin{aligned}
 C_Y &= \frac{1}{n-1}YY^T \\
 &= \frac{1}{n-1}(PX)(PX)^T \\
 &= \frac{1}{n-1}PXX^TP^T \\
 &= P\left(\frac{1}{n-1}XX^T\right)P^T \\
 C_Y &= PC_XP^T.
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

Se a matriz P for escolhida tal que cada linha p_i seja um autovetor de C_X , ou seja, $P \equiv E^T$, e devido a condição de ortogonalidade da matriz P , tem-se que $E = P^{-1} = P^T$ (cf. Teorema 2.1). Além disso, como C_X é simétrica, pelo Teorema 2.2, tem-se que $C_X = EDE^{-1} = P^{-1}DP$. Desta forma, é possível rescrever C_Y da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 C_Y &= PC_XP^T \\
 &= P(EDE^{-1})P^T \\
 &= P(P^{-1}DP)P^T \\
 &= (PP^{-1})D(PP^T) \\
 &= (PP^{-1})D(PP^{-1}) \\
 C_Y &= D.
 \end{aligned} \tag{2.44}$$

Teorema 2.1 (Matrizes ortogonais). *Uma matriz A é dita ser ortogonal se sua inversa coincide com sua transposta, ou seja, $A^{-1} = A^T$.*

Teorema 2.2 (Condição de diagonalização baseada em autovetores). *Uma matriz A do tipo $n \times n$ é diagonalizável se e somente se ela possui n autovetores linearmente independentes (L.I).*

Corolário 2.2.1 (Matriz simétrica diagonalizada por autovetores). *Se uma matriz A do tipo $n \times n$ possui n autovetores linearmente independentes, então ela pode ser diagonalizada por uma matriz E composta por seus autovetores, ou seja, $D = E^{-1}AE$,*

em que D é uma matriz diagonal formada por seus autovalores. Portanto, a matriz E é encontrada determinando os n autovetores L.I. de A .

Teorema 2.3 (Matriz simétrica ortogonalmente diagonalizável). *Uma matriz A é simétrica se e somente se ela for ortogonalmente diagonalizável, ou seja, existe uma matriz ortogonal Q e uma matriz diagonal D tais que $D = Q^T A Q$.*

É evidente que a escolha de P diagonaliza C_Y , objetivo este da PCA. Desta forma, podemos sumarizar os resultados da PCA:

- As componentes principais de X são os autovetores de sua matriz de covariância C_X .
- O i -ésimo valor diagonal de C_Y corresponde a variância de X em relação a p_i .

Vale lembrar também que X foi escolhido de tal forma a possui média igual a zero, suposição esta que deve ser levada em conta no algoritmo.

Embora a decomposição apresentada nesta seção forneça um dos caminhos de obtenção das componentes principais, a Seção 2.4.5 apresenta uma solução mais geral usando uma técnica mais relacionada a esta análise: a decomposição em valores singulares.

2.4.5 Decomposição em valores singulares

A decomposição em valores singulares (ou SVD, do inglês *Singular Value Decomposition*) possui diversas aplicações em várias áreas de interesse. Através dela, informações podem ser extraídas de forma direta ou indireta utilizando outros métodos complementares.

Teorema 2.4 (Decomposição reduzida em valores singulares). *Seja uma matriz A do tipo $m \times n$, com $m \geq n$ e posto r . Se*

$$A = U \Sigma V^T, \quad (2.45)$$

em que U e V , $m \times r$ e $n \times r$, respectivamente, são matrizes cujas colunas são orto-

normais, e Σ é a matriz diagonal $r \times r$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_r \end{bmatrix}, \quad (2.46)$$

então $U\Sigma V^T$ é dito ser a **decomposição em valores singulares de A**.

As colunas da matriz U são autovetores de AA^T , sendo chamados de vetores singulares à esquerda da matriz A . As colunas de V são autovetores de $A^T A$, sendo chamados de vetores singulares à direita de A . Além disto, os elementos da diagonal principal de Σ são positivos e são as raízes quadradas dos autovalores não nulos ($\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$) de AA^T e $A^T A$, sendo estes os chamados **valores singulares de A**.

A versão escalar da SVD é a definição

$$A\hat{v}_i = \sigma_i\hat{u}_i, \quad (2.47)$$

em que, $\{\hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots, \hat{v}_r\}$ é um conjunto de autovetores ortonormais associado aos autovalores $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r\}$ da matriz simétrica $A^T A$ e $\{\hat{u}_1, \hat{u}_2, \dots, \hat{u}_r\}$ é o conjunto de vetores definidos por $\hat{u}_i = \frac{1}{\sigma_i} A\hat{v}_i$.

O Teorema 2.4 afirma que qualquer matriz arbitrária A pode ser convertida em uma matriz ortogonal U , uma matriz diagonal Σ e outra matriz ortogonal V .

O Exemplo 2.2 mostra o passo-a-passo de uma decomposição em valores singulares de uma matriz 2×2 apenas com o objetivo de retratar o procedimento para o cálculo da SVD.

Exemplo 2.2. Obtenção da decomposição em valores singulares da matriz

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 5 \\ -1 & 7 \end{bmatrix}.$$

- Cálculo de V

$$A^T A = \begin{bmatrix} 5 & -1 \\ 5 & 7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 5 \\ -1 & 7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 26 & 18 \\ 18 & 74 \end{bmatrix}$$

$$\det(A^T A - \lambda I) = \det \begin{bmatrix} 26 - \lambda & 18 \\ 18 & 74 - \lambda \end{bmatrix} = (\lambda - 20)(\lambda - 80)$$

Então, os autovalores de $A^T A$, na ordem decrescente são $\lambda_1 = 80$ e $\lambda_2 = 20$.

Determinando vetores unitários, soluções dos sistemas homogêneos com matrizes $A^T A - 80I = \begin{bmatrix} -54 & 18 \\ 18 & -6 \end{bmatrix}$ e $A^T A - 20I = \begin{bmatrix} 6 & 18 \\ 18 & 54 \end{bmatrix}$, obtém-se os autovetores $V_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{10}} \\ \frac{3}{\sqrt{10}} \end{bmatrix}$ e $V_2 = \begin{bmatrix} \frac{-3}{\sqrt{10}} \\ \frac{1}{\sqrt{10}} \end{bmatrix}$.

Logo,

$$V = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{10}} & \frac{-3}{\sqrt{10}} \\ \frac{3}{\sqrt{10}} & \frac{1}{\sqrt{10}} \end{bmatrix}.$$

- Cálculo de Σ

Como a matriz A tem posto dois, seus valores singulares são $\sigma_1 = \sqrt{80}$ e $\sigma_2 = \sqrt{20}$, portanto

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 4\sqrt{5} & 0 \\ 0 & 2\sqrt{5} \end{bmatrix}.$$

- Cálculo de U

Como $A = U\Sigma V^T$, e lembrando que V foi escolhido de modo a ser ortonormal, tem-se que $V^T V = I$ e, portanto, $AV = U\Sigma$. Desta forma, substituindo A , V e Σ , para calcular $U = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$, obtém-se

$$U = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}.$$

A decomposição em valores singulares pode ser re-escrita por

$$\begin{aligned} A &= U\Sigma V^T \\ U^T A &= \Sigma V^T \\ U^T A &= Z, \end{aligned} \tag{2.48}$$

de modo que U^T representa uma mudança de base de X para Z .

Há ainda uma simetria para a decomposição. Re-escrevendo a SVD, pode-se igualmente obter

$$\begin{aligned} A &= U\Sigma V^T \\ AV &= U\Sigma \\ (AV)^T &= (U\Sigma)^T \\ V^T A^T &= \Sigma U^T \\ V^T A^T &= Z, \end{aligned} \tag{2.49}$$

que mostra que V^T transforma A^T em Z .

Neste ponto, é evidente a semelhança entre a PCA e a SVD. Definindo novamente X como a matriz original de dados do tipo $m \times n$, pode-se definir uma nova matriz A também do tipo $m \times n$, dada por

$$A = \frac{1}{\sqrt{n-1}} X^T, \quad (2.50)$$

em que cada coluna de A possui média zero. A escolha de A se torna clara através de

$$\begin{aligned} A^T A &= \left(\frac{1}{\sqrt{n-1}} X^T \right)^T \left(\frac{1}{\sqrt{n-1}} X^T \right) \\ &= \frac{1}{n-1} X X^T \\ A^T A &= C_X. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Da Seção 2.4.4, é conhecido que as componentes principais de X são os autovetores de C_X . Ao calcular a SVD de A , as colunas da matriz V contém os autovetores de C_X . Portanto, as colunas de V são as **componentes principais de X** .

2.4.6 Interpretação das componentes principais

Os autovetores de uma matriz de covariância têm a característica de serem ortogonais entre si, o que implica em independência dos dados. Observou-se que as componentes principais são vetores ortogonais nos quais os dados originais são projetados. Tal projeção pode revelar informações independentes presentes nos dados.

Para auxiliar na interpretação das componentes principais, definem-se os **scores** como a projeção dos dados originais (de média zero) nos autovetores da matriz de covariância, ou seja, nos componentes principais.

A simples observação destes valores não ajuda na interpretação das informações obtidas com a análise. Não existe uma interpretação padronizada para os componentes principais de dados. Cada conjunto de dados gerará componentes que devem ser analisadas para se chegar a alguma interpretação. Porém, não existe garantia de que haverá uma interpretação plausível para qualquer conjunto de dados. Ainda assim, há pelo menos um procedimento que ajuda na interpretação dos dados.

A ideia básica é associar cada uma das componentes principais (colunas da matriz P) a cada um dos **scores** (colunas da matriz **scores**), o que é feito normalmente utilizando gráficos de barras (21). Esta representação é utilizada neste trabalho.

3 Ensaio Laboratoriais

Após o conhecimento do óleo combustível e da compreensão dos tópicos relacionados às técnicas ultrassônicas, bem como das técnicas de processamento digital e estatístico de sinais, torna-se possível abordar as etapas realizadas em laboratório.

Como o objetivo deste trabalho é de apresentar uma metodologia para a estimação do conteúdo de água em óleos combustíveis, torna-se imprescindível relatar os ensaios realizados. Estas etapas contaram com o desenvolvimento de alguns dispositivos, com a definição prévia de algumas configurações e, em seguida, com os processos de secagem e contaminação controlada do óleo combustível.

Devido a sua complexidade, os detalhes do desenvolvimento eletrônico responsável pela geração e recepção dos sinais ultrassônicos são abordados no Apêndice A, enquanto as demais etapas são tratadas nesta seção.

3.1 Resposta em Frequência dos Transdutores Ultrassônicos

Dentre os tipos de transdutores ultrassônicos apresentados na Seção 2.2.3.1, optou-se por conceber alguns pares de transdutores retos, como apresenta a Figura 23. Resinas de cores diferentes foram utilizadas com o objetivo de facilitar a identificação e diferenciação dos transdutores de emissão e de recepção.



Figura 23 – Transdutores ultrassônicos fabricados.

O conhecimento prévio da resposta em frequência dos transdutores contribui para a obtenção das componentes sensíveis à presença de água, pois facilita o uso dos algoritmos responsáveis para a aplicação da técnica de PCA. Um menor número de parâmetros de entrada agiliza a obtenção das componentes principais. Desta forma, o espectro de impedância do cristal piezoelétrico utilizado na concepção dos transdutores foi obtido e é apresentado na Figura 24. A impedância elétrica é medida dentro da faixa de 10kHz a 100kHz utilizando o conhecido método com ponte auto-balanceada (do inglês *auto-balancing bridge method*). As frequências de ressonância e anti-ressonância são enfatizadas.

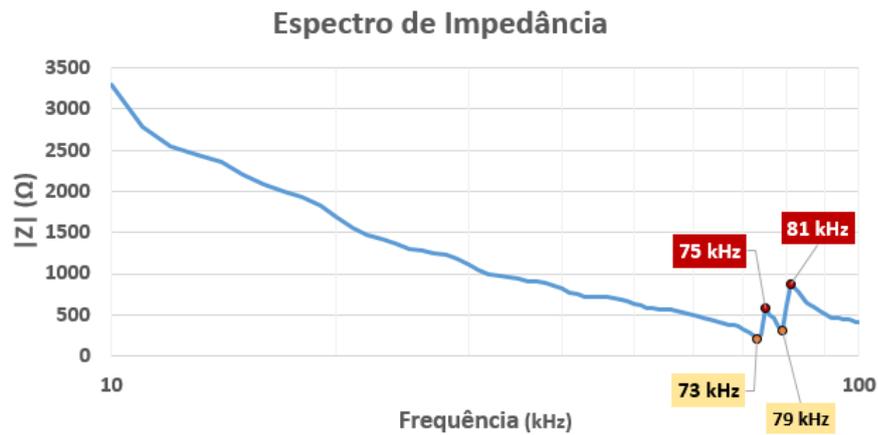


Figura 24 – Espectro de impedância do cristal piezoelétrico utilizado.

Para utilização dos transdutores ultrassônicos, uma cubeta de vidro foi preparada, apresentada a Figura 25. Os transdutores são posicionados no alojamento de modo a facear o nível de óleo lateralmente, formando um caminho acústico.



Figura 25 – Cubeta de vidro com os transdutores ultrassônicos.

3.2 Definições do Sinal de Excitação e do Sistema de Aquisição

Neste ponto, vale lembrar as considerações feitas na Seção 1.3. Baseando-se em uma representação por função de transferência, o fluido foi considerado o sistema em análise, enquanto os sinais emitidos e recebidos foram considerados, respectivamente, a entrada e a saída, como ilustra a Figura 26. É esperado que, ao manter o sinal de excitação constante, a saída varie de acordo com o nível de contaminação por umidade da amostra. Assim, a definição de um padrão para a excitação dos transdutores, bem como para o sistema de aquisição se faz necessário.

O modo pulsado, descrito na Seção 2.2.3.3, foi estabelecido para a operação dos transdutores ultrassônicos. Além disso, o método de análise escolhido baseia-se na técnica

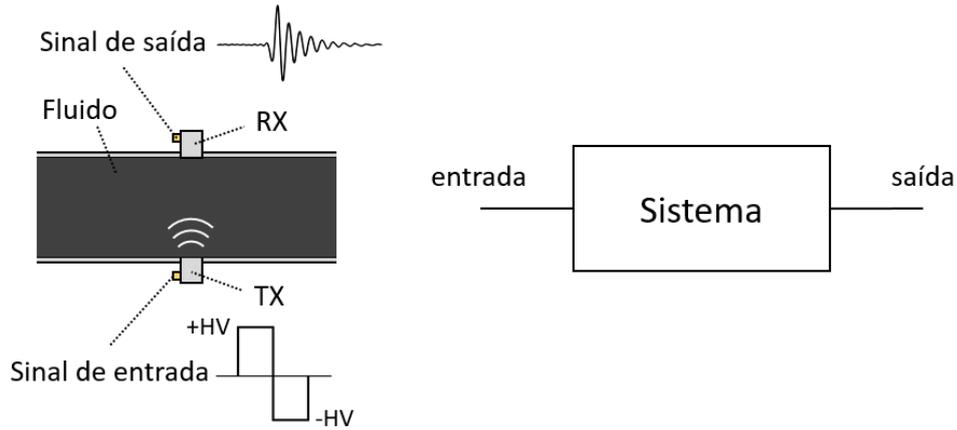


Figura 26 – Sistema em análise e função de transferência.

de transmissão, descrita na Seção 2.2.3.4, na qual dois transdutores são utilizados: o emissor (TX) e o receptor (RX).

A Figura 27 ilustra o conceito deste método de análise trabalhando no modo pulsado. Observa-se que, devido ao modo de operação pulsado, apenas parte do sinal adquirido pelo transdutor de recepção carrega a informação de interesse, ou seja, os chamados pulsos ultrassônicos.

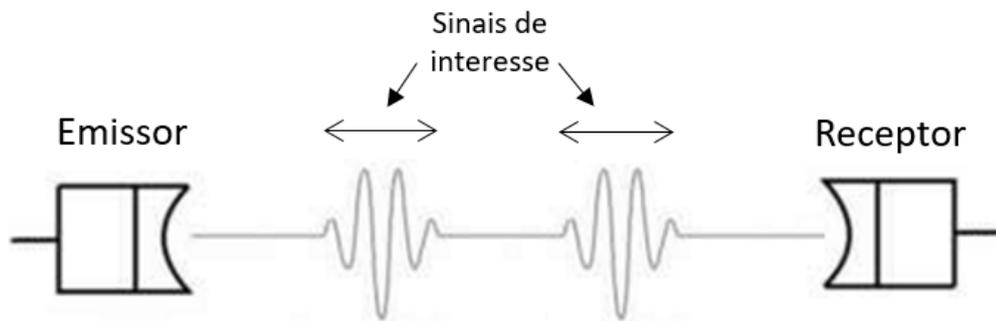


Figura 27 – Pulsos ultrassônicos de interesse no modo de operação pulsado. Adaptado de (19).

Um sinal adquirido pode conter, portanto, vários pulsos ultrassônicos dependendo da duração da aquisição. A título de demonstração do sistema em funcionamento, a Figura 28 apresenta os sinais de emissão (pulsos retangulares) e de recepção (pulsos ultrassônicos) obtidos com o protótipo desenvolvido.

Para divisão dos pulsos ultrassônicos, um algoritmo foi elaborado, permitindo a separação automática dos mesmos. Cada pulso pode ser considerado como um experimento realizado. Após aplicação das transformações matemáticas de interesse, cada pulso corresponderá a diversos parâmetros que, por sua vez, servirão como dados de entrada para a aplicação da técnica de PCA.

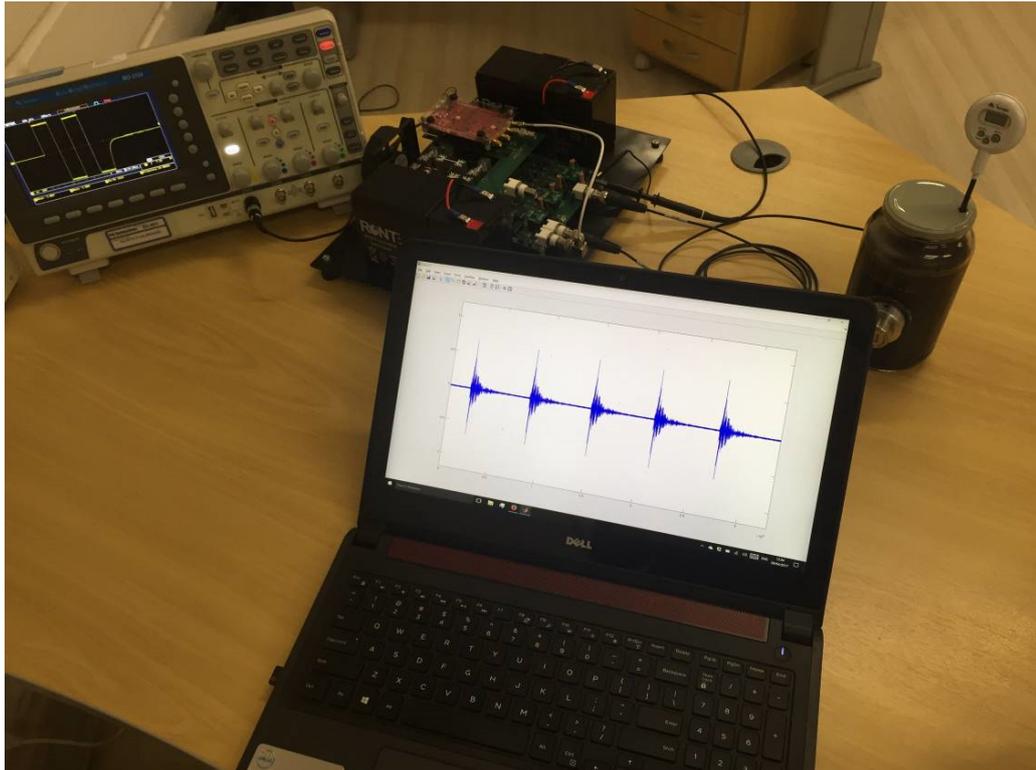


Figura 28 – Pulsos ultrassônicos obtidos com o protótipo desenvolvido.

O sistema eletrônico desenvolvido possibilitou adquirir sinais a 1,5625 MS/s. Após a realização de alguns testes e com esta taxa de amostragem, foram necessários 1024 pontos para registrar o porção de interesse de cada pulso ultrassônico. Em outras palavras, a resolução do espectro de frequência definida foi de 1,5259kHz.

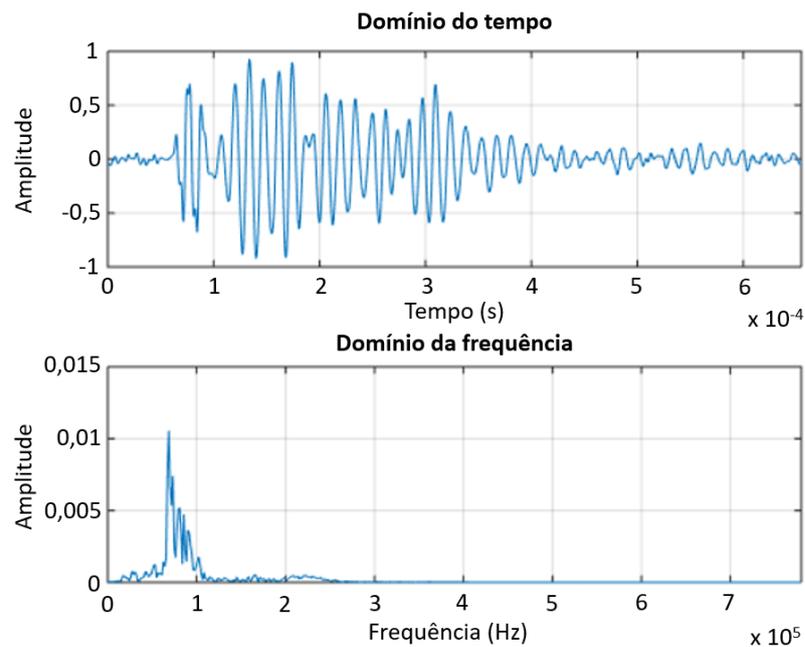


Figura 29 – Pulso ultrassônico no domínio do tempo e no domínio da frequência.

A Figura 29 apresenta um dos pulsos adquiridos no domínio do tempo e no domínio da frequência, é possível observar que as componentes em frequência que compõem o sinal estão próximas as frequências de ressonância e anti-ressonância do transdutor ultrassônico, previamente conhecidas com o espectro de impedâncias gerado.

3.3 Processo de Secagem

Visando quantificar o conteúdo de água, o processo de secagem se faz igualmente necessário, pois permite obter níveis mínimos de água, ou até zerados, antes das etapas de contaminação.

O método elaborado para realizar o processo de secagem baseia-se em filtro de papel crepado. Trata-se de um tipo especial de celulose pura com alto poder de absorção. O filtro foi acoplado à tampa de um frasco de vidro, como apresenta a Figura 30.



Figura 30 – Filtro de papel crepado.

Após a colocação do óleo no frasco, o filtro foi colocado dentro de uma estufa à 40°C durante 24 horas de modo a facilitar qualquer acomodação de água, lembrando que a densidade da água é maior que densidade do óleo combustível.

3.4 Processo de Contaminação Controlada

Como visto na Seção 2.4, a técnica de PCA identifica a base mais significativa para re-expressar o conjunto de dados a partir da diagonalização da matriz de covariância. Os vetores responsáveis pela diagonalização são ordenados de acordo com sua variância, dando origem às chamadas componentes principais. A primeira componente indica, portanto, a direção de máxima variância e é com esta característica que os ensaios de contaminação se relacionam.

Através do controle do processo de adição de água, é possível manter grandezas escalares (e.g., temperatura, pressão, conteúdo de enxofre, etc.) basicamente constantes e variar somente a razão água/óleo de modo que a primeira componente encontrada pela

técnica de PCA, que retém a maior variância, se relacione com a informação desejada, ou seja, o conteúdo de água.

As contaminações foram realizadas adicionando-se água às amostras de óleo oriundas do processo de secagem. Utilizando-se seringas e uma balança de precisão, diferentes passos de contaminação foram realizados. Misturadores foram utilizados de forma a garantir a homogeneidade das amostras durante as aquisições de dados. Dois ensaios foram realizados de forma a permitir a sustentação da hipótese inicial e alcançar os objetivos esperados, seguindo a motivação apresentada.

Apenas com o intuito de classificação das amostras, hipótese que sustenta este trabalho, o primeiro ensaio consistiu em analisar duas amostras de óleo contendo teores totalmente diferentes de água. A primeira amostra continha apenas o óleo cru (i.e., sem contaminação), enquanto a segunda amostra continha 50% de água.

O segundo ensaio consistiu em passos de contaminação de 1% dentro de uma faixa próxima às condições reais de aplicação em campo, objetivo deste trabalho. Em relação ao conteúdo de água e de acordo com a Resolução ANP, apresentada na Seção 2.1.2, vale lembrar que o limite de 2% de água e sedimentos é imposto para comercialização de óleos combustíveis. Assim, amostras que apresentavam teores de água em uma faixa de 0% a 5% foram analisadas. A Tabela 4 apresenta um resumo deste ensaio.

Amostra	Óleo (g)	Água (g)	Água/Óleo (%)
A		0,0	0,0
B		4,9	1,0
C		9,8	2,0
D	490,0	14,7	3,0
E		19,6	4,0
F		24,5	5,0

Tabela 4 – Ensaio de contaminação em passos de 1%.

4 Aplicação da Técnica de PCA

Dadas as considerações feitas no Capítulo 3 e visando atingir os objetivos deste trabalho - uma metodologia que visa a estimação do teor de água em óleos combustíveis através da geração, recepção e análise de sinais ultrassônicos, de forma a possibilitar uma aplicação *online*, a obtenção da assinatura ultrassônica para cada nível de contaminação se faz necessária.

Entretanto, antes da obtenção de um modelo, que poderá ser usado nas aplicações em campo, é preciso sustentar a hipótese base deste trabalho, declarado na Seção 1.3, ou seja, que é possível a classificação de amostras de óleo com diferentes teores de água através da análise de sinais ultrassônicos. Após isso, buscar-se-á obter o modelo que facilite a estimação do conteúdo de água para possíveis aplicações *online*. É esperado neste momento encontrar uma expressão que relacione de alguma forma a assinatura ultrassônica à razão água-óleo.

Com o objetivo de comparar as transformadas revisadas na Seção 2.3, a técnica de PCA foi aplicada com dois conjuntos de parâmetros de entrada diferentes. O primeiro conjunto consistia somente nos parâmetros obtidos após a aplicação da Transformada Fourier, enquanto o segundo consistia somente nos parâmetros obtidos após a aplicação da *Modulation Spectra*.

Com o intuito de diminuir o número de parâmetros de entrada para a aplicação da técnica de PCA e reduzir a dimensão da matriz de covariância a ser diagonalizada, principalmente quando do uso da Transformada de Fourier, apenas algumas frequências foram utilizadas. Ao observar as respostas em frequência obtidas de diversos ensaios, optou-se por usar as componentes dentro da faixa de 60kHz a 105kHz. Devido à resolução de frequência fixa, 30 *bins* de frequência são portanto considerados.

4.1 Classificação de Amostras

Para a classificação de amostras, o primeiro ensaio, descrito na Seção 3.4, foi utilizado. Neste, apenas duas amostras contendo níveis bem diferentes de água são analisadas. Para cada nível de contaminação 180 pulsos foram analisados.

A Figura 31 apresenta a projeção de cada um dos conjuntos de dados oriundos da aplicação da Transformada de Fourier sobre a primeira componente principal (PC#1) obtida com a técnica de PCA com estes conjuntos, resultando nos chamados *scores* da PC#1. É possível perceber a separação *scores* dos 180 primeiros pulsos, correspondentes ao óleo cru, e os outros 180 pulsos, correspondentes à amostra que continha uma mistura

com 50% de água.

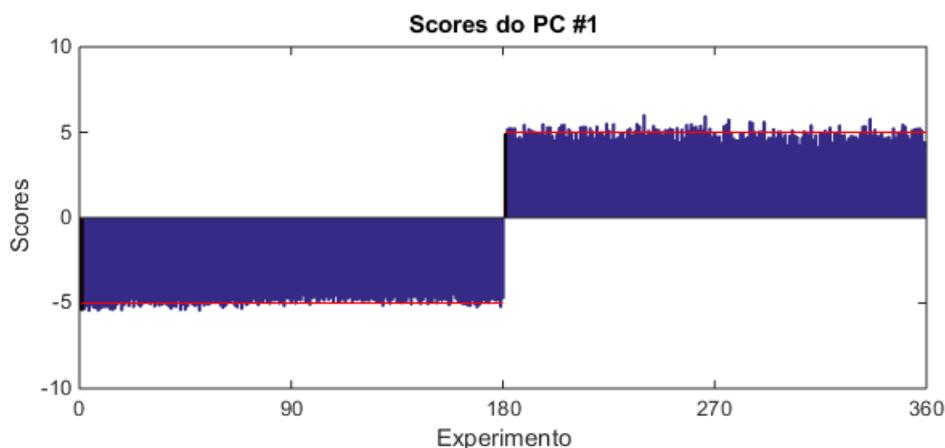


Figura 31 – Projeções sobre a PC#1 obtida com a Transformada de Fourier no primeiro ensaio.

Por outro lado, a Figura 32 apresenta a projeção de cada um dos conjuntos de dados oriundos da aplicação da *Modulation Spectra* sobre a PC#1 obtida agora com novos conjuntos. Neste ponto, é igualmente possível perceber patamares distintos entre os 180 pulsos correspondentes a cada nível de contaminação.

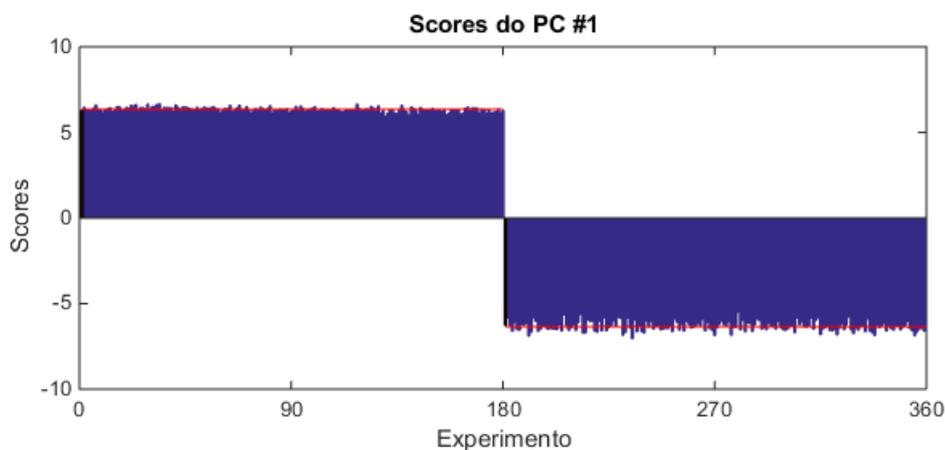


Figura 32 – Projeções sobre a PC#1 obtida com a *Modulation Spectra* no primeiro ensaio.

4.2 Estimação da Contaminação por Umidade

Como já discutido, o limite de 2% de água e sedimentos é imposto pela Resolução ANP N° 3, abordada na Seção 2.1.2. Assim, para esta etapa o segundo ensaio foi utilizado, haja vista a faixa e os passos de contaminação utilizados. Da mesma forma, para cada um dos 6 níveis de contaminação, 180 pulsos foram analisados.

Visando novamente comparar a aplicação da Transformada de Fourier e da *Modulation Spectra*, ambas as representações foram testadas.

A Figura 33 apresenta a projeção de cada um dos conjuntos de dados oriundos da aplicação da Transformada de Fourier sobre a PC#1 obtida através da técnica de PCA com os próprios conjuntos. É possível perceber patamares distintos entre os 180 pulsos correspondentes a cada nível de contaminação.

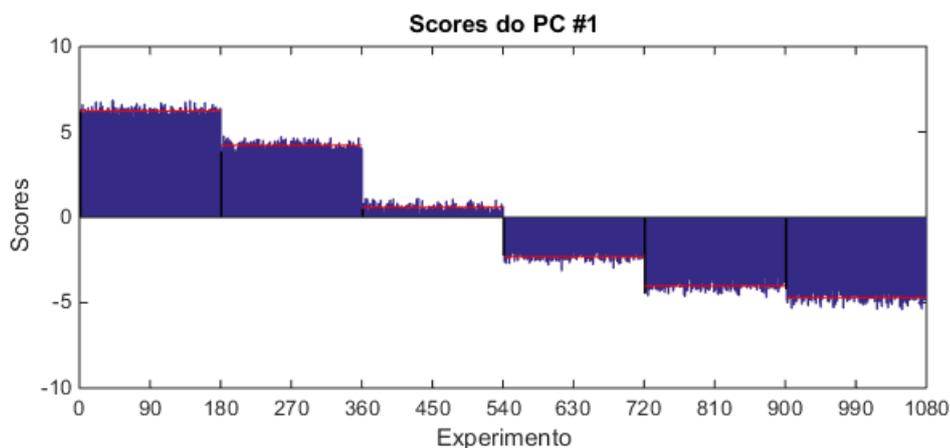


Figura 33 – Projeções sobre a PC#1 obtida com a Transformada de Fourier no segundo ensaio.

A Figura 34 apresenta a projeção de cada um dos conjuntos de dados oriundos da aplicação da *Modulation Spectra* sobre a PC#1 obtida através da técnica de PCA. Utilizando tais parâmetros como entrada, não é possível classificar as diferentes amostras de óleo.

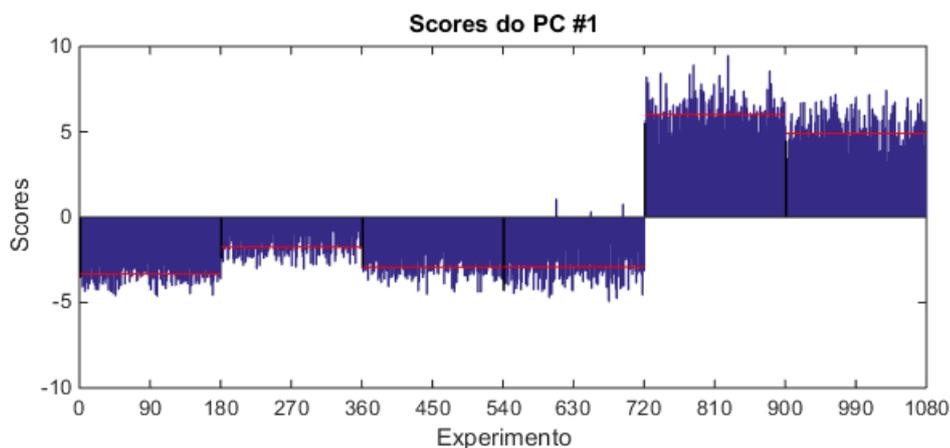


Figura 34 – Projeções sobre a PC#1 obtida com a *Modulation Spectra* no segundo ensaio.

Com base nestes resultados, a estimação do nível de contaminação por unidade será realizada a partir da aplicação da técnica de PCA que continha como entrada as componentes em frequência oriundas da Transformada de Fourier. A primeira componente principal encontrada, sobre a qual os dados originais foram projetados, resultando nos *scores* apresentados na Figura 33, é composto pela combinação linear dos parâmetros originais. A composição desta componente é apresentada na Figura 35. A contribuição de

cada parâmetro, bem como os valores de média e desvio padrão obtidos são apresentados na Tabela 5.

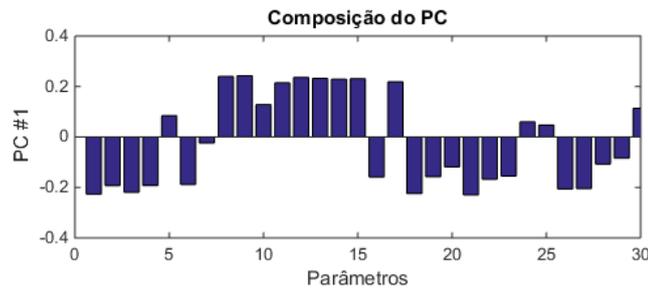


Figura 35 – Composição da PC#1 obtida a partir da Transformada de Fourier.

Valor médio: $1,2558 \times 10^{-3}$

Desvio padrão: $4,9975 \times 10^{-4}$

Parâmetro	Frequência (kHz)	Contribuição
1	59,509	-0,2263
2	61,035	-0,1931
3	62,561	-0,2191
4	64,087	-0,1923
5	65,613	0,0842
6	67,139	-0,1886
7	68,665	-0,0237
8	70,190	0,2402
9	71,716	0,2426
10	73,242	0,1281
11	74,768	0,2148
12	76,294	0,2363
13	77,820	0,2323
14	79,346	0,2291
15	80,872	0,2312
16	82,397	-0,1584
17	83,923	0,2188
18	85,449	-0,2242
19	86,975	-0,1574
20	88,501	-0,1185
21	90,027	-0,2294
22	91,553	-0,1676
23	93,079	-0,1549
24	94,604	0,0598
25	96,130	0,0473
26	97,656	-0,2058
27	99,182	-0,2046
28	100,708	-0,1080
29	102,233	-0,0838
30	103,759	0,1138

Tabela 5 – Composição da PC#1 obtida a partir da Transformada de Fourier.

Para melhor visualização do comportamento da assinatura ultrassônica, a Figura 36 apresentada a média dos espectros dos sinais correspondentes a cada um dos níveis de contaminação.

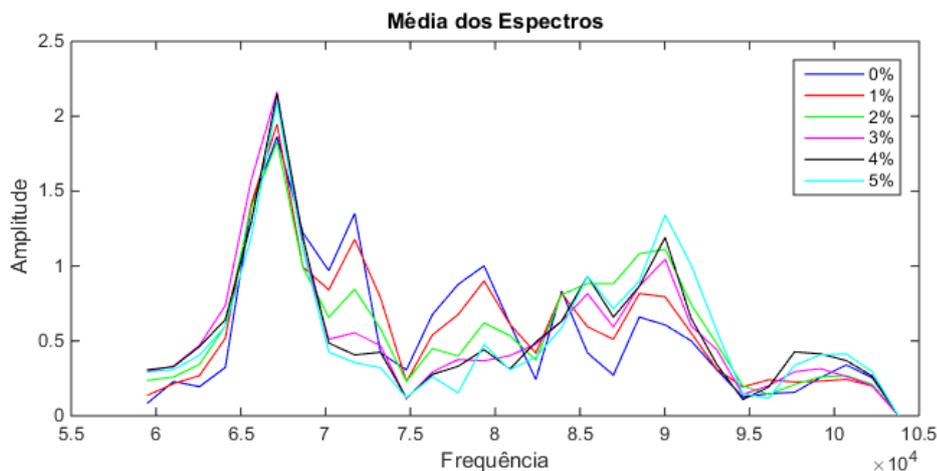


Figura 36 – Médias dos espectros.

Com o simples objetivo de verificação, o parâmetro com a maior contribuição (Parâmetro 9), correspondente à frequência de 71,716 kHz, é destacado na Figura 37, haja vista a correlação das amplitudes com os níveis de contaminação.

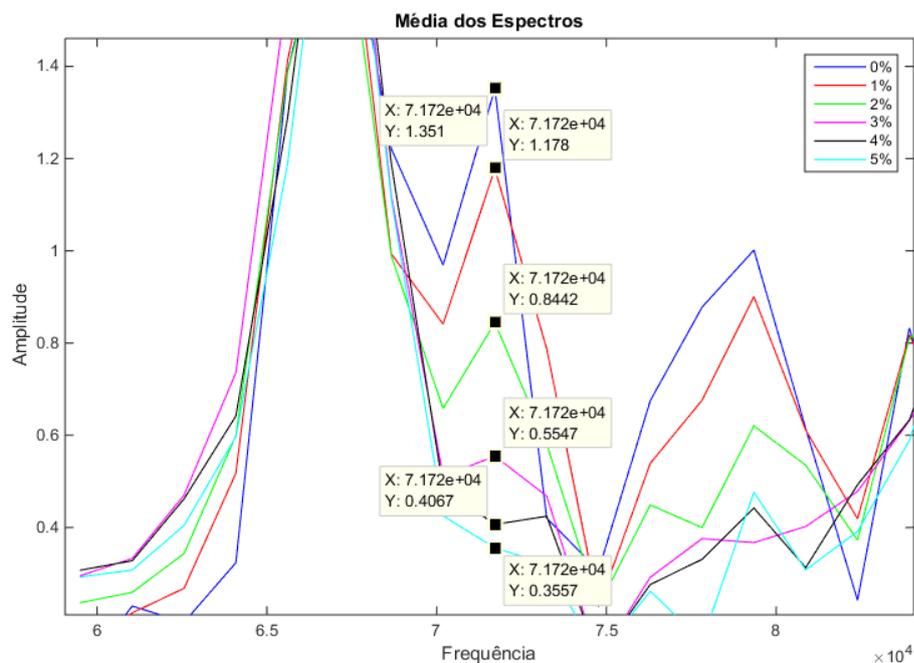


Figura 37 – Parâmetro com a maior contribuição para a formação da PC#1.

A partir dos resultados apresentados na Figura 33, é possível obter os valores médios de *scores* para cada grupo. Estes, por sua vez, podem finalmente ser associados aos níveis de contaminação, como apresenta a Tabela 6.

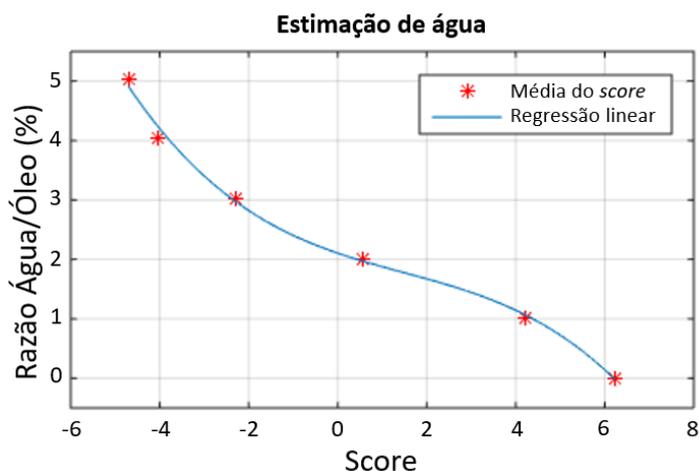
Água/Óleo (%)	Score médio
0,0	6,2316
1,0	4,2227
2,0	0,5800
3,0	-2,3094
4,0	-4,0233
5,0	-4,7017

Tabela 6 – Razão água-óleo *versus* Valor de *score*.

Uma regressão linear de terceira ordem, apresentada na Figura 38, resulta na equação

$$y = -0.0079x^3 + 0.0354x^2 - 0.2557x + 2.1062, \quad (4.1)$$

em que y corresponde à razão água-óleo, dada em %, e x corresponde ao valor de *score* para a primeira componente principal, composta e obtida a partir dos valores apresentados na Tabela 5.

Figura 38 – Estimativa de água de acordo com os valores de *score* para a a PC#1.

A Equação 4.1 pode agora ser usada para estimativa da contaminação por unidade em óleo, pois fornece a razão água-óleo a partir de um valor de *score*. Vale ressaltar que todos os coeficientes apresentados na Tabela 5, incluindo média e desvio padrão devem ser levados em consideração para a inferência adequada durante medições em campo.

5 Instalações em Campo

Os testes em campo são fundamentais para a verificação de um dos objetivos deste trabalho: uma aplicação *online* capaz de estimar a contaminação por umidade em óleos combustíveis. O protótipo foi instalado em uma usina termelétrica (UTE).

Para o monitoramento em campo, o desenvolvimento de um protótipo seguindo as exigências das instalações da UTE foi de suma importância. O sistema foi instalado em uma das baias de abastecimento de óleo combustível, como apresenta a Figura 39.



Figura 39 – Instalação em campo do protótipo em um dos terminais de abastecimento de óleo combustível.

Esta seção trata das considerações realizadas para a instalação, bem como do desenvolvimento do sensor capacitivo utilizado para comparação e validação dos resultados obtidos.

5.1 Características da Medição

O fluido, agora em movimento, preencherá o duto e passará através do caminho acústico entre os transdutores de emissão (TX) e o de recepção (RX). Da mesma forma, espera-se que o sinal de saída varie para diferentes níveis de contaminação por umidade, como ilustra a Figura 40.

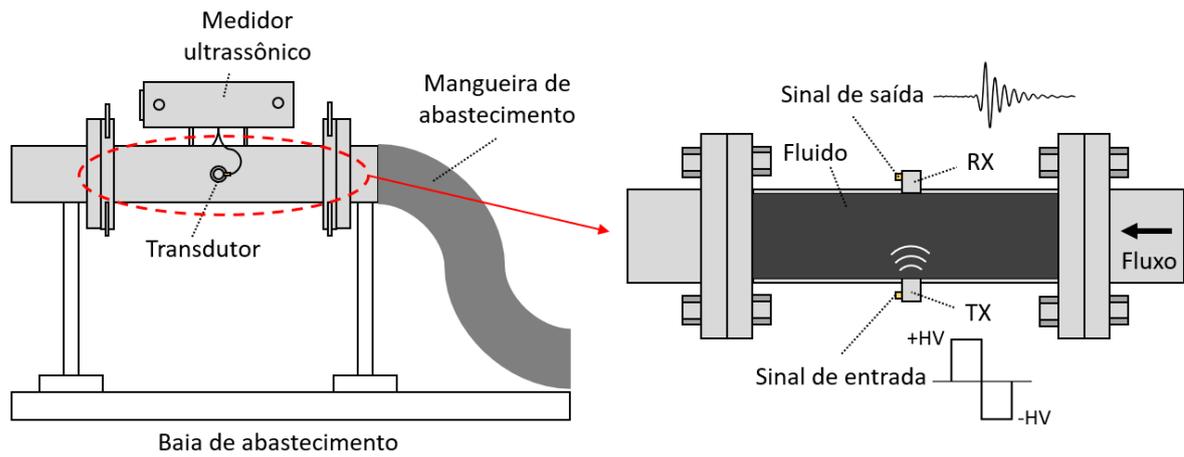


Figura 40 – Ilustração do esquema de monitoramento.

Como discutido na Seção 2.1.1, o fluido em análise trata-se de uma mistura de óleo combustível pesado e de diferentes contaminantes. Devido ao fato da mistura não ser homogênea, espera-se que o sistema aponte diferentes níveis de contaminação por unidade durante abastecimento.

A vazão média alcançada durante o processo de abastecimento é de aproximadamente $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$. Como o diâmetro do duto de passagem é de 4" ($0,1016 \text{ m}$), a velocidade média \bar{v}_f , ilustrada na Figura 41, é de aproximadamente $1,23 \text{ m/s}$.

De acordo com a ANP, a viscosidade máxima permitida de HFO a 60°C é de $0,00062 \text{ m}^2/\text{s}$. Para este valor e considerando o diâmetro e a velocidade do fluido supracitados, o número de Reynolds é de aproximadamente 202. Como o óleo combustível é normalmente aquecido até uma temperatura de 50°C durante o processo de abastecimento, sua velocidade cinemática aumenta ainda mais. Logo, o fluxo de óleo em condições estacionárias pode ser considerado laminar. Ainda, é possível assumir sem prejuízo à medição que o fluido se encontra totalmente desenvolvido na região a frente dos transdutores ultrassônicos.

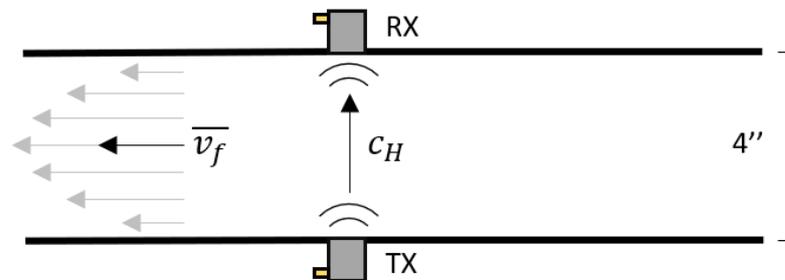


Figura 41 – Características da medição.

Por fim, sabendo que a velocidade do som em hidrocarbonetos pesados c_H é maior que 1000 m/s (31), é possível afirmar que a onda ultrassônica não é influenciada pelo

movimento do fluido, haja vista a curta distância do caminho acústico. É importante mencionar que, visando obter resultados adequados, o nível de fluido dentro do duto de passagem deve se encontrar acima da altura de ambos os transdutores durante as aquisições.

5.2 Sensor Capacitivo

Com o objetivo de comparar e validar todos os resultados obtidos pelo sistema desenvolvido durante o monitoramento em campo, um sensor capacitivo baseado em placa de circuito impresso (PCI) foi desenvolvido, como apresentado na Figura 42. Este tipo de sensor se comporta como um capacitor de forma que a emulsão água em óleo age como o material de isolamento. Devido a expressiva diferença entre as permissividades relativas do óleo combustível e da água, variações no valor da razão água/óleo variam a capacitância equivalente.



Figura 42 – Sensor capacitivo desenvolvido.

Para aumentar a capacitância equivalente a ser medida, facilitando a medição, o sensor capacitivo conta com placas circulares conectadas em paralelo, como ilustra a Figura 43. Por fim, visando conhecer e eliminar os efeitos parasitas das medições, amostras padrão de óleo com permissividades relativas conhecidas foram utilizadas.

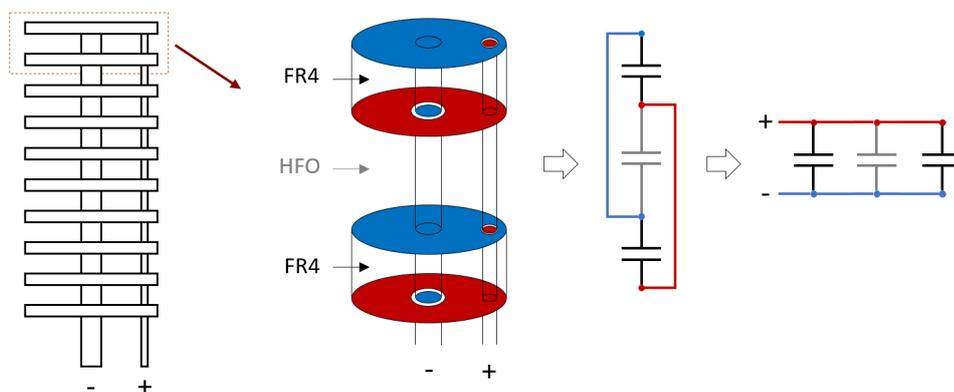


Figura 43 – Esquema de ligação do sensor capacitivo.

6 Resultados e Discussões

Seguindo os requisitos da ANP, ficou conhecido que óleos combustíveis contendo níveis de água e sedimentos maiores que 2% não podem ser comercializados. Assim, como os distribuidores autorizados devem entregar os óleos combustíveis dentro de tal limite, espera-se obter valores menores com o sistema desenvolvido e também com o sensor capacitivo.

Durante cada processo de abastecimento de óleo, o protótipo realiza diversas aquisições dependendo das configurações definidas pelo usuário. No final de todas as coletas, o valor médio da razão água/óleo é registrado. Os valores médios obtidos de ambos os métodos (ultrassônico e capacitivo) são comparados. A instalação em campo do sensor capacitivo é apresentada na Figura 44.



Figura 44 – Sensor capacitivo integrado ao protótipo em campo.

No período de setembro de 2018, a UTE foi continuamente requisitada. Desta forma, um número considerável de abastecimentos foram realizados neste período. A Tabela 7 apresenta todos os resultados obtidos durante o período mencionado. É possível observar o erro, dado em pontos percentuais, entre os valores inferidos a partir de ambos os métodos.

A caráter de demonstração, apenas três resultados são enfatizados e detalhados, haja vista a grande quantidade de coletas realizadas no período informado. Como o início da aquisição dependia do comando do usuário, algumas coletas apresentam um menor número de amostras analisadas. O valor de temperatura correspondente a cada instante foi igualmente registrado. O intervalo entre amostras é de 20s e, conseqüentemente, cada coleta teve duração média de 100 minutos.

n°	Data e hora	Razão água/óleo (%)		Erro
		Ultrassom	Capacitivo	
1	06/Set/2018, 23:30	1,0	0,9	+0,1
2	07/Set/2018, 15:38	1,1	0,9	+0,2
3	08/Set/2018, 07:35	1,1	0,9	+0,2
4	11/Set/2018, 07:58	1,1	0,9	+0,2
5	11/Set/2018, 11:42	1,1	0,9	+0,2
6	11/Set/2018, 17:43	1,1	0,9	+0,2
7	12/Set/2018, 09h48	1,1	0,9	+0,2
8	12/Set/2018, 16h33	1,1	1,0	+0,1
9	12/Set/2018, 17h56	1,0	1,0	0,0
10	12/Set/2018, 21h33	1,1	1,0	+0,1
11	13/Set/2018, 06h21	1,1	1,0	+0,1
12	13/Set/2018, 09h08	1,1	0,9	+0,2
13	13/Set/2018, 13h36	1,0	0,9	+0,1
14	13/Set/2018, 16h11	1,0	0,9	+0,1
15	13/Set/2018, 19h42	1,0	0,9	+0,1
16	17/Set/2018, 13h33	1,1	1,1	0,0
17	18/Set/2018, 13h57	1,1	1,1	0,0
18	19/Set/2018, 00h04	0,9	0,9	0,0
19	19/Set/2018, 12h26	1,2	1,0	+0,2
20	19/Set/2018, 13h55	1,2	1,0	+0,2
21	19/Set/2018, 17h57	1,0	1,0	0,0
22	20/Set/2018, 10h48	1,2	1,0	+0,2
23	21/Set/2018, 16h57	1,0	1,0	0,0
24	21/Set/2018, 19h13	1,0	1,0	0,0
25	24/Set/2018, 10h45	0,7	0,9	-0,2
26	25/Set/2018, 11h28	0,7	0,6	-0,1
27	26/Set/2018, 07h36	0,8	0,6	+0,2
28	27/Set/2018, 07h02	0,7	0,6	+0,1
29	27/Set/2018, 08h14	0,7	0,6	+0,1
30	27/Set/2018, 13h02	0,7	0,6	+0,1
31	27/Set/2018, 15h01	0,7	0,6	+0,1
32	27/Set/2018, 19h02	0,7	0,6	+0,1

Tabela 7 – Resultados obtidos em campo durante o mês de Setembro de 2018.

A Figura 45 apresenta os resultados obtidos durante o abastecimento ocorrido em 20/Set/2018 às 10:48. Da mesma forma, a Figura 46 traz os resultados obtidos durante o abastecimento ocorrido em 26/Set/2018 às 07:36. Por fim, os resultados obtidos durante o abastecimento ocorrido em 27/Set/2018 às 19:02 são apresentados na Figura 47.

A partir destes resultados, é possível verificar a não-homogeneidade do fluido em relação à razão água/óleo, comportamento este já esperado. Para cada porção analisada ao longo do processo de monitoramento, observa-se que os níveis, embora próximos, não

são constantes.

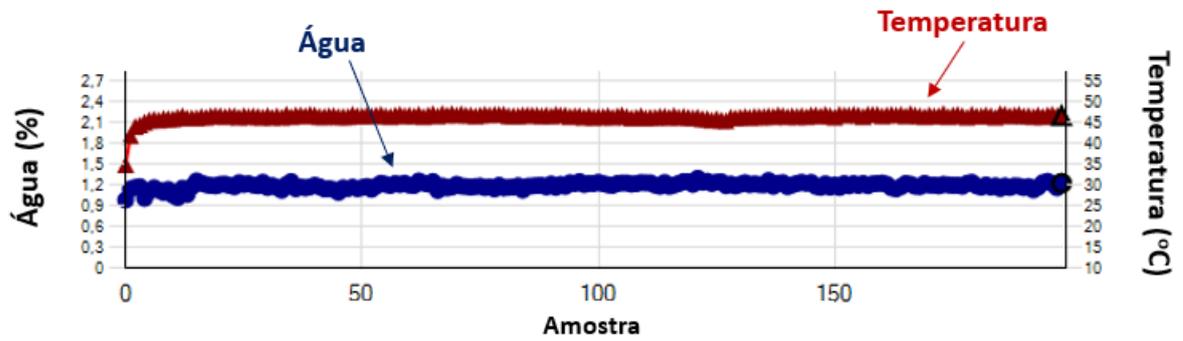


Figura 45 – Resultados obtidos a partir da sistema proposto durante o abastecimento ocorrido em 20/Set/2018 às 10:48.

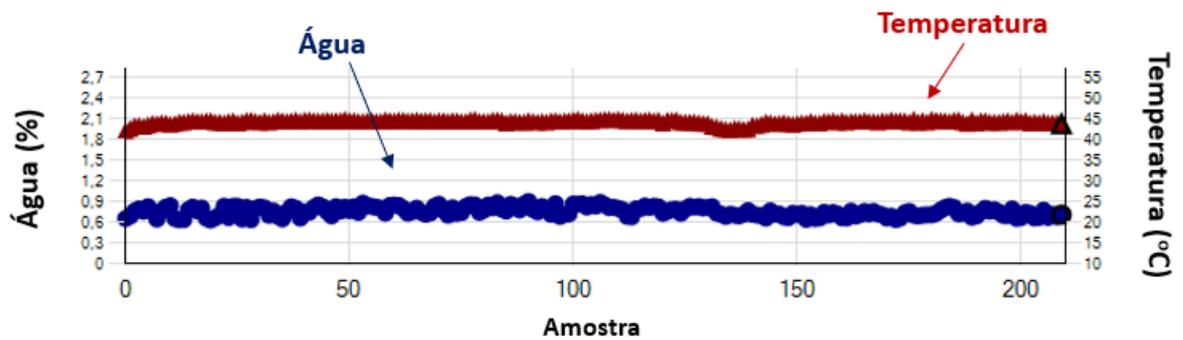


Figura 46 – Resultados obtidos a partir da sistema proposto durante o abastecimento ocorrido em 26/Set/2018 às 07:36.

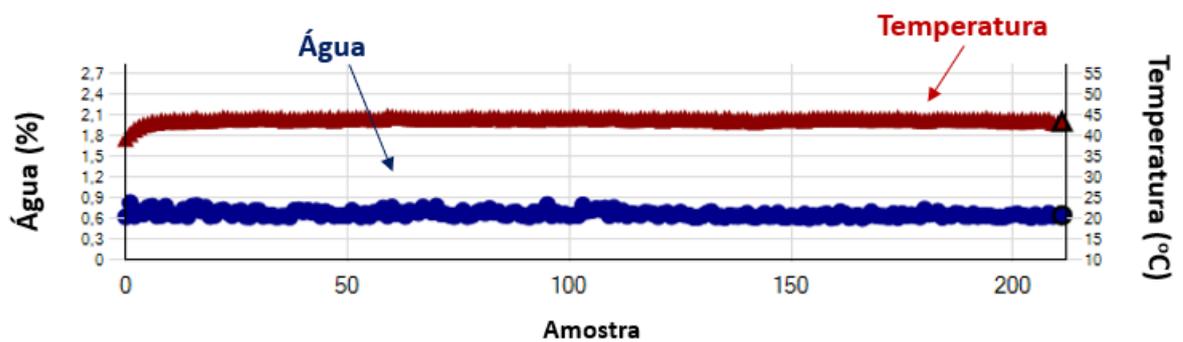


Figura 47 – Resultados obtidos a partir da sistema proposto durante o abastecimento ocorrido em 27/Set/2018 às 19:02.

7 Conclusão

O principal objetivo deste trabalho, além do desenvolvimento de um completo sistema ultrassônico, é a contribuição no que concerne o monitoramento da contaminação por umidade em óleos combustíveis. O propósito inicial foi verificar a possibilidade de detecção através da análise de sinais ultrassônicos gerados e captados pelo sistema desenvolvido.

A hipótese de que é possível classificar amostras contendo diferentes níveis de contaminação por umidade através da análise de sinais ultrassônicos foi comprovada. Ainda, atingindo um dos objetivos, a metodologia foi capaz de possibilitar uma aplicação *online* do sistema de monitoramento.

Uma metodologia consistindo em ensaios laboratoriais de contaminação em conjunto com a Análise de Componentes Principais foi apresentada. Seu objetivo foi descobrir quais parâmetros eram mais sensíveis à presença de água, resultando em uma expressão para a estimação da razão água/óleo. Esta expressão, por sua vez, foi testada sob condições reais em campo. O sistema proposto foi instalado e pôde ser testado em uma usina termelétrica.

Inicialmente, os testes em laboratório confirmaram a capacidade do sistema em classificar amostras de óleo combustível. Dentre as transformações matemáticas utilizadas, a Transformada de Fourier se mostrou mais eficaz, quando comparada à *Modulation Spectra*, pois permitiu classificar amostras contaminadas em passos de 1%, na faixa de 0% a 5%. Os resultados obtidos com a técnica de PCA relacionou os *scores* (i. e., os resultados das projeções dos conjuntos de dados originais sobre as componentes principais obtidas) e a razão água/óleo, dada em %.

Foi possível notar que todos os valores estimados pelo sistema ultrassônico proposto estiveram de acordo com os limites impostos pela ANP. Além disso, foi possível notar que mesmo com a variação de temperatura, geralmente ocorrida no início de cada processo de abastecimento, não houve alteração significativa dos valores estimados.

Visando validar os valores obtidos em campo a partir da expressão usada, um sensor capacitivo foi desenvolvido. Este princípio apresenta elevada sensibilidade nestes tipos de medições, tendo em vista que a permissividade relativa da água e de hidrocarbonetos são substancialmente diferentes. Ao comparar todos os resultados oriundos de ambos os métodos, foi possível verificar um erro máximo de 0,2 pontos percentuais, podendo ser considerado satisfatório.

Finalmente, a técnica proposta também fornece uma metodologia alternativa para

análise de outros contaminantes. Os custos envolvidos na fabricação e instalação do sistema foram reduzidos quando comparados a outros medidores semelhantes disponíveis no mercado.

7.1 Trabalhos Futuros

Durante os trabalhos de laboratório, houve grande dificuldade relacionada às etapas de secagem e contaminação. Em particular, a manipulação do óleo combustível utilizado (OCB1) se mostrou extremamente complexa, haja vista sua elevada viscosidade a temperatura ambiente, além de sua característica de opacidade, que dificulta a visualização do mesmo durante as diversas etapas. Deste modo, a otimização dos processos laboratoriais é um ponto a ser destacado como trabalho futuro.

Com a posse de um sistema ultrassônico robusto, inteiramente desenvolvido durante a realização deste trabalho, abrem-se caminhos para a análise de outros parâmetros e contaminantes. Além disso, através do conhecimento dos procedimentos realizados em laboratório, destaca-se um importante contaminante a ser estudado: o enxofre. Junto à água, o enxofre constitui um dos parâmetros mais importantes quanto a qualidade do óleo utilizado. A presença de ambos pode resultar no conhecido H_2SO_4 (ácido sulfúrico), como detalhado na Seção 2.1.1.2. Ainda, a partir do conhecimento deste contaminante, da água e da densidade, torna-se possível estimar o poder calorífico inferior, parâmetro este diretamente ligado à capacidade de geração da usina.

Devido a robustez da técnica de Análise de Componentes Principais, capaz de verificar a contribuição de cada parâmetro de entrada na composição dos vetores ortogonais, outras informações podem ser tratadas. Com o objetivo de melhorar o poder de detecção, como por exemplo melhorando a resolução de detecção, outras transformadas matemáticas podem ser utilizadas, como por exemplo a Transformada Wavelet (3).

Finalmente, essa abordagem pode ser testada, tal como apresentada, em dutos de passagem de óleo combustível, de forma *online*, porém ainda de forma invasiva, colocando os transdutores nas paredes de um duto de passagem de óleo, em contato com o mesmo. Uma última proposta é o estudo da detecção por ultrassom de modo não-invasivo, através da emissão e recepção das ondas ultrassônicas é realizada com os transdutores ultrassônicos localizados nas paredes externas de um duto de passagem de óleo combustível.

Referências

- 1 ANP. *Resolução ANP nº 3 DE 27/01/2016*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Citado 3 vezes nas páginas 14, 23 e 24.
- 2 ASSAD, M.; ASLAM, M. Z. An interface circuit design based on differential capacitive sensors for accurate measurement of water contents in crude oil. In: *IEEE International Conference on Circuits and Systems (ICCAS)*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 15.
- 3 NORONHA, I. *Sistema de Avaliação da Contaminação, por Umidade, de Óleo Isolante de Transformador usando Técnicas de Ultrassom*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 15, 32 e 75.
- 4 PETROBRÁS. *Óleo Combustível - Informações Técnicas*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/>>. Citado na página 18.
- 5 THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. [S.l.]: Interciência, 2001. Citado na página 18.
- 6 PETROBRÁS. *Manual do Produto - Add Cleaner*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.br.com.br/pc/produtos-e-servicos/para-industrias/oleo-combustivel>>. Citado na página 19.
- 7 SZKLO, V. C. U. A. S.; BONFÁ, M. H. P. *Fundamentos do Refino de Petróleo - Tecnologia e Economia*. [S.l.]: Interciência, 2012. Citado na página 19.
- 8 YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Física II - Termodinâmica e Ondas*. 12ª ed.. ed. [S.l.]: Pearson - Addison Wesley, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 26, 29 e 32.
- 9 ANDREUCCI, R. *Ensaio por Ultra-Som - Aspectos Básicos*. [S.l.]: ABENDE, 2002. Citado 6 vezes nas páginas 26, 32, 33, 34, 37 e 38.
- 10 DACIUK, R. J. *Estudo de Parâmetros Ultra-Sônicos para Caracterização de Líquidos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- 11 VIVES, A. A. *Piezoelectric Transducers and Applications*. [S.l.]: Springer, 2008. Citado na página 30.
- 12 MINICUCCI, D. J. *Avaliação de Tensões por Ultra-som no Aro e Rodas Ferroviárias Forjadas Novas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2003. Citado na página 31.
- 13 WOOD, A. B. *A Textbook of Sound*. 3ª ed.. ed. [S.l.]: The Macmillan Company, 1957. Citado na página 31.
- 14 CHRISTENSEN, D. *Ultrasonic Bioinstrumentation*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1957. Citado na página 31.
- 15 NDT, O. *Ultrasonic Transducers Technical Notes*. [S.l.], 2007. Disponível em: <www.olympus-ims.com>. Citado na página 35.

- 16 ALMEIDA, W. R. M. *Anemômetro Baseado no Método de Tempo de Trânsito: Estudo Comparativo de Arquiteturas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Maranhão, 2004. Citado na página 35.
- 17 SHULL, P. J. *Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications*. [S.l.]: CRC Press, 2002. Citado na página 35.
- 18 MIELE, F. R. *Ultrasound Physics and Instrumentation*. [S.l.]: Miele Enterprises, LLC, 2006. Citado na página 35.
- 19 NDT, O. *Manually Controlled Ultrasonic Pulser-Receivers*. [S.l.], 2009. Disponível em: <www.olympus-ims.com>. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 37 e 58.
- 20 VILLANUEVA, J. M. M. *Fusão de Dados das Técnicas de Tempo de Trânsito Utilizando Transdutores Ultra-Sônicos para Medição da Velocidade do Vento*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009. Citado na página 38.
- 21 VELOSO, G. F. C. *Identificação de Padrões de Contaminação em Óleo de Transformador Através da Monitoração Acústica das Descargas Parciais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 55.
- 22 VINTON, M. S.; ATLAS, L. E. Scalable and progressive audio codec. In: *2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221)*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 5, p. 3277–3280 vol.5. ISSN 1520-6149. Citado na página 42.
- 23 THOMPSON, J. K.; ATLAS, L. E. A non-uniform modulation transform for audio coding with increased time resolution. In: *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03). 2003 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 5, p. V–397–400 vol.5. ISSN 1520-6149. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- 24 LI, Q.; ATLAS, L. Properties for modulation spectral filtering. In: *Proceedings. (ICASSP '05). IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 4, p. iv/521–iv/524 Vol. 4. ISSN 1520-6149. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- 25 OWSLEY, L.; ATLAS, L.; HEINEMANN, C. Use of modulation spectra for representation and classification of acoustic transients from sniper fire. In: *Proceedings. (ICASSP '05). IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 4, p. iv/1129–iv/1132 Vol. 4. ISSN 1520-6149. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 44.
- 26 KINNUNEN, T. Joint acoustic-modulation frequency for speaker recognition. In: *2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 1, p. I–I. ISSN 1520-6149. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- 27 CHANG, H.; RIDEOUT, V. C. A Generalization of Modulation Spectra. *Quarterly of Applied Mathematics*, Brown University, v. 11, n. 1, p. 87–100, abr. 1953. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/43635886>>. Citado na página 42.
- 28 SHLENS, J. *A Tutorial on Principal Component Analysis*. [S.l.]: Cornell University, 2014. Citado na página 45.

-
- 29 SHLENS, J. *A Tutorial on Principal Component Analysis - Derivation, Discussion and Singular Value Decomposition*. [S.l.]: Cornell University, 2002. Citado na página 48.
- 30 SMITH, L. *A Tutorial on Principal Component Analysis*. [S.l.]: Cornell University, 2002. Citado na página 49.
- 31 DASHTI, H. H.; RIAZI, M. Acoustic velocities in petroleum fluids: Measurement and prediction. In: *Journal of Petroleum Science and Engineering*. [S.l.: s.n.], 2014. v. 124. Citado na página 69.

Apêndices

APÊNDICE A – Sistema Desenvolvido

Este Apêndice apresenta os detalhes do desenvolvimento do protótipo eletrônico responsável pela excitação do transdutor ultrassônico e pelo condicionamento do sinal adquirido antes de sua digitalização e processamento.

A.1 Sistema Eletrônico

O diagrama de blocos do circuito eletrônico desenvolvido é resumido na Figura 48. Observa-se inicialmente que o sistema trabalha com baterias que podem ser carregadas através de circuitos eletrônicos carregadores, também inseridos no protótipo. Desta forma, para carregamento, basta que a entrada seja conectada à rede elétrica (127/220V).

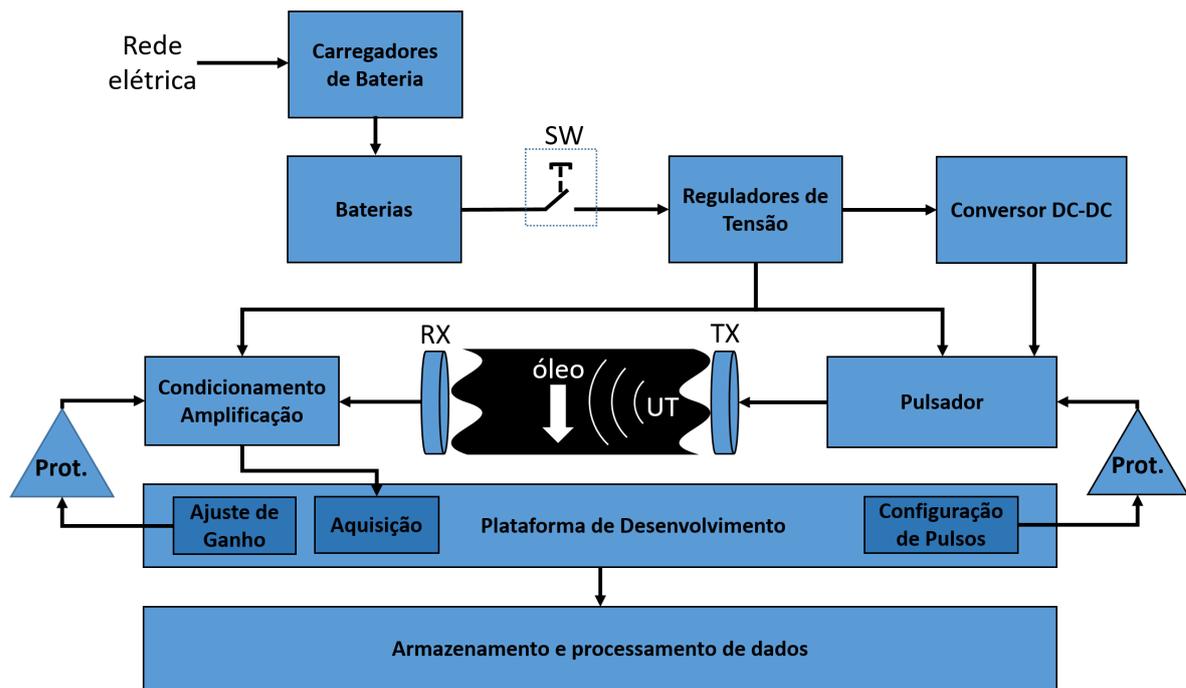


Figura 48 – Diagrama de blocos do funcionamento do protótipo eletrônico.

Para atender às diversas especificações de tensão dos circuitos eletrônicos, as tensões oriundas da bateria (+12V e -12V) são reguladas em diversos outros níveis (+5V, -5V e +3,3V) através do bloco contendo os reguladores de tensão.

Como o bloco Pulsador exige tensões elevadas para os sinais de excitação do transdutor ultrassônico, um conversor DC-DC eleva a tensão de entrada de 12V (fornecida pela bateria) a uma tensão de saída ajustável de 50V a 135V. Além disso, a configuração dos pulsos é feita através de sinais digitais que controlam cada um dos níveis.

A Figura 49 ilustra o funcionamento do bloco Pulsador, mostrando a relação entre os níveis digitais de entrada e os níveis de alta tensão de saída para uma excitação seguindo o padrão bipolar, ou seja, quando os pulsos de excitação atingem valores positivos e negativos (+HV e -HV). Os blocos denominados *Drivers* são utilizados para adequar os níveis lógicos '0' e '1' (sendo estes níveis TTL ou níveis CMOS) às tensões apropriadas de acionamento dos MOSFETs, além de também fornecer (ou drenar) a corrente necessária para carregamento (ou descarregamento) das capacitâncias parasitas do terminal gate do MOSFET, agilizando assim seu chaveamento.

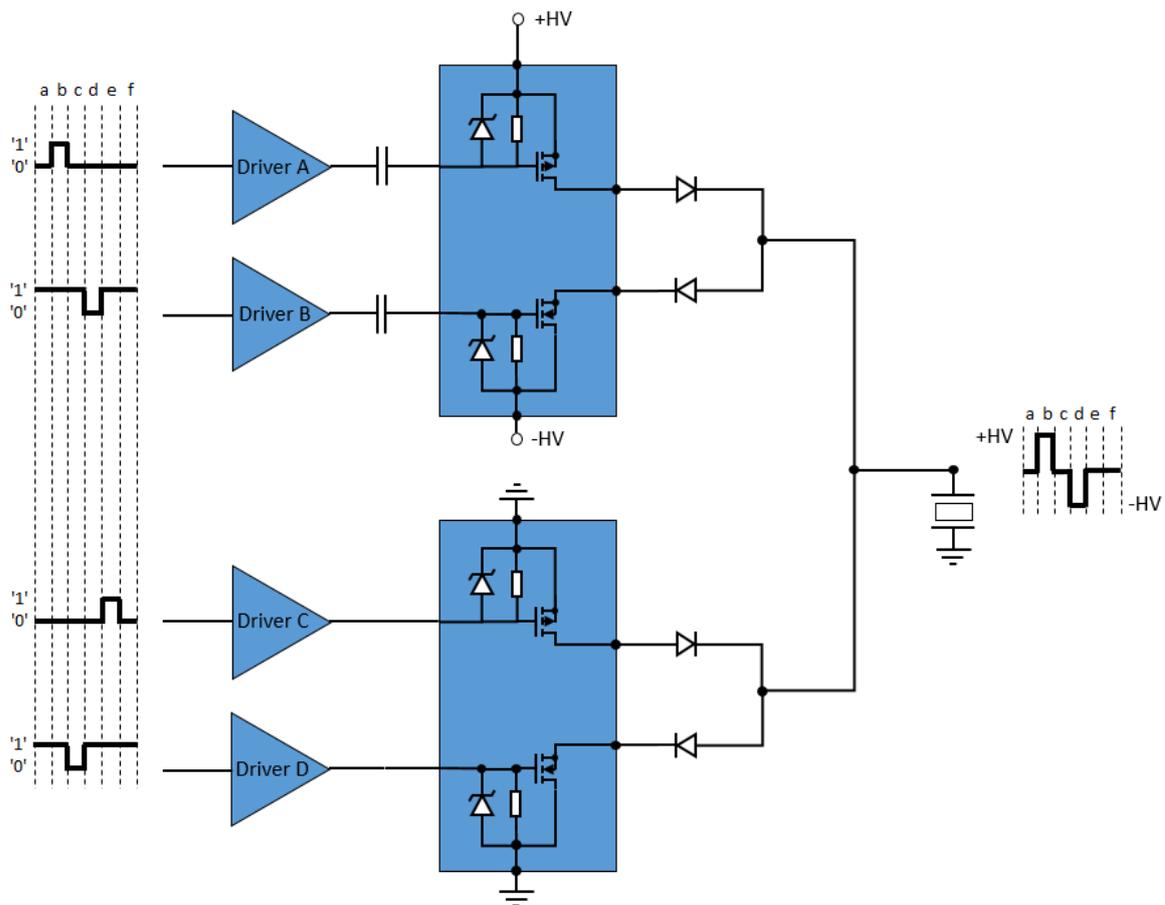


Figura 49 – Funcionamento do bloco pulsador (modo bipolar).

De modo a proteger as saídas digitais da plataforma de desenvolvimento, circuitos de proteção foram inseridos no protótipo eletrônico, como apresenta a Figura 48. Essa proteção incorpora diodos de acionamento ultrarrápidos para proteção contra descargas eletrostáticas (ou ESD, do inglês *ElectroStatic Discharge*), além de um isolador digital unidirecional, permitindo somente a passagem de sinais em uma única direção.

A Figura 50 ilustra o circuito de proteção para um único pino GPIO (do inglês *General Purpose Input/Output*, ou entrada/saída de propósito/uso geral), mas vale lembrar que, como visto na Figura 49, existem quatro circuitos de *driver* e, conseqüentemente, quatro circuitos de proteção.

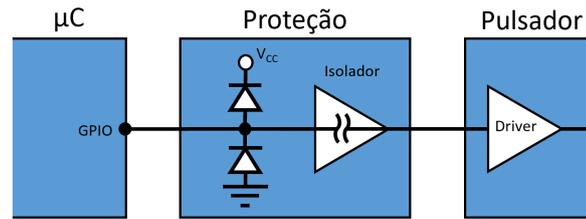


Figura 50 – Diagrama do circuito de proteção de pinos digitais.

Por fim, o protótipo eletrônico conta também com circuito de condicionamento e amplificação dos sinais adquiridos, apresentado na Figura 51. Este circuito conta com a combinação de filtros passa-baixa e passa-alta. O filtro passa-baixa, além de reduzir ruídos em altas frequências, reduz o efeito de *aliasing* durante a conversão analógico-digital, enquanto o filtro passa-alta, além de reduzir ruídos em baixas frequências (principalmente oriundo ruído da rede elétrica), restringe a faixa de frequência do sinal adquirido, adequando-a à resposta do transdutor ultrassônico. O sinal é amplificado por um ganho fixo G e um ganho variável G_{var} , resultando em um ganho de valor $G \times G_{var}$.

O conversor analógico-digital responsável pela aquisição se encontra incorporado à plataforma de desenvolvimento (ver Seção A.2). Após a gravação dos dados convertidos na memória local, o microprocessador (μP) faz a leitura dos mesmos e os processa, enviando sinais digitais para ajuste de ganho ao amplificador de ganho variável, se necessário. Circuitos de proteção para os pinos digitais (detalhados na Figura 50) também foram inseridos.

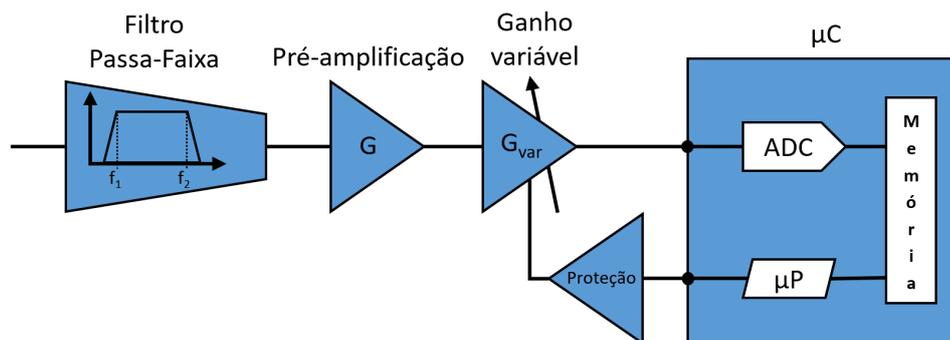


Figura 51 – Diagrama do circuito de condicionamento e amplificação.

Os dados condicionados são finalmente enviados através da rede para armazenamento e/ou posterior processamento e análise.

As placas de circuito impresso (PCI) referentes aos blocos mencionados foram dispostas em módulos encaixáveis. O protótipo foi elaborado desta forma visando facilitar pequenas alterações, as quais podem ser realizadas apenas em um determinado módulo, não havendo a necessidade da troca de todo o conjunto. A Figura 52 apresenta os quatro módulos básicos a serem descritos nos parágrafos seguintes antes do processo de soldagem.

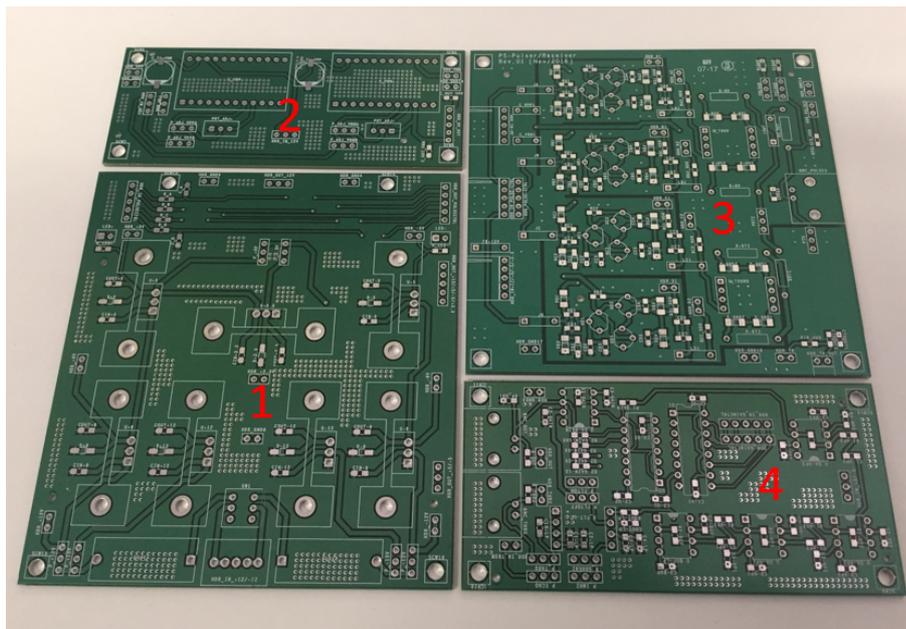


Figura 52 – Módulos básicos do sistema eletrônico.

O Módulo 1 corresponde aos reguladores de tensão, incluindo também fusíveis de proteção. Um borne receptor do tipo BR8 foi colocado para receber de forma segura as tensões positiva e negativa oriundas da bateria.

O Módulo 2 se refere somente aos conversores DC-DC, sendo responsáveis por elevar a tensão de 12V a níveis próximos de 100V. Dois conversores DC-DC são utilizados de modo a oferecer as tensões positiva (+HV) e negativa (-HV). Os *trimpots* inseridos permitem o ajuste dos valores absolutos dessas tensões, que podem variar de 50V a 135V.

O Módulo 3 corresponde ao bloco pulsador e inclui os itens mencionados na Figura 49. Foi visto que quatro sinais digitais são necessários para fazer o ajuste dos pulsos, assim quatro *drivers* estão presentes neste módulo. O conector do tipo BNC fêmea oferece o sinal de saída do pulsador, devendo este ser conectado ao transdutor transmissor (TX).

O Módulo 4 constitui as etapas de condicionamento e amplificação. Os dois conectores do tipo BNC fêmea correspondem aos sinais ultrassônicos pré e pós-condicionados. O sinal pré-condicionado se refere ao sinal ultrassônico captado pelo transdutor receptor (RX), enquanto o sinal pós-condicionado se refere ao sinal já filtrado e amplificado. Este último irá diretamente à plataforma de desenvolvimento para ser digitalizado pelo conversor analógico-digital e processado.

A Figura 53 apresenta os módulos descritos anteriormente agora com os componentes soldados. Entretanto, o circuito correspondente ao bloco de proteção ainda não é mostrado.

O circuito de proteção foi inserido acima dos quatro módulos anteriores, como exhibe a Figura 54. Observa-se nesta figura que o módulo apresenta também um *slot* reser-

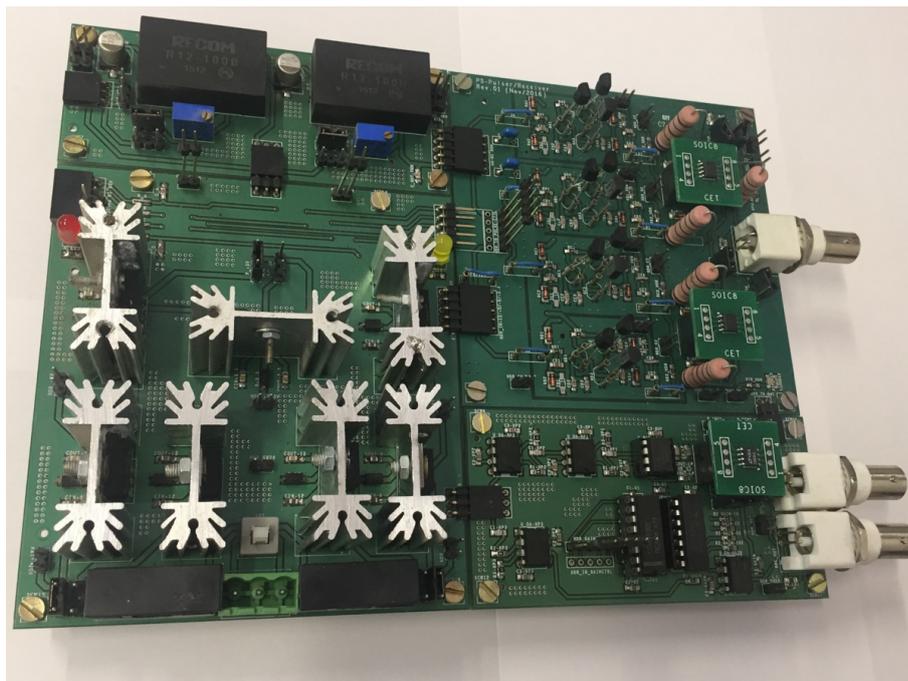


Figura 53 – Sistema eletrônico sem o módulo de proteção.

vado à plataforma de desenvolvimento STEMLab[®] (ver Seção A.2). Um mini-ventilador (*cooler*) também foi inserido com o objetivo de ajudar o resfriamento da plataforma de desenvolvimento.

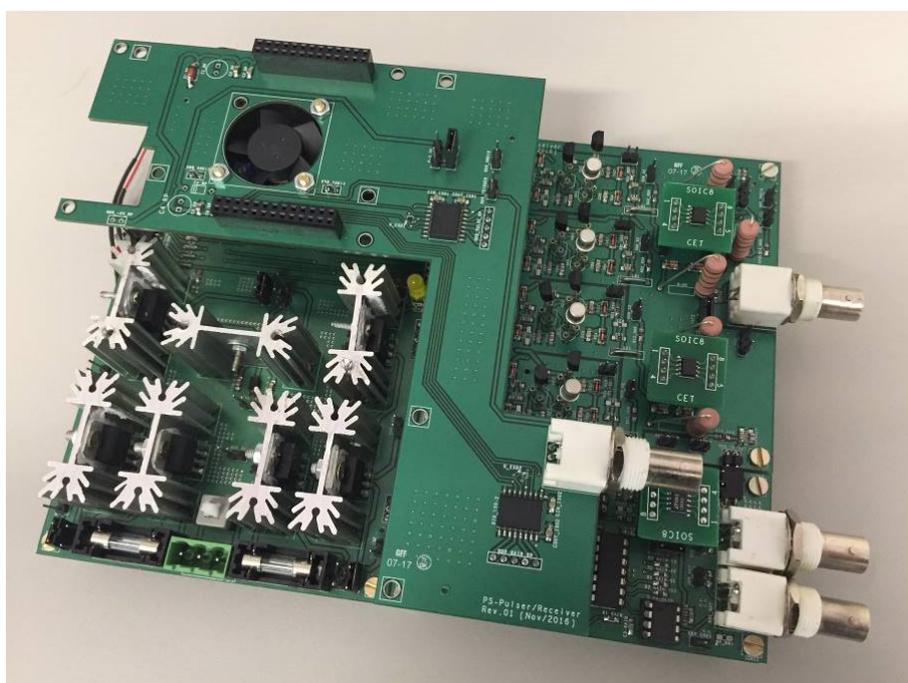


Figura 54 – Sistema eletrônico com o módulo de proteção.

A Figura 55 exibe o protótipo eletrônico contendo todos os módulos discutidos anteriormente.

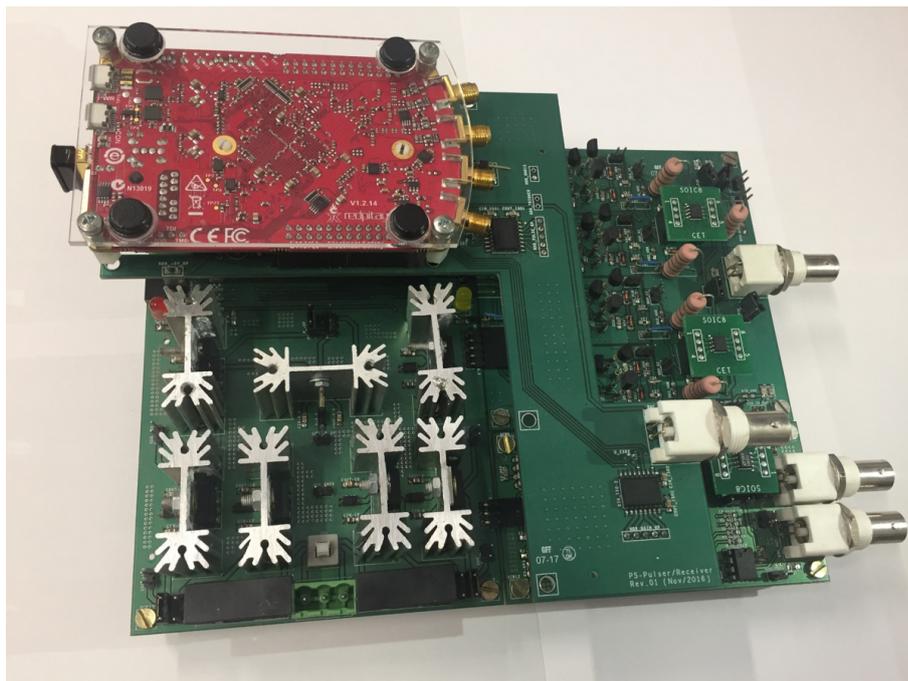


Figura 55 – Protótipo eletrônico completo.

De modo a facilitar seu transporte, bem como das baterias e dos circuitos carregadores, todo o sistema foi colocado sobre uma plataforma, como exibe a Figura 56.

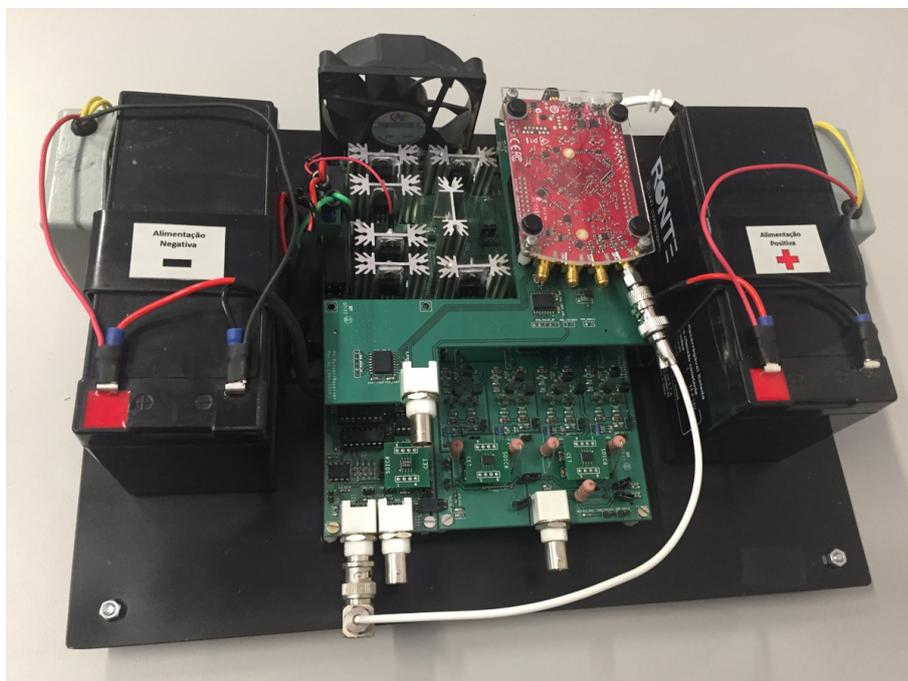


Figura 56 – Protótipo eletrônico completo montado sobre plataforma.

A.2 Customização da Plataforma de Desenvolvimento

Antes de iniciar o detalhamento da seção, é importante conhecer um pouco sobre a plataforma de desenvolvimento utilizada. Trata-se da placa de prototipagem chamada STEMLab[®], fabricada pela empresa RedPitaya[®] e mostrada na Figura 57.

Esta placa é dotada de um processador *Dual Core* ARM[®] Cortex[®]-A9 integrada a FPGA (do inglês *Field Programmable Gate Array*, ou arranjo de portas programáveis em campo) Xilinx[®] Zynq[®]-7010 SoC (do inglês *System-On-a-Chip*, ou sistema em um circuito integrado) com uma memória RAM DDR3 de 512MB. Oferece a possibilidade de controle remoto através de uma porta *Ethernet*, ou controle direto através de uma porta micro-USB. Além disso, é uma plataforma de prototipagem *open-source* embarcada com o sistema operacional Linux[®].

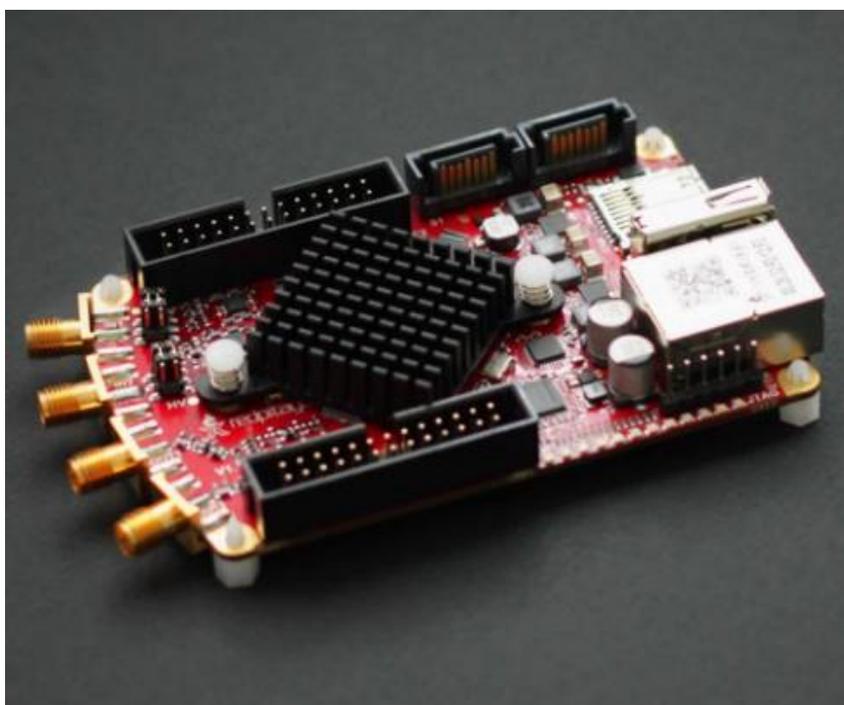


Figura 57 – Plataforma de desenvolvimento STEMLab[®]. Fonte: RedPitaya[®].

A versão utilizada possui entradas e saídas analógicas rápidas com frequência de amostragem de até 125 MS/s e resolução de 14 bits, além de entradas analógicas mais lentas com frequência de amostragem de até 100 kS/s e resolução de 12 bits. Possui ainda 16 portas digitais de entrada e saída.

Resumidamente, este sistema oferece as vantagens da programação de *software* (processador) aliadas às diversas possibilidades de configuração de *hardware* (FPGA). Em outras palavras, o usuário tem acesso à uma plataforma que pode ser totalmente customizada de acordo com suas necessidades.

A.2.1 Hardware

O ambiente de desenvolvimento mais recente oferecido pela Xilinx® para edição de hardware e software é conhecido como Vivado®. Esta seção também servirá como um mini-tutorial sobre esta ferramenta e fornecerá uma breve introdução ao protocolo AXI.

Para a criação do projeto, é necessário conhecer o componente alvo a ser reconfigurado. A plataforma de desenvolvimento STEMLab® é baseada no modelo XC7Z010CLG400-1 da família Zynq®-7000. Este SoC conta com 60 blocos de memória RAM, 80 blocos processadores, 35200 flip-flops, 17600 LUTs, entre outros atributos, como apresenta a Figura 58.

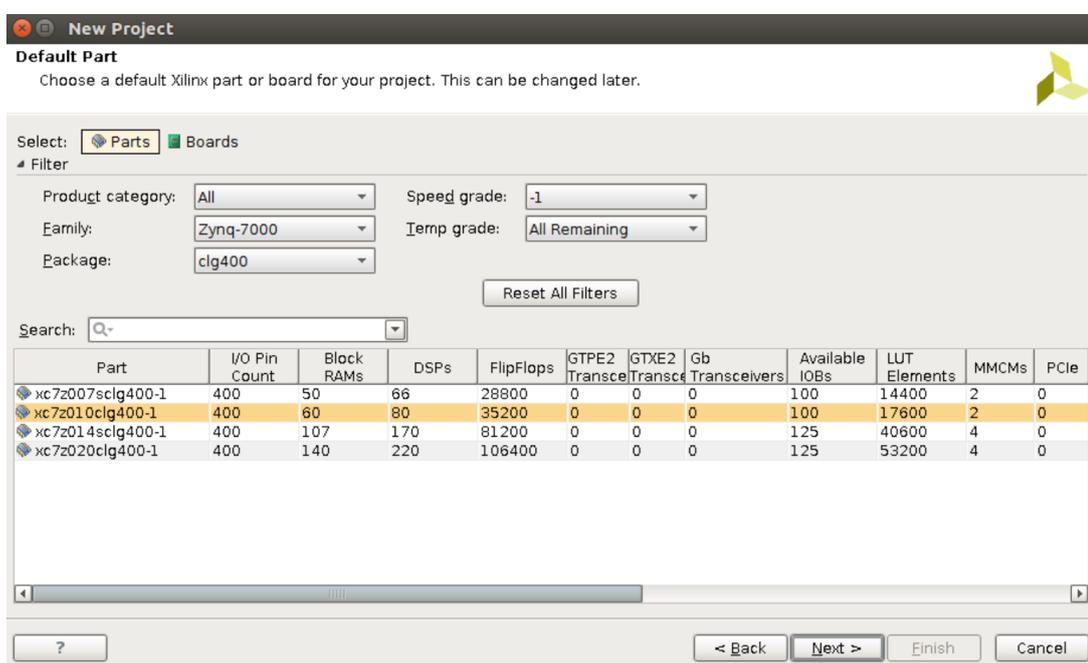


Figura 58 – Seleção do componente alvo no Vivado.

Após a criação do projeto, o primeiro passo é a inserção do IP¹ correspondente ao sistema de processamento (ou PS, do inglês *Processing System*), que neste caso é o Zynq®-7000, mostrado na Figura 59. Devido à complexidade deste bloco, sua configuração (periféricos, *clocks*, memórias, interfaces, entre outros) é feita através de um arquivo “.xml” que implementa automaticamente tais definições.

A comunicação do PS com a lógica programável (PL, do inglês *Programmable Logic*) é feita através do barramento AXI (do inglês *Advanced eXtensible Interface*). Vale lembrar que o lado PS possui um processador *Dual Core ARM® Cortex®-A9* e o lado PL se baseia na família de FPGAs *Artix®-7*, da Xilinx®.

¹ Propriedade Intelectual ou IP (do inglês *Intellectual Property*) é uma unidade de lógica normalmente desenvolvida com a ideia de sua reutilização. Atualmente, várias funcionalidades vêm sendo integradas em chips únicos e, assim, tais blocos pré-definidos se tornam cada vez mais importantes. Pode ser comparado ao uso de funções já existentes que podem ser (re)utilizadas em determinado programa quando se importa sua biblioteca correspondente.

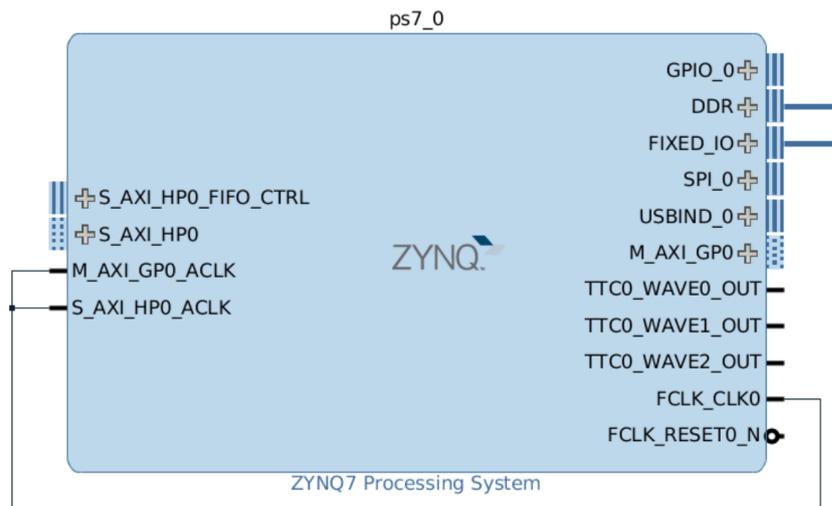


Figura 59 – IP referente ao PS Zynq[®]-7000.

A empresa Xilinx[®] adotou o protocolo AXI para IPs a partir das famílias de FPGAs Spartan[®]-6 e Virtex[®]-6, continuando a utilizá-lo nas séries 7 e Zynq[®]-7000. AXI faz parte da família de barramentos para os processadores ARM[®], sendo a última versão a AXI4. Nesta versão, há três tipos de interfaces:

- AXI4: para interfaces de memória de alta desempenho.
- AXI4-*Lite*: para transferência de dados mais lentas (barramento de menor desempenho).
- AXI4-*Stream*: para alta velocidade de dados *streaming*.

O limite de transferência no AXI4 é de rajadas (*bursts*) de até 256 dados por transação. O AXI4-*Lite* permite somente 1 dado transferido por transação. Por fim, o AXI-*Stream* suporta um tamanho ilimitado de dados.

Os canais disponíveis na arquitetura são:

- *Read Address Channel*: canal de leitura de endereço;
- *Write Address Channel*: canal de escrita de endereço;
- *Read Data Channel*: canal de leitura de dados;
- *Write Data Channel*: canal de escrita de dados;
- *Write Response Channel*: canal de escrita de resposta.

O *Read Address Channel* é o canal pelo qual o IP envia um sinal informando que deseja iniciar uma transação de leitura. Este canal traz informações de endereçamento e

alguns sinais de *handshaking*. O *Read Data Channel* contém os dados que são transferidos durante uma operação, juntamente com os sinais de *handshaking* associados. O *Write Address Channel* é a via utilizada pelo IP para sinalizar que deseja iniciar uma transação de escrita, sendo semelhante ao *Read Address Channel*. O *Write Data Channel* executa uma função análoga ao *Read Data Channel*, exceto pelo fato que os dados são oriundos do mestre (*master*). O *Write Response Channel* é utilizado pelo escravo (*slave*) para avisar a recepção de dados, ou para indicar a ocorrência de um erro.

Após conhecer a ideia básica das interfaces AXI, é necessário também entender que a comunicação entre um mestre e um escravo é realizada através de um bloco chamado *AXI Interconnect*. Este bloco conecta mestres AXI e escravos AXI através do endereço configurado de cada escravo conectado ao *AXI Interconnect*, funcionando como um barramento de endereços. No entanto, diferentemente de um barramento simples, este bloco permite a conversão do tamanho das palavras, a ligação entre IPs de diferentes versões AXI (e.g., AXI3 e AXI4), a transformação do domínio do *clock*, entre outras funções.

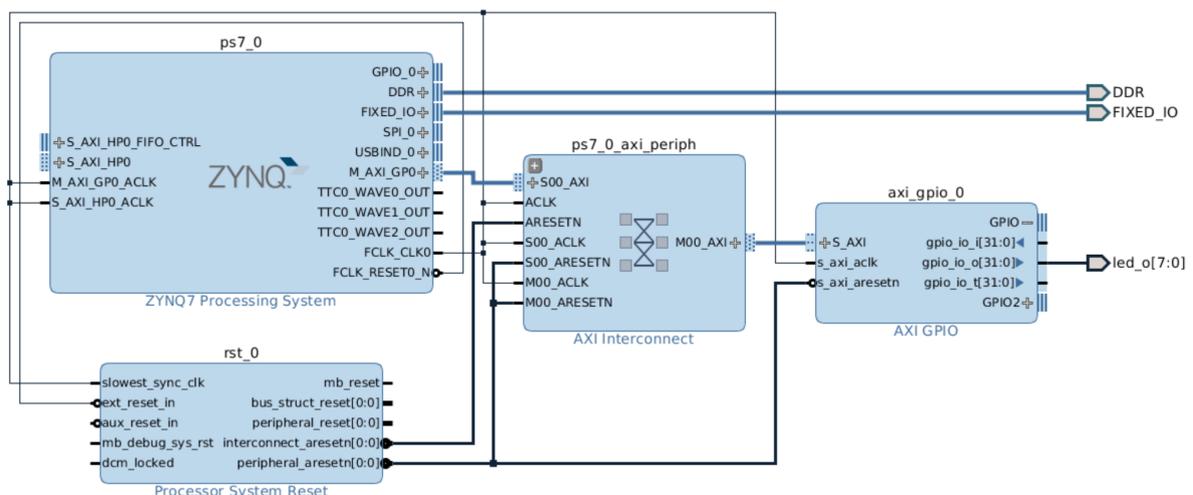


Figura 60 – Acesso às portas de saída pelo PS via AXI Interconnect e bloco AXI GPIO.

Como exemplo de utilização deste bloco de comunicação entre mestres e escravos AXI, tem-se o acionamento de um LED feito por software (lado PS). Isso só pode ser feito conectando-se o PS a um bloco GPIO via AXI Interconnect e, por último, conectando-se o GPIO às portas correspondentes aos LEDs localizados externamente, como mostra a Figura 60. O código elaborado no lado PS deve levar em consideração o endereço pré-definido para o bloco escravo AXI GPIO. Por fim, o PS faz o uso do mapeamento de memória acionamento dos LED ao conhecer o endereço que o bloco AXI GPIO foi definido no AXI Interconnect.

Para o desenvolvimento do *hardware*, houve a inserção de vários blocos, os quais foram combinados formando grupos de blocos. Devido à complexidade do sistema, os blocos são mostrados resumidamente na Figura 63 do Apêndice B.

O grupo denominado **Acquisition** inclui inicialmente o bloco responsável pela aquisição dos dados oriundos do conversor analógico-digital (ADC, do inglês *analog-to-digital converter*) que ocorre por *streaming* de dados via interface AXI4-Stream. Os dados adquiridos são combinados ao sinal de *trigger* e juntos são transformados para outro domínio de *clock*, a 143 MHz. Esse processo foi necessário para garantir a correta aquisição de dados na frequência de amostragem máxima disponível pelo conversor (125 MHz).

Dado que os transdutores ultrassônicos especificados operam em frequências próximas à 500 kHz, muito abaixo da frequência máxima do ADC, é necessário reduzir o ritmo de amostragem. Esta função é realizada pelo grupo denominado **Decimation** que, além de realizar a decimação escolhida pelo usuário, implementa filtros digitais que auxiliam esta operação.

Após a decimação, os dados são novamente passados via interface AXI4-Stream para o grupo chamado **Scope**, que basicamente implementa a função de um osciloscópio. Desta forma, embora esteja sempre recebendo dados, este bloco apenas os registra após a detecção de um evento de *trigger*, oriundo do grupo denominado **Triggering**, que por sua vez é comandado pelo PS.

Após o evento de *trigger*, o bloco **Data_Writer** grava os dados recebidos pelo bloco Scope na memória RAM do sistema. Um registrador de status indica ao PS o término do processo de gravação dos dados adquiridos, bem como o endereço inicial para futura leitura dos mesmos.

Por último, o grupo **Proc_System**, que inclui o bloco PS, também envia comandos ao grupo denominado **PulseGain**. Este bloco é responsável pela configuração e acionamento dos pulsos a serem gerados para excitação do transdutor, bem como pelo controle de ganho do módulo de condicionamento de sinais.

Internamente ao grupo **PulseGain**, um módulo descrito em Verilog foi desenvolvido, como mostra a Figura 61. Nesta figura, observa-se que além dos sinais de *clock* (CLK), habilitação ou *enable* (CE) e *reset* (RST), outros sinais devem ser fornecidos. A descrição destes sinais é mostrada na Tabela 8. Seu código é dado no Apêndice B.

A Figura 64 no Apêndice B apresenta a simulação realizada no Vivado[®] correspondente aos valores de entrada mostrados na coluna “Simulação” da Tabela 8. O *clock* utilizado é de 125MHz. O sinal de *reset* foi mantido em nível alto até 400ns, enquanto o sinal de *enable* foi mantido em nível alto a partir deste valor, dando início aos pulsos.

A flexibilidade quanto aos pulsos de alta tensão gerados se faz necessária pelo fato do sinal ultrassônico ser fortemente dependente do modo de excitação.

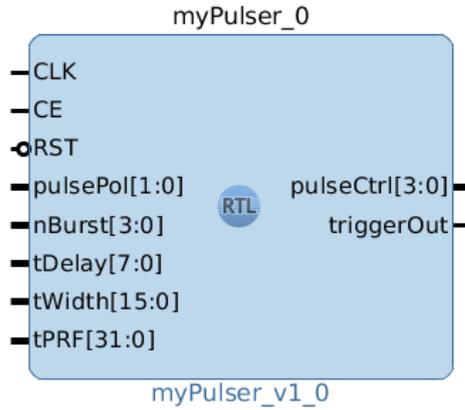


Figura 61 – Bloco correspondente ao módulo Verilog desenvolvido.

Pino	Tipo	Tamanho	Descrição	Simulação
<i>pulsePol</i>	entrada	2 bits	Polarização do pulso 0 → Unipolar Positivo 1 → Unipolar Negativo 2 → Bipolar	2
<i>nBurst</i>	entrada	3 bits	Número de rajadas (<i>bursts</i>) consecutivas	0
<i>tDelay</i>	entrada	8 bits	Tempo entre pulsos consecutivos	50 ^a
<i>tWidth</i>	entrada	16 bits	Largura dos pulsos	50 ^b
<i>tPRF</i>	entrada	32 bits	Tempo entre rajadas consecutivas	500 ^c
<i>pulseCtrl</i>	saída	4 bits	Controle dos pulsos ^d 1010 ₂ = A ₁₆ → Sem pulsos 1011 ₂ = B ₁₆ → +HV 0010 ₂ = 2 ₁₆ → GND após +HV 1000 ₂ = 8 ₁₆ → -HV 1110 ₂ = E ₁₆ → GND após -HV	-
<i>triggerOut</i>	saída	1 bit	<i>Trigger</i> indicando início de cada rajada	-

Tabela 8 – Descrição dos pinos de entrada do bloco desenvolvido.

^a Para um *clock* de 125MHz, este valor corresponde a um tempo de $50 \times 8ns = 400ns$.

^b Para um *clock* de 125MHz, este valor corresponde a um tempo de $50 \times 8ns = 400ns$.

^c Para um *clock* de 125MHz, este valor corresponde a um tempo de $50 \times 8ns = 4\mu s$.

^d Os bits 0, 1, 2 e 3 controlam, respectivamente, os *Drivers* A, B, C e D mostrados no circuito da Figura 49.

A.2.2 Software

Com o objetivo de comandar o *hardware* desenvolvido, o que inclui a emissão de pulsos e o ajuste de ganho, um programa em linguagem C foi elaborado. Vale lembrar que o código é executado no processador integrado no SoC. Seu fluxograma é mostrado na Figura 62 e seu detalhamento é dado a seguir.

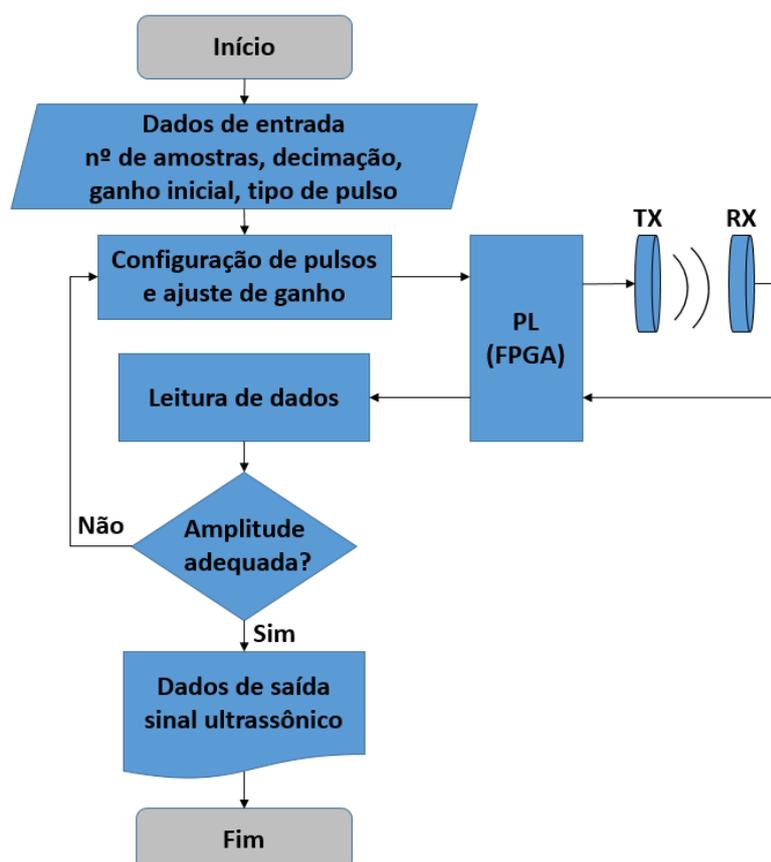


Figura 62 – Fluxograma do programa desenvolvido para controle do hardware.

Pode-se observar que os dados de entrada principais são: número de amostras, decimação, ganho inicial definido pelo usuário e o tipo de pulso. O número de amostras e a decimação influenciam no tempo a ser adquirido. O ganho é ajustado por uma palavra de 4 bits, logo há 16 valores possíveis em uma faixa não-linear entre $8\times$ a $160\times$.

Juntamente ao ajuste ganho inicial, o software envia o comando para início do processo de geração dos pulsos ultrassônicos à FPGA (PL). A partir deste sinal de *trigger*, a FPGA gera os sinais responsáveis pela emissão dos pulsos ultrassônicos, enquanto o conversor analógico-digital inicia a aquisição de dados. Após a aquisição e gravação de dados na memória RAM interna, o software faz a leitura deste sinal e verifica sua amplitude, reenviando um novo ajuste de ganho à FPGA, se necessário, e reiniciando o processo de pulsação. Finalizada esta etapa que pode ser chamada de calibração, o programa oferece como saída o sinal ultrassônico condicionado e pronto para processamento.

APÊNDICE B – Software Vivado®

Este Apêndice apresenta o código correspondente ao módulo Verilog desenvolvido, os resultados de simulação do mesmo, bem como uma visão resumida do diagrama de blocos que foi elaborado para reconfigurar a FPGA da plataforma de desenvolvimento STEMLab®.

A Figura 64 apresenta a simulação realizada no Vivado® correspondente aos valores de entrada mostrados na coluna “Simulação” da Tabela 8. O *clock* utilizado é de 125MHz. O sinal de *reset* foi mantido em nível alto até 400ns, enquanto o sinal de *enable* foi mantido em nível alto a partir deste valor, dando início aos pulsos.

Apêndice B.1. Código do módulo Verilog desenvolvido para controle dos pulsos de excitação.

```

module myPulser
(
  //-----Input ports Data Type-----
  input wire CLK,
  input wire CE,
  input wire RST,
  input wire [1:0] pulsePol,
  input wire [3:0] nBurst,
  input wire [7:0] tDelay,
  input wire [15:0] tWidth,
  input wire [31:0] tPRF,
  //-----Output Ports Data Type-----
  output wire [3:0] pulseCtrl,
  output wire triggerOut
);
  //-----Local parameters-----
  // If CLK = 125MHz, PRF = 100Hz
  localparam [31:0] MAX_tPRF = 1250000;
  // If CLK = 125MHz, tWidth = 50us
  localparam [15:0] MAX_tWidth = 6250;
  // If CLK = 125MHz, Delay = 1us
  localparam [7:0] MAX_tDelay = 125;
  //-----Integers variables-----
  integer changeIndex = 0;
  wire [31:0] tPulse;
  //-----Storage Elements (reg)-----
  reg [3:0] pulses = 4'b1010; // No pulses
  reg trigOut = 1'b0;
  reg [31:0] count = 0;
  reg isGND = 1'b1;
  reg isPosHV = 1'b0;

  assign tPulse = (pulsePol == 2'b00) ? 2*(tWidth)*(nBurst+1):
                 (pulsePol == 2'b01) ? 2*(tWidth)*(nBurst+1):
                 2*(tWidth+tDelay)*(nBurst+1);

```

```

// Since 'pulsePol' can take on values 00,01,10, and 11,
// we define all possible cases
// At every rising edge, handle counter
always @ (posedge CLK) begin : COUNTER // Block Name
// If RST = 1, reset counter
if (RST == 1'b1) begin
    count <= 0;
// If RST = 0 and CE = 0, stop counter
end else if (CE == 1'b0) begin
    // Not count... do nothing
// If RST = 0, CE = 1 and count < 'tPRF', than increment counter
end else if (count < tPRF) begin
    count <= count + 1;
// If RST = 0, CE = 1 and count = 'tPRF', than reset counter
end else begin
    count <= 0;
end
end

// At every rising edge, handle trigger
always @ (posedge CLK) begin : TRIGGER // Block Name
// If RST = 1, trigger level is 0
if (RST == 1'b1) begin
    trigOut <= 1'b0;
// If RST = 0 and CE = 0, trigger level is 0
end else if (CE == 1'b0) begin
    trigOut <= 1'b0;
// If RST = 0, CE = 1 and count = 0, positive edge in trigger
end else if (count == 0) begin
    trigOut <= 1'b1;
// If RST = 0, CE = 1 and count = 'tWidth', negative edge in trigger
end else if (count == tWidth) begin
    trigOut <= 1'b0;
end else begin
    // do nothing...
end
end

// At every rising edge, handle 'pulses'
always @ (posedge CLK) begin
//If RST = 1, load 'pulses' with its default value
if (RST == 1'b1) begin
    pulses <= 4'b1010;
    isGND = 1'b1;
    isPosHV = 1'b0;
    changeIndex = 0;
// If RST = 0 and CE = 0 (counter is stopped),
// load 'pulses' with its default value
end else if (CE == 1'b0) begin
    pulses <= 4'b1010;
end else if (count < tPRF) begin
    if (pulsePol == 1'b00) begin // positive unipolar pulses
        if (count < tPulse) begin
            if (count == changeIndex && isGND == 1'b1) begin
                // +HV
                pulses <= 4'b1011;
                // Set flag
                isGND <= 1'b0;
                // Next index that happens a changement
                changeIndex = changeIndex + tWidth;
            end
        end
    end

```

```

end else if (count == changeIndex && isGND == 1'b0) begin
    // GND after +HV
    pulses <= 4'b0010;
    // Set flag
    isGND <= 1'b1;
    // Next index that happens a changement
    changeIndex = changeIndex + tWidth;
end
end else begin
    pulses <= 4'b1010;          // stop pulses
end
end else if (pulsePol == 1'b01) begin // negative unipolar pulses
    if (count < tPulse) begin
        if (count == changeIndex && isGND == 1'b1) begin
            // -HV
            pulses <= 4'b1000;
            // Set flag
            isGND <= 1'b0;
            // Next index that happens a changement
            changeIndex = changeIndex + tWidth;
        end else if (count == changeIndex && isGND == 1'b0) begin
            // GND after -HV
            pulses <= 4'b1110;
            // Set flag
            isGND <= 1'b1;
            // Next index that happens a changement
            changeIndex = changeIndex + tWidth;
        end
    end
end else begin
    pulses <= 4'b1010;          // No pulses
end
end else begin
    // bipolar pulses
    if (count < tPulse) begin
        if (count == changeIndex && isGND == 1'b1 && isPosHV == 1'b0) begin
            // +HV
            pulses <= 4'b1011;
            // Set flags
            isGND <= 1'b0;
            isPosHV <= 1'b1;
            // Next index that happens a changement
            changeIndex = changeIndex + tWidth;
        end else if (count == changeIndex && isGND == 1'b0 && isPosHV == 1'b1) begin
            // GND after +HV
            pulses <= 4'b0010;
            // Set flags
            isGND <= 1'b1;
            isPosHV <= 1'b1;
            // Next index that happens a changement
            changeIndex = changeIndex + tDelay;
        end else if (count == changeIndex && isGND == 1'b1 && isPosHV == 1'b1) begin
            // -HV
            pulses <= 4'b1000;
            // Set flags
            isGND <= 1'b0;
            isPosHV <= 1'b0;
            // Next index that happens a changement
            changeIndex = changeIndex + tWidth;
        end else if (count == changeIndex && isGND == 1'b0 && isPosHV == 1'b0) begin
            // GND after -HV

```

```
pulses <= 4'b1110;  
// Set flags  
isGND <= 1'b1;  
isPosHV <= 1'b0;  
// Next index that happens a changement  
changeIndex = changeIndex + tDelay;  
end  
end else begin  
    pulses <= 4'b1010;           // No pulses  
end  
end  
end else begin  
    changeIndex = 0;  
end  
end  
  
assign pulseCtrl = pulses;  
assign triggerOut = trigOut;  
  
endmodule
```

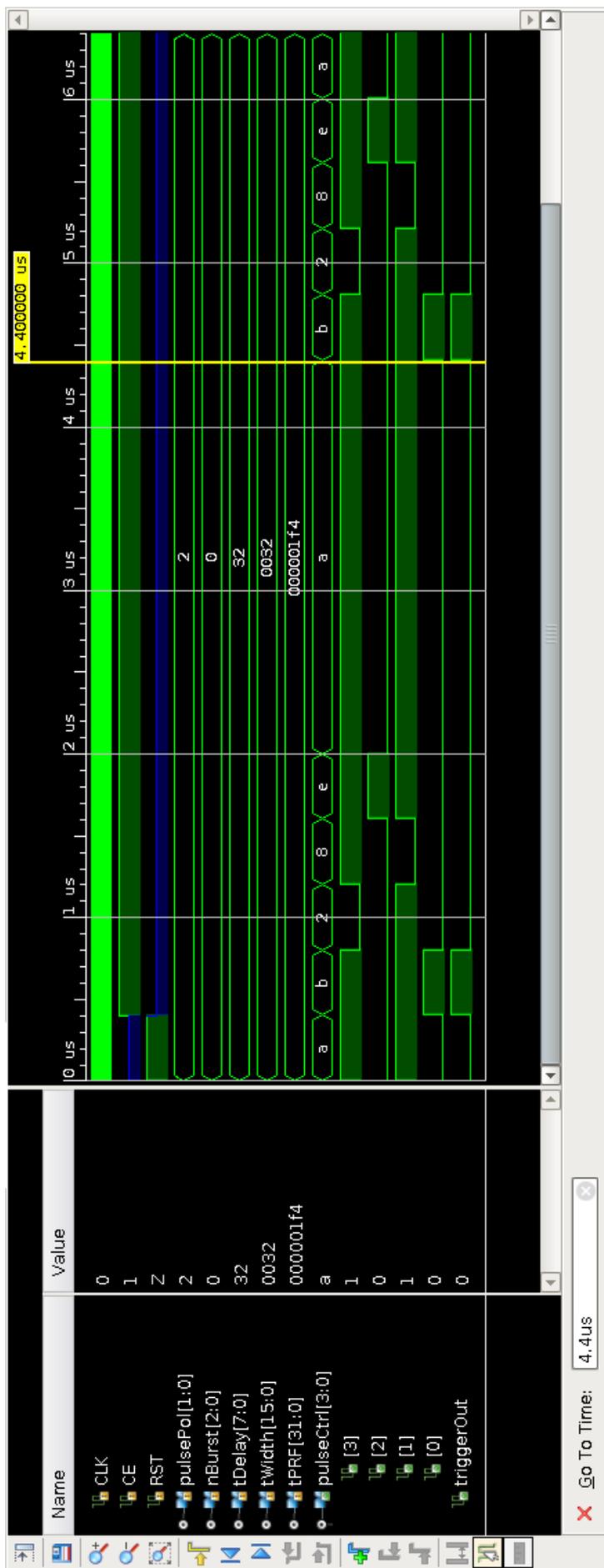
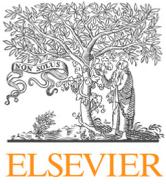



Figura 64 – Bloco correspondente ao código Verilog desenvolvido.

Anexos



An ultrasound-based water-cut meter for heavy fuel oil

Carlos Eduardo Teixeira^a, Luiz Eduardo Borges da Silva^a, Giscard F.C. Veloso^a, Germano Lambert-Torres^{b,*}, Mateus Mendes Campos^a, Ismael Noronha^b, Erik L. Bonaldi^b, Levy E. Lacerda de Oliveira^b

^a Itajuba Federal University, UNIFEI, Itajuba, MG 37500-903, Brazil

^b Gnarus Institute, Itajuba, MG 37500-052, Brazil



ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 May 2019

Received in revised form 30 July 2019

Accepted 1 August 2019

Available online 5 August 2019

Keywords:

Heavy fuel oil

Water-cut meter

Principal Component Analysis

Contaminants in oil

ABSTRACT

In order to have on-line measurement of water content in heavy fuel oil (HFO), the so-called water-cut meters are used. Typically, measurements performed by these devices are based on capacitive principle, in which the water-in-oil emulsion acts as the insulation material. In this case, variations in the water/oil ratio affect the dielectric, which causes the capacitance to vary. By contrast, in our approach, water-in-oil emulsions act as the material medium for propagation of ultrasound waves so that the variations in water/oil ratio affect their frequency components. Since we keep the transmitter transducer excitation the same, the received ultrasound signal will vary according to the current characteristics of the fluid. As it is not known in advance which components will be affected by the presence of water, we present a methodology consisting in laboratory experiments in conjunction with Principal Component Analysis (PCA). This methodology leads to an expression that relates the score value issued from PCA and the water content information. In addition to presenting the development of an ultrasound-based water-cut meter, this paper presents some results obtained from both laboratory and field measurements. We could also compare the proposed system with a PCB-based capacitive sensor under field conditions. We verified a maximum difference of 0.2 percentage point between both approaches.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The efficiency of thermal power plants depends directly on the quality of the fuel oil injected into their driving units. Poor-quality fuels may jeopardize both engines and pipelines, resulting in economic losses. Therefore, a careful assessment of the oil quality produces a substantial increase in efficiency and reliability of the generating unit.

Heavy fuel oil (HFO for short) is a commonly used fuel in industry heating and power generation. Since it is a hydrocarbon derived from crude oil, the HFO contains carbon and hydrogen atoms in addition to many impurities such as sulfur and vanadium [1]. When combined with water, these elements and contaminants can cause corrosion and damages to the thermal power plant's facilities [2].

By knowing water contamination is a natural process in petroleum products, reliable on-line water content determination in HFO is quite useful for thermal power plants to know the fuel quality. Its presence may damage several parts of the plant and may

influence directly the lower heating value (LHV) [3]. Besides that, the determination of water content is vital in the processing, transport and marketing purposes as it reflects the net volumes of actual fuel oil in sales, taxation, exchanges and custody transfer [4].

Traditional laboratory measurements of water content in oil (also known as water-cut) are precise, but incapable of providing real-time information [5]. In order to carry out on-line monitoring of water content, thermal power plants tend to prefer the so-called water-cut meters. The vast majority of these devices work as a capacitor, in which the water-in-oil emulsion acts as the insulation material. Due to the expressive difference in the relative permittivity of oil and water, variations in the water/oil ratio vary the equivalent capacitance [6]. Although measurements obtained from these devices are satisfactory, costs associated with manufacturing and installation are generally high.

In this context, the present work introduces an ultrasound-based water-cut meter for heavy fuel oil. Water-in-oil emulsions act as the material medium for the ultrasound wave propagation. We assume that variations in the water/oil ratio affect the frequency components of the wave crossing the fluid [7]. In order to discover which components would be more water sensitive, we used the well-known Principal Component Analysis (PCA) with

* Corresponding author.

E-mail address: germanoltorres@gmail.com (G. Lambert-Torres).

data coming from laboratory experiments. We fully presented the development of the proposed ultrasound-based water-cut meter. For evaluation, we tested our system under laboratory and field conditions. All field measurements were obtained from a prototype installed in SUAPE II thermal power plant, in Brazil. We also compared it with a PCB-based capacitive sensor under field conditions.

In Section 2, we detail the proposed water-cut meter, aside from some operation aspects. In Section 3, we briefly explain the concepts of PCA. In Section 4, we detail the water contamination process and all laboratory experiments were made in order to obtain an expression for the water content. In Section 5, we cover the developed prototype and its installation in field. We also discuss about the flow characteristics. In Section 6, we present all field results obtained from our device alongside proper discussion. Finally, we present our relevant conclusions in Section 7.

2. Proposed system

The block diagram of our ultrasound-based water-cut meter is illustrated in Fig. 1.

The energy management circuit (1) provides all voltage levels necessary to power the included modules from the mains supply. In order to drive the transmitter piezoelectric transducer (4), which is usually achieved by unipolar or bipolar high-voltage pulses/impulses [8], a DC-DC boost converter (2) steps up the voltage provided by the energy management module to levels extending from 55 V to 135 V.

The pulse generator, also referred to as pulser (3), is capable of generating both positive/negative unipolar and bipolar square pulses. The lowest allowed pulse width is 400 ns, producing square wave signals of up to 2.5 MHz. The pulser can also produce up to 16 burst pulses, making it suitable for a wide range of ultrasonic transducers.

Acoustic signals acquired by the receiver piezoelectric transducer (5) are adapted (filtered and amplified) within the conditioning and amplification module (6). Aiming to perform a proper analog-to-digital conversion, a digitally programmable gain selection is available.

A Zynq[®]-based development platform (8) controls both pulser and conditioning modules. This platform consists in the well-known STEMLab board, by Red Pitaya. It includes an embedded Zynq[®]-7000, which integrates a dual-core ARM[®] Cortex[™]-A9 based

processing system (PS) and Xilinx programmable logic (PL) in a single device [9]. It is responsible for adjusting amplifier gain, since it is digitally programmable, acquiring the conditioned ultrasound signals and configuring the pulse profile. Digital isolators (7) were used to protect input/output pins of the development platform.

The assembled circuit board is presented in Fig. 2. As aforementioned, it includes a STEMLab board (the red one). Since analog input pins are available, different sensors can be used, allowing measurements of physical variables, such as temperature, which leads to have temperature-compensated water-cut measurements.

Finally, a dedicated software, installed in a local machine, implements data processing and storage module (9).

In order to have a prototype based on power plant's facilities requirements, both transmitter and receiver piezoelectric ultrasonic transducers were fully developed. The impedance test of the manufactured transducer is shown in Fig. 3. The electrical impedance is measured from 10 kHz to 100 kHz, by using the so-called auto-balancing bridge method [10]. Resonant and anti-resonant frequency regions are highlighted.

3. Principal Component Analysis

The central idea of the Principal Component Analysis (PCA for short) is to reduce the dimensionality of a data set in which there is a large number of interrelated variables, while retaining as much as possible of the variation present in the data set.

Given a zero-mean and standardized data set X , an $m \times n$ matrix, where m is the number of different parameters and n corresponds to the number of measurements of each parameter, the covariance matrix C_X is given by

$$C_X = \frac{1}{n} X X^T \quad (1)$$

PCA intends to find an orthonormal matrix P that implements a linear transform $Y = PX$, making the covariance matrix C_Y to be diagonal. Hence, all off-diagonal terms in C_Y should be zero (uncorrelated variables). Also, each successive dimension in Y should be rank-ordered according to variance. The resulting ordered set of elements p_i are the principal components [11]. Rewriting C_Y , we have

$$C_Y = \frac{1}{n} (PX)(PX)^T = P C_X P^T \quad (2)$$

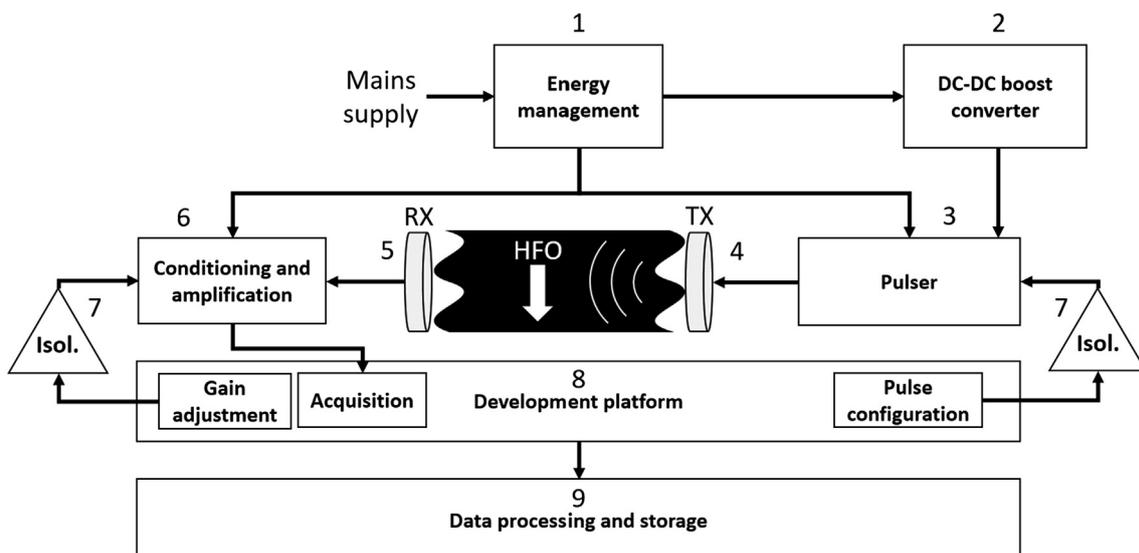


Fig. 1. Block diagram of the proposed system. The ultrasound-based water-cut meter was developed in modules.

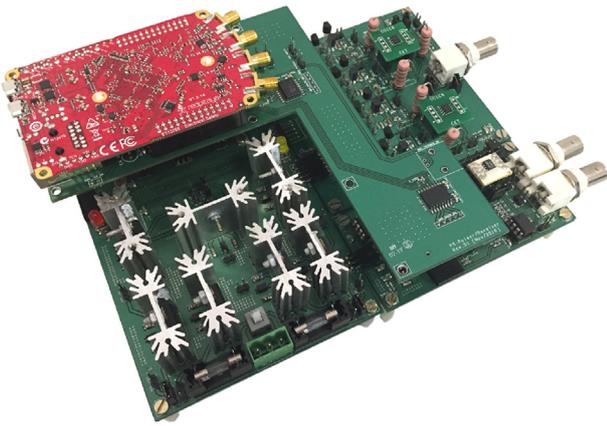


Fig. 2. Hardware of the proposed ultrasound-based water-cut meter. All circuitry was assembled in modules, making both testing workbench and replacement procedures easier.

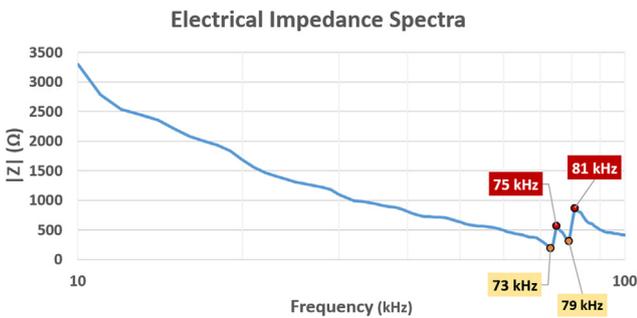


Fig. 3. Frequency response of the ultrasonic piezoelectric transducer.

Since C_X is a symmetric matrix, we can diagonalized it by a matrix of its orthonormal eigenvectors E ($C_X = EDE^T$). By knowing that the inverse of an orthogonal matrix is its transpose and by selecting $P = E^T$, we have

$$C_Y = P(EDE^T)P^T = D \tag{3}$$

which means that C_Y is a diagonal matrix. Thus, the principal components of X is the eigenvectors of C_X .

Briefly, PCA seeks a linear combination of the original variables that produces orthogonal axes forming a new meaningful basis capable of re-express the associated data set, filtering noise and revealing hidden information. It assumes that the data to be analyzed have a high signal-to-noise ratio (SNR). Principal components

with larger associated variances represent interesting information, while those with lower variances represent noise or undesired information [11,12].

4. Water contamination

At this point, the fluid is considered the system in analysis. The excitation signal corresponds to the input of this system, whilst the received ultrasound signal corresponds to its output. Since we keep the transmitter transducer excitation the same, the output signal varies according to the characteristics of the fluid, as illustrated in Fig. 4.

By controlling the laboratory contamination, it is possible to keep scalar quantities (e.g., temperature, pressure, sulfur content, etc.) nearly constant and vary only the water/oil ratio so that the first component found by PCA, which retains the most variance, will translate the desired information, i.e., the water content. It is important to mention that a same pre-defined square pulse excites the transmitter transducer in all measurements.

Since we seek the ultrasound frequency components most affected by the presence of water, the original data set consists of the parameters obtained by the Fourier Transform of the acoustic wave.

4.1. Experimental set-up

For the investigation, we chose the well-known through-transmission technique. In this case, ultrasonic waves travel from the transmitter to the receiver [13], forming a single acoustic path.

Thus, we aligned both receiver and transmitter probes properly, placing one opposite to the other in a glass vessel, which was adapted to the experiments, as shown in Fig. 5.

4.2. Acquisition settings

The used sampling rate is 1.5625 MHz and each ultrasonic pulse corresponds to 1024 samples. In other words, the frequency resolution is 1.5259 kHz.

Both time and frequency domains of a typical ultrasound signal acquired by the proposed water-cut meter are shown in Fig. 6. It is possible to verify the frequency range in which the ultrasonic receiver transducer responds. It varies from approximately 60 kHz to 105 kHz. Hence, aiming the reduction of the data set matrix, only frequency bins within this range are considered. Due to the pre-defined frequency resolution, a total of 30 frequency bins is considered.

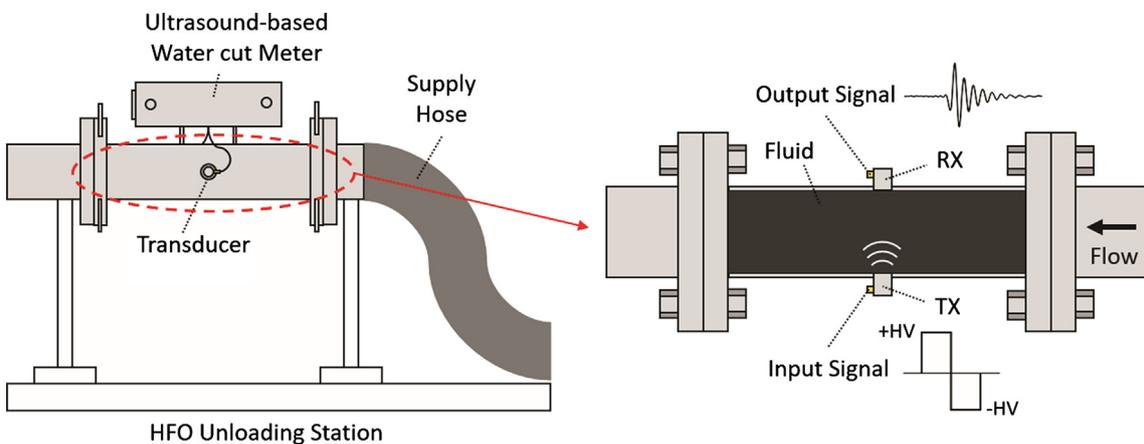


Fig. 4. Simplified diagram of the water-cut measurement. Excitation signal is supposed to be the input of the system, while the received ultrasound signal corresponds to its output.



Fig. 5. The glass vessel adapted to the laboratory experiments. Both transducers are placed into the corresponding housings.

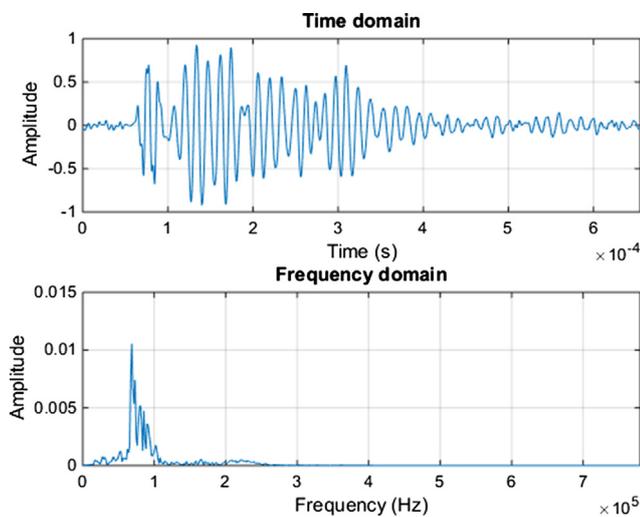


Fig. 6. Time and frequency domains of a typical ultrasound pulse acquired by the proposed system.

4.3. Laboratory experiments

We carried out contamination procedures by simply adding water into different samples of HFO. We used dosing syringes and mixers to produce mixtures as homogeneous as possible.

We performed the essays ordered and registered according to Table 1, in which water/oil ratio varies in steps of 1% from a sample to another.

As aforementioned, the resulting data set matrix consists of some parameters obtained by the Fourier Transform of the ultrasound waves. Considering only the frequency range sensible of the receiver transducer, a single pulse corresponds to 30 parameters. Since 180 pulses were analyzed for each sample, 6 samples in total, a 1080×30 matrix was obtained.

4.4. Score and water estimation

After using the resulting 1080×30 matrix as input of PCA algorithm, we obtained a 30×30 matrix of uncorrelated variables. It corresponds to the new data set ordered according to the variance. Each new component is a linear combination of the original variables. Table 2 presents the contribution of the original parameters for the composition of the first principal component (PC #1).

As expected, this component might translate the water/oil ratio, knowing only water content varied during essays. As aforementioned,

Table 1
Contamination Essays.

Sample	Oil quantity (g)	Water quantity (g)	Water/oil ratio (%)
A	490.0	0.0	0.0
B		4.9	1.0
C		9.8	2.0
D		14.7	3.0
E		19.6	4.0
F		24.5	5.0

Table 2

PC #1 Composition Mean value: 1.2558×10^{-3} Standard Deviation Value: 4.9975×10^{-4} .

Parameter	Frequency (kHz)	Contribution
1	59.509	-0.2263
2	61.035	-0.1931
3	62.561	-0.2191
4	64.087	-0.1923
5	65.613	0.0842
6	67.139	-0.1886
7	68.665	-0.0237
8	70.190	0.2402
9	71.716	0.2426
10	73.242	0.1281
11	74.768	0.2148
12	76.294	0.2363
13	77.820	0.2323
14	79.346	0.2291
15	80.872	0.2312
16	82.397	-0.1584
17	83.923	0.2188
18	85.449	-0.2242
19	86.975	-0.1574
20	88.501	-0.1185
21	90.027	-0.2294
22	91.553	-0.1676
23	93.079	-0.1549
24	94.604	0.0598
25	96.130	0.0473
26	97.656	-0.2058
27	99.182	-0.2046
28	100.708	-0.1080
29	102.233	-0.0838
30	103.759	0.1138

tioned, scalar quantities, such as temperature, pressure, sulfur content and other contaminants remained nearly constant.

In order to investigate this result, all original variables were projected onto the new axis, i.e., the first principal component. The projection of original variables onto any principal component, the so-called score, corresponds to a linear combination of the zero-mean standardized original data and the corresponding principal component [14].

Remembering that each sample corresponds precisely to 180 pulses, the score value was able to separate each sample, in addition to group them properly, as shown in Fig. 7.

The average score value for each group can thus be associated to the corresponding water/oil ratio value, as we present in Table 3. Thus, it is possible to obtain a relation between these values.

A third order linear regression, shown in Fig. 8, gives us the formula

$$y = -0.0079x^3 + 0.0354x^2 - 0.2557x + 2.1062 \quad (4)$$

where y corresponds to the water/oil ratio, given in %, and x corresponds to the score for the first principal component, composed and obtained from all values of Table 2.

We can now use (1) for estimating water content in oil. All coefficients shown in Table 2, including mean and standard deviation

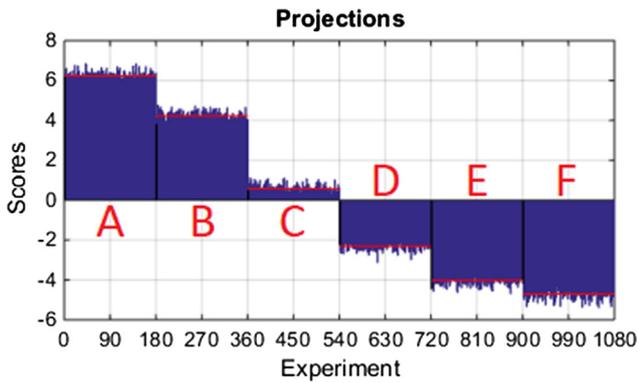


Fig. 7. Scores of all experiments for the first principal component.

Table 3
Water/oil ratio versus Score Value.

Water/oil ratio (%)	Average score
0.0	6.2316
1.0	4.2227
2.0	0.5800
3.0	-2.3094
4.0	-4.0233
5.0	-4.7017

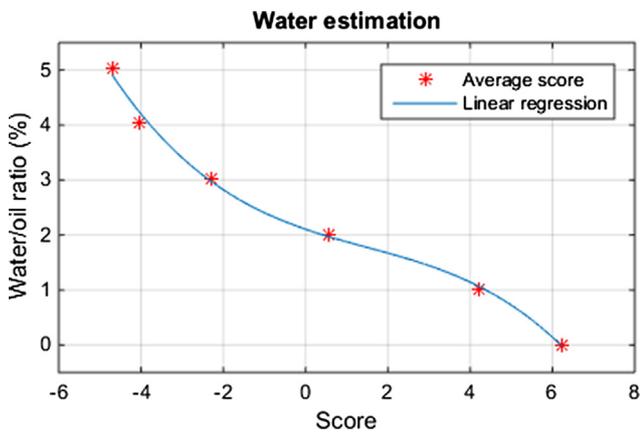


Fig. 8. Water estimation according to score values for the first principal component obtained after laboratory experiments.

values must be taken into account in order to properly infer water-cut in field measurements. These values are stored in the software.

5. Field installation

5.1. Field prototype of the proposed water-cut meter

We developed the prototype based totally on power plant's facilities requirements. The objective was to install it in the HFO unloading terminal [15]. To that end, we took some care on the development of field version of the prototype.

Firstly, we manufactured a metallic case aiming to protect all circuitry against the most common damages, such as dust, corrosion and other weather conditions. In accordance to the current HFO inlet, our prototype has DIN connections welded to a four-inch carbon steel pipe, as shown in Fig. 9. The pipe includes also some customized housings. Both transmitter and receiver ultrasound transducers are placed into these reserved locations.



Fig. 9. Field prototype of the proposed ultrasound-based water-cut meter.



Fig. 10. Complete installation of the prototype in one of the HFO unloading terminals.

The prototype was installed as shown in Fig. 10. It is possible to notice that the oil feed hose coming directly from tank trucks is attached directly to the DIN connection of the developed system.

Signal acquisition are remotely made from a computer, where the dedicated software is installed, as we described previously in Fig. 1.

According to (1), water estimation is based on the scores issued from PCA, which in turn depend on the frequency responses of both transducers used during laboratory contamination. Aiming to ensure the same frequency responses of both transducers during field measurements, the same transducers were used in both cases.

5.2. Flow and measurement characteristics

As already mentioned, fluid under analysis is HFO mixed with contaminants, such as water, sulfur, among others. Mainly focusing on water contamination, the mixture is not homogeneous. Therefore, our system is supposed to measure different levels of water content over time.

The average volumetric flow rate reached during the unloading procedure is about $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$. Since we have a four-inch (0.1016 m) circular pipe, the average flow velocity \bar{v}_f is about 1.23 m/s .

According to National Petroleum Agency (ANP, Brazil), the maximum allowed value for kinematic viscosity of HFO at 60°C is $0.00062 \text{ m}^2/\text{s}$. For that value and considering the diameter and the flow velocity aforementioned, the Reynolds number is about 202. Since HFO is normally heated up to 50°C during the unloading procedure, its kinematic viscosity further increases. Therefore, we

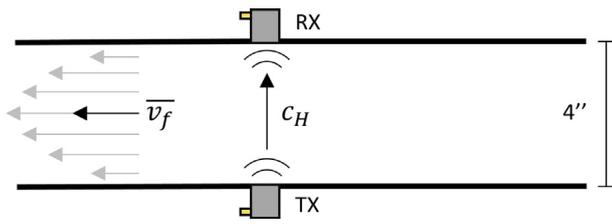


Fig. 11. Simplified diagram of the measurement characteristics.



Fig. 12. PCB-based capacitive sensor. Round two-layers PCBs were soldered side by side, forming a particular capacitor.

can consider a laminar flow inside the pipe. Also, we can assume a fully developed flow in the region in front of the ultrasound transducer.

Besides that, by knowing that the speed of sound in heavy hydrocarbons c_H is normally higher than 1000 m/s [16], the acoustic wave is not influenced by the flow movement due to short distance between transmitter (TX) and receiver (RX) transducers. The simplified diagram resuming the measurement characteristics is shown in Fig. 11. It is important to mention that the level of fluid inside the pipe must be above the height of both RX and TX transducers during measurements in order to have proper results.

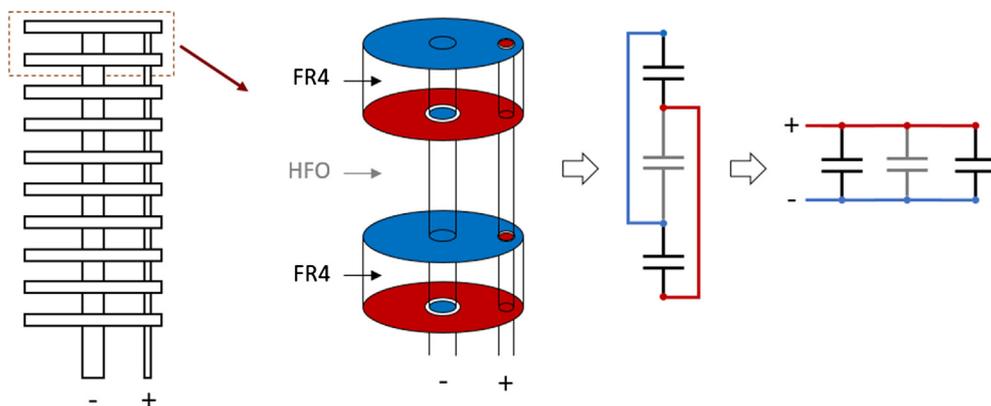


Fig. 13. Illustration of our PCB-based capacitive sensor. FR4 is a designation for glass-reinforced epoxy laminate material, which is the insulation material of the PCB. HFO represents the emulsion passing through the sensor.

5.3. Capacitive sensor

Aiming to compare and validate all values obtained from the proposed ultrasound-based water-cut meter during field measurements, we developed a PCB-based capacitive sensor, shown in Fig. 12.

As aforementioned, this kind of sensor acts as a capacitor, in which water-in-oil emulsions act as the insulation material. Due to the expressive difference in the relative permittivity of oil and water, variations in the water/oil ratio vary the equivalent capacitance.

Devices available on the market usually distinguish from each other by having different structural arrangements. Our sensor consists of round plates connected in parallel, resulting in an equivalent capacitance, as Fig. 13 illustrates. In addition to all parasitic capacitance, including the one of the PCB structure, HFO acts as the insulation material, composing the equivalent capacitance.

In order to discover a mathematical model for the proposed capacitor, we used standard samples of oil having known values of relative permittivity.

Fig. 14 highlights both capacitive sensor and ultrasound transducer, which were placed into their corresponding housings.

6. Results

In accordance with National Petroleum Agency (ANP, Brazil), fuel oil containing levels of basic sediments and water higher than 2% cannot be traded. Therefore, since authorized distributors shall



Fig. 14. Capacitive sensor and ultrasound transducer integrated to the field prototype.

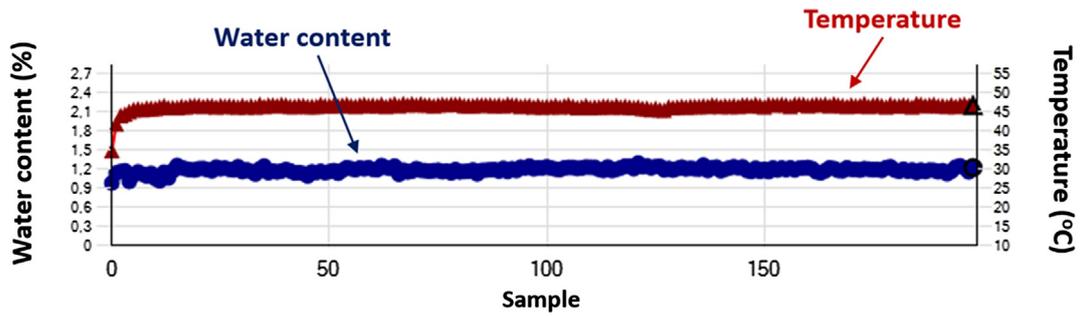


Fig. 15. Field results during the HFO unloading occurred on Sep-20th-2018, at 10:48 am.

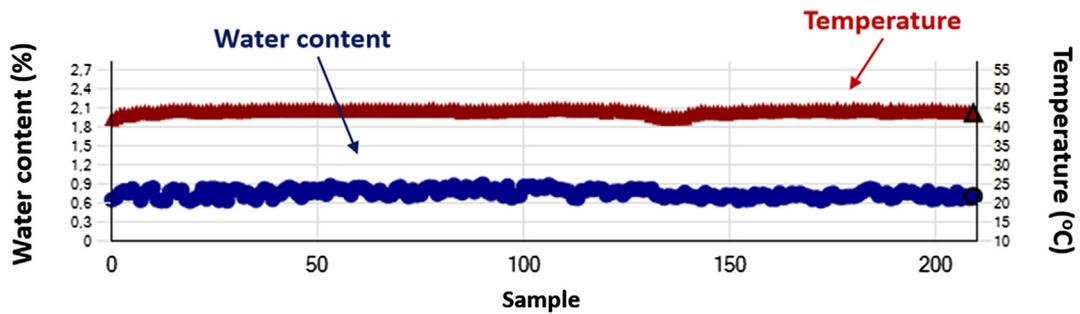


Fig. 16. Field results during the HFO unloading occurred on Sep-26th-2018, at 07:36 am.

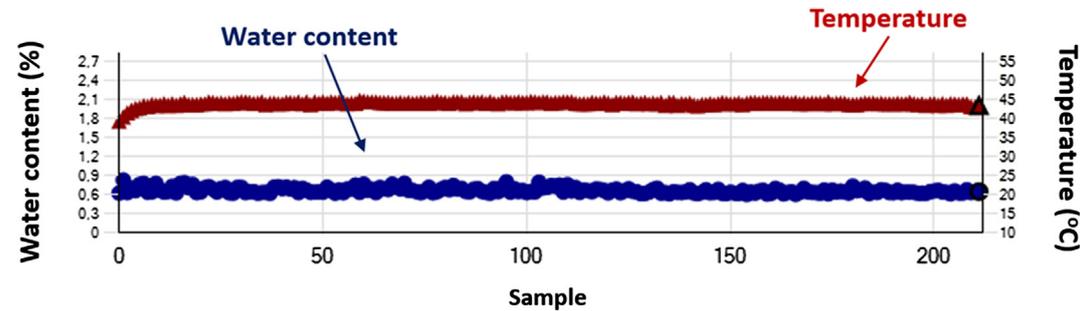


Fig. 17. Field results during the HFO unloading occurred on Sep-27th-2018, at 07:02 pm.

deliver HFO complying with this requirement, we expected to measure water content levels up to this value.

During each HFO unloading, the field prototype performs several measurements depending on the user settings. At the end, the average value of the water content is registered.

Especially in September 2018, SUAPE II thermal power plant was highly required so that a considerable number of HFO unloading was carried out. Since a lot of measurements were made by the proposed water-cut meter during this period, only a few of them are detailed subsequently.

Figs. 15–17 show the field results obtained over time during specific HFO unloading processes. Every 20 s, a value for the water content was estimated using (1). Hence, the total number of samples depends on the duration of the corresponding unloading. The temperature value corresponding to each sample can also be verified.

As we expected, water-in-oil emulsions do not form homogeneous mixtures so that water content estimation do not remain constant over time unsurprisingly. Especially at the beginning of each unloading process, when temperature is still increasing, we can notice the values estimated for the water content do not change significantly.

Finally, Table 4 shows all results obtained during the period aforementioned, emphasizing the average value for the water content and comparing both ultrasound and capacitive methods. The results corresponding to the Figs. 15–17 are highlighted in bold.

7. Conclusions

The aim of this work is to contribute to addressing the problem of monitoring water content in heavy fuel oil (HFO). In this context, we fully presented the development of an ultrasound-based water-cut meter.

We presented also a methodology consisting in laboratory experiments in conjunction with the Principal Component Analysis (PCA) in order to discover which components would be more water sensitive with data coming from laboratory experiments. This methodology led us to an expression for water/oil ratio estimation, which could in turn be tested under laboratory and field conditions. We tested the proposed system in SUAPE II thermal power plant, in Brazil.

Firstly, the laboratory tests proved the system's ability of classify HFO samples at different levels of water content from 0% to

Table 4
Field measurements.

n°	Date and Time	Water content (%)		Error
		Ultrasound	Capacitive	
1	Sep-06-2018, 11:30 pm	1.0	0.9	+0.1
2	Sep-07-2018, 03:38 pm	1.1	0.9	+0.2
3	Sep-08-2018, 07:35 am	1.1	0.9	+0.2
4	Sep-11-2018, 07:58 am	1.1	0.9	+0.2
5	Sep-11-2018, 11:42 am	1.1	0.9	+0.2
6	Sep-11-2018, 05:43 pm	1.1	0.9	+0.2
7	Sep-12-2018, 09:48 am	1.1	0.9	+0.2
8	Sep-12-2018, 04:33 pm	1.1	1.0	+0.1
9	Sep-12-2018, 05:56 pm	1.0	1.0	0.0
10	Sep-12-2018, 09:33 pm	1.1	1.0	+0.1
11	Sep-13-2018, 06:21 am	1.1	1.0	+0.1
12	Sep-13-2018, 09:08 am	1.1	0.9	+0.2
13	Sep-13-2018, 01:36 pm	1.0	0.9	+0.1
14	Sep-13-2018, 04:11 pm	1.0	0.9	+0.1
15	Sep-13-2018, 07:42 pm	1.0	0.9	+0.1
16	Sep-17-2018, 01:33 pm	1.1	1.1	0.0
17	Sep-18-2018, 01:57 pm	1.1	1.1	0.0
18	Sep-19-2018, 00:04 am	0.9	0.9	0.0
19	Sep-19-2018, 12:26 pm	1.2	1.0	+0.2
20	Sep-19-2018, 01:55 pm	1.2	1.0	+0.2
21	Sep-19-2018, 05:57 pm	1.0	1.0	0.0
22	Sep-20-2018, 10:48 am	1.2	1.0	+0.2
23	Sep-21-2018, 04:57 pm	1.0	1.0	0.0
24	Sep-21-2018, 07:13 pm	1.0	1.0	0.0
25	Sep-24-2018, 10:45 am	0.7	0.9	-0.2
26	Sep-25-2018, 11:28 am	0.7	0.6	-0.1
27	Sep-26-2018, 07:36 am	0.8	0.6	+0.2
28	Sep-27-2018, 08:14 am	0.7	0.6	+0.1
29	Sep-27-2018, 07:02 am	0.7	0.6	+0.1
30	Sep-27-2018, 01:02 pm	0.7	0.6	+0.1
31	Sep-27-2018, 03:01 pm	0.7	0.6	+0.1
32	Sep-27-2018, 07:02 pm	0.7	0.6	+0.1

5% in steps of 1%. The results obtained from PCA algorithm led us to an expression linking scores and water/oil ratio, given in %.

We could notice that all values estimated by the proposed ultrasound-based water-cut meter were in accordance with the limits imposed by ANP. Besides that, we noticed that even when the temperature varies, especially at the beginning of each unloading process, we do not notice a significant change in the estimated values.

Aiming to validate all values obtained from our proposed ultrasound-based water-cut meter during field measurements, we developed also a PCB-based capacitive sensor, commonly used in such kinds of measurements. By comparing all results coming from both capacitive sensor and ultrasound system, we could verify a maximum difference of 0.2 percentage point between both approaches, which can be considered satisfactory.

Finally, the proposed technique also provides an alternative methodology of analyzing other HFO contaminants. The costs involved in manufacturing and installing our system were low compared to market water-cut meters.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude to the anonymous reviewers for their important contributions to improve the quality of the paper. The authors would like also thank the ANEEL R&D and CAPES for the financial support of this project.

References

- [1] M. Happonen, F. Mylläri, P. Karjalainen, et al., Size distribution, chemical composition, and hygroscopicity of fine particles emitted from an oil-fired heating plant, *Environ. Sci. Technol.* ED-57 (24) (2013) 14468–14475, <https://doi.org/10.1021/es4028056>.
- [2] P.K. Bhowmik, E. Hossain, J.A. Shamim, Corrosion and its control in crude oil refining process, *Proc. GIMEC&14APM*, Dhaka, Bangladesh, 2012, doi: 10.13140/2.1.1349.0244.
- [3] P. Quaak, *Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technologies*, World Bank, Washington, 1999.
- [4] T.B. Tang, Y.L. Lim, M.Z. Aslam, Detecting trace amount of water in crude oil with capacitance sensors, in: *SENSORS*, 2014, IEEE, Valencia, 2014, pp. 2030–2033, doi: 10.1109/ICSENS.2014.6985433.
- [5] M.A. Karimi, M. Arsalan, A. Shamim, A low cost and pipe conformable microwave-based water-cut sensor, in: *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, San Francisco, CA, 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/MWSYM.2016.7540425.
- [6] M. Assaad, M.Z. Aslam, An interface circuit design based on differential capacitive sensors for accurate measurement of water contents in crude oil, in: *2012 IEEE International Conference on Circuits and Systems (ICCCAS)*, Kuala Lumpur, 2012, pp. 263–266, doi: 10.1109/ICCCAS.2012.6408315.
- [7] V.C.M.N. Leite, G.F.C. Veloso, L.E.B. da Silva, G. Lambert-Torres, J.G.B. da Silva, J. O.P. Pinto, Moisture estimation in power transformer oil using acoustic signals and spectral kurtosis, *Meas. Sci. Technol.* 27 (3) (2016) 8, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/3/035301>.
- [8] Jian-Xing Wu, Yi-Chun Du, Chia-Hung Lin, Pei-Jarn Chen, Tainsong Chen, A novel bipolar pulse generator for high-frequency ultrasound system, in: *2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Prague, 2013, pp. 1571–1574, doi: 10.1109/ULTSYM.2013.0400.
- [9] Xilinx Inc., "Zynq-7000 All Programmable SoC Technical Reference Manual – UG585 (v1.11)," September 27, 2016.
- [10] Keysight Technologies, "Impedance Measurement Handbook – A guide to measurement technology and techniques," 6th Ed., November 2, 2016.
- [11] I.T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*, Springer Series in Statistics, second ed., Springer, New York, 2002.
- [12] J. Shlens, *A Tutorial on Principal Component Analysis*, Cornell University, Mountain View, CA, 2014.
- [13] R. Martinez, L. Leija, A. Vera, Ultrasonic attenuation in pure water: comparison between through-transmission and pulse-echo techniques, in: *2010 Pan*

- American Health Care Exchanges, Lima, pp. 81–84, doi: 10.1109/PAHCE.2010.5474593.
- [14] S. Lee, F. Zou, F.A. Wright, Convergence and prediction of principal component scores in high-dimensional settings, *Ann. Stat.* 38 (6) (2010) 3605–3629, <https://doi.org/10.1214/10-AOS821>.
- [15] J.T. Mäkelä, Standardization and Optimization of the Fuel Unloading Station Ph.D. dissertation, University of Applied Sciences, Vaasa, Finland, 2010.
- [16] H.H. Dashti, M.R. Riazi, Acoustic velocities in petroleum fluids: measurement and prediction, *J. Pet. Sci. Eng.* 124 (2014) 94–104, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.10.013>.