

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
INDUSTRIAL

AVNER OSTROVSKI SÄUBERLICH

SENSOR CAPACITIVO MULTIELETRODO PARA
MONITORAMENTO DE NÍVEL EM SEPARADORES MULTIFÁSICOS

CURITIBA

2019

AVNER OSTROVSKI SÄUBERLICH

**SENSOR CAPACITIVO MULTIELETRODO PARA
MONITORAMENTO DE NÍVEL EM SEPARADORES MULTIFÁSICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de concentração: Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Marco José da Silva
Co-orientador: Dr. Eduardo Nunes dos Santos

CURITIBA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Säuberlich, Avner Ostrovski

Sensor capacitivo multieletrodo para monitoramento de nível em separadores multifásicos [recurso eletrônico] / Avner Ostrovski Säuberlich. - 2019.

1 arquivo eletrônico (122 f.) : PDF ; 3,25 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, Curitiba, 2019

Bibliografia: f. 112-118.

1. Engenharia elétrica - Dissertações. 2. Detectores - Aplicações industriais. 3. Medição. 4. Indicadores de nível. 5. Escoamento multifásico - Monitorização. 6. Separação (Tecnologia). 7. Petróleo - Prospecção. 8. Processamento de imagens - Técnicas digitais. 9. Processamento eletrônico de dados em tempo real. 10. Métodos de simulação. I. Silva, Marco José da, orient. II. Santos, Eduardo Nunes dos, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.3

Biblioteca Central do Câmpus Curitiba - UTFPR
Bibliotecária: Luiza Aquemi Matsumoto CRB-9/794

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO

A Dissertação de Mestrado intitulada **Sensor capacitivo multieletrodo para monitoramento de nível em separadores multifásicos** defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Avner Ostrovski Sauberlich** no dia **17 de dezembro de 2019**, foi julgada aprovada em sua forma final para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Linha de Pesquisa – Sistemas de Mediação e Instrumentação, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marco José da Silva - (UTFPR) - Orientador

Prof. Dr. Marcos Santos Hara - (IFPR)

Prof. Dr. Flavio Neves Jr. - (UTFPR)

Prof. Dr. Aluisio do Nascimento Wrasse - (UTFPR)

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 17 de dezembro de 2019.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, Pai de todos, por me conceder a força e a sabedoria necessárias para a execução deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Marco Jose da Silva, e meu co-orientador, Dr. Eduardo Nunes dos Santos, pela oportunidade a mim concedida desde o dia em que os conheci, na entrevista para a entrada no programa de mestrado. Agradeço por todo o apoio, dedicação e companheirismo durante a execução de minha pesquisa e também pela paciência em observar e corrigir meus eventuais erros de percurso.

Aos meus pais, Alfredo Max e Denise, por me darem todo o amor, incentivo e suporte emocional necessários para a obtenção de mais esta conquista.

Ao meu irmão Cael, por todo o apoio dado e pela grande irmandade e amizade que temos, que foi essencial para a conclusão desta obra.

Ao meu tio Igor, pelo suporte técnico dado a mim, de coração, na confecção das soldas e na montagem dos componentes eletrônicos no sensor desenvolvido.

Ao professor Dr. Dalton Bertoldi por todo o intermédio na área financeira da minha pesquisa, viabilizando e simplificando todas as tratativas com os fornecedores.

À Vanessa, funcionária da empresa que confeccionou as placas de circuito impresso, pelo excelente atendimento e por toda a ajuda disponibilizada durante o processo de fabricação das estruturas.

Aos meus colegas e amigos do Núcleo de Escoamento Multifásico (NUEM) da UTFPR, Alex Neitzke, Aluísio do Nascimento Wrasse, Carlos da Luz Lima, Joel Karp, professor Dr. Moisés Neto, professor Me. Raul Erthal e Reinaldo Justiniano, que deram contribuições significativas ao meu trabalho durante todas as suas etapas.

Ao chefe de departamento do NUEM, professor Dr. Rigoberto Morales, pela administração exemplar da instituição, viabilizando assim o desenvolvimento de pesquisas de alto gabarito e relevância para a sociedade científica e industrial.

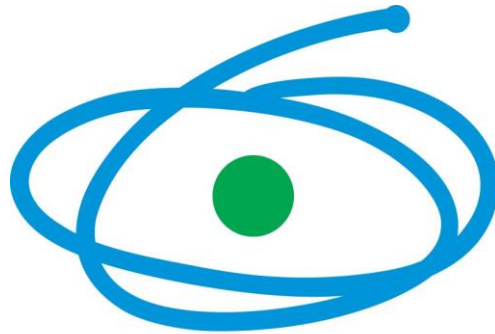
Por fim, agradeço ao Programa de Recursos Humanos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante o desenvolvimento desta pesquisa, e à Petrobrás por todo o investimento e disponibilização dos recursos necessários à confecção deste trabalho.



NUEM

MULTIPHASE FLOW RESEARCH CENTER

*10
years*



CAPES



PETROBRAS

UTFPR

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

“If I have seen further and became grand, it was because I stood on the shoulders of Giants.”

– Isaac Newton

RESUMO

Com a crescente demanda produtiva da indústria petrolífera, faz-se necessário cada vez mais o desenvolvimento e aperfeiçoamento de sistemas, tecnologias e processos dentro das suas várias etapas. Uma delas, é o processo de separação da mistura de petróleo, água de produção e gás natural provenientes do processo de exploração de poços petrolíferos. Nesta fase, é fundamental realizar o monitoramento dos níveis dos diferentes compostos no interior dos tanques separadores, para que essas informações sirvam como variáveis de entrada no sistema de controle separador garantindo a eficiência e segurança destes equipamentos. Com base nisso, este trabalho tem o objetivo de apresentar estudo, a análise e realização de testes de um sensor capacitivo multieletrodo para monitorar em tempo real o nível dos diferentes fluidos em separadores gravitacionais aplicados na indústria do petróleo. Desse modo, é possível identificar as diferentes substâncias e interfaces presentes no interior de tanques separadores. Além disso, também foram realizados estudos preliminares sobre o uso combinado das técnicas de monitoramento capacitiva e indutiva (de modo que uma metodologia possa suprir as limitações da outra). O protótipo desenvolvido foi testado em recipientes de teste com resultados satisfatórios na medição da altura de misturas multifásicas água-óleo-ar. O protótipo pode ser facilmente instalado em separadores testes e necessitando de aprimoramentos no que tange robustez e operação em ambientes explosivos para que possa ser empregado em aplicações reais.

Palavras-chave: medidor de nível; sensor capacitivo; sensor indutivo; mistura multifásica; sensor multieletrodo.

ABSTRACT

With the increasing production demand of the oil industry, it is more and more necessary to develop and improve systems, technologies and processes within their various stages. Among them, one important process is the separation of the oil, water and natural gas from the reservoirs at processing plants. At this stage, it is essential to monitor the levels of the different compounds within the separator tanks, so that this information serves as input variable in the control systems ensuring the efficiency and safety of these equipment. Based on this, this work aims to present the study, analysis and testing of a capacitive multielectrode sensor to monitor in real time the level of different fluids in gravitational separators applied in the oil industry. In this way, it is possible to identify the different substances and interfaces present inside separator tanks. In addition, preliminary studies have also been conducted on the combined use of capacitive and inductive monitoring techniques (so that one methodology can address the limitations of the other). The developed prototype was tested in test vessels with satisfactory results for measuring the level of water-oil-air multiphase mixtures. The prototype can be easily installed on test tabs and requires improvements regarding robustness and operation in explosive environments so that it may be used in real applications.

Keywords: level sensor; capacitive sensor; inductive sensor; multiphase mixture; multielectrode sensor.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μ_r – Permeabilidade magnética relativa

A – Unidade de medida de corrente elétrica (ampère)

A/D – Referente a conversões eletrônicas de grandezas analógicas para digitais

CI – Circuito integrado

CMOS – *Complementary Metal Oxide Semiconductor*

d – Diâmetro

F – Unidade de medida de capacitância (Faraday)

g (nas equações) – Aceleração da gravidade

g (nas unidades de medida) – Unidade de medida de massa (grama)

h – altura

H (nas equações) – altura

H (nas unidades de medida) – Unidade de medida de indutância (Henry)

H₂O – Fórmula química da água

Hz – Unidade de medida de frequência (hertz)

I/O – Abreviatura de *Input/Output*

I²C – *Inter-Integrated Circuit*

B – Unidade de medida de capacidade de memória eletrônica (Byte)

L (nas equações) – Indutância

L (nas unidades de medida) – Unidade de medida de volume (litro)

m – Unidade de medida de distância (metro)

MCU – *Microcontrolled Central Unit*

NaCl – Fórmula química do cloreto de sódio

O/W – Referente à composição de emulsões (oil-in-water)

°C – Unidade de medida de temperatura (grau Célsio)

psi – Unidade de medida de pressão (*pound force per square inch*)

psig – Unidade de medida de pressão (*pound force per square inch gauge*)

PWM – *Pulse Width Modulation*

RPM – Unidade de medida de rotação (rotações por minuto)

S – Unidade de medida de condutância elétrica (Siemens)

SCL – *Serial Clock*

SDA – *Serial Data*

V – Unidade de medida de tensão elétrica (Volt)

V_{AC} – Representação de tensão elétrica alternada

W – Unidade de medida de potência (Watt)

W/O – Referente à composição de emulsões (water-in-oil)

ϵ_r – Permissividade elétrica relativa

ρ – Densidade

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema de um separador multifásico.....	20
Figura 2.1 – Tipos de emulsões existentes.	24
Figura 2.2 – Classificação de estabilidade de emulsões de acordo com o diâmetro médio de gotas.....	27
Figura 2.3 – Sistema de radiação gama intrusiva no interior de separadores multifásicos.	29
Figura 2.4 – Sistema de radiação gama não-intrusiva no interior de separadores multifásicos.	30
Figura 2.5 – Sistema ultrassônico de monitoramento de separadores multifásicos.	31
Figura 2.6 – Sistema capacitivo de monitoramento de separadores multifásicos.	33
Figura 2.7 – Capacitor com dois dielétricos de isolamento.	34
Figura 2.8 – Sistema indutivo de monitoramento de separadores multifásicos.	35
Figura 2.9 – Geometrias de indutores planares.	36
Figura 2.10 – Sistema de tomografia ECT para o monitoramento de separadores multifásicos.	38
Figura 2.11 – Combinação de duas imagens de tomografia para a formação da distribuição trifásica.	39
Figura 2.12 – Sistema de medição de níveis de interfaces por diferença de pressão (sem emulsão).	40
Figura 2.13 – Sistema de diferença de pressão para o monitoramento de separadores multifásicos.....	41
Figura 2.14 – Sistema de flutuadores para o monitoramento de separadores multifásicos.....	43
Figura 2.15 – Sistema de vibração para o monitoramento de separadores multifásicos.	44
Figura 2.16 – Sistema de fibra ótica para o monitoramento de separadores multifásicos.	45
Figura 2.17 – Circuito detector de carga para medição de capacitâncias.....	48
Figura 2.18 – Sequência de chaveamento do transdutor capacitivo.....	49
Figura 2.19 – Processo de carga do transdutor capacitivo chaveado	50
Figura 2.20 – Processo de descarga do transdutor capacitivo chaveado.	50

Figura 2.21 – Diagrama de blocos do transdutor capacitivo ressonante.	52
Figura 2.22 – Ponto de operação do transdutor capacitivo ressonante.....	53
Figura 2.23 – Representação simplificada do conceito de segurança intrínseca.....	57
Figura 3.1 – Desenho técnico do protótipo de separador da UTFPR.....	58
Figura 3.2 – Protótipo do separador da UTFPR.	59
Figura 3.3 – Bancada experimental do protótipo do separador da UTFPR.....	59
Figura 3.4 – Circuito integrado do FDC2214.....	61
Figura 3.5 – Circuito eletrônico do FDC2214.....	62
Figura 3.6 – Circuito eletrônico do LDC1614.....	63
Figura 3.7 – Módulo de avaliação do FDC2214.	64
Figura 3.8 – Módulo de avaliação do LDC1614.	64
Figura 3.9 – Design dos eletrodos do sensor de nível.	66
Figura 3.10 – Design das bobinas planares testadas.....	66
Figura 3.11 – Diagrama construtivo do circuito eletrônico do sensor capacitivo.	68
Figura 3.12 – Esboço do sensor construído.....	69
Figura 3.13 – Esboço da eletrônica do sensor construído.	70
Figura 3.14 – Esboço dos eletrodos do sensor construído.....	71
Figura 3.15 – Disposição do sensor de nível no separador da UTFPR.	72
Figura 3.16 – Protótipo final do sensor de nível desenvolvido.	73
Figura 3.17 – Reservatório para calibração do sensor de nível.	74
Figura 3.18 – Monitoramento do sensor de nível envolto em ar e óleo.	76
Figura 3.19 – Monitoramento do sensor de nível envolto em ar, óleo e água.....	76
Figura 3.20 – Monitoramento do sensor de nível envolto em óleo e água.....	77
Figura 4.1 – PCI capacitiva.	79
Figura 4.2 – PCI indutiva.	79
Figura 4.3 – Gráfico da capacitância média da PCI capacitiva considerando o incremento da condutividade da água pela inserção de cloreto de sódio.....	81

Figura 4.4 – Gráfico da indutância média da PCI indutiva considerando o incremento da condutividade da água pela inserção de cloreto de sódio.....	82
Figura 4.5 – Gráfico da capacitância média da PCI capacitiva em emulsões com diferentes proporções entre água e óleo.	82
Figura 4.6 – Gráfico da indutância média da PCI indutiva em emulsões com diferentes proporções entre água e óleo.	83
Figura 4.7 – Emulsão do tipo W/O composta por 50% água e 50% óleo.	84
Figura 4.8 – Misturador de baixa rotação utilizado para fazer as emulsões.....	85
Figura 4.9 – Impeller de plástico e acrílico utilizado para produzir as emulsões.....	86
Figura 4.10 – Haste sensora construída para os experimentos com emulsões.	86
Figura 4.11 – Gráfico da capacitância média da haste sensora em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.	89
Figura 4.12 – Gráfico da capacitância média da haste sensora em emulsões com diferentes proporções de salmoura e óleo.	89
Figura 4.13 – Gráfico da capacitância média da haste sensora em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo e salmoura e óleo.	91
Figura 4.14 – Gráfico da capacitância média da PCI capacitiva para substâncias com permissividades elétricas conhecidas.	92
Figura 4.15 – Gráfico da indutância média da PCI indutiva para substâncias puras.	93
Figura 4.16 – Misturador produzindo emulsões simultaneamente à medição do sensor de nível.	95
Figura 4.17 – Gráfico da capacitância média do 14° eletrodo do sensor de nível em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.	98
Figura 4.18 – Gráfico da capacitância média do 15° eletrodo do sensor de nível em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.	98
Figura 4.19 – Gráfico da condutividade elétrica de emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.....	99
Figura 4.20 – Gráfico da capacitância de todos os eletrodos do sensor de nível para substâncias com diferentes permissividades elétricas relativas.....	101
Figura 4.21 – Gráfico da capacitância normalizada de todos os eletrodos do sensor de haste para substâncias com diferentes permissividades elétricas relativas.....	103
Figura 4.22 – Gráfico das capacitâncias normalizadas do sensor de nível em função da altura da coluna de água.	104

Figura 4.23 – Gráfico das capacitâncias normalizadas do sensor de nível em função da altura da coluna de óleo.	105
Figura 4.24 – Gráfico das capacitâncias normalizadas do sensor de nível durante o experimento dinâmico entre ar e água.	106
Figura 4.25 – Gráfico das capacitâncias normalizadas do sensor de nível durante o experimento dinâmico entre ar e óleo.....	107
Figura 4.26 – Gráfico das capacitâncias normalizadas do sensor de nível durante o experimento dinâmico entre ar, óleo e água.	108
Figura A-1 – Gráfico do comportamento do sensor de nível em regime temporal.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Coeficientes da Fórmula de Wheeler modificada.....	37
Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens de cada técnica de medição.....	47
Tabela 2.3 – Categorias de temperaturas máximas de superfície para o Grupo II.	55
Tabela 2.4 – Faixas de temperatura de ambiente de serviço.	56
Tabela 2.5 – Graus de proteção de equipamentos e seus respectivos símbolos.	56
Tabela 4.1 – Medidas de capacitância e indutância obtidas de diferentes substâncias com os circuitos FDC2214 e LDC1614 em conjunto com as PCI desenvolvidas.	80
Tabela 4.2 – Medidas de capacitância média da haste sensora em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.	87
Tabela 4.3 – Medidas de capacitância média da haste sensora em emulsões com diferentes proporções de salmoura e óleo.	88
Tabela 4.4 – Medidas de capacitância e indutância dos circuitos FDC2214 e LDC1614 em conjunto com as PCI desenvolvidas em substâncias com valores de permissividade elétrica conhecidos (DA SILVA, 2008).	91
Tabela 4.5 – Valores de média e desvio padrão das capacitâncias do 14° eletrodo do sensor de nível em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.....	96
Tabela 4.6 – Valores de média e desvio padrão das capacitâncias do 15° eletrodo do sensor de nível em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.....	97
Tabela A-1 – Valores de média e desvio padrão das capacitâncias de todos os capacitores do sensor de haste para substâncias com diferentes permissividades elétricas relativas.....	119

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Motivação.....	19
1.2	Objetivos gerais.....	20
1.3	Objetivos específicos.....	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1	Emulsões.....	23
2.1.1	Tipos de emulsões.....	24
2.1.2	Principais fatores que influem na estabilidade de emulsões.....	25
2.1.2.1	Partículas sólidas.....	25
2.1.2.2	Componentes polares de alta massa molar.....	26
2.1.2.3	Temperatura.....	26
2.1.2.4	Tamanho de gotas.....	27
2.2	Técnicas de medida aplicadas em separadores multifásicos.....	28
2.2.1	Sistemas de raios-gama.....	29
2.2.2	Sistemas de ultrassom.....	31
2.2.3	Sistemas capacitivos.....	32
2.2.4	Sistemas indutivos.....	35
2.2.5	Sistemas de tomografia.....	38
2.2.6	Sistemas de diferencial de pressão.....	39
2.2.7	Sistemas de flutuadores.....	42
2.2.8	Sistemas vibratórios.....	43
2.2.9	Sistemas de fibra ótica.....	45
2.2.10	Vantagens e desvantagens de cada técnica de medição.....	47
2.3	Técnicas de medição de capacitância.....	48
2.3.1	Chaveamento eletrônico e transferência de carga.....	48
2.3.2	Variação de frequência de ressonância.....	51
2.4	Normas regulamentadoras do sistema (em caso de uso comercial).....	54
3	DESENVOLVIMENTO.....	58
3.1	Protótipo do separador gravitacional horizontal da UTFPR.....	58
3.2	Eletrônica do sensor.....	60

3.2.1	Definição do método de medição	60
3.2.2	Caracterização e definição de estruturas	63
3.2.3	Manipulação dos dados digitalizados	67
3.3	<i>Layout</i> do sensor desenvolvido com o circuito de medição capacitivo.....	69
3.4	Calibração.....	74
3.5	Sensoriamento por imagem	75
4	RESULTADOS	78
4.1	Resultados preliminares com protótipos capacitivo e indutivo.....	78
4.1.1	Experimentos com as substâncias padrão do separador	78
4.1.2	Experimentos específicos com emulsões	84
4.1.3	Experimentos com substâncias puras	91
4.2	Resultados do protótipo final do sensor de nível multicanal.....	94
4.2.1	Experimentos específicos com emulsões	95
4.2.2	Experimentos com substâncias puras	100
4.2.3	Experimento de altura de coluna de fluidos	104
4.2.4	Experimento dinâmico de identificação de substâncias	105
5	CONCLUSÕES.....	110
	REFERÊNCIAS	112
	APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR DE NÍVEL FINAL	119

1 INTRODUÇÃO

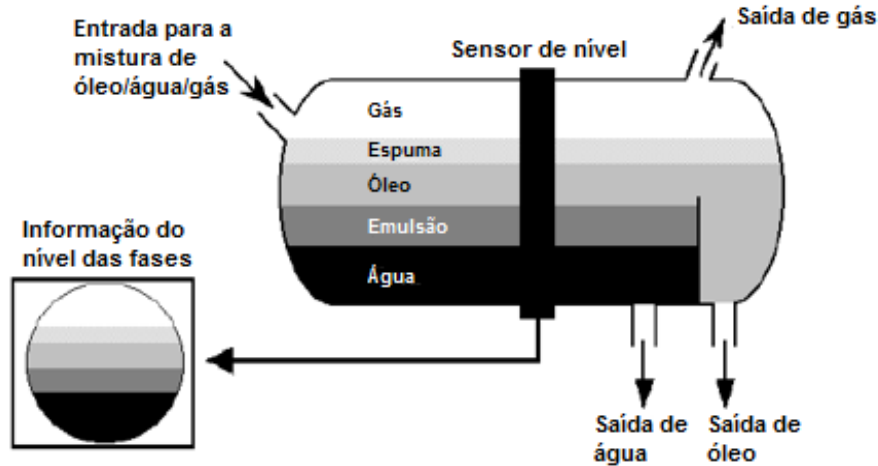
1.1 Motivação

Segundo Falcone (2009), quando o petróleo bruto é extraído do subsolo marítimo, ele traz consigo diversas impurezas naturais do seu processo de formação e extração. Água, gás natural e alguns sólidos são alguns dos compostos que vêm combinados com o petróleo nesta fase inicial, formando uma mistura multifásica. Para que as etapas produtivas seguintes sejam realizadas de maneira adequada, é necessário que haja uma separação das fases, de forma que a água possa ser retornada ao mar ou reinserida no poço e a areia também volte ao oceano (apresentando uma quantidade de óleo que atenda às normas ambientais), possibilitando com que o petróleo e o gás natural sigam para suas respectivas cadeias de produção livres de impurezas.

Essa separação ocorre através da decantação de toda essa mistura, que é armazenada em grandes reservatórios, chamados de separadores gravitacionais. Esses tanques possuem uma válvula de entrada (para a inserção do petróleo bruto) e válvulas de saída para a água, para o óleo e para o gás natural (Figura 1.1).

Para possibilitar a separação, o monitoramento do nível das fases desses reservatórios torna-se algo indispensável, uma vez que as informações provenientes desse acompanhamento são utilizadas como variáveis de controle nas malhas que regulam tanto a vazão do composto de entrada que é injetado no separador, quanto os fluxos de saída dos compostos extraídos nesse processo. Através desse controle, é possível que haja uma separação eficiente das diferentes substâncias presentes no tanque, ou seja, evita-se, que a água extraída do processo contenha óleo e/ou areia misturados e vice-versa, por consequência de vazões de entrada e de saída não adequadas.

Figura 1.1 – Esquema de um separador multifásico.



Fonte: Adaptado de ISAKSEN *et al.*, 1994.

Dessa forma, é necessário usar sistemas de detecção apropriados, para que a leitura dos níveis de diferentes fases nos separadores seja monitorada com precisão. Existem diferentes tecnologias de detecção para o monitoramento de nível multifásico, baseadas, por exemplo, em ultrassom, radiação ionizante, impedância elétrica, entre outros. No entanto, nenhum pode ser visto como geral e cada solução apresenta alguma desvantagem.

1.2 Objetivos gerais

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sensor de nível multifásico para realizar a instrumentação de separadores gravitacionais horizontais. O sistema é baseado em medidas de capacitância de múltiplos eletrodos capazes de realizar esse monitoramento com a exatidão e precisão necessárias a esse tipo de atividade e aplicação, sendo feita também a investigação preliminar de uma técnica indutiva utilizando bobinas de geometrias planares. Como possível objeto de testes, tem-se a disposição um separador protótipo do Núcleo de Escoamento Multifásico (NUEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

A tecnologia híbrida (sensor capacitivo e indutivo) deve ser avaliada para monitorar com maior confiabilidade aplicações envolvendo substâncias com valores mais altos de condutividade elétrica, como por exemplo, a salmoura. Em medições capacitivas puras, as alterações de salinidade influenciam muito as leituras de capacitância e, às vezes, podem

causar curto-circuito nos eletrodos do sensor (YANG, 2006). Além disso, a geometria planar adotada nas bobinas reduz o acúmulo de impurezas na região sensora.

Como a capacitância entre regiões condutoras e a indutância de uma bobina são grandezas que variam com as propriedades elétricas do meio físico que as envolvem (permissividade e condutividade elétricas), diferentes substâncias presentes na mistura do separador que estiverem circundando os capacitores e indutores do sensor irão gerar diferentes medidas de capacitância e indutância nesses componentes. Esses valores, ao serem processados e imageados, permitirão medir quais compostos estão presentes na região sensível do sistema, possibilitando assim realizar o monitoramento simultâneo e em tempo real dos níveis de ar, óleo, emulsão e água presentes no tanque separador.

Através do escopo mostrado na Figura 1.1, percebe-se que existe uma dinâmica entre as fases presentes no interior dos separadores gravitacionais. Segundo Almeida (2014), no caso da fronteira entre a água e o óleo, a movimentação e o atrito entre esses fluidos faz com que seja gerada uma mistura entre eles, chamada de emulsão. A identificação dessa mistura é de extrema importância para o processo de separação, uma vez que ela não pode ser descartada de volta ao mar junto com a água (devido à sua composição de óleo) e também não pode seguir no processo de refino junto com o petróleo (devido à sua composição de água). Com base nisso e também na dificuldade de identificação desse composto por outras técnicas de medição (YANG, 2006), são realizados experimentos de caracterização de diferentes composições de emulsões com o objetivo de tornar o sensor de nível capaz de identificar também essa mistura.

Em geral, as técnicas de medição multifásicas baseadas em impedância elétrica são desenvolvidas com base em circuitos de carga e descarga capacitiva e indutiva, como descrito por Meng *et al.* (2006). Apesar desse método ter evoluído com o passar dos anos, ainda apresenta como principais desvantagens a maior suscetibilidade a ruídos e interferências eletromagnéticas e o mais alto consumo de energia quando comparado a outras técnicas. Essas características provêm das condições não ideais do chaveamento eletrônico em alta frequência (HUANG *et al.* 1988).

A fim de mitigar essas limitações, a tecnologia empregada para realizar as medidas das diferentes capacitâncias e indutâncias do sensor se baseia em uma técnica inovadora desenvolvida pela empresa Texas Instruments, na qual essas grandezas são mensuradas com base na variação da frequência de ressonância de um circuito composto pelos capacitores/indutores de valores variáveis do sensor, em paralelo com indutores/capacitores de valores fixos, presentes em sua eletrônica de baixo consumo. À medida que os eletrodos e

bobinas do sensor têm seus valores modificados pelas diferenças nas propriedades elétricas dos fluidos sendo medidos, os diferentes circuitos capacitor-indutor formados têm também as suas frequências de ressonância modificadas. Essa técnica mostra-se bastante precisa para este tipo de aplicação, sendo necessária uma calibração do sensor para identificar os níveis das diferentes fases no interior dos separadores.

Com base nessas informações, o escopo de construção desse sistema visa não somente tornar o seu método de monitoramento menos susceptível às adversidades e limitações provenientes da sua aplicação, como também possibilitar a realização de medições multiponto (gerando um perfil das substâncias) e proporcionar um processo de fabricação, instalação e manutenção simples e seguros para a indústria do petróleo.

1.3 Objetivos específicos

- Instrumentação do separador gravitacional da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR);
- Desenvolvimento de um sensor baseado em medidas de capacitância de múltiplos eletrodos capazes de realizar esse monitoramento com a eficiência necessária a esse tipo de atividade e aplicação;
- Investigação de técnica indutiva de monitoramento para a aplicação de tecnologia híbrida (capacitiva e indutiva multicanal) em processos envolvendo fluidos de alta condutividade elétrica;
- Implantação de arquitetura eletrônica inovadora para a realização das medidas;
- Imageamento em tempo real das fases no interior do separador.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas as definições básicas a respeito do que são emulsões (como são formadas, suas características e classificações), as técnicas mais utilizadas para realizar o monitoramento e a instrumentação de separadores multifásicos e também as normas regulamentadoras para o desenvolvimento e instalação de dispositivos elétricos e eletrônicos destinados a operação em ambientes com atmosferas explosivas (caso da aplicação do sensor de nível desenvolvido).

2.1 Emulsões

Emulsão é um sistema heterogêneo composto por pelo menos duas substâncias imiscíveis entre si. De acordo com Almeida (2014), geralmente essa mistura é composta por uma fase apolar, composta por hidrocarbonetos (chamada de fase oleosa) e por uma fase polar, normalmente composta por água e chamada de fase aquosa.

Além da vasta presença na indústria do petróleo, as emulsões são importantes também em uma ampla faixa de aplicações industriais, como cosmética, farmacêutica, alimentícias e tintas (SOUZA, 2014; GEORGIEVA *et al.*, 2009; KILPATRICK, 2012). Desse modo, a sua estabilidade é um parâmetro muito importante e que deve ser controlado, a fim de que possam ser devidamente utilizadas em todo o seu campo de aplicações.

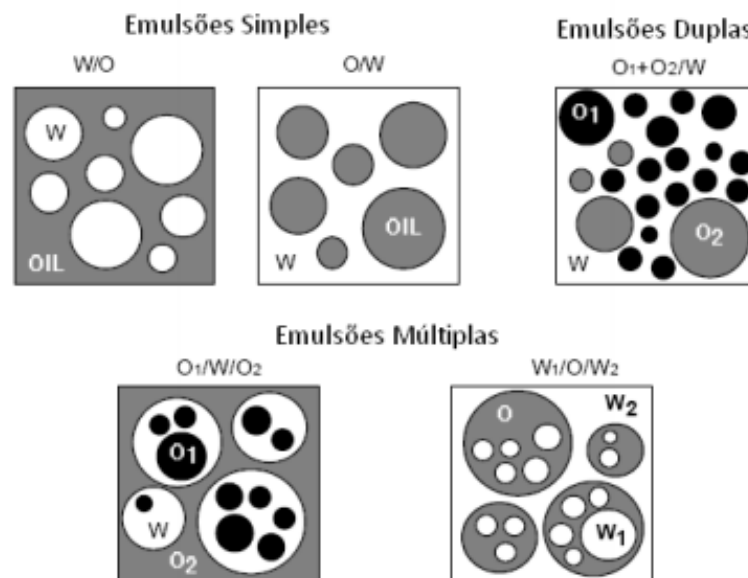
A estabilidade das emulsões depende de vários fatores, sendo a presença de emulsificantes naturais em suas interfaces o principal responsável pela estabilização das emulsões de petróleo, uma vez que esses compostos reduzem a probabilidade de coalescência entre as gotas (SOUZA, 2014; AUFLEM, 2002). As moléculas dos agentes emulsificantes apresentam regiões polares e apolares que lhes conferem um caráter anfífilico (hidrofóbico e hidrofílico), isto é, dupla afinidade, tanto pela fase polar como pela fase apolar. (SOUZA, 2014; ARDITTY *et al.*, 2004).

Na indústria de petróleo, as emulsões podem ser encontradas em quase todas as etapas da cadeia produtiva, desde a exploração até o refino, sendo aproximadamente 80% do petróleo bruto explorado encontrado na forma de emulsões (SOUZA, 2014).

2.1.1 Tipos de emulsões

Em geral, existem dois tipos básicos de emulsões: as denominadas óleo-em-água (O/W), em que o óleo encontra-se disperso em forma de gotas na fase aquosa contínua; e as denominadas água-em-óleo (W/O), em que a água encontra-se dispersa em forma de gotas na fase oleosa contínua (ALMEIDA, 2014). Segundo Salager (2000), existem também situações um pouco mais complexas em que há a formação de emulsões múltiplas do tipo água-em-óleo-em-água (W/O/W) e óleo-em-água-em-óleo (O/W/O) ou também de emulsões duplas, as quais possuem dois tipos diferentes de fase dispersa. A Figura 2.1 ilustra esses tipos diferentes de emulsões.

Figura 2.1 – Tipos de emulsões existentes.



Fonte: SALAGER, 2000.

2.1.2 Principais fatores que influem na estabilidade de emulsões

A estabilidade de uma emulsão depende de vários parâmetros, tais como: a existência de partículas sólidas em sua composição, a massa molar de seus componentes, a temperatura da mistura, o tamanho de suas gotas e a sua dispersão na fase contínua, entre outros (SOUZA, 2014; GEORGIEVA *et al.*, 2009).

2.1.2.1 Partículas sólidas

No processo de geração de emulsões, as partículas sólidas podem ser adsorvidas de forma espontânea na interface dos fluidos ou formar uma monocamada densa de partículas. Outra maneira é a formação de uma espessa camada de agregados de partículas sólidas, gerando um filme rígido e evitando os fenômenos de coalescência entre as gotas (SOUZA, 2014). Estas partículas são constituídas de sílica hidrofílica, sílica hidrofóbica, argila, sulfato de bário, carbonato de cálcio e podem contribuir na estabilidade de emulsões (SOUZA, 2014; AVEYARD *et al.*, 2003; LAREDJ-BOUREZG *et al.*, 2012). Segundo Chen *et al.* (2011) e Souza (2014), existem três fatores que regulam a estabilidade de uma emulsão a partir de partículas sólidas:

- O tamanho das partículas deve ser menor do que o tamanho das gotas;
- A floculação das partículas deve ser menos atuante durante a estabilização da emulsão;
- As partículas devem estar parcialmente dispersas em ambas as fases.

2.1.2.2 Componentes polares de alta massa molar

De acordo com Souza (2014), as frações pesadas do petróleo são classificadas como compostos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (SARA). As resinas representam um alto peso molecular e são classificadas como hidrocarbonetos polares, os quais são conhecidos como substâncias estabilizantes dos asfaltenos no petróleo. Já os asfaltenos (emulsificantes naturais que mais se destacam na formação e na estabilização de emulsões de petróleo do tipo W/O) são classificados como hidrocarbonetos poliaromáticos e muitas vezes são precipitados. Para alguns pesquisadores, os asfaltenos juntamente com as resinas são os responsáveis pela formação de emulsões estáveis do tipo água em óleo, principalmente, por causa da sua capacidade em formar uma película estável ou um filme interfacial mecanicamente rígido (SOUZA, 2014; SPEIGHT, 2007; KRALOVA *et al.*, 2011).

Os asfaltenos são constituídos por substâncias como o oxigênio, enxofre e nitrogênio, podendo conter ainda alguns constituintes de compostos organometálicos, tais como: o níquel, vanádio e ferro, que estão presentes no petróleo bruto. As resinas, por sua vez, são compostas por moléculas polares constituídas por: o nitrogênio, oxigênio e enxofre e também pelos ácidos naftênicos (SOUZA, 2014).

2.1.2.3 Temperatura

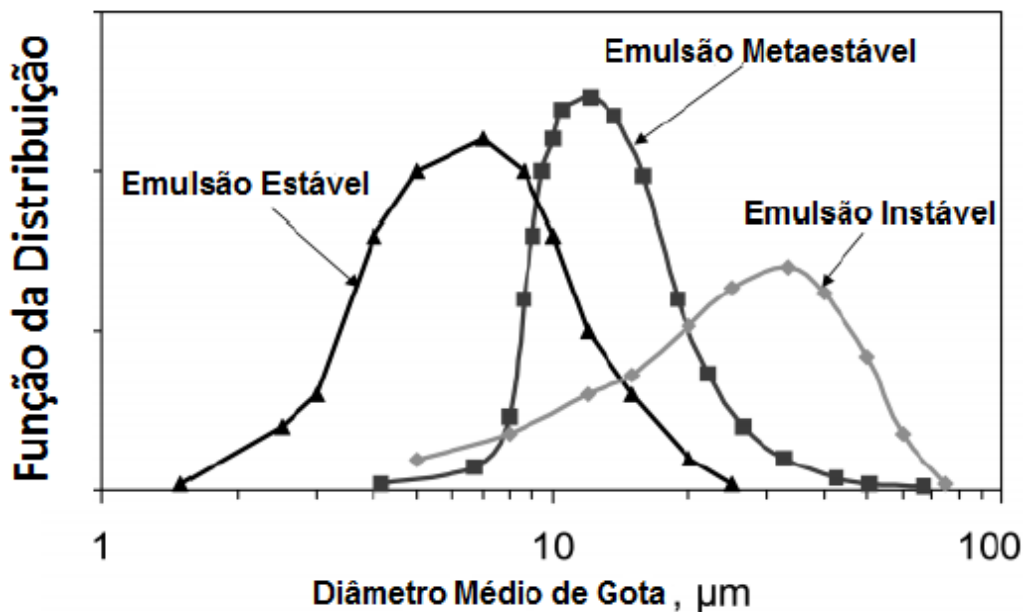
A temperatura pode afetar significativamente a estabilização de emulsões, podendo apresentar influência sobre as propriedades físicas do óleo, da água, do filme interfacial e também da solubilidade de ambas as fases (SOUZA, 2014; CUNHA, 2007). Dessa forma, segundo Souza (2014), o aumento da temperatura de uma emulsão é acompanhado pela diminuição da sua viscosidade, que por sua vez é fundamental para aumentar a velocidade de sedimentação das gotas, o que facilita a aproximação das gotas de água e conseqüentemente acelera o seu processo de sedimentação. O aumento da temperatura leva também ao aumento da taxa de colisão entre as gotas e ao aumento da diferença de densidade entre ambas as fases, possibilitando assim uma dissolução dos emulsificantes e facilitando a drenagem, a ruptura e

a diminuição da rigidez do filme interfacial (SOUZA, 2014). O incremento da temperatura aumenta também a mobilidade das gotas de uma emulsão, e conseqüentemente, a sua coalescência (SOUZA, 2014; ARNOLD e SMITH, 1992; CUNHA, 2007; FRISING *et al.*, 2008).

2.1.2.4 Tamanho de gotas

Já é conhecido na literatura que a distribuição de tamanho de gotas (DTG) influencia na estabilidade das emulsões (SOUZA, 2014). De acordo com Moradi *et al.* (2011) a DTG de uma emulsão é muito importante, pois controla a sua floculação (difusão de gotas na fase contínua), coalescência e resistência à sedimentação, podendo assim interferir no controle de sua estabilidade. Segundo Souza (2014), de maneira geral, quanto menor o tamanho das gotas de água na emulsão, maior é a tendência para formar emulsões mais estáveis. A Figura 2.2 retrata essa característica.

Figura 2.2 – Classificação de estabilidade de emulsões de acordo com o diâmetro médio de gotas.



Fonte: SOUZA, 2014.

Segundo Jurado *et al.* (2007), a DTG exerce influência em algumas propriedades das emulsões, tais quais: taxa de degradação, estabilidade, resistência a coalescência, viscosidade, textura e na aparência óptica. Assim sendo, a classificação de uma emulsão é resultado do acompanhamento da DTG e é utilizado para determinar alguns parâmetros importantes na caracterização da emulsão, a exemplo do $D(4,3)$ que se refere ao diâmetro médio volumétrico (corresponde ao diâmetro da esfera que possui o mesmo volume médio das partículas constituintes do sistema) e o $D(0,5)$, que é o diâmetro da mediana (divide a distribuição obtida exatamente na metade, ou seja, 50% do volume total das partículas encontram-se abaixo deste valor e 50% encontram-se acima) (SOUZA, 2014).

Com base nisso, pode-se concluir que em mecanismos utilizados para a geração de emulsões, como por exemplo misturadores, quanto maior for a energia disponível no processo (neste caso a velocidade de rotação), mais intenso será o fenômeno de cisalhamento nos fluidos e portanto menores serão as dimensões das gotas formadas na mistura, o que a tornará mais estável.

2.2 Técnicas de medida aplicadas em separadores multifásicos

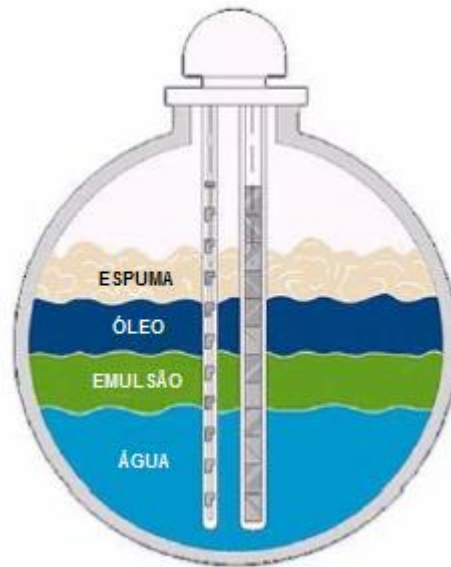
De acordo com Meribout *et al.* (2011), diversos sistemas de monitoramento de separadores já foram desenvolvidos, testados e validados, porém muitos deles são destinados ao monitoramento de sistemas bifásicos de separação fluidos. Com aplicação em separadores multifásicos, menos soluções foram desenvolvidas até então. Segundo Yang (2006), o primeiro medidor de nível capacitivo para misturas compostas por mais de duas fases foi proposto pela Shell, em 1984. O sensor consiste em duas placas paralelas justapostas, sendo uma delas composta por um único eletrodo de excitação e a outra por eletrodos segmentados para detecção. A principal desvantagem dessa geometria é que o espaço presente entre as duas placas pode ser facilmente bloqueado por óleos e emulsões de maior viscosidade, diminuindo assim a confiabilidade das medições.

Além dessa, outras técnicas foram desenvolvidas para esse tipo de aplicação. A seguir são apresentados os métodos e sensores mais convencionais para realizar a medição e o monitoramento dos diferentes fluidos em separadores trifásicos água-óleo-gás.

2.2.1 Sistemas de raios-gama

A técnica baseia-se na medição da atenuação de radiação gama para a detecção do perfil e distribuição de densidades da mistura presente no interior do tanque separador, apresentando duas variações construtivas básicas (TRACERCO, 2005; BERTHOLD, 2018). Na primeira, o sensor consiste em duas ou três hastes instaladas verticalmente no interior do separador (técnica invasiva e intrusiva), sendo uma delas a fonte de emissão de radiação gama colimada e de baixa energia (para produzir feixes estreitos), e as restantes responsáveis por detectar, a partir de receptores em diferentes alturas, a radiação gama atenuada pelas substâncias presentes no tanque (TRACERCO, 2005). A Figura 2.3 ilustra esse sistema de radiação gama dentro do separador.

Figura 2.3 – Sistema de radiação gama intrusiva no interior de separadores multifásicos.

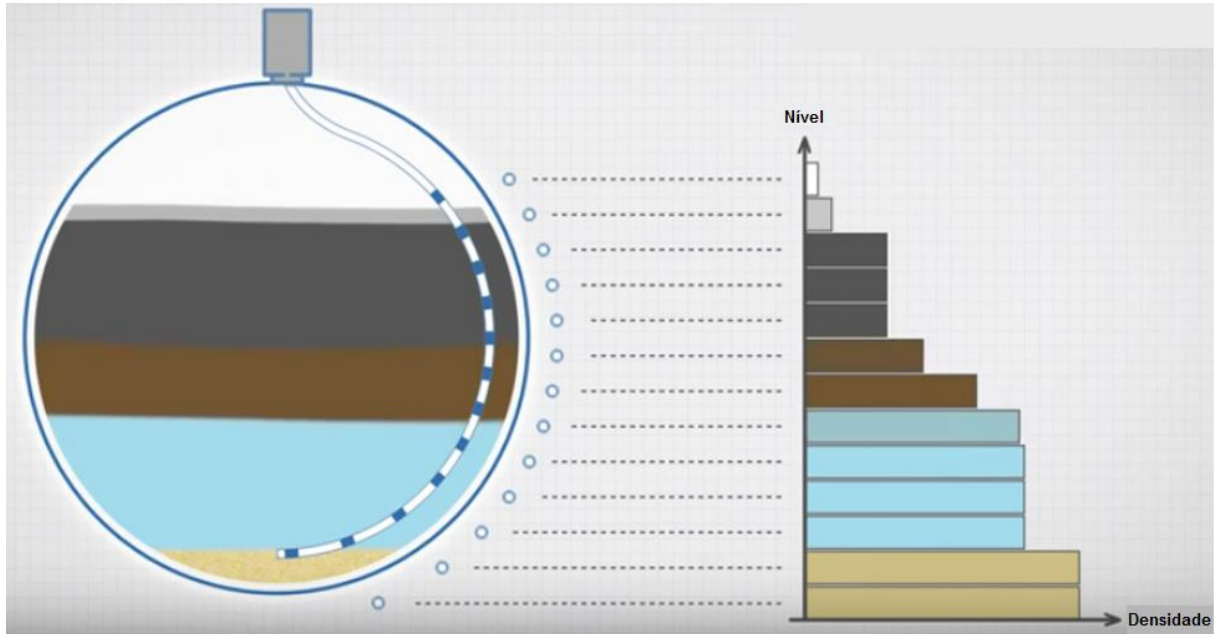


Fonte: Adaptado de TRACERCO, 2005.

A segunda variação consiste em um conjunto de detectores que são instalados na parte externa do tanque, enquanto as fontes de radiação são inseridas em um tubo de imersão. Cada detector é utilizado para estimar a posição das interfaces em intervalos relativamente pequenos (20-60 mm), com uma resolução espacial que depende da geometria do detector. O uso de isótopos Cs-137 de alta energia em conjunto com a longa distância entre a fonte e o detector (> 500 mm), garante resultados mais representativos e uma medição que

praticamente não é afetada pelas dimensões do tanque ou pelo acúmulo mineral nas paredes do separador ou no tubo de imersão (BERTHOLD, 2018). A Figura 2.4 ilustra essa segunda técnica.

Figura 2.4 – Sistema de radiação gama não-intrusiva no interior de separadores multifásicos.



Fonte: Adaptado de BERTHOLD, 2018.

Em razão das diferentes densidades do óleo, água, emulsão, espuma e areia, os sinais de radiação sofrem atenuação em diferentes níveis e, dessa forma, é possível determinar as substâncias presentes em cada um dos detectores e assim estimar os níveis desses compostos no interior do tanque separador.

Apesar do sistema de radiação gama possuir boa precisão e confiabilidade no monitoramento, ele apresenta algumas desvantagens:

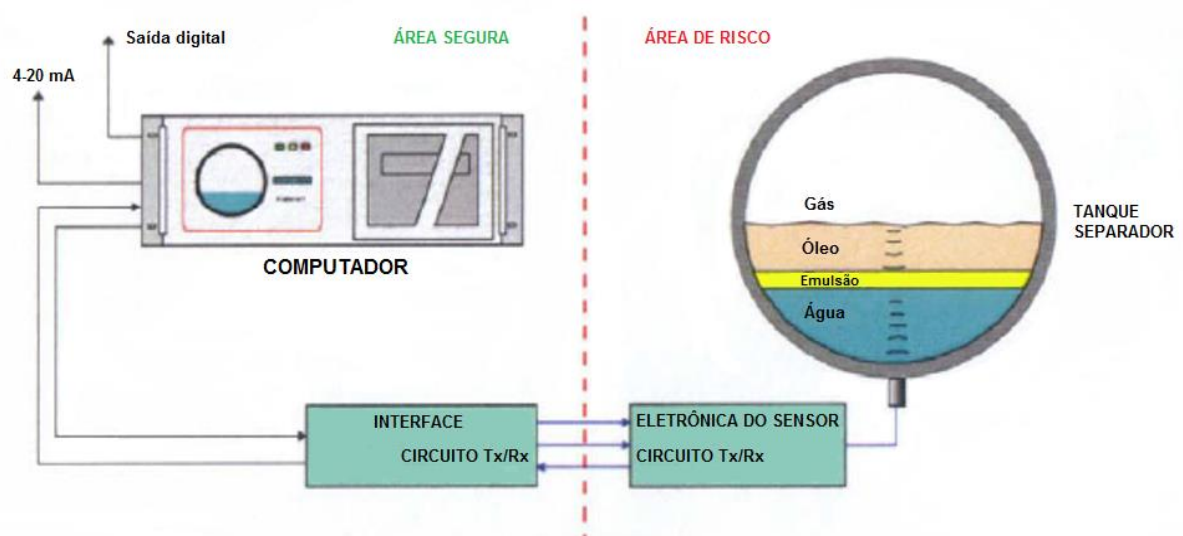
- Utiliza-se de fontes de radiação, o que causa preocupações com segurança e potenciais problemas de saúde;
- Complexidade na fabricação e manutenção;
- Restrição de instalação em alguns países/cenários;
- É uma técnica invasiva e intrusiva.

2.2.2 Sistemas de ultrassom

Este método utiliza a tecnologia de transdutores ultrassônicos em modo de reflexão e é eficiente para determinar uma única interface entre gás-líquido ou gás-sólidos. A distância entre o transdutor e a interface é determinada medindo-se o tempo decorrido desde a emissão até a sua recepção nos transdutores. Esse tempo é chamado de “tempo de trânsito” (Yang 2006).

Algumas companhias, como a Christian Michelsen Research (CMR) na Noruega, vêm desenvolvendo sistemas ultrassônicos para o monitoramento de processos com múltiplas interfaces, como os separadores trifásicos de petróleo. O sistema é composto por um sensor ultrassônico instalado na região inferior do separador e em contato direto com a sua parede externa, transmitindo e recebendo pulsos de ultrassom ao longo do seu eixo vertical (CHRISTIAN MICHELSEN RESEARCH, 2005). Essa operação é baseada no eco produzido pelos pulsos ultrassônicos gerados, sendo que os níveis das interfaces são estimados pelos “tempos de trânsito” desses ecos entre as interfaces das substâncias, considerando para isso a velocidade de propagação do som nos diferentes meios materiais presentes no tanque. A Figura 2.5 mostra o esquema do sistema ultrassônico desenvolvido pela CMR.

Figura 2.5 – Sistema ultrassônico de monitoramento de separadores multifásicos.



Fonte: Adaptado de CHRISTIAN MICHELSEN RESEARCH, 2005.

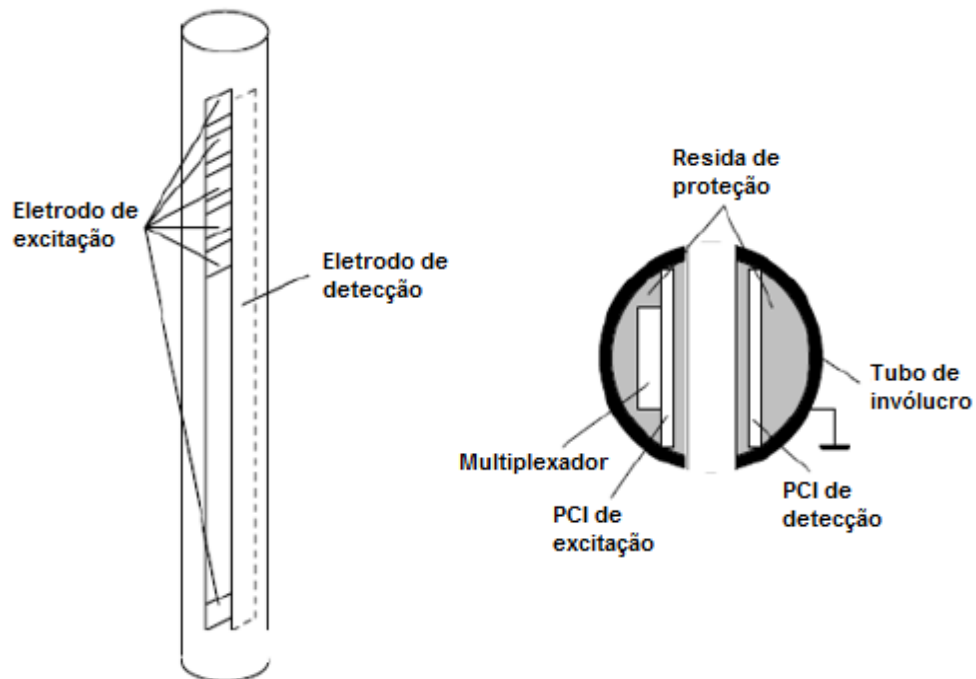
Segundo Beck *et al.* (1994) e Hjertaker *et al.* (2001), existem algumas limitações no uso de sistemas de ultrassom para o monitoramento de processos com múltiplas interfaces:

- O sinal ultrassônico é atenuado significativamente pela primeira interface e consequentemente os ecos provenientes das interfaces subseqüentes ficam muito fracos para serem detectados;
- Para lidar com a atenuação do sinal devido à parede do tanque, é necessário a emissão de um sinal sonoro com energia suficiente. Contudo, há um limite de energia que pode ser aplicado em sistemas de segurança intrínseca, de modo que não se cause ignições espontâneas no material. Por outro lado, se o transdutor ultrassônico for instalado no interior do separador, ele se torna intrusivo e isso novamente causa preocupações com a segurança intrínseca;
- A emulsão pode absorver completamente a energia do sinal ultrassônico, podendo assim causar uma falsa leitura do sistema.

2.2.3 Sistemas capacitivos

De acordo com Asran (1998), sistemas capacitivos normalmente são compostos por um invólucro no qual estão fixados eletrodos, em hastes dispostas de maneira paralela e em sentido longitudinal (Figura 2.6). Em uma delas, há um grande eletrodo único, enquanto na outra, há vários eletrodos menores (a quantidade depende do tamanho do separador e da resolução que se deseja monitorar), formando assim vários pequenos capacitores ao longo do dispositivo. Enquanto os eletrodos de menores são excitados pelo sistema, o eletrodo maior tem a função de realizar a detecção dos sinais de tensão, através de um multiplexador de sinais.

Figura 2.6 – Sistema capacitivo de monitoramento de separadores multifásicos.



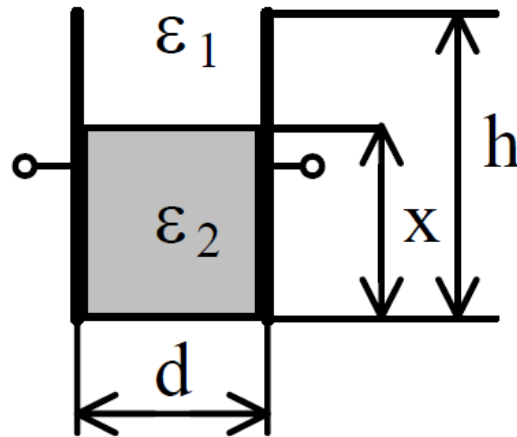
Fonte: Adaptado de ASRAN, 1998.

Em experimentos de laboratório de Yang (2001), essa técnica foi testada em sistemas trifásicos para a identificação das interfaces em ar-óleo e óleo-água, tendo obtido resultados satisfatórios para essa aplicação.

Devido aos diferentes valores de permissividade elétrica relativa do gás ($\epsilon_r \approx 1$), do óleo ($\epsilon_r \approx 2-3$, dependendo do tipo do óleo) e da água ($\epsilon_r \approx 80$), a capacitância medida entre cada um dos capacitores formados pelo dispositivo pode determinar qual substância está presente entre o eletrodo de detecção e um eletrodo específico de excitação.

Devido às dimensões dos seus eletrodos, é possível que haja no máximo dois fluidos diferentes entre as placas de cada capacitor formado (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Capacitor com dois dielétricos de isolamento.



Fonte: ASRAN, 1998.

A Equação (2.1) mostra como obter esse mesmo valor da capacitância quando o capacitor estiver envolto em apenas uma substância (de permissividade ϵ_1). De acordo com Yang (2006), considerando que um capacitor desse sensor esteja totalmente envolto em um fluido cuja permissividade elétrica seja ϵ_1 e o outro esteja totalmente envolto em um fluido de permissividade ϵ_2 , um terceiro capacitor, disposto entre eles, que possua ambos os fluidos entre suas placas (Figura 2.7), terá sua capacitância definida pela Equação (2.2).

$$C = \frac{\epsilon_1 w h}{d} \quad (2.1)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 w h}{d} \left[\epsilon_1 + (\epsilon_2 - \epsilon_1) \frac{x}{h} \right] \quad (2.2)$$

Sendo ϵ_0 a permissividade elétrica do vácuo (8,85 pF/m), d a distância entre o eletrodo de excitação e o de detecção, w a largura do eletrodo de detecção, h a altura do eletrodo de detecção (Figura 2.7) e x a porção da altura do eletrodo de detecção em que se encontra a linha divisória entre dois compostos imiscíveis (Figura 2.7).

Dessa maneira, pode-se definir a posição em que se encontra a fronteira entre dois compostos no interior do separador, uma vez que haverá uma descontinuidade significativa no valor da capacitância desse eletrodo quando comparada à capacitância de seus eletrodos adjacentes. Segundo Hjertaker *et al.* (2001), para soluções condutivas o sistema capacitivo

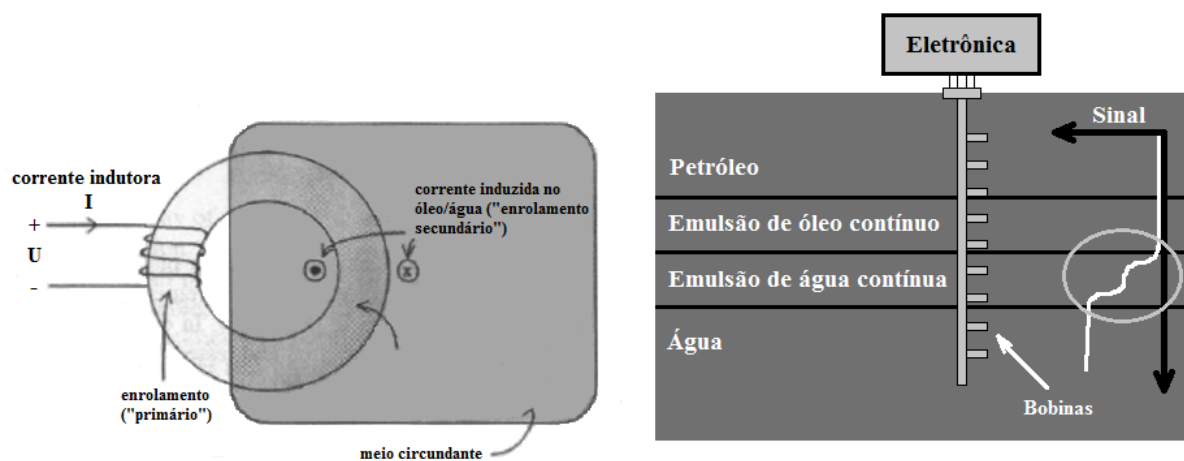
oferece limitações, uma vez que essas substâncias podem gerar curtos-circuitos entre os eletrodos dos capacitores. A isolação desses eletrodos é um método utilizado para amenizar este efeito, contudo, ainda assim o sistema apresenta rápida saturação e instabilidades nas medidas de capacitância. Desse modo, para separadores reais (em que a água salina está presente no processo), a utilização desse sistema em conjunto com alguma outra técnica, é o mais indicado.

2.2.4 Sistemas indutivos

A técnica indutiva é baseada no uso de sensores de efeito Hall ou bobinas indutivas e apresenta confiabilidade satisfatória na medição de interfaces entre óleo e água, com ou sem sal (SYED, 2004; AKHNEIFER, 1999).

De acordo com Yang (2006), a empresa ABB desenvolveu um sistema indutivo de monitoramento de níveis em processos com múltiplas interfaces. O dispositivo possui múltiplas bobinas indutivas acopladas em uma haste vertical (Figura 2.8). Nesse arranjo, a corrente induzida nas bobinas depende da permeabilidade elétrica do meio que as envolve, que gera a força contra eletromotriz. Essa condutividade, por sua vez, pode ser estimada medindo-se a variação no valor da condutância dessas bobinas.

Figura 2.8 – Sistema indutivo de monitoramento de separadores multifásicos.

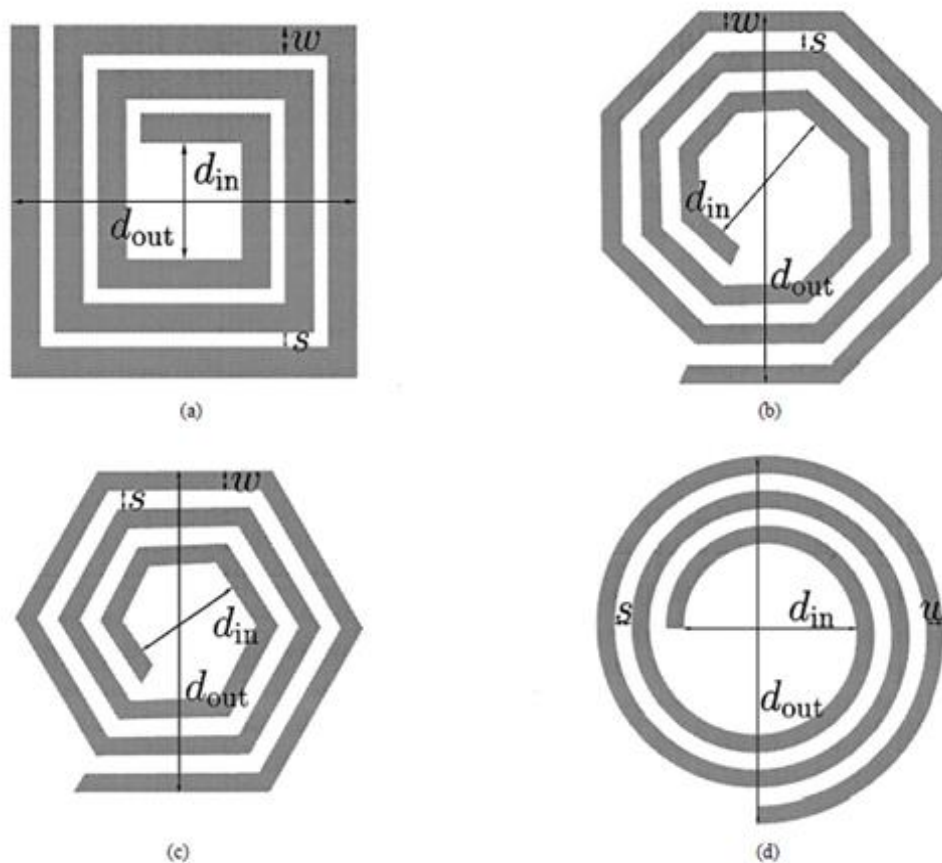


Fonte: Adaptado de HJERTAKER *et al.*, 2001.

Através de experimentos, foi confirmado que a água salina ou a emulsão contínua de água salina podem ser detectadas usando este sistema sem grandes problemas de incrustação, uma vez que a cobertura de incrustações ou cera exerce pouca influência na medição magnética. No entanto, esse sensor não fornece informações precisas para as fases de óleo e gás.

Uma técnica que pode ser adotada para esse sistema que não só facilitaria a sua construção e instalação, mas que também evitaria a formação de incrustações (apesar da pouca influência nas medidas, é mais indicado o uso de uma geometria que evite isso) é o desenvolvimento das bobinas de maneira planar em uma superfície, como por exemplo uma placa de circuito impresso (PCI). Esse método de disposição de solenoides já é utilizado pela empresa americana Texas Instruments. Ela realiza a impressão desses indutores diretamente nas PCI, em módulos que podem ser utilizados para diversas aplicações. A Figura 2.9 ilustra algumas geometrias de indutores planares (a – quadrado, b – octogonal, c – hexagonal, d – circular).

Figura 2.9 – Geometrias de indutores planares.



Quanto ao valor indutivo dessas diferentes formas de bobinas, segundo Mohan *et al.* (1999), dada uma geometria indutiva planar, esta pode ser completamente definida e modelada com o seu número de voltas n , espessura da trilha w , espaçamento entre trilhas s e qualquer uma das seguintes grandezas: diâmetro externo d_{out} , diâmetro interno d_{in} , diâmetro médio $d_{avg} = 0,5 \cdot (d_{out} + d_{in})$ ou a taxa de preenchimento, definida como $\rho = (d_{out} - d_{in}) / (d_{out} + d_{in})$. A partir desses parâmetros, é possível definir teoricamente a indutância desse tipo de solenoide através da Fórmula de Wheeler modificada (Equação (2.3)). De acordo com Mohan *et al.* (1999), a Fórmula de Wheeler foi desenvolvida originalmente para definir a indutância de indutores planares discretos, sendo útil portanto para indutores integrados em uma PCI.

$$L = K_1 \mu \frac{n^2 d_{avg}}{1 + K_2 \rho} \quad (2.3)$$

Sendo K_1 e K_2 constantes dependentes do tipo de geometria do solenoide (Tabela 2.1) e μ a permeabilidade magnética do material que envolve a bobina. A razão ρ representa o quão vazio é o indutor. Para um ρ de valor pequeno, tem-se um indutor mais vazio ($d_{out} \approx d_{in}$), assim como para um ρ de valor grande, a bobina é mais preenchida ($d_{out} \gg d_{in}$). Desse modo, dois indutores com o mesmo diâmetro médio, mas diferentes taxas de preenchimento terão diferentes valores de indutância. O mais preenchido terá uma indutância menor devido às suas voltas internas estarem mais próximas do centro da espiral, o que contribui para que haja uma menor indutância mútua positiva e uma maior indutância mútua negativa entre as espiras (MOHAN *et al.*, 1999).

Tabela 2.1 – Coeficientes da Fórmula de Wheeler modificada.

Geometria	K₁	K₂
Quadrada	2,34	2,75
Hexagonal	2,33	3,82
Octogonal	2,25	3,55

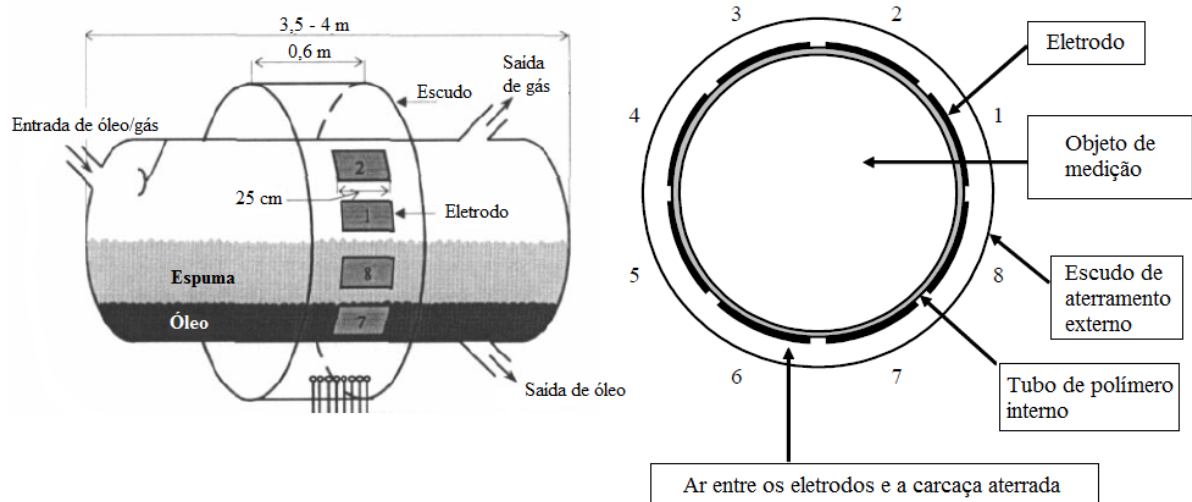
Fonte: Adaptado de MOHAN *et al.*, 1999.

2.2.5 Sistemas de tomografia

As técnicas de tomografia fornecem a possibilidade de monitorar as características internas de processos industriais de maneira não-invasiva e/ou não-intrusiva. Dentre os vários tipos de sistemas tomográficos, a tomografia elétrica, que inclui a tomografia por capacitância elétrica (ECT, do inglês), a tomografia por resistência elétrica (ERT, do inglês) e a tomografia eletromagnética (EMT, do inglês), foi a primeira a ser desenvolvida e atualmente é a mais amadurecida. Particularmente, a ECT tem as vantagens de possuir baixo custo, alta resolução de imagem, ser não-intrusiva e não-invasiva, não utilizar radiação, não possuir partes móveis e poder ser utilizada em ambientes com altas temperaturas e pressões.

Isaksen *et al.* (1994) construíram o primeiro protótipo de sistema ECT para a medição do separador multifásico de petróleo, no CMR. Como mostra a Figura 2.10, oito eletrodos de capacitância foram instalados pela circunferência do separador de um metro de diâmetro. Nesse sistema, a capacitância é medida para cada combinação de par de eletrodos, totalizando nesse caso, 28 medidas possíveis. A partir dessas medidas, a distribuição de materiais presentes na seção transversal medida é reconstruída.

Figura 2.10 – Sistema de tomografia ECT para o monitoramento de separadores multifásicos.

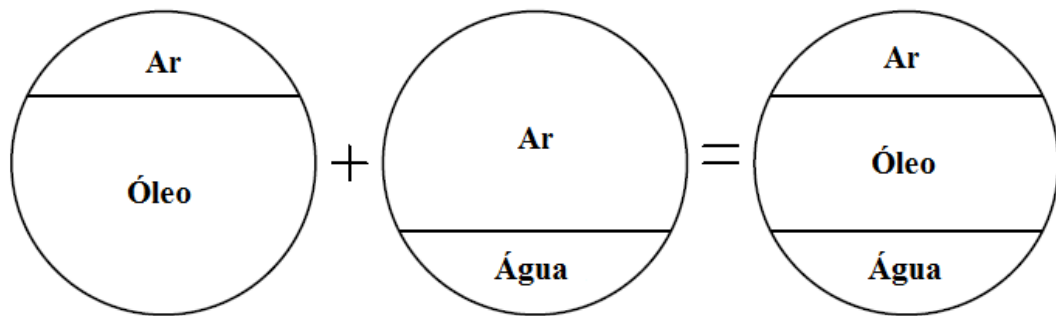


Fonte: Adaptado de ISAKSEN *et al.*, 1994.

Para realizar a reconstrução da imagem, a tomografia utiliza algoritmos específicos para essa finalidade. Na Universidade de Manchester desenvolveu-se uma abordagem

específica, em que para reconstruir a imagem do ar, óleo e água no separador, primeiramente, um sensor ECT é calibrado por uma mistura de ar e óleo e, posteriormente, por uma mistura de ar e água, gerando assim duas referências (YANG, 2006). Nessa linha, quando um conjunto de capacitâncias é adquirido pelo sensor ECT em uma aplicação real, uma imagem é gerada usando os dados de calibração obtidos da mistura ar-óleo para refletir o contraste entre o ar como um componente e o óleo e a água como outro componente. Em seguida, uma segunda imagem é gerada usando os dados de calibração da mistura de ar-água para refletir o contraste entre o ar e o óleo como um componente e a água como outro componente. Por fim, essas duas imagens são combinadas formando uma imagem resultante que ilustra a distribuição dos três componentes no interior do tanque separador. Esse processo pode ser observado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Combinação de duas imagens de tomografia para a formação da distribuição trifásica.



Fonte: Adaptado de YANG, 2006.

Em princípio, um sensor baseado em ECT pode fornecer não somente as informações sobre as interfaces, mas também a respeito da composição de uma emulsão, isto é, as suas respectivas frações de água e óleo. Isso auxilia os operadores a conhecerem informações mais detalhadas durante o processo de separação.

2.2.6 Sistemas de diferencial de pressão

Segundo Meribout *et al.* (2011), um dos dispositivos mais utilizados para o monitoramento da interface entre líquidos em tanques separadores de petróleo é o dispositivo

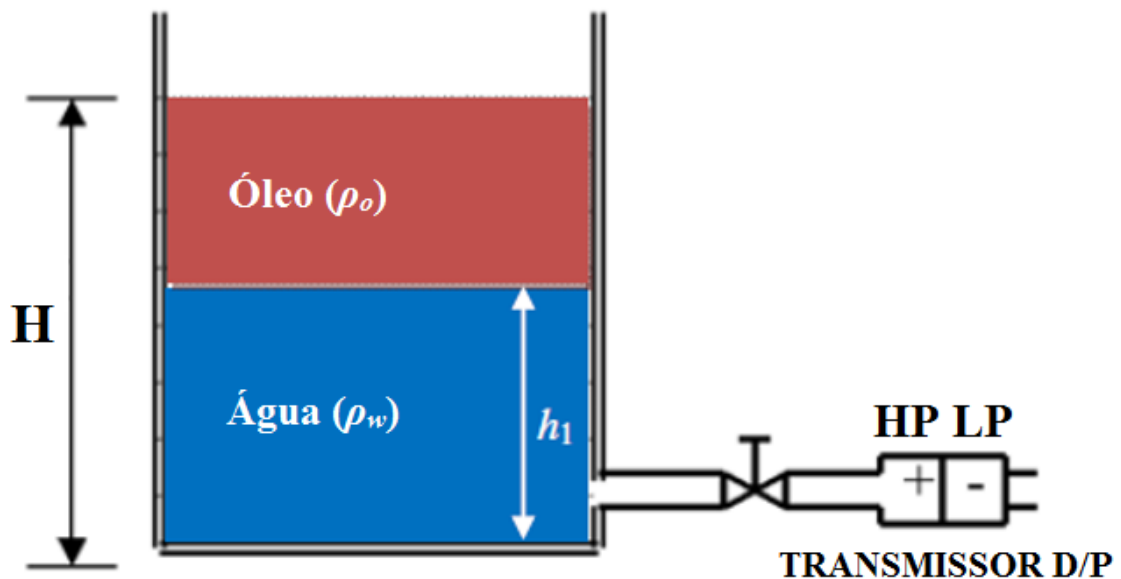
sensor de pressão. De acordo com a Equação (2.4), a pressão P , a uma dada altura h , com uma densidade de líquido ρ e gravidade local g , é dada por:

$$P = \rho gh \quad (2.4)$$

A Figura 2.12 mostra o princípio de medição do nível de interface, h_1 no interior de um tanque contendo água (densidade ρ_w) e óleo (densidade ρ_o). Um sensor de pressão diferencial, cujo um lado está em contato direto com o lado inferior do tanque, e o outro está em contato com o ar, fornece a pressão manométrica (PG) definida pela Equação (2.5) (MERIBOUT *et al.*, 2011).

$$PG = \rho_w g h_1 + \rho_o g (H - h_1) \quad (2.5)$$

Figura 2.12 – Sistema de medição de níveis de interfaces por diferença de pressão (sem emulsão).



Fonte: Adaptado de MERIBOUT *et al.*, 2011.

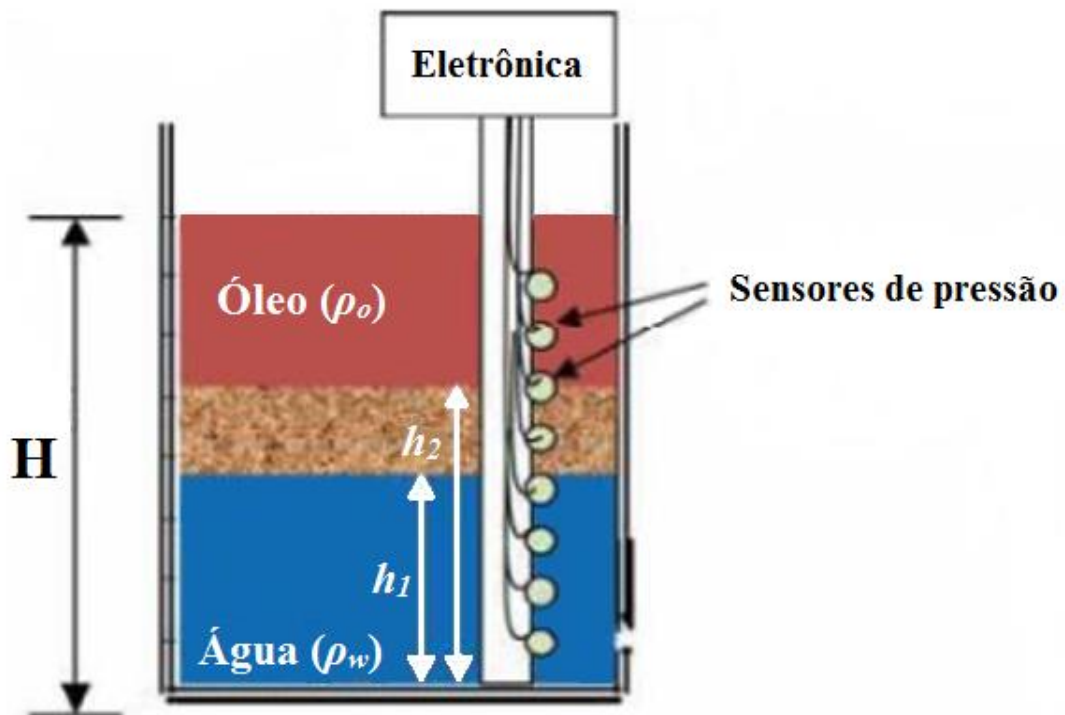
Em que H é a altura total de líquido. Desse modo, conhecendo-se H , ρ_w e ρ_o , pode-se determinar a altura da interface, h_1 . Essa técnica funciona muito bem quando a fronteira entre dois líquidos é bem definida. Contudo, para interfaces mais grossas e gradativas (emulsão), contendo a mistura dessas substâncias, uma solução alternativa seria a utilização de um conjunto desses sensores ao longo da região vertical do tanque, separados um do outro por uma distância fixa (Figura 2.13). Dessa forma, as posições inferior e superior da camada de

emulsão (h_1 e h_2 , respectivamente, na Figura 2.13) corresponderiam aos sensores de pressão fornecendo os valores definidos nas Equações (2.6) e (2.7), respectivamente.

$$P_1 = \rho_o g(H - h_1) \quad (2.6)$$

$$P_2 = \rho_o g(H - h_2) \quad (2.7)$$

Figura 2.13 – Sistema de diferença de pressão para o monitoramento de separadores multifásicos.



Fonte: Adaptado de MERIBOUT *et al.*, 2011.

Com isso, para cada altura h , o sistema armazena em seu banco de dados um valor de pressão correspondente à água ($\rho_w gh$) e outro ao óleo ($\rho_o gh$). Em seguida, o sistema compara o valor real de pressão adquirido por um determinado sensor de pressão com esses dois valores armazenados (repetindo esse procedimento para cada ponto sensor), para assim definir as posições de cada interface no interior do tanque separador. Partindo-se do fundo do tanque, a menor altura com o mesmo valor ($\rho_o gh$) e a maior altura com o mesmo valor ($\rho_w gh$) correspondem às interfaces inferior e superior da camada de emulsão, respectivamente.

A principal desvantagem dessa técnica é referente ao problema da incrustação, que em grande parte é proveniente da deposição de materiais nos sensores e pode ocasionar falsas leituras de pressão pelo sistema.

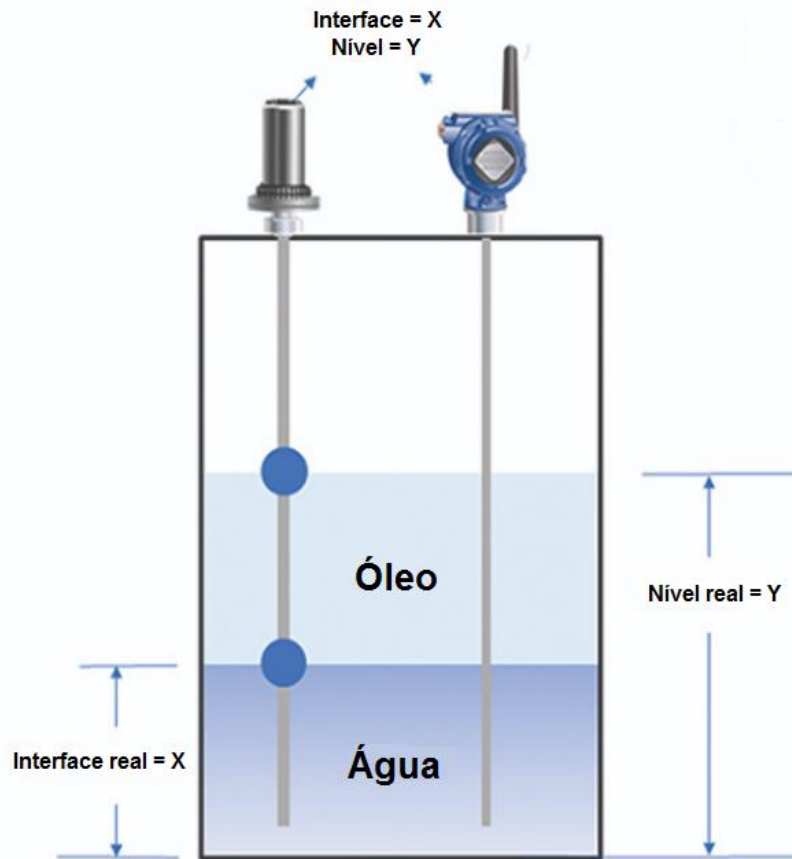
2.2.7 Sistemas de flutuadores

De acordo Meribout *et al.* (2011), flutuadores são muito utilizados no processo de medição de interfaces. Eles se baseiam no princípio de Arquimedes que afirma que quando um objeto está imerso em um fluido, ele perde valor de peso igual ao peso do fluido deslocado por ele. Com isso, para um objeto de densidade ρ flutuar na interface de dois fluidos com densidades ρ_1 e ρ_2 , a condição da Equação (2.8) deve ser satisfeita.

$$\rho_1 < \rho < \rho_2 \quad (2.8)$$

No caso da existência de uma camada de emulsão, um conjunto de flutuadores em arranjo vertical pode ser implantado de tal forma que flutuadores adjacentes tenham densidades que combinem com as dos líquidos a serem detectados. Contudo, uma vez que o sistema estiver ajustado para densidades específicas dos fluídos, elas não podem se alterar durante o processo, o que nem sempre ocorre em tanques petrolíferos, onde a ampla faixa de variação de temperatura leva a variações nas densidades dos líquidos durante a produção. Outra possível fonte de erros nesse sistema é causada pela deposição de resíduos de óleo nos flutuadores, alterando assim as suas respectivas densidades, o que acaba descalibrando o dispositivo. A Figura 2.14 ilustra esse sistema.

Figura 2.14 – Sistema de flutuadores para o monitoramento de separadores multifásicos.



Fonte: Adaptado de WIENKE, 2019.

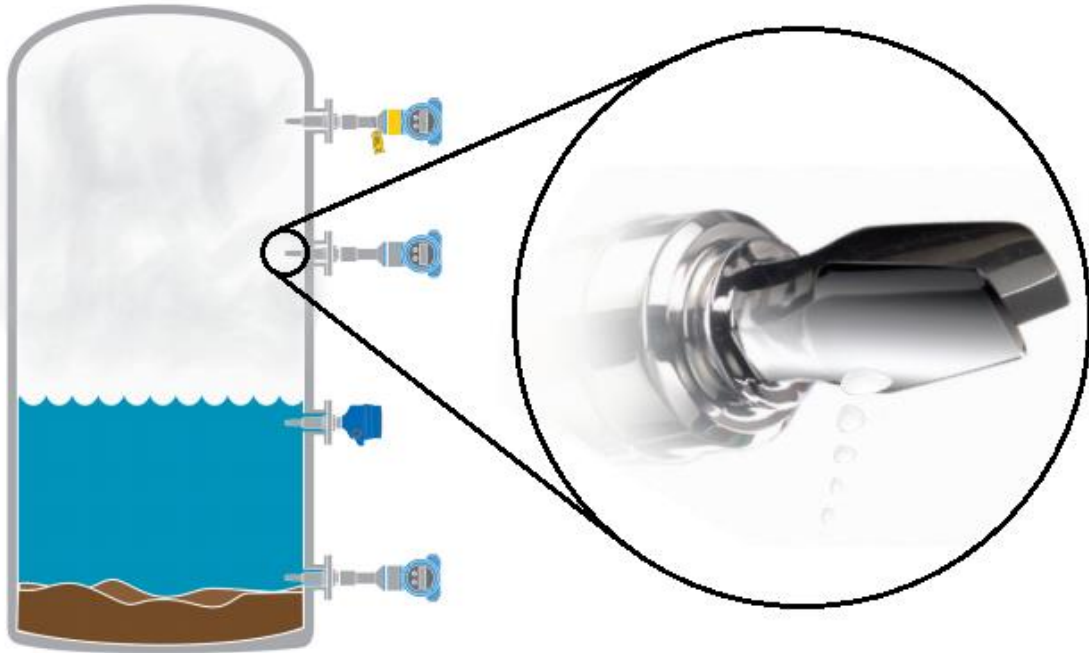
2.2.8 Sistemas vibratórios

Sistemas de monitoramento de nível por vibração detectam o amortecimento que ocorre em uma sonda vibratória quando ela se encontra submersa em diferentes tipos de fluidos, sendo esse amortecimento dependente da densidade do fluido circundante (EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2009). Geralmente, o sistema é composto por pares de pás que são imersos nos diferentes compostos presentes no reservatório, os quais são levados a uma frequência de oscilação por um cristal piezoelétrico.

Diferentes líquidos geram diferentes frequências de oscilação dessas pás, que são interpretadas por uma eletrônica de processamento e controle que atua em possíveis alarmes,

bombas ou válvulas do sistema de separação. A Figura 2.15 ilustra de maneira simplificada esse dispositivo.

Figura 2.15 – Sistema de vibração para o monitoramento de separadores multifásicos.



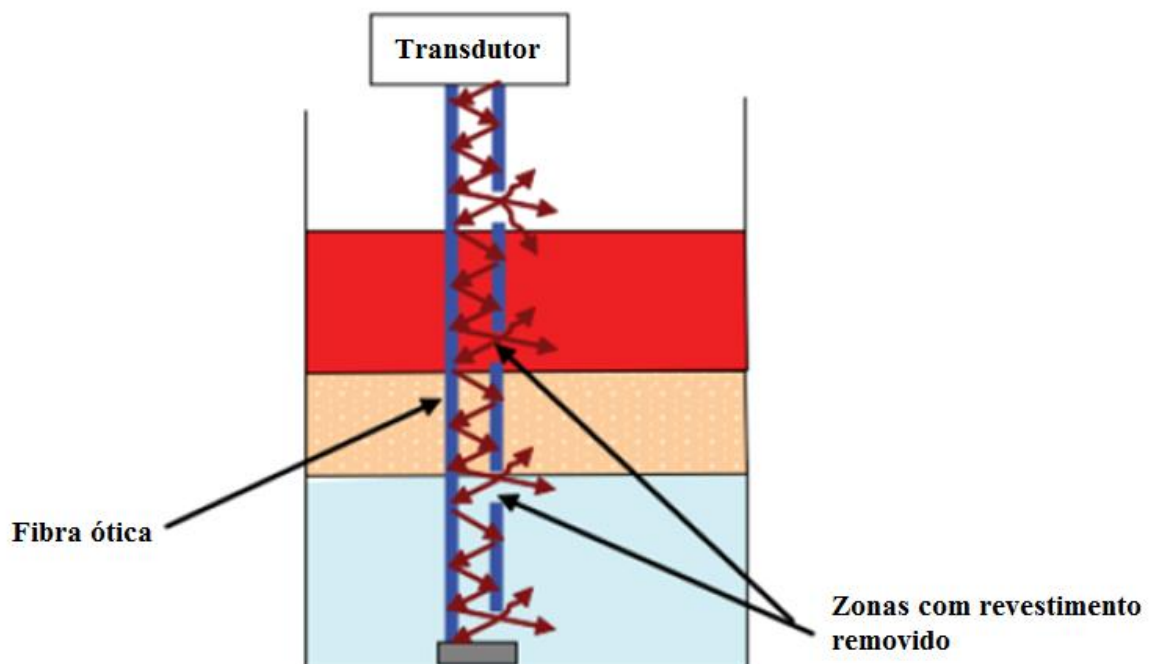
Fonte: Adaptado de EMERSON PROCESS MANAGEMENT, 2019.

A baixa frequência operacional desses sensores faz com que o projeto de software/hardware do sistema seja simples e barato. Contudo, a maior desvantagem dessa técnica é a alta potência necessária para movimentar as pás no interior do tanque, além do fato de que essa movimentação pode gerar turbulências nos fluidos, podendo assim induzir o sistema a cometer alguns erros de medição. Em razão de se tratar um dispositivo sensível ao acúmulo de materiais, intrusivo e invasivo, há a necessidade de se verificar e realizar a limpeza da sua parte sensível a cada nova medição.

2.2.9 Sistemas de fibra ótica

Segundo Betta *et al.* (1998), sensores de fibra ótica têm sido utilizados em alguns tanques de petróleo devido ao fato de possuírem a capacidade de medir a pressão e temperatura em diferentes posições verticais do reservatório ao longo de uma única fibra. O conceito por trás dessa técnica é que a energia que se propaga ao longo da fibra é atenuada se parte do seu revestimento é removido e se o meio que a circunda possui um índice de refração maior que o do seu núcleo. A Figura 2.16 ilustra essa ideia, que é conhecida como fibra com Rede de Bragg. Seguindo essa linha, o elemento sensor consiste em uma fibra que estende-se por toda a profundidade do tanque e cujo revestimento é removido em zonas igualmente espaçadas. Toda vez que o líquido atinge ou deixa uma dessas zonas, a potência de saída aumenta ou diminui dependendo da direção da mudança do nível do líquido. As medidas dos níveis dos líquidos são então realizadas por um circuito de condicionamento de sinal analógico que soma as variações para cima e para baixo da potência de saída, sendo cada uma delas contada separadamente.

Figura 2.16 – Sistema de fibra ótica para o monitoramento de separadores multifásicos.



Fonte: Adaptado de MERIBOUT *et al.*, 2011.

Uma das principais vantagens deste tipo de sensor é que as leituras não são afetadas pelas interfaces eletromagnéticas que podem ser geradas pelos cabos elétricos ou motores circundantes. Além disso, é um dispositivo intrinsecamente seguro e seu cabo de sinal pode ser implantado dentro do tanque sem a necessidade de qualquer tipo de certificação. No entanto, uma de suas principais desvantagens é a limitação com problema do acúmulo de resíduos em sua estrutura (MERIBOUT *et al.*, 2011).

2.2.10 Vantagens e desvantagens de cada técnica de medição

Cada técnica de medição apresentada anteriormente possui vantagens e desvantagens provenientes das suas características de construção, operação e manutenção. A Tabela 2.2 mostra de maneira resumida esses aspectos de cada sistema de medição.

Tabela 2.2 – Vantagens e desvantagens de cada técnica de medição.

Sensor	Principais vantagens	Principais desvantagens
Raios-gama	Confiabilidade, precisão	Preocupações com radiação, custo elevado
Ultrassônico	Não-invasivo, não-intrusivo, fácil de instalar	Grande atenuação do sinal para a segunda interface e subsequentes
Capacitivo	Estrutura simples	Resolução limitada, dificuldade de uso com água salina
Indutivo	Confiabilidade para detecção de água salina, sem problemas com incrustações	Dificuldade na detecção de óleo e gás
ECT	Não-invasivo, não-intrusivo, capaz de medir todos os tipos de materiais, inclusive a emulsão	Custo elevado
Diferencial de pressão	Estrutura simples	Problemas com incrustações
Flutuador	Estrutura simples	Densidades dos fluidos não podem se alterar durante o processo, problemas com incrustações
Vibratório	Estrutura simples e barata, tempo de resposta rápido	Alta potência necessária, pode gerar turbulências nos fluidos (o que gera erros de medição), problemas com incrustações, intrusivo e invasivo
Fibra ótica	Não susceptível à interferências eletromagnéticas, intrinsecamente seguro	Problemas com incrustações

Fonte: Autoria própria, baseado em YANG, 2006 e MERIBOUT *et al.*, 2011.

2.3 Técnicas de medição de capacitância

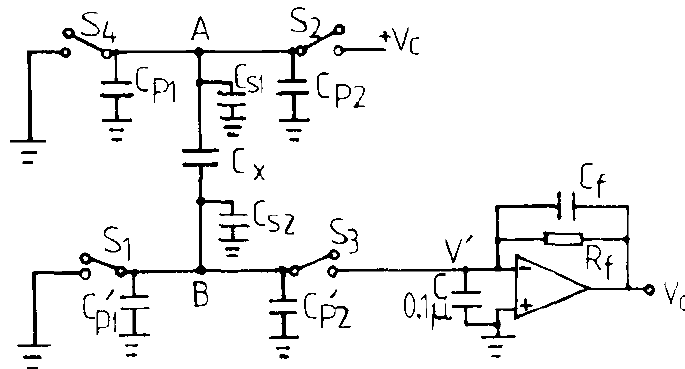
Os sistemas capacitivos de monitoramento de fluidos requerem circuitos capazes de realizar a medição da capacitância de suas regiões sensoras e o posterior processamento dessas informações, para que dessa forma possam classificar as diferentes substâncias presentes no interior do separador e os níveis nos quais elas se encontram. A seguir são apresentadas as técnicas mais utilizadas para essa finalidade.

2.3.1 Chaveamento eletrônico e transferência de carga

Esta técnica se baseia no princípio de carga/descarga do capacitor e é realizada a partir da excitação sucessiva de um arranjo de chaves eletrônicas em um circuito medidor de carga.

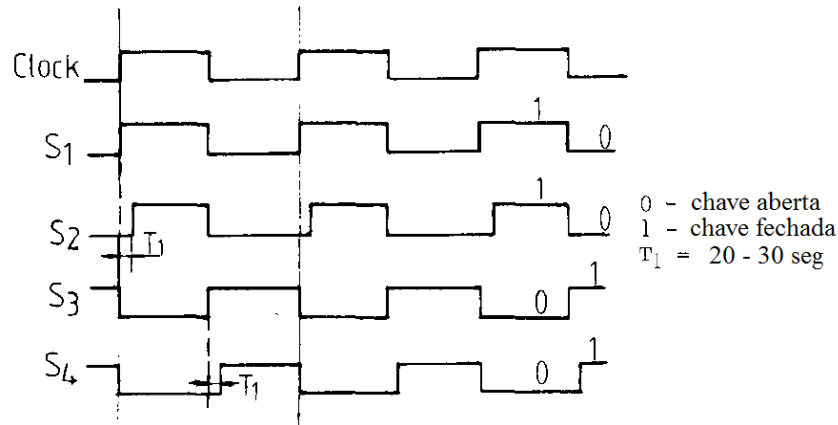
Huang *et al.* (1988) desenvolveram um sistema para a medição de capacitâncias que consiste em carregar uma capacitância desconhecida C_x para uma tensão conhecida, e depois descarregá-la. Este ciclo de carga/descarga é repetido sob o controle de um sinal de *clock* com uma frequência programável f . As descargas sucessivas de pulsos de corrente de C_x são medidas por um detector de carga baseado em um amplificador operacional. O circuito deste transdutor pode ser visto na Figura 2.17 e a sequência de chaveamento de suas chaves CMOS S_1 a S_4 é mostrada na Figura 2.18.

Figura 2.17 – Circuito detector de carga para medição de capacitâncias.



Fonte: HUANG *et al.*, 1988.

Figura 2.18 – Sequência de chaveamento do transdutor capacitivo.



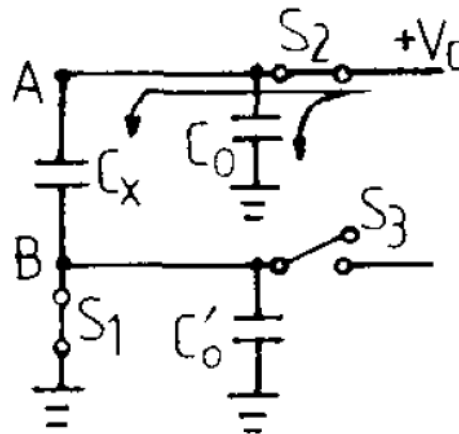
Fonte: Adaptado de HUANG *et al.*, 1988.

Como a impedância de entrada do amplificador operacional possui um valor considerável, os pulsos da corrente de descarga que fluem através dele geram picos de tensão transitórios em sua entrada. Por conta disso, um capacitor de desacoplamento C ($C \gg C_x$) é conectado entre a entrada do amplificador e o potencial de terra, sem afetar a carga média medida. Ele é responsável por absorver os transientes e garantir um potencial estável de terra virtual na entrada do detector de carga.

Escolhendo-se uma constante de tempo de integração $T_f = R_f \cdot C_f$ grande e um valor de C também grande, o circuito de medição de carga produz uma tensão de saída DC proporcional à capacitância desconhecida, sendo capaz de apresentar uma boa precisão nas medições, que pode ser mantida mesmo em altas frequências de comutação sem requisitos especiais para a largura de banda do amplificador operacional.

Em um ciclo típico de carga/descarga, quando o sinal de *clock* vai para nível alto, o interruptor S_1 é fechado para conectar o eletrodo B (eletrodo de detecção) do sensor C_x ao potencial de terra. Após um curto intervalo de tempo T_1 , S_2 é fechado para carregar o outro eletrodo, A (eletrodo de origem), com $+V_c$ (Figura 2.19). A capacitância geral dispersa efetivamente conectada ao eletrodo A, C_0 , incluindo as capacitâncias dos interruptores, C_{p1} e C_{p2} , e a capacitância entre o eletrodo A e a carcaça do transdutor, C_{s1} , (Figura 2.17), também são carregadas por S_2 com $+V_c$, enquanto a capacitância parasita geral conectada ao eletrodo B, C'_0 , é descarregada para o potencial zero, pela chave S_1 .

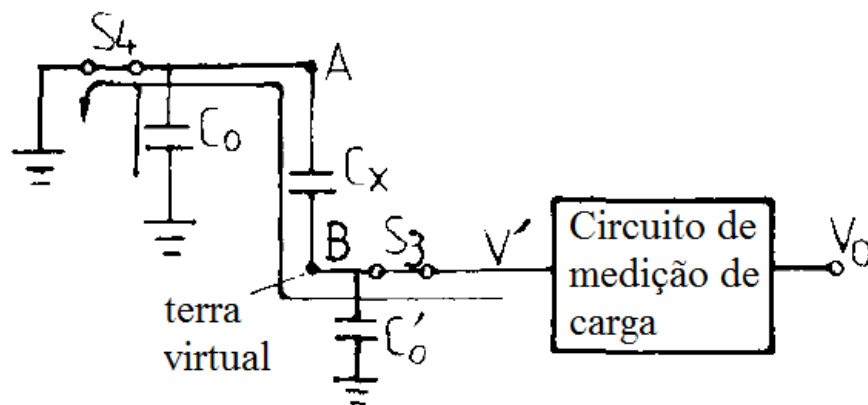
Figura 2.19 – Processo de carga do transdutor capacitivo chaveado



Fonte: HUANG *et al.*, 1988.

Quando o sinal de *clock* passa para nível baixo, S_1 e S_2 abrem antes que o interruptor S_3 feche a conexão do eletrodo B para a entrada do detector, que é mantida no potencial virtual de terra. Após um curto período de tempo, T_1 , S_4 fecha descarregar C_x e C_0 para o terra (Figura 2.20). Apenas a corrente de descarga de C_x fluirá através do detector. A de C_0 não. Portanto, os efeitos da capacitância parasita C_0 , são eliminados da medição.

Figura 2.20 – Processo de descarga do transdutor capacitivo chaveado.



Fonte: Adaptado de HUANG *et al.*, 1988.

Como o capacitor C'_0 estava no potencial de terra antes do interruptor S_3 fechar, a carga acumulada por ele após o fechamento dessa chave (Q') é dada pela Equação (2.9).

$$Q' = C'_0 \cdot V' \quad (2.9)$$

Como não há correntes de fuga (resistência de derivação) entre o eletrodo de detecção B e a massa, a quantidade total de carga Q que flui através do detector durante o intervalo de descarga pode ser obtida através da Equação (2.10).

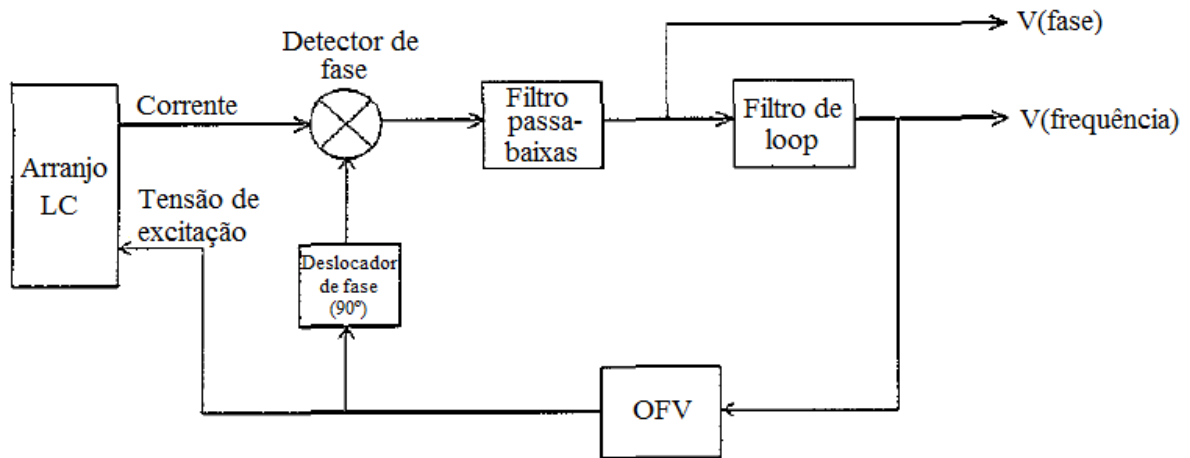
$$Q = C_x \cdot V_c + C'_0 \cdot V' \quad (2.10)$$

2.3.2 Variação de frequência de ressonância

De acordo com Tapson *et al.* (1993), esse método de medição usa como princípio a variação da frequência de ressonância de um circuito oscilador RC ou LC, de forma que mudanças na capacitância desses arranjos são detectadas como amplitude ou alterações de fase. Essa técnica costuma ser utilizada para medir variações de pequenos valores de capacitância em espaços mais restritos. Possui aplicação para uma larga faixa do espectro, com medição de frequências de até MHz se configurado corretamente. É também imune às capacitâncias parasitas, e pode ser usada com tensões de excitação relativamente pequenas nas placas do capacitor.

Tapson *et al.* (1993) desenvolveram um sistema de ressonância capaz de medir capacitâncias a partir do deslocamento de fase que é gerado por um circuito LC excitado por um oscilador de frequência variável (OFV). O arranjo LC é excitado em sua frequência ressonante: se a capacitância mudar, a frequência de excitação é alterada correspondentemente por um *loop de feedback* para manter a condição ressonante. A Figura 2.21 ilustra o diagrama de blocos desse sistema ressonante.

Figura 2.21 – Diagrama de blocos do transdutor capacitivo ressonante.

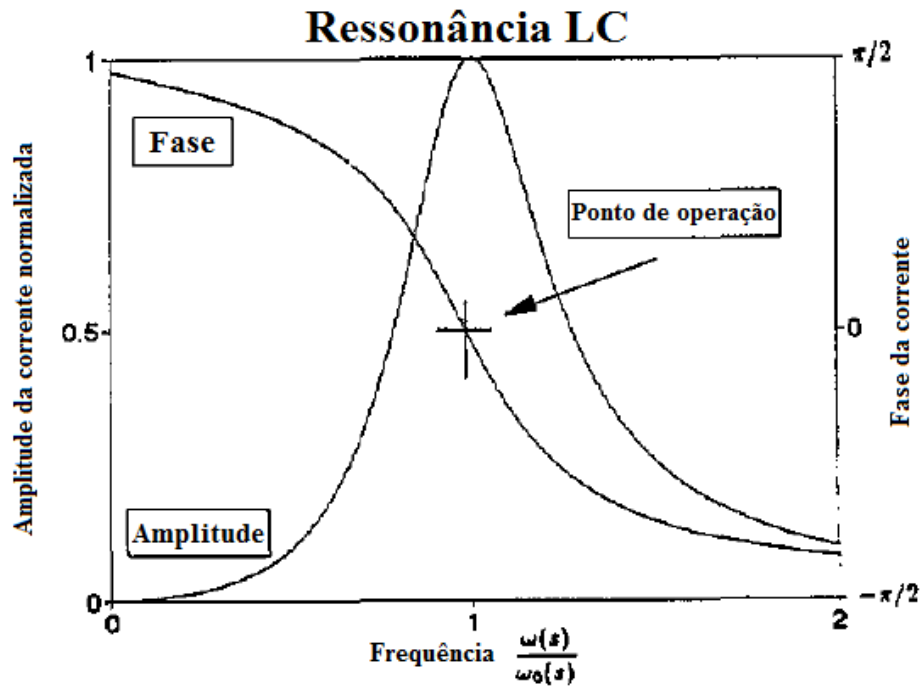


Fonte: Adaptado de TAPSON *et al.*, 1993.

O sistema LC é acionado pelo OFV em sua frequência ressonante. No caso de uma mudança na capacitância do conjunto, um sinal de erro de fase se propaga através da malha, causando uma correção na saída do oscilador variável. A frequência é indicada pela tensão que aciona o OFV e os erros transitórios presentes na malha podem ser medidos como diferenças de fase diferentes de zero em relação ao ponto de operação (Figura 2.22).

Quando a capacitância varia nas faixas dentro da largura de banda da malha, ela identifica a nova frequência ressonante e a variação de capacitância pode ser medida como uma tensão na saída do filtro de *loop*. No caso da capacitância variar em níveis que gerem uma frequência de ressonância muito acima da largura de banda da malha, essa variação pode ser medida como uma tensão de saída do detector de fase. Para variações de frequência próximas à largura de banda da malha, uma combinação dessas duas medidas pode ser utilizada.

Figura 2.22 – Ponto de operação do transdutor capacitivo ressonante.



Fonte: Adaptado de TAPSON *et al.*, 1993.

Nesse sistema portanto, o estado ressonante é determinado em termos de fase. Sua malha é projetada para sintonizar o OFV para reduzir o deslocamento de fase para 0° (o deslocador de fase de 90° é necessário para trazer tanto o detector analógico de fase, como também toda a malha, para uma região linear de operação ressoante).

Outras técnicas podem detectar variações na capacitância a partir de alterações na amplitude do sinal de saída do circuito LC, que são identificadas por meio de uma malha de controle semelhante à da Figura 2.21, porém projetada para ter sensibilidade às variações de amplitude.

2.4 Normas regulamentadoras do sistema (em caso de uso comercial)

Ao desenvolver, projetar e especificar equipamentos eletroeletrônicos para uso em ambientes sujeitos a atmosferas explosivas (como é o caso da aplicação em separadores gravitacionais), algumas medidas e cuidados importantes devem ser levados em conta.

Existem várias normas, nacionais e internacionais, que regulamentam o desenvolvimento, projeto e ensaio desses tipos de dispositivos. Dentre elas destacam-se:

- ABNT NBR IEC 60079-0, que especifica os requisitos gerais para construção, ensaios e marcação de equipamentos elétricos e componentes Ex (destinados ao uso em atmosferas explosivas de gás). Essa norma é uma tradução idêntica da norma internacional IEC 60079-0:2004 (ABNT, 2006b).
- ABNT NBR IEC 60079-11, que especifica a construção e os ensaios de equipamentos intrinsecamente seguros destinados à utilização em atmosferas potencialmente explosivas e dos equipamentos associados (ABNT, 2009).
- ABNT NBR IEC 60079-14, que regulamenta de modo geral a aplicação de equipamentos, projeto e montagem de instalações elétricas em atmosferas explosivas por gás ou vapores inflamáveis. Essa norma foi baseada na norma internacional IEC 79-14:1984 (ABNT, 2006a).

A partir da análise e interpretação das normas citadas, nota-se que os equipamentos elétricos destinados a atmosferas explosivas são classificados em três categorias:

- Grupo I, que são equipamentos elétricos para minas suscetíveis à exalação de grisú¹;
- Grupo II, que são equipamentos elétricos para aplicação em outros locais com atmosferas explosivas de gás;
- Grupo III, que são equipamentos elétricos para aplicação em locais com atmosferas explosivas de poeira.

Diferentes locais com atmosferas explosivas oferecem diferentes graus de risco quanto a explosões. Tendo isso em vista, as normas estabelecem a existência de três zonas distintas quanto ao grau de risco desses locais:

¹ Grisú: gás combustível, formado de metano, anidridos carbônicos e nitrogênio, que se desprende espontaneamente das minas de carvão.

- Zona 0: local onde a ocorrência de mistura inflamável/explosiva é contínua, ou existe por longos períodos;
- Zona 1: local onde a ocorrência de mistura inflamável/explosiva é provável de acontecer em condições normais e operação do equipamento de processo;
- Zona 2: local onde a ocorrência de mistura inflamável/explosiva é pouco provável de acontecer e se acontecer é por curtos períodos.

Para equipamentos pertencentes ao Grupo II (o sensor deste trabalho se enquadra nesse grupo), são também estabelecidas subdivisões de categorias no que diz respeito às temperaturas máximas de operação de partes constituintes destes aparelhos, a fim de que se garanta que o dispositivo especificado não ultrapasse a temperatura de autoignição do fluido ao qual estará imerso. A Tabela 2.3 especifica essas subdivisões e suas respectivas temperaturas.

Tabela 2.3 – Categorias de temperaturas máximas de superfície para o Grupo II.

Classe de temperatura	Temperatura máxima de superfície °C
T1	450
T2	300
T3	200
T4	135
T5	100
T6	85

Fonte: ABNT NBR IEC 60079-0:2006.

Em equipamentos elétricos destinados a atmosferas explosivas, é também obrigatório que o fabricante do produto especifique para qual temperatura ambiente o aparelho deverá operar em regime normal, devendo colocar marcações adicionais no produto em caso de operação em temperaturas diferentes das especificadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Faixas de temperatura de ambiente de serviço.

Equipamento elétrico	Temperatura ambiente em serviço	Marcação adicional
Normal	Máxima: + 40°C Mínima: - 20°C	Nenhuma
Especial	Especificada pelo fabricante	T_a ou T_{amb} com a faixa especial, por exemplo: $- 30^{\circ}\text{C} \leq T_a \leq + 40^{\circ}\text{C}$ ou o símbolo "X"

Fonte: ABNT NBR IEC 60079-0:2006.

A Tabela 2.5 especifica os tipos de proteção e seus respectivos símbolos para os diferentes tipos de equipamentos elétricos para atmosferas explosivas.

Tabela 2.5 – Graus de proteção de equipamentos e seus respectivos símbolos.

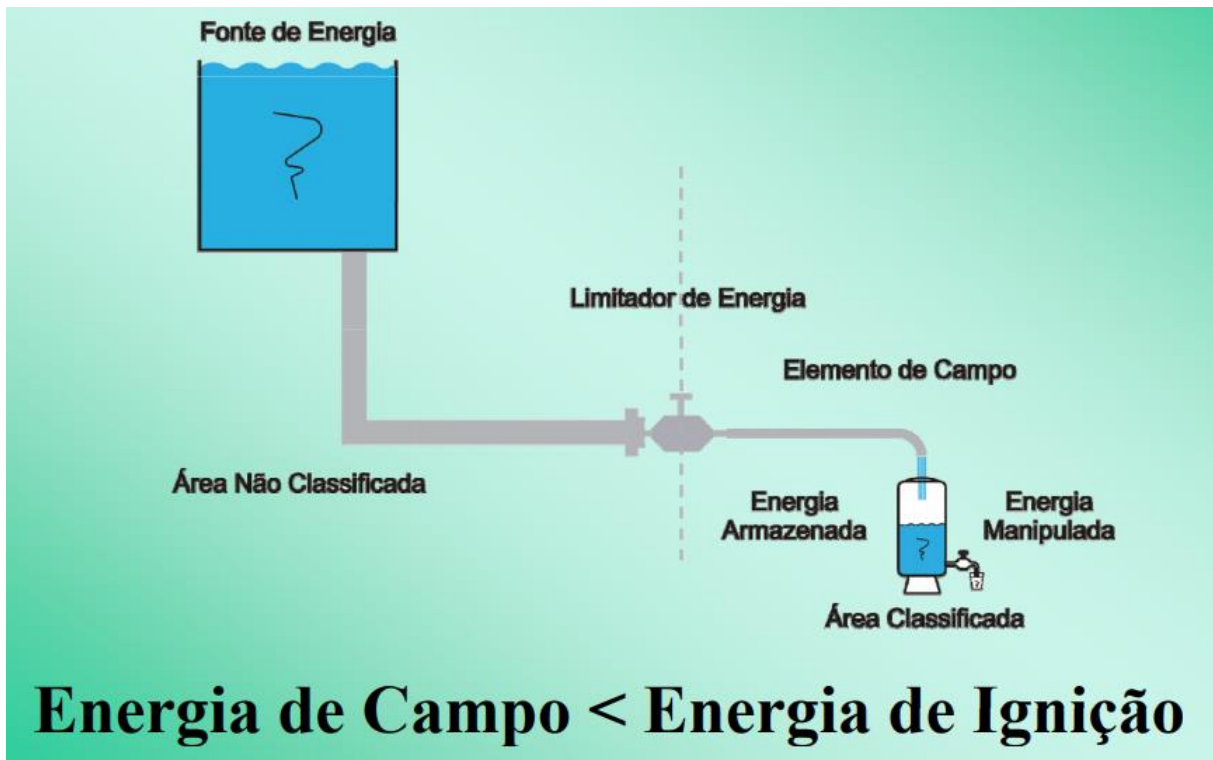
Símbolo	Tipo de proteção
d	Invólucro à prova de explosão
p	Invólucro pressurizado ou com diluição contínua
q	Equipamento imerso em areia
o	Equipamento imerso em óleo
e	Equipamento com segurança aumentada
i	Equipamento com segurança intrínseca
n	Equipamento não-acendível
m	Equipamento com encapsulamento
s	Equipamento com proteção especial

Fonte: ABNT NBR IEC 60079-0:2006.

Através da análise e interpretação das normas supracitadas e de documentos anexos a elas, entende-se que o sistema proposto pode ser classificado como um equipamento elétrico do tipo de segurança intrínseca. Segundo as normas, equipamentos elétricos de segurança intrínseca (grau de proteção Ex-i) são dispositivos que em condições normais de operação não são capazes de provocar a ignição de uma atmosfera explosiva de gás, bem como não é provável que ocorra algum defeito neles que seja capaz de causar a inflamação dessa atmosfera. Além disso, equipamentos do tipo Ex-i são um dos poucos com utilização

permitida na Zona 0 (zona de operação do sensor desenvolvido). A Figura 2.23 ilustra de maneira simbólica o conceito de segurança intrínseca. Nesta analogia, uma quantidade de energia maior do que energia mínima de autoignição do meio que envolve o equipamento é manipulada de forma a tornar-se menor do que ela quando presente em sua área classificada. Tanto em regime de operação normal quanto em casos de falhas de funcionamento dispositivo.

Figura 2.23 – Representação simplificada do conceito de segurança intrínseca.



Fonte: ROSSIT, 2019.

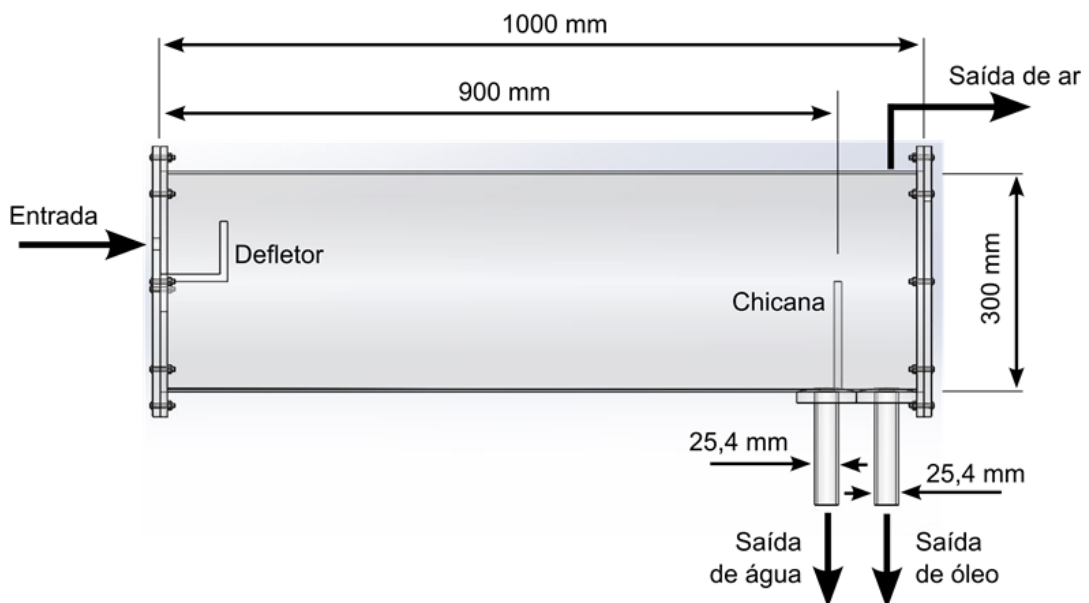
3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são detalhadas as especificações técnicas dos componentes do sensor de nível, assim como o funcionamento e operação de cada um deles no sistema. O processo de calibração do sensor e os aspectos construtivos físicos do circuito impresso desenvolvido e do separador gravitacional da UTFPR também são apresentados nesta seção.

3.1 Protótipo do separador gravitacional horizontal da UTFPR

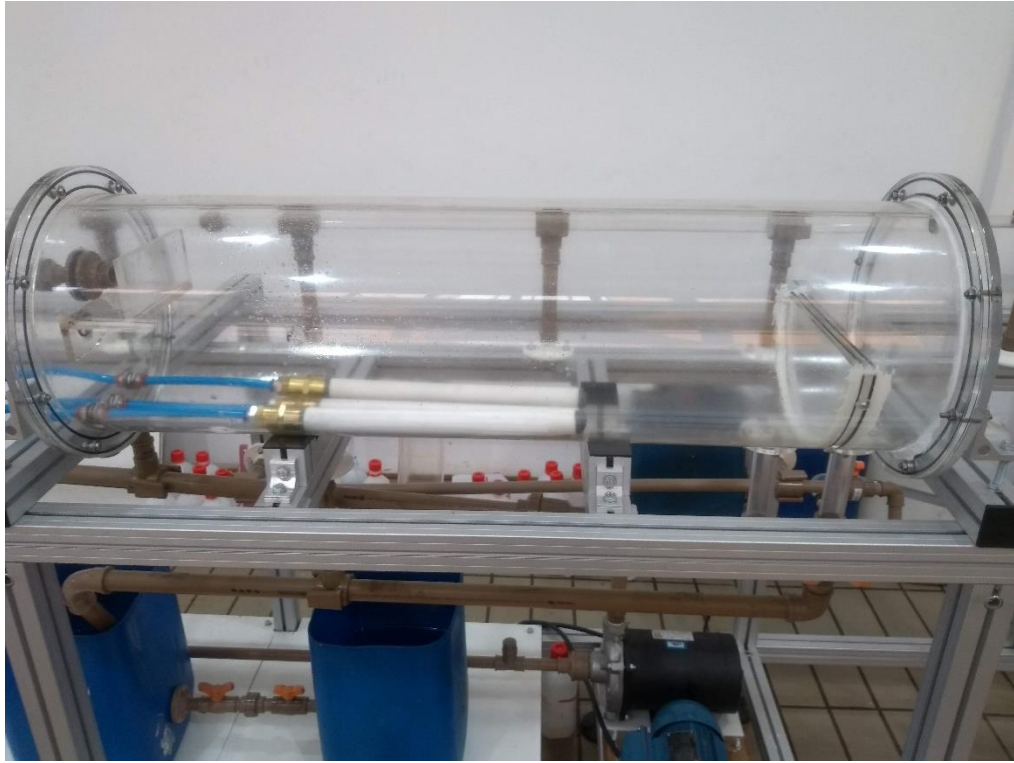
Todas as características do sensor de nível desenvolvido foram projetadas a partir das dimensões e necessidades reais do protótipo de separador da UTFPR. As imagens mostradas na sequência da Figura 3.1 a Figura 3.3 ilustram esse separador, bem como a sua bancada experimental.

Figura 3.1 – Desenho técnico do protótipo de separador da UTFPR.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.2 – Protótipo do separador da UTFPR.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.3 – Bancada experimental do protótipo do separador da UTFPR.



Fonte: Autoria própria.

Para a instrumentação desse separador foi desenvolvido um sensor contendo apenas a tecnologia capacitiva de medição. Isso se deu devido ao fato de o tanque utilizado ser apenas um protótipo miniaturizado do reservatório real, no qual a água utilizada nas simulações de separação é proveniente diretamente da rede de saneamento, não possuindo assim uma alta condutividade elétrica (cerca de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Contudo, a fim de se conhecer o comportamento do sensor com a tecnologia híbrida em aplicações reais envolvendo água salina, a técnica indutiva ainda será investigada e caracterizada (detalhes no Capítulo 4).

3.2 Eletrônica do sensor

Nesta seção serão abordados todos os aspectos construtivos e operacionais da eletrônica do sensor de nível, bem como os processos de caracterização necessários para se desenvolver a sua estrutura. Seu processo de calibração e sensoriamento por imagem também serão detalhados aqui.

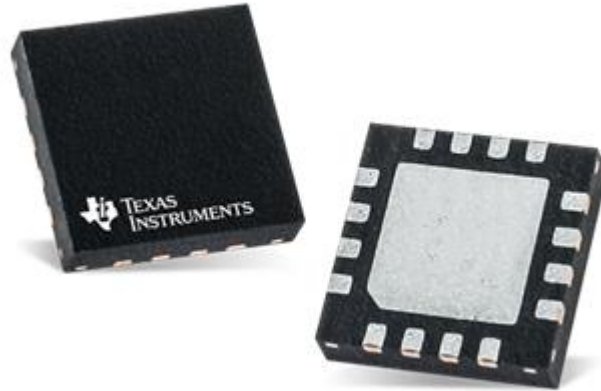
3.2.1 Definição do método de medição

Por apresentar uma aplicação para largas faixas do espectro de frequências (de poucos kHz até Mhz), possuir alta imunidade a ruídos e interferências do meio, baixo consumo de potência (cerca de 7mW – referente ao quesito de segurança intrínseca necessário a esse tipo de dispositivo) e capacidade de medição de uma larga faixa de valores de capacitância e indutância, foi adotada uma tecnologia de medição capacitiva/indutiva a partir da variação da frequência de ressonância de um circuito oscilante, desenvolvida pela Texas Instruments (TI).

A técnica utilizada baseia-se nas variações das frequências de ressonância de arranjos de indutores e capacitores (LC paralelo), nos quais os capacitores são as próprias placas imersas nas diferentes substâncias do separador. Cada tipo de fluido apresenta um valor diferente de permissividade elétrica, o que permite a diferenciação das fases nos eletrodos. O

circuito integrado FDC2214 (na Figura 3.4 com encapsulamento do tipo WQFN) desenvolvido pela TI é capaz de realizar essas medições e também a manipulação dos dados.

Figura 3.4 – Circuito integrado do FDC2214.



Fonte: TEXAS INSTRUMENTS, 2015.

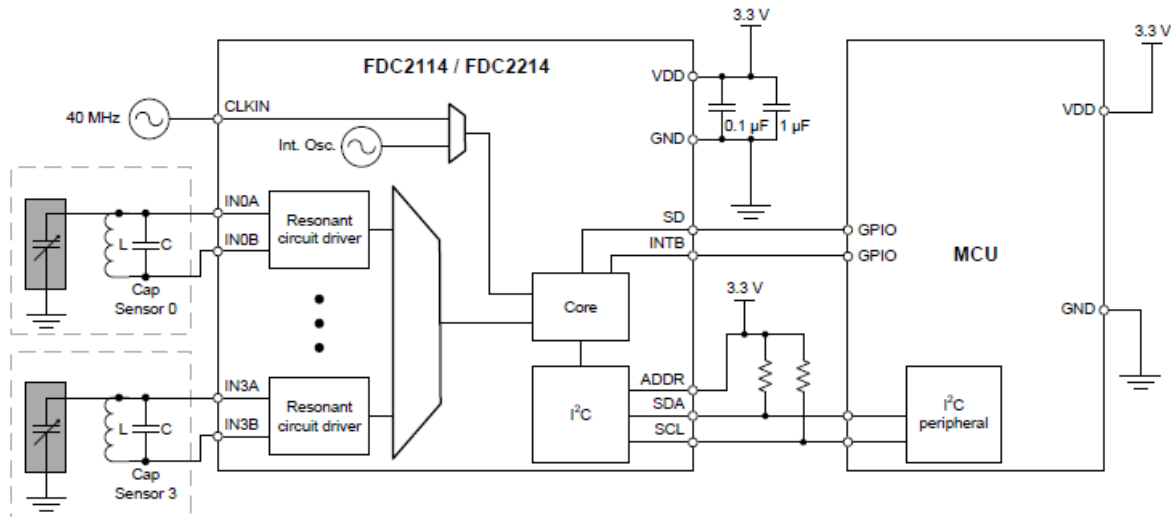
O FDC2214 é um conversor de frequência ressonante para valor digital que disponibiliza esses dados com uma resolução de 28 bits em sua saída. Ele possui quatro canais de medição e tensão de alimentação de 3,3 V.

A partir de drivers de circuito ressonante, o FDC2214 mede de maneira sequencial a frequência de oscilação f_x (de 10 kHz até 10 MHz) de cada um dos quatro arranjos LC contendo cada capacitor de medição. O *firmware* do transdutor seleciona cada canal para realizar a leitura da frequência de ressonância do seu arranjo LC, enquanto mantém os outros três canais em potencial nulo. Seu núcleo utiliza então uma frequência de referência f_{REF} (35 a 55 MHz) para disponibilizar os dados digitais finais em sua saída, que são proporcionais à razão f_x/f_{REF} . Essa frequência de referência pode ser derivada tanto de um sinal de *clock* interno de referência, como de um circuito oscilador externo. Posteriormente, a partir da Equação (3.1), é possível obter o valor dessas capacitâncias C_x no circuito, uma vez que o valor da indutância L , que deve ser instalada externamente ao CI, é fixo.

$$C_x = \frac{1}{L \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_x)^2} \quad (3.1)$$

Através do protocolo de comunicação I2C e da multiplexação interna dos canais do FDC2214, é possível enviar essas informações para um microcontrolador ou processador externo. A Figura 3.5 mostra o circuito eletrônico do FDC2214.

Figura 3.5 – Circuito eletrônico do FDC2214.



Fonte: TEXAS INSTRUMENTS, 2015.

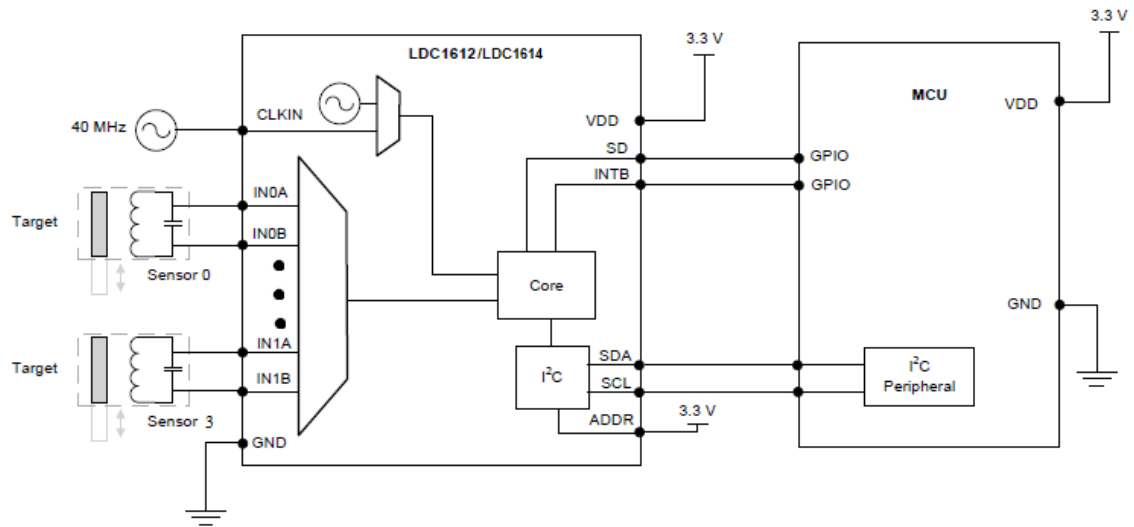
O circuito integrado que realiza as medições de indutância e posterior manipulação desses dados é desenvolvido pela TI e é chamado de LDC1614. O dispositivo possui características construtivas, físicas e operacionais muito semelhantes às do FDC2214, com a diferença de que ele se aplica a indutores de valores variáveis, devendo assim ter capacitores de valores fixos instalados externamente (C). Com os valores digitalizados em sua saída (proporcionais a f_x/f_{REF}), a partir da Equação (3.2) (Equação (3.1) reestruturada) é possível determinar o valor das indutâncias L_x presentes em cada um dos seus quatro canais.

$$L_x = \frac{1}{C \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_x)^2} \quad (3.2)$$

Assim como o FDC2214, o LDC1614 também apresenta 28 bits de resolução, quatro canais de medição e tensão de alimentação de 3,3 V, sendo capaz de medir frequências de ressonância de 1 kHz até 10 MHz nos circuitos osciladores. Seu circuito integrado possui o mesmo encapsulamento do FDC2214 mostrado na Figura 3.4.

A Figura 3.6 mostra o circuito eletrônico do LDC1614.

Figura 3.6 – Circuito eletrônico do LDC1614.



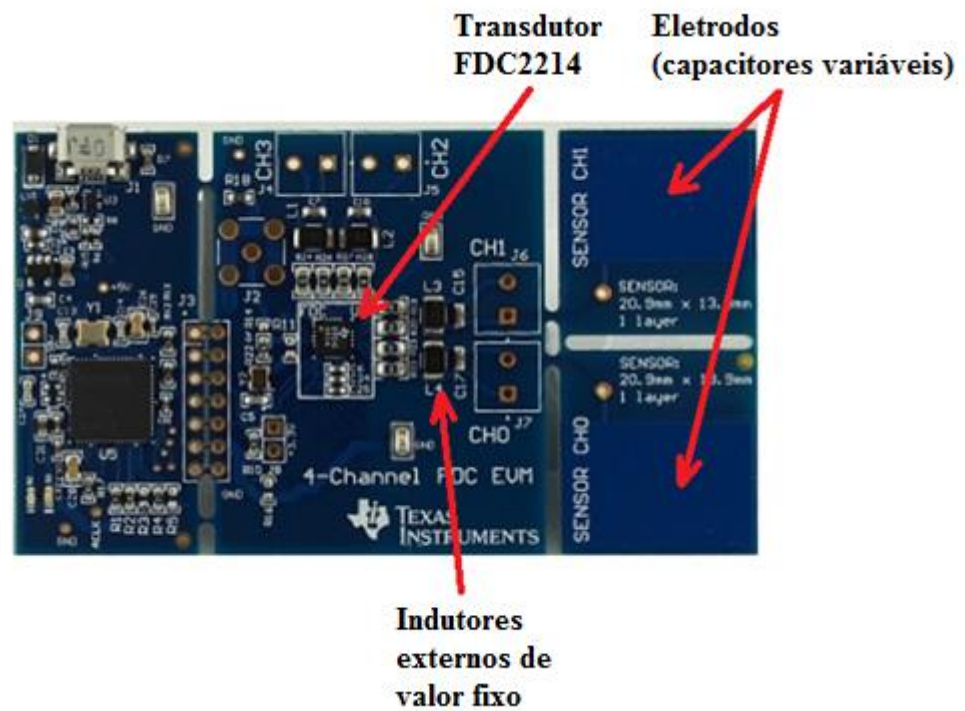
Fonte: TEXAS INSTRUMENTS, 2015.

3.2.2 Caracterização e definição de estruturas

A Texas Instruments disponibiliza placas de circuito impresso já contendo os transdutores FDC2214 e LDC1614 juntamente com suas respectivas estruturas necessárias e prontas para realizar medições.

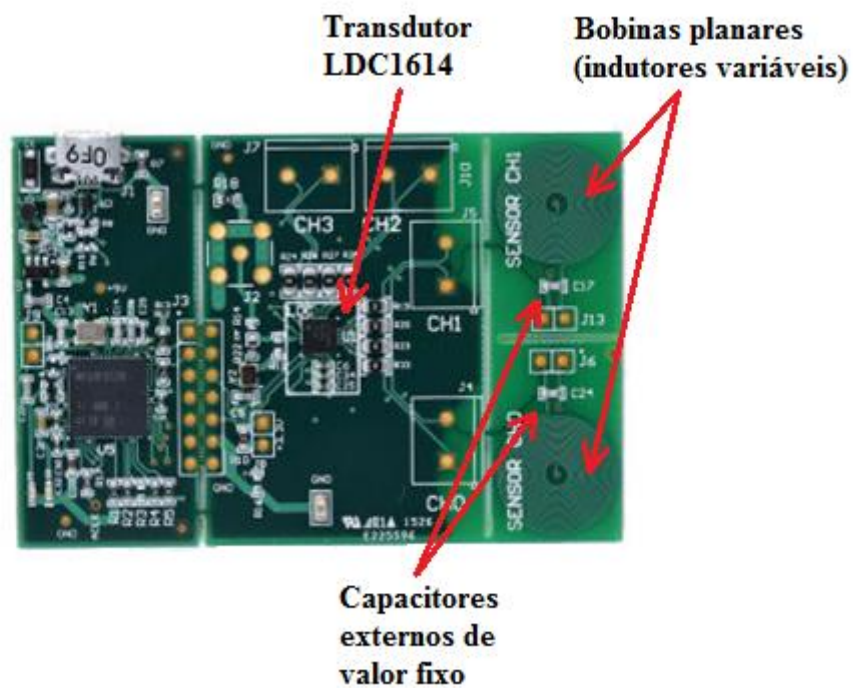
Esses módulos de avaliação (Evaluation Modules – EVM) foram tomados como base para a caracterização e definição das estruturas do sensor de nível desenvolvido e podem ser vistos na Figura 3.7 e Figura 3.8.

Figura 3.7 – Módulo de avaliação do FDC2214.



Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS, 2015.

Figura 3.8 – Módulo de avaliação do LDC1614.



Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS, 2015.

Cada eletrodo (capacitor variável) do módulo de avaliação capacitivo possui dimensões de 13,9 x 20,9 mm e está conectado a apenas uma terminação dos canais de medição do transdutor FDC2214, formando um “capacitor de placa única” em que a referência é o potencial da extremidade em aberto do canal. Essa configuração de “placa única” foi também adotada no *layout* do sensor de nível, uma vez que permitiria a construção de um dispositivo de uma só haste, simplificando assim a sua estrutura e diminuindo o acúmulo de impurezas nas regiões sensoras (maior no caso da existência de duas hastes paralelas).

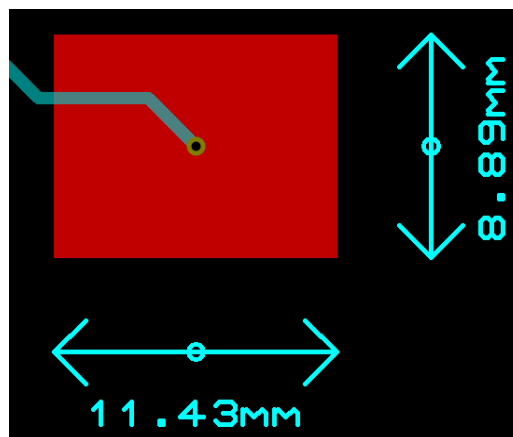
Cada bobina planar do módulo indutivo, de acordo com os parâmetros presentes na Figura 2.9, tem formato circular, número de voltas $n = 19$, espessura da trilha $w = 0,1524$ mm, espaçamento entre as trilhas $s = 0,1524$ mm, diâmetro interno $d_{in} = 2,5$ mm e diâmetro externo $d_{out} = 14$ mm.

A placa chicana do separador da UTFPR (Figura 3.1) tem a função de separar o compartimento do óleo do resto do separador, para que ele possa escoar puro para a sua região de saída. Desse modo, para que o sistema funcione corretamente, nenhuma outra substância líquida (neste caso emulsão ou água) podem ultrapassar essa barreira, que mede 120 mm. Com isso, para o *layout* do sensor de nível seria necessário um valor máximo 130 mm de região sensora para medir apenas líquidos, devido ao fato do óleo se sobrepor em até 10 mm a barreira da chicana durante o processo dinâmico de separação (valor verificado a partir de experimentos) e mais uma porção para a identificação do ar. A fim de se ter uma resolução relativamente boa para o separador utilizado e ao mesmo tempo não idealizar um número muito de grande de canais, gerando assim a necessidade de uma eletrônica mais complexa englobando mais transdutores (cada um possui quatro canais), definiu-se que a resolução do sensor seria de aproximadamente 10 mm por canal. Assim, seriam necessários 13 canais para a identificação de líquidos, o que implicaria na utilização de 4 transdutores FDC2214, totalizando 16 porções sensitivas do sensor dentro das dimensões do separador. Os três canais restantes foram utilizados para a identificação do ar.

Apesar do sensor de nível ter sido idealizado apenas com a tecnologia capacitiva, visando a caracterização da técnica indutiva e também trabalhos futuros com uma eletrônica híbrida, foi adotada a mesma resolução do sensor capacitivo para o *design* das bobinas planares utilizadas nos testes de caracterização preliminares que serão apresentados de maneira mais detalhada no Capítulo 4.

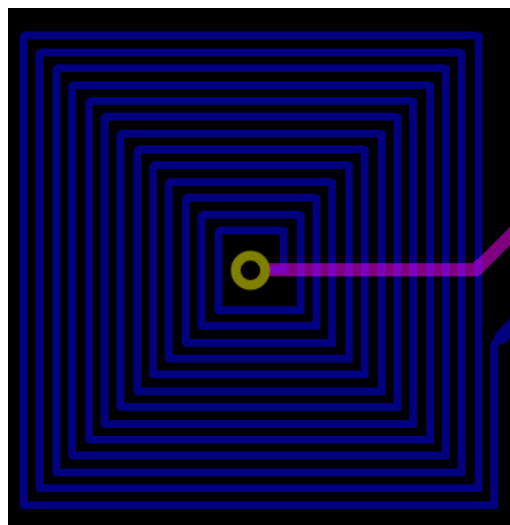
Para o projeto desses elementos sensores, considerando os valores de resolução determinados e visando a otimização do *design* do circuito impresso, definiu-se as medidas de cada eletrodo em 8,89 x 11,43 mm (Figura 3.9) e parâmetros das bobinas planares (Figura 3.10), mencionados no Capítulo 2, em: número de voltas $n = 13$, espessura da trilha $w = 0,1524$ mm, espaçamento entre as trilhas $s = 0,1524$ mm, diâmetro interno $d_{in} = 1,1176$ mm e diâmetro externo $d_{out} = 9,0424$ mm. No caso das bobinas, a espessura da trilha foi definida a partir do valor mínimo possível para a sua confecção (a fim de ter o maior número de voltas possível dentro de uma mesma área e assim, uma maior indutância), de acordo com os limites técnicos estabelecidos pelo fabricante. Desse modo, com a resolução do canal estipulada, o número de voltas da bobina ficou condicionado ao número 13.

Figura 3.9 – *Design* dos eletrodos do sensor de nível.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.10 – *Design* das bobinas planares testadas.



Fonte: Autoria própria.

Quanto aos indutores e capacitores externos de valor fixo, necessários para a confecção dos arranjos LC referentes aos transdutores FDC2214 e LDC1614, respectivamente, a partir de testes preliminares (Capítulo 4) envolvendo os *designs* de eletrodos e bobinas definidos para o sensor e a própria estrutura dos módulos de avaliação da TI (com valores de indutância e capacitância já definidos e inseridos no circuito), notou-se que esses componentes permitiam a identificação das capacitâncias e indutâncias variáveis dentro do separador dentro das faixas de operação dos transdutores. Desse modo, para a confecção do sensor de nível, utilizou-se esses componentes com os mesmos valores disponíveis nos módulos de avaliação EVM, em que $C = 330 \text{ pF}$ e $L = 18 \text{ }\mu\text{H}$. O cristal oscilador externo utilizado no sensor de nível (f_{REF}), foi escolhido a partir de dados disponíveis no *datasheet* do FDC2214. Foram utilizados quatro cristais osciladores de 40 MHz, um para cada transdutor, devido ao fato de que um único cristal oscilador para os quatro circuitos tornaria as trilhas de sinal de *clock* muito longas no sensor, o que poderia causar problemas de ruídos e interferências em sua eletrônica.

3.2.3 Manipulação dos dados digitalizados

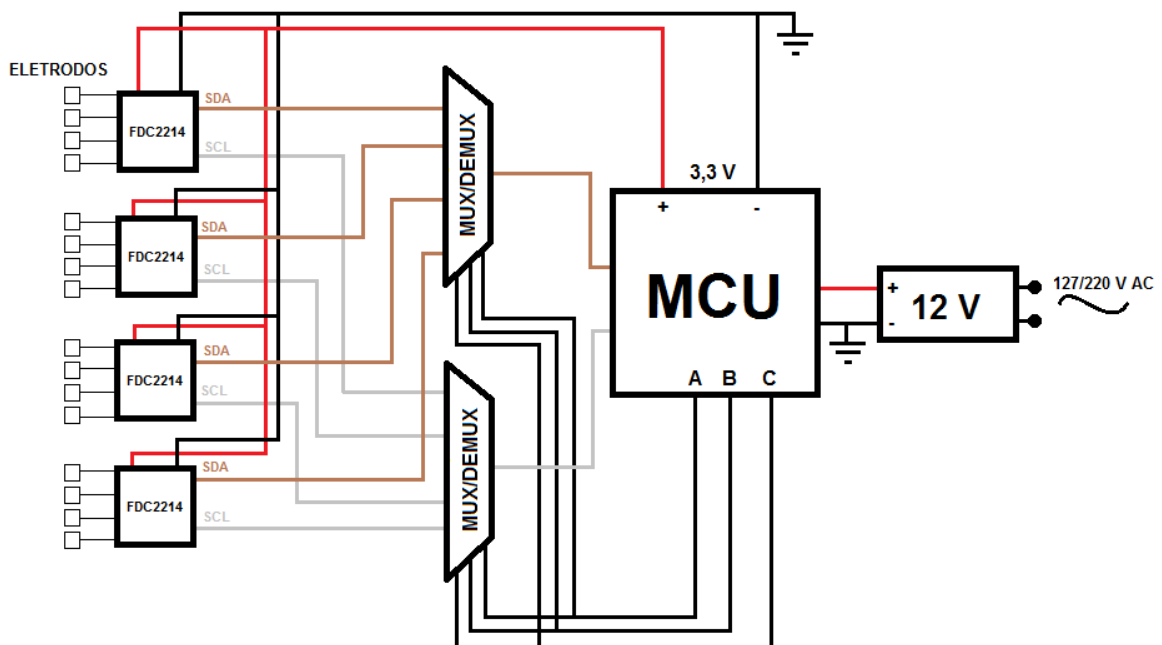
No sensor de nível proposto, são utilizados quatro circuitos do FDC2214 trabalhando de maneira conjunta, a fim de se obter os 16 canais de medição referentes aos 16 eletrodos da geometria aplicada. A seleção de leitura dos canais é feita de maneira sequencial. Enquanto um dos transdutores é habilitado, os outros três permanecem desabilitados e com seus canais de medição aterrados. No transdutor habilitado, a leitura de seus canais também é feita de maneira sequencial, ou seja, enquanto um canal está habilitado para aquisição de dados, os outros três permanecem em potencial nulo. Desse modo, para o sensor como um todo, enquanto um dos 16 canais está realizando uma leitura de frequência, os outros 15 canais estarão aterrados, aguardando a habilitação do seu transdutor de origem e também do seu canal específico dentro do transdutor.

Os transdutores utilizados transmitem suas informações digitalizadas para dispositivos externos a partir do protocolo de comunicação I2C. Desse modo, a fim de que fosse possível realizar a leitura e interpretação dos dados dos quatro FDC2214 de uma maneira eficiente,

sem tornar a eletrônica e o processamento de dados do sensor muito complexos, optou-se pela utilização de dois multiplexadores externos no canal de comunicação I2C (um para os sinais de *clock*-SCL e o outro para os de dados-SDA de cada CI) enviando essas informações para um único microcontrolador, ao invés de utilizar, por exemplo, um microcontrolador para cada transdutor.

A Figura 3.11 ilustra o diagrama construtivo do circuito eletrônico desenvolvido para o sensor de nível capacitivo.

Figura 3.11 – Diagrama construtivo do circuito eletrônico do sensor capacitivo.



Fonte: Autoria própria.

Devido à pequena demanda por pinos I/O digitais no circuito do microcontrolador (um total de cinco: dois para a comunicação I2C e outros três para a seleção de dados dos multiplexadores) e a necessidade de miniaturização do circuito do sensor de haste capacitivo, escolheu-se para esse projeto, o uso da plataforma Arduino Nano, composta por um microcontrolador de modelo ATmega, da ATMEL (ARDUINO, 2019).

Quanto aos circuitos multiplexadores, como os quatro circuitos FDC2214 funcionam paralelamente, fez-se necessário a utilização de dois seletores de sinal, um para os sinais de *clock*-SCL e o outro para os de dados-SDA da interface I2C de cada CI, obtendo assim as leituras de capacitância para cada um dos 16 canais de medição. Apesar da tecnologia de

sensoriamento indutivo não estar sendo utilizada no sistema desenvolvido, para aplicações em plataformas reais ela poderá ser implementada. Dessa forma, haveriam oito sinais SCL e outros oito sinais SDA (quatro de cada dos circuitos FDC2214 e mais quatro de cada dos circuitos LDC1614), necessitando assim de dois circuitos com possibilidade de seleção de oito canais cada.

Como o protocolo I2C é bidirecional, ou seja, para que se dê o seu correto funcionamento, durante o processo de comunicação ocorrem fluxos de dados tanto do mestre para o escravo como vice-versa, o circuito seletor para a aplicação neste sensor deveria necessariamente poder de trabalhar neste regime, sendo assim classificado como um multiplexador e demultiplexador. Desse modo, optou-se pela utilização de multiplexador/demultiplexador 74HC4051 com tecnologia CMOS, que é capaz de manipular sinais digitais de níveis de 3,3 ou 5 V (característica necessária, uma vez que o protocolo I2C do FDC2214 opera em níveis de 3,3 V).

3.3 *Layout do sensor desenvolvido com o circuito de medição capacitivo*

Para fins de otimização da geometria do sensor e da sua instalação, as placas capacitivas foram desenvolvidas de modo a serem planos únicos (e não um par de placas paralelas espaçadas, como convencionalmente se utiliza). Desse modo, o sensor mensura a capacitância existente entre o eletrodo do *layout* e o meio ao seu redor. Com o objetivo também de reduzir ruídos e interferências nas leituras do sensor, provenientes de partes móveis em sua estrutura, como cabos, por exemplo, sua geometria foi integralmente desenvolvida em uma placa de circuito impresso (PCI). A Figura 3.12 mostra o esboço do sensor construído.

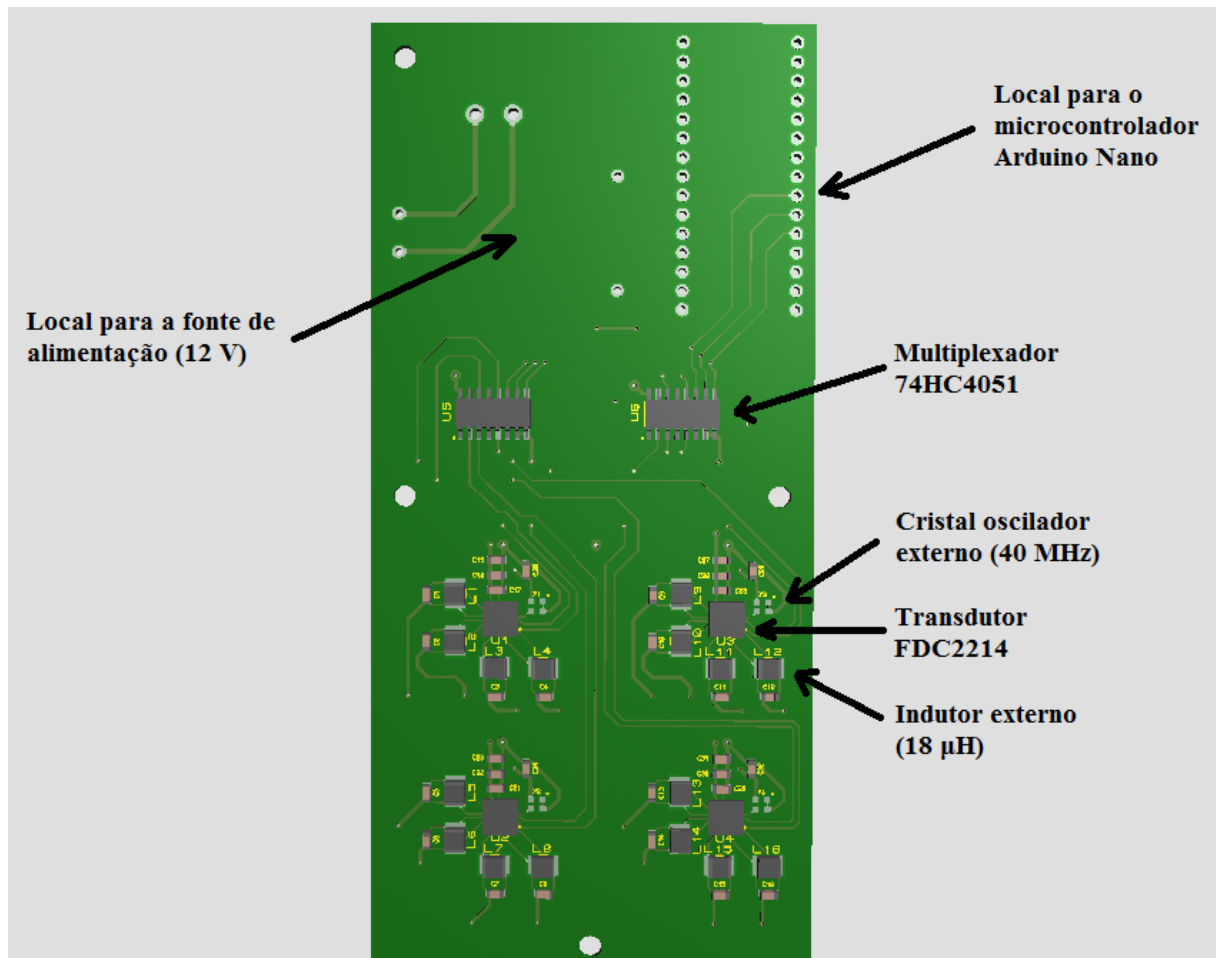
Figura 3.12 – Esboço do sensor construído.



Fonte: Autoria própria.

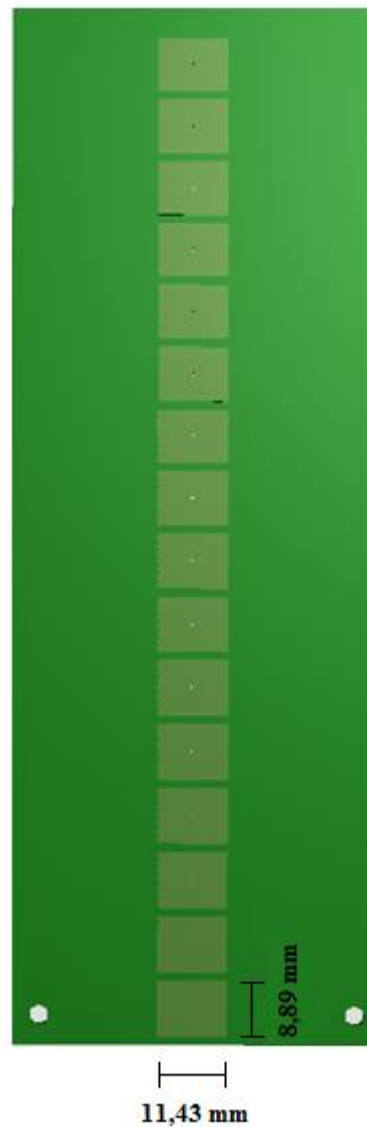
Na parte superior do dispositivo fica situada toda a eletrônica para controle, processamento e envio dos dados medidos para um computador (Figura 3.13). Na parte inferior (Figura 3.14), estão os 16 eletrodos referentes a cada um dos 16 canais responsáveis por realizar as medidas de capacitância das diferentes substâncias e interfaces presentes no separador.

Figura 3.13 – Esboço da eletrônica do sensor construído.



Fonte: Autoria própria.

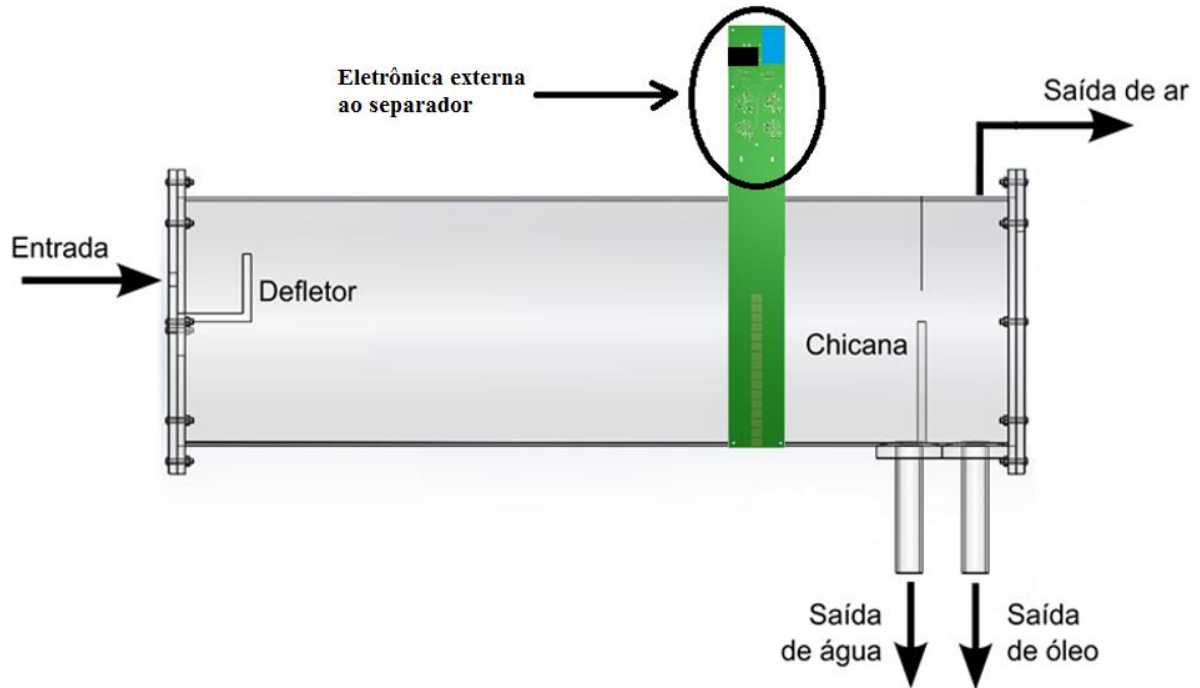
Figura 3.14 – Esboço dos eletrodos do sensor construído.



Fonte: Autoria própria.

O espaçamento entre os eletrodos do sensor e sua região eletrônica foi desenvolvido para que essa ficasse situada totalmente na parte exterior do separador (Figura 3.15), não tendo assim a possibilidade de entrar em contato com os compostos em seu interior, mesmo no caso de possuir um invólucro de proteção.

Figura 3.15 – Disposição do sensor de nível no separador da UTFPR.



Fonte: Autoria própria.

Para que mitigar ao máximo possíveis interferências entre todos os sinais elétricos presentes no sensor, foi desenvolvido um plano de terra cobrindo toda a área de sua PCI, exceto a região dos eletrodos, para que o potencial nulo não alterasse as linhas de campo elétrico ali presentes, prejudicando assim as medições. Desse modo, a PCI do sensor de nível desenvolvido foi construída com 4 camadas de circuitos e pode ser visto na Figura 3.16.

A eletrônica desenvolvida possui baixa demanda de potência e tem necessidade de um fluxo constante de energia. Para esta aplicação, segundo dados do fabricante de cada um dos componentes do sensor, a plataforma Arduino Nano irá consumir um máximo de 700 mW de potência, os seletores 74HC4051 irão demandar de cerca de 10 mW cada um (totalizando 20 mW para ambos), enquanto para os circuitos FDC2214 estima-se um fluxo de aproximadamente 15 mW em cada um (totalizando 60 mW para os quatro). Assim, estima-se que a potência total consumida pelo sensor desenvolvido fique em torno de 800 mW.

Desse modo, para realizar a energização de todo o sistema optou-se pela utilização de uma fonte chaveada modelo HLK-PM12, com entrada de tensão bivolt (100-240 V_{AC}), 12 V/0,25 A na saída e fornecimento de potência de 3 W.

Figura 3.16 – Protótipo final do sensor de nível desenvolvido.



Fonte: Autoria própria.

3.4 Calibração

Para realizar todo o processo de calibração do sensor e refino do código do microcontrolador, inicialmente construiu-se um reservatório em poliuretano transparente (Figura 3.17) a fim de que não fosse necessário o uso de grandes quantidades de substâncias puras e misturas para a sincronização dos diferentes níveis das interfaces.

Figura 3.17 – Reservatório para calibração do sensor de nível.



Fonte: Autoria própria.

A partir de experimentos e análises das capacitâncias dos 16 eletrodos do sensor (detalhados no Capítulo 4), notou-se uma dispersão significativa dessa grandeza entre os canais de medição, resultado das geometrias adotadas e do *layout* do dispositivo como um todo. Desse modo, para uma correta identificação das fases pelo sensor, seria necessária uma calibração individual dos seus canais para as faixas específicas de capacitância que cada um deles mediria nos diferentes meios, o que tornaria o código de controle mais complexo e com maior dificuldade para realização de ajustes (no caso de recalibrações necessárias).

Assim, com o objetivo de diminuir essa faixa de variação nas medidas dos canais para uma mesma substância e assim possibilitar uma calibração única para todo o sensor, optou-se por normalizar o valor das capacitâncias medidas em cada canal, utilizando a fórmula mostrada pela Equação (3.3).

$$V_{nx} = \frac{C_{xmed} - C_{xar}}{C_{xágua} - C_{xar}} \quad (3.3)$$

Em que V_{nx} é o valor normalizado da capacitância medida no eletrodo, C_{xmed} é o valor real da capacitância medida no eletrodo, C_{xar} é o valor médio da capacitância do eletrodo imerso no ar ambiente e $C_{xágua}$ é o valor médio da capacitância do eletrodo imerso em água (da rede de saneamento ou deionizada, dependendo da situação em questão).

Dessa forma, como cada tipo de composto que envolve os canais do sensor faz com que a capacitância normalizada medida esteja situada em uma determinada faixa de valores, através da análise desses intervalos é possível programar o microcontrolador para identificar que tipo de substância se encontra presente em cada região sensora.

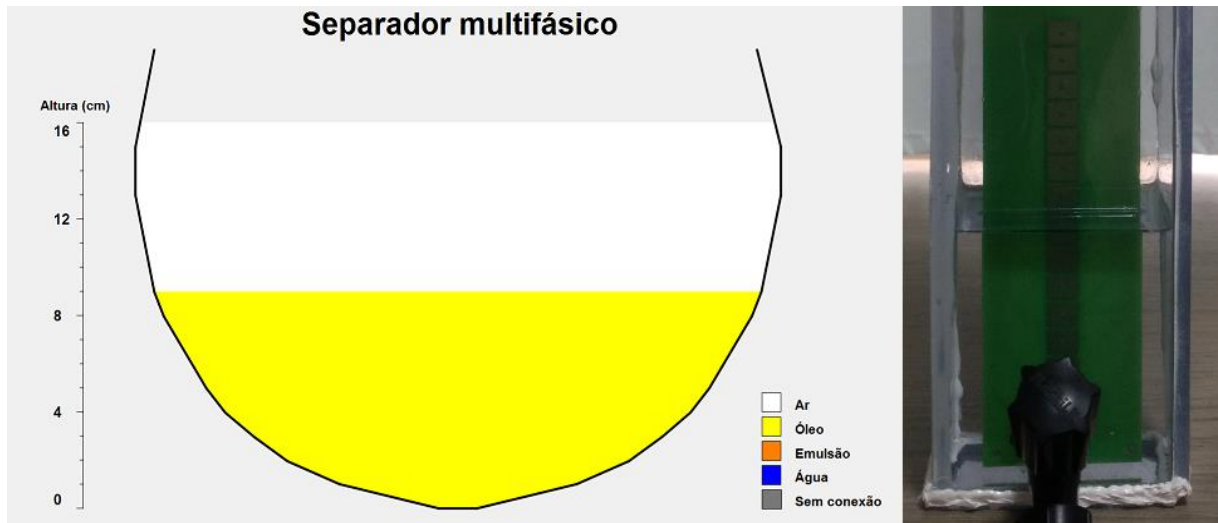
Em todo o processo de calibração feito com o sensor de nível, utilizou-se água da rede de saneamento e um óleo mineral transparente de densidade 0,838 g/mL (o mais utilizado nos experimentos realizados no separador da UTFPR).

3.5 Sensoriamento por imagem

Para se ter uma informação visual e mais intuitiva do monitoramento do sensor, foi desenvolvido uma aplicação no *software* supervisor Elipse E3, que por meio do

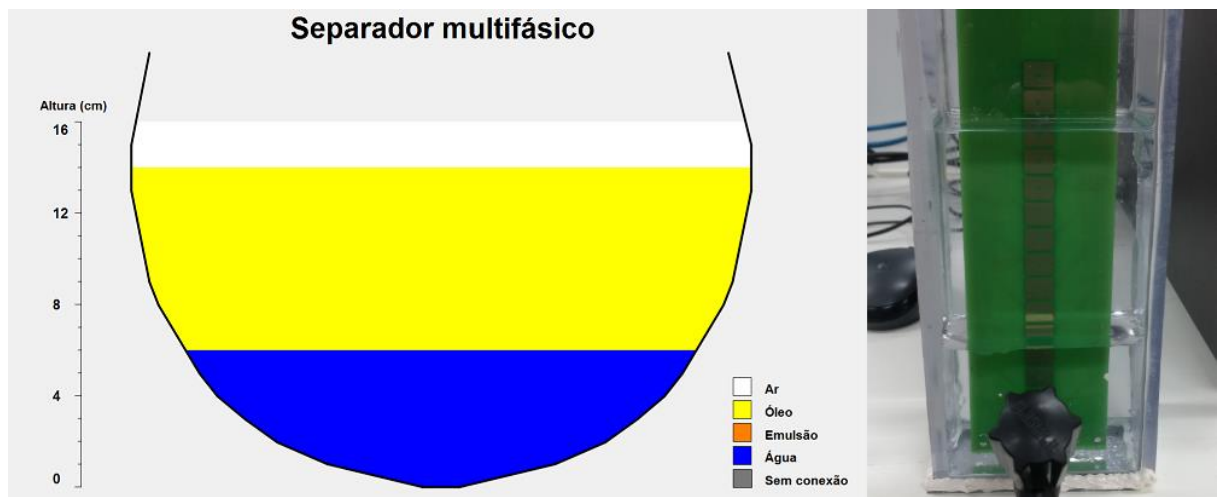
processamento de dados providos dos sensores FDC2214 e do microcontrolador Arduino Nano, mostra de maneira simples e em tempo real ao usuário os níveis dos diferentes fluidos presentes no reservatório, sendo cada uma dessas fases representada por uma cor diferente: ar-branco, óleo-amarelo, emulsão-laranja e água-azul. As imagens mostradas na sequência da Figura 3.18 a Figura 3.20 apresentam a informação visual de diferentes situações de monitoramento das interfaces entre fluidos pelo sensor de nível.

Figura 3.18 – Monitoramento do sensor de nível envolto em ar e óleo.



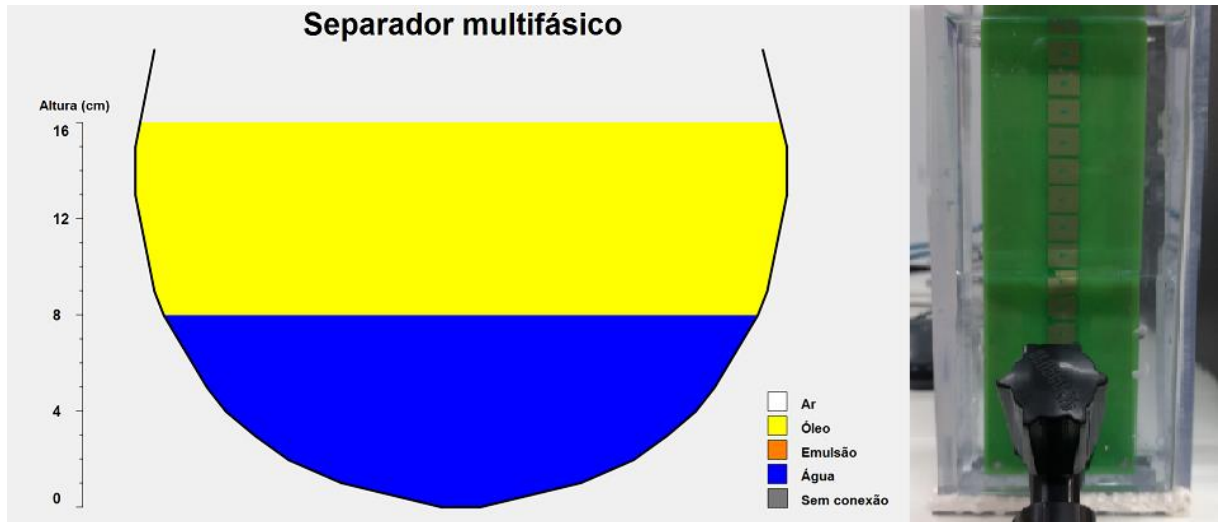
Fonte: Autoria própria.

Figura 3.19 – Monitoramento do sensor de nível envolto em ar, óleo e água.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.20 – Monitoramento do sensor de nível envolto em óleo e água.



Fonte: A autoria própria.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os experimentos, caracterizações e resultados preliminares da tecnologia capacitiva e indutiva com diferentes tipos de emulsões e substâncias puras. Esses mesmos testes com o sensor de nível final também são abordados nesta seção.

4.1 Resultados preliminares com protótipos capacitivo e indutivo

Neste subcapítulo são apresentados todos os testes e experimentos realizados com os circuitos capacitivo e indutivo a fim de se caracterizar de maneira mais precisa o comportamento que as diferentes fases presentes no processo de aplicação do sensor (separador gravitacional aplicado em misturas ar-água-óleo) têm do ponto de vista elétrico e como elas interagem com a eletrônica utilizada no sistema desenvolvido.

4.1.1 Experimentos com as substâncias padrão do separador

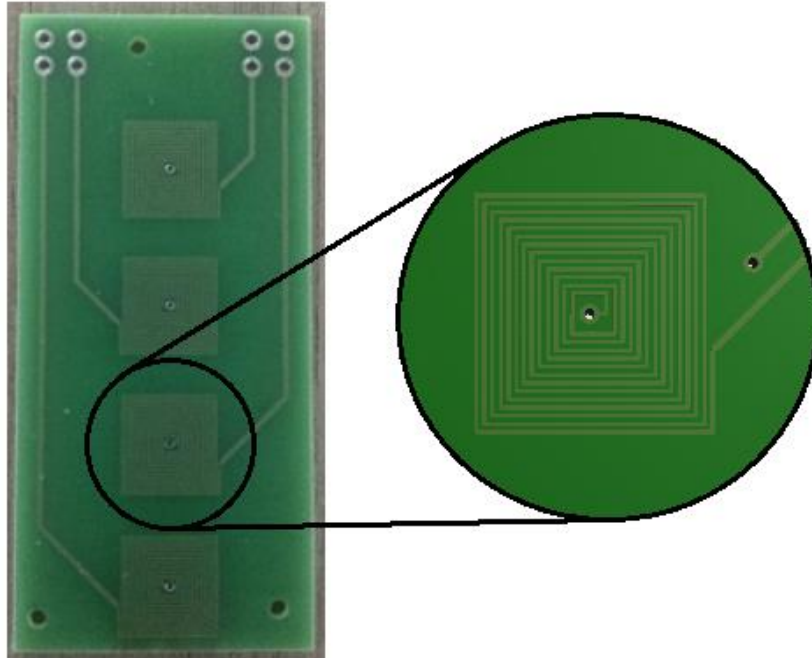
Para realizar os experimentos preliminares dos circuitos capacitivo (FDC2214) e indutivo (LDC1614) e caracterizá-los devidamente para o seu uso no sensor de nível final, foram desenvolvidos alguns protótipos de PCI específicos, nos quais foram utilizadas as mesmas geometrias propostas para o sensor de nível (especificadas no Capítulo 3). Assim é possível validar a capacidade do sistema em diferenciar as fases do separador gravitacional. A Figura 4.1 e Figura 4.2 ilustram as PCI com os capacitores e indutores, respectivamente.

Figura 4.1 – PCI capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.2 – PCI indutiva.



Fonte: Autoria própria.

Para a sua devida caracterização, as PCI desenvolvidas foram conectadas aos módulos de avaliação EVM mencionados no Capítulo 3, utilizando os seus próprios circuitos eletrônicos para a realização dos testes.

As medições de capacitância e indutância foram realizadas por meio da imersão dos eletrodos e bobinas das PCI nos diferentes fluidos presentes no processo de separação (ar, água, óleo e emulsão). Essas substâncias eram colocadas em um copo de vidro com graduação de volume de 250 mL.

As substâncias que foram utilizadas para estes experimentos foram: o ar do próprio ambiente, óleo Lubrax Tecno Semissintético SN 15W-40, água com diferentes concentrações de cloreto de sódio diluído, gerando diferentes valores de condutividade elétrica (medidos através do condutivímetro Digimed de modelo DM-3P) e emulsão entre salmoura (35 g de NaCl/L de H₂O) e o óleo Lubrax Tecno Semissintético SN 15W-40, para diferentes proporções entre seus volumes (%). As emulsões eram estáveis (permaneciam homogêneas por dias) e foram obtidas através da agitação da salmoura com o óleo (sem a adição de estabilizantes), utilizando a rotação do eixo de uma mini retífica (variando de 5000 a 35000 rpm). Os resultados de todas essas medidas podem ser vistos na Tabela 4.1 (os valores obtidos com as emulsões foram adquiridos com as misturas já prontas, e não durante o seu processo de homogeneização).

Tabela 4.1 – Medidas de capacitância e indutância obtidas de diferentes substâncias com os circuitos FDC2214 e LDC1614 em conjunto com as PCI desenvolvidas.

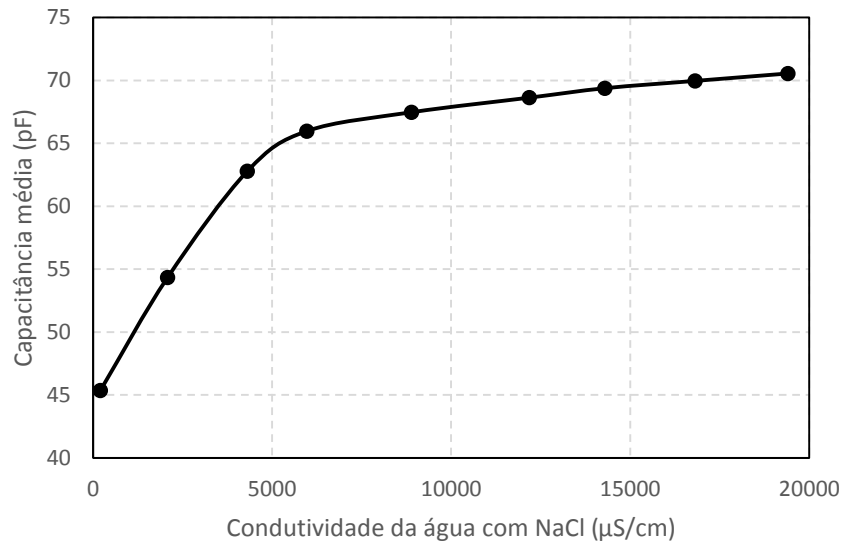
Substância	Capacitância média (pF)	Desvio padrão das capacitâncias (pF)	Indutância média (μH)	Desvio padrão das indutâncias (μH)
Ar	37,31	0,0069	1,219	0,00027
Óleo Lubrax Tecno Semissintético SN 15W-40	37,71	0,0055	1,227	0,00019
Água (202 μS/cm) - torneira	45,36	0,0129	1,249	0,00045
Água (2,08 mS/cm)	54,34	0,0137	1,286	0,00042
Água (4,31 mS/cm)	62,79	0,0117	1,313	0,00039
Água (5,97 mS/cm)	65,97	0,0132	1,328	0,00047
Água (8,90 mS/cm)	67,47	0,0124	1,343	0,00046
Água (12,19 mS/cm)	68,63	0,0202	1,356	0,00052
Água (14,30 mS/cm)	69,38	0,0196	1,362	0,00049
Água (16,82 mS/cm)	69,96	0,0211	1,366	0,00053
Água (19,41 mS/cm)	70,55	0,0208	1,370	0,00055
Água do mar ou salmoura (35g de NaCl/L de água)	71,91	0,0224	1,375	0,00061
Emulsão (12,5% salmoura + 87,5% óleo)	38,73	0,0061	1,230	0,00022
Emulsão (22,2% salmoura + 77,8% óleo)	38,91	0,0058	1,233	0,00033
Emulsão (30% salmoura + 70% óleo)	39,08	0,0064	1,236	0,00027
Emulsão (37,8% salmoura + 62,2% óleo)	39,42	0,0052	1,239	0,00025
Emulsão (50% salmoura + 50% óleo)	40,23	0,0069	1,246	0,00029
Emulsão (66,7% salmoura + 33,3% óleo)	42,62	0,0071	1,256	0,00041
Emulsão (75% salmoura + 25% óleo)	44,27	0,0083	1,259	0,00048

Fonte: Autoria própria.

Devido aos resultados da Tabela 4.1 representarem apenas testes preliminares para o levantamento das características e do comportamento dos circuitos de medição para diferentes compostos químicos, adotou-se o uso de uma população de 10 valores para os cálculos de média aritmética e desconsiderou-se o desvio padrão dessas grandezas durante a elaboração dos gráficos, uma vez que devido à sua pequena magnitude comparada aos valores de média, eles se tornariam praticamente invisíveis junto às curvas.

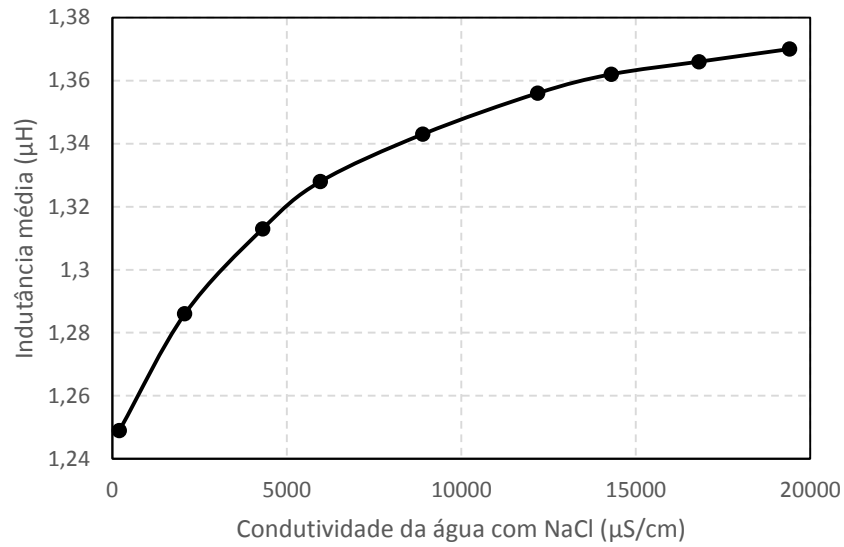
A partir dos dados contidos na Tabela 4.1, tem-se os gráficos mostrados na sequência da Figura 4.3 e Figura 4.6.

Figura 4.3 – Gráfico da capacitância média da PCI capacitiva considerando o incremento da condutividade da água pela inserção de cloreto de sódio.



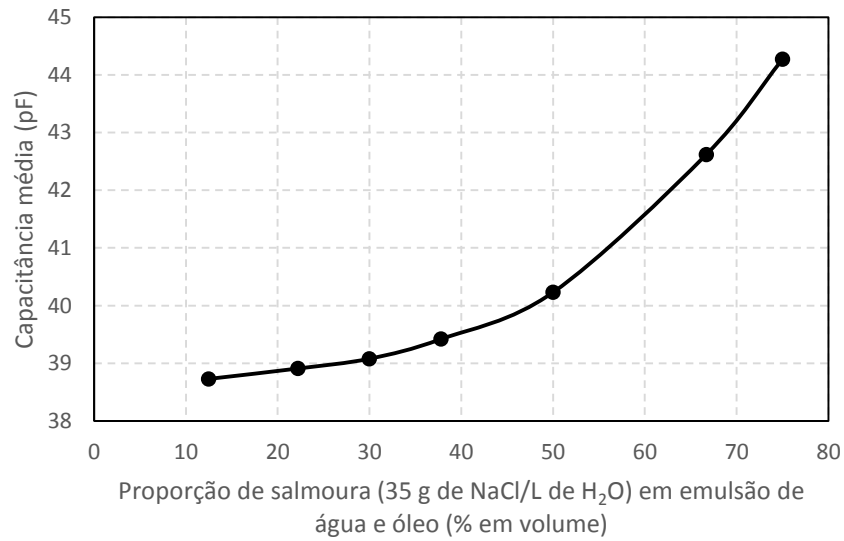
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.4 – Gráfico da indutância média da PCI indutiva considerando o incremento da condutividade da água pela inserção de cloreto de sódio.



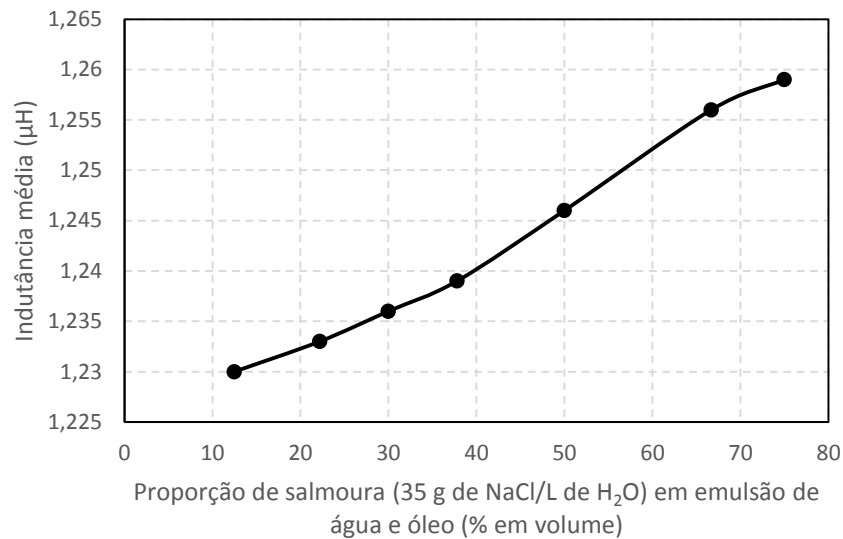
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.5 – Gráfico da capacitância média da PCI capacitiva em emulsões com diferentes proporções entre água e óleo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.6 – Gráfico da indutância média da PCI indutiva em emulsões com diferentes proporções entre água e óleo.



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, a PCI capacitiva foi testada com a parte metálica de seus eletrodos totalmente exposta, exatamente como mostra a Figura 4.1. Nessa configuração, para a água salina o sensor apresentou valores de capacitância totalmente incoerentes e dispersos entre si, mostrando claramente um comportamento de falha nas medições devido ao curto-circuito entre as placas. Dessa forma, optou-se por cobrir os eletrodos capacitivos com uma camada de material isolante (fenolite da PCI) e então realizar os experimentos cujos resultados são mostrados pela Tabela 4.1.

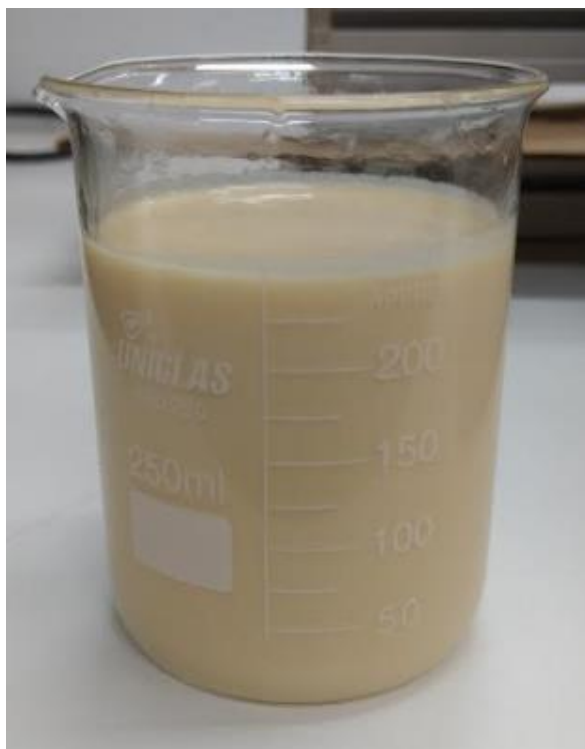
Os resultados obtidos permitem confirmar que a tecnologia capacitiva apresenta maiores variações nas medidas com a alteração da condutividade da solução do que o método indutivo, além de apresentar uma tendência de saturação dos valores com o incremento dessa grandeza (Figura 4.3), característica essa proveniente da susceptibilidade da técnica à curtos-circuitos (atenuada com a inserção de um isolante nos eletrodos, porém ainda presente).

Apesar dessas características, pode-se concluir que ambas as tecnologias são capazes de diferenciar o nível das diferentes fases no interior do separador de maneira satisfatória. Contudo, devido à proximidade entre as medidas de capacitância e indutância do ar e do óleo, podem haver falsas leituras na região dessa interface em específico, o que pode ser mitigado através de melhorias no *layout* da eletrônica e em seus algoritmos de tratamento de dados.

4.1.2 Experimentos específicos com emulsões

Nos testes com os protótipos capacitivos e indutivos, devido às altas rotações utilizadas para produzir as emulsões, todas elas foram estabilizadas como emulsões do tipo água em óleo, independente das proporções utilizadas. Isso se deve ao fato de que altas rotações são capazes de gerar gotas de água com diâmetros na ordem de microns, que por sua vez apresentam baixas tensões interfaciais entre si e por isso tendem a manter-se separadas umas das outras (característica que não ocorre em emulsões do tipo óleo em água), tornando a solução estável e homogênea por longos períodos de tempo (JURADO *et al.*, 2007), como de fato foi observado durante vários dias. A Figura 4.7 mostra uma emulsão do tipo água em óleo composta por 50 % de água da rede de saneamento e 50 % de óleo Lubrax Tecno Semissintético SN 15W-40.

Figura 4.7 – Emulsão do tipo W/O composta por 50% água e 50% óleo.

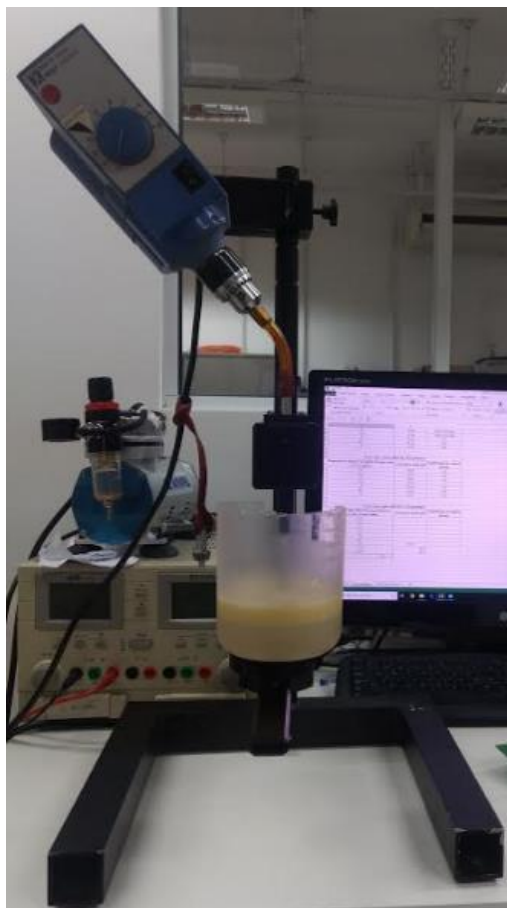


Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, a fim de se obter emulsões também do tipo óleo em água (O/W), utilizou-se uma rotação de 500 rpm para misturar as substâncias (água e óleo Lubrax Tecno Semissintético SN 15W-40) e gerar as emulsões.

Diferentemente das emulsões W/O, as emulsões O/W são mais instáveis do ponto de vista da homogeneidade da mistura, separando rapidamente as fases água e óleo após o término da rotação imposta. Portanto, na bancada utilizada para produzir essas emulsões, mediu-se os valores de capacitância dessas substâncias simultaneamente à rotação da mistura. A Figura 4.8 mostra a bancada utilizada para realizar as emulsões do tipo O/W.

Figura 4.8 – Misturador de baixa rotação utilizado para fazer as emulsões.



Fonte: Autoria própria.

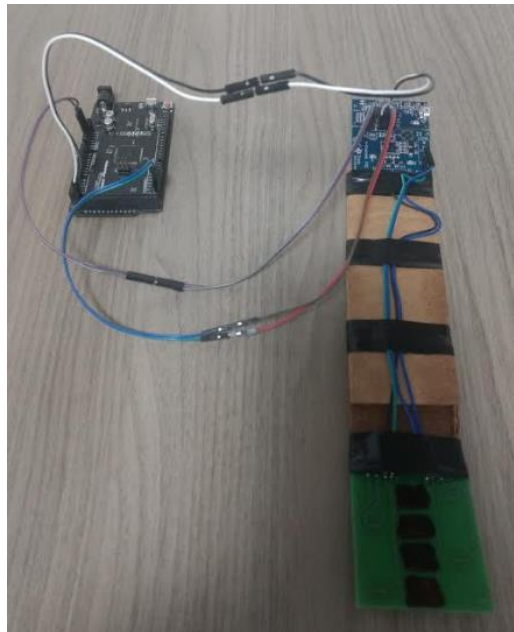
O *impeller* original da bancada utilizada é feito de alumínio, metal que distorce o campo elétrico do sensor capacitivo, alterando assim as suas leituras e medições. Portanto, foi desenvolvido um *impeller* feito em plástico e acrílico (Figura 4.9) com as mesmas dimensões e geometrias do dispositivo metálico. A haste sensora montada para realizar esses experimentos pode ser melhor visualizada na Figura 4.10.

Figura 4.9 – *Impeller* de plástico e acrílico utilizado para produzir as emulsões.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.10 – Haste sensora construída para os experimentos com emulsões.



Fonte: Autoria própria.

Essas emulsões produzidas a partir de uma baixa rotação foram geradas para diferentes proporções entre água e óleo, tanto para água vinda diretamente da rede de saneamento (condutividade elétrica de cerca de $200 \mu\text{S}/\text{cm}$), quanto para água com concentração de sal semelhante à do mar ($35 \text{ g de NaCl}/\text{L de H}_2\text{O}$). Para a produção desses compostos, utilizando sempre o recipiente da Figura 4.8, as medições iniciavam com uma mistura de volume total de

250 mL, composta por 12,5% de volume de água (da rede de saneamento ou salmoura) e, a partir disso, adicionava-se água à proporção calculada para obter as diferentes composições testadas, elevando-se a cada vez o nível da haste sensora à mesma posição relativa da mistura, a fim de não se produzir medidas falsas. Os resultados obtidos nesses experimentos podem ser vistos na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Medidas de capacitância média da haste sensora em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.

Proporção de água (200 μS/cm) em emulsão de água e óleo (% em volume)	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
12,50	38,22	0,0358
22,20	38,42	0,0169
30,00	38,55	0,0272
37,80	38,84	0,0573
50,00	39,35	0,0731
66,70	40,42	0,0441
75,00	40,53	0,0513
77,27	40,67	0,0431
79,16	41,28	0,0683
80,76	41,86	0,0356
82,13	42,34	0,0478
84,36	42,57	0,0568
86,09	43,15	0,0587
87,48	43,51	0,0614

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.3 – Medidas de capacitância média da haste sensora em emulsões com diferentes proporções de salmoura e óleo.

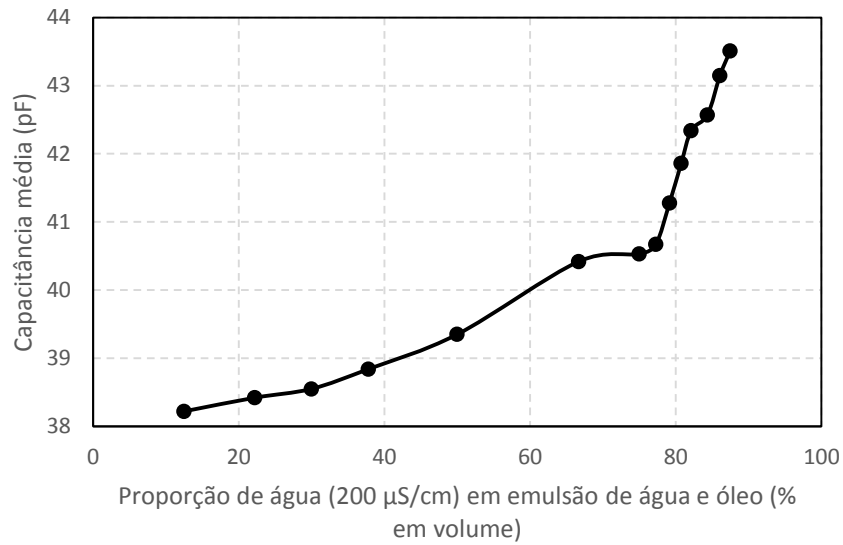
Proporção de salmoura em emulsão de água e óleo (% em volume)	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
12,50	38,51	0,0434
22,20	38,66	0,0551
30,00	38,89	0,0578
37,80	39,22	0,0867
50,00	40,13	0,0988
66,70	43,75	0,0712
75,00	44,33	0,0661
77,27	44,51	0,1034
79,16	47,81	0,0727
80,76	49,17	0,0892
82,13	50,83	0,0789
84,36	54,88	0,0881
86,09	56,89	0,0972
87,48	59,74	0,1031

Fonte: Autoria própria.

Devido aos resultados apresentados na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3 representarem apenas testes preliminares para o levantamento das características e do comportamento dos circuitos de medição para diferentes composições de emulsões, adotou-se o uso de uma população de 10 valores para os cálculos de média aritmética e desconsiderou-se o desvio padrão dessas grandezas durante a elaboração dos gráficos, uma vez que devido à sua pequena magnitude comparada aos valores de média, eles se tornariam praticamente invisíveis junto às curvas.

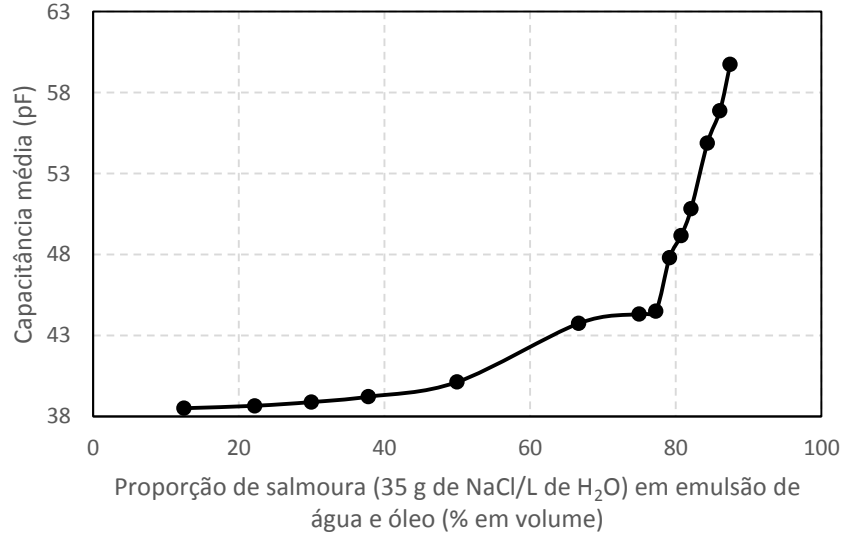
A partir dos dados contidos na Tabela 4.2 e Tabela 4.3, tem-se os gráficos mostrados na Figura 4.11 e na Figura 4.12, respectivamente.

Figura 4.11 – Gráfico da capacitância média da haste sensora em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.12 – Gráfico da capacitância média da haste sensora em emulsões com diferentes proporções de salmoura e óleo.



Fonte: Autoria própria.

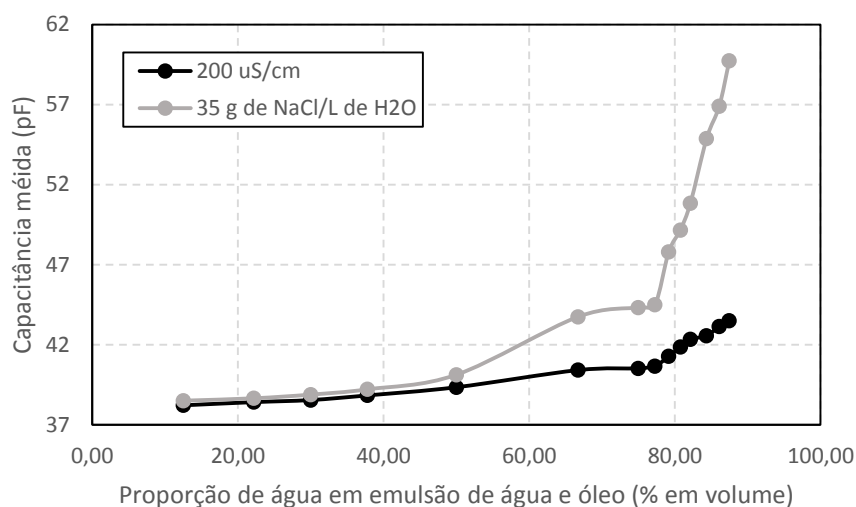
Com esses resultados, pode-se notar que para proporções maiores do que aproximadamente 79% de água na emulsão, a mistura passa ter uma mudança em sua linha tendência, aumentando significativamente a derivada da capacitância da haste sensora em relação à proporção de água no composto. Esse fenômeno foi acompanhado de uma

observação da estabilidade dessas emulsões. Para as combinações até cerca de 77% de volume de água, observou-se uma maior constância das emulsões, as quais demandavam vários minutos para que a separação entre as suas fases pudesse começar a ser vista a olho nú. Por outro lado, para as misturas com concentrações acima de 77% de volume de água, verificou-se que em cerca de poucos segundos as fases de água e óleo podiam ser claramente diferenciadas visualmente.

Em separadores industriais, as emulsões podem ter diferentes concentrações de substâncias e podem ser tanto O/W como W/O. Vários fatores são responsáveis por suas características físico-químicas, como o tipo do óleo, a composição da água, a forma como se dá o dinamismo e o atrito entre seus componentes para a sua formação, a temperatura e pressão do reservatório, entre outros (Almeida 2014).

Além do mais, como mostra a Figura 4.13 (união dos dados da Figura 4.11 e da Figura 4.12), observou-se que à direita do ponto de mudança de tendência, o experimento com água salgada apresenta valores de capacitância medidos significativamente maiores do que os obtidos com as emulsões contendo água de torneira, fenômeno que não ocorre do lado esquerdo desses pontos, região na qual as diferenças entre as leituras são visivelmente menores (começam a se tornar mais significativas a partir de emulsões com 50% de água, porém com misturas ainda estáveis, indicando ser do tipo W/O). Isso ajuda a corroborar que de fato há a formação de emulsão do tipo óleo em água para as misturas com cerca de 79% ou mais de água em sua composição.

Figura 4.13 – Gráfico da capacitância média da haste sensora em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo e salmoura e óleo.



Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Experimentos com substâncias puras

Com o objetivo de se conhecer de maneira mais ampla a resposta dos circuitos FDC2214 e LDC1614 para diferentes compostos, neste experimento as PCI capacitiva e indutiva foram utilizadas para adquirir dados de substâncias puras, cujas permissividades elétricas relativas são previamente conhecidas (DA SILVA, 2008).

Essas substâncias, com seus respectivos valores médios de capacitância e indutância, são mostradas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Medidas de capacitância e indutância dos circuitos FDC2214 e LDC1614 em conjunto com as PCI desenvolvidas em substâncias com valores de permissividade elétrica conhecidos (DA SILVA, 2008).

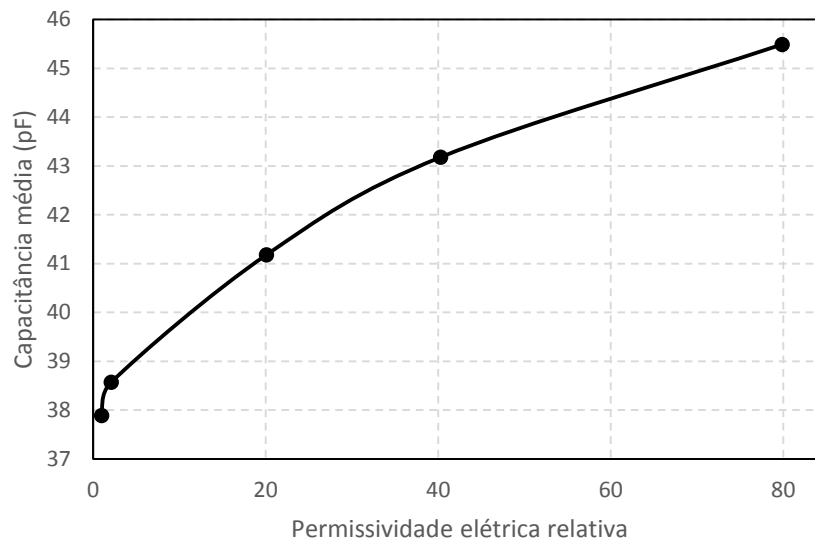
Substância	Permissividade elétrica relativa (ϵ_r) - (DA SILVA, 2008)	Capacitância média (pF)	Desvio padrão das capacitâncias (pF)	Indutância média (μH)	Desvio padrão das indutâncias (μH)
Ar	1	37,89	0,0063	1,203	0,00022
Óleo Lubrax Tecno Semissintético SN 15W-40	2,1	38,57	0,0051	1,212	0,00018
Isopropanol	20,1	41,18	0,0023	1,224	0,00007
Etileno Glicol	40,3	43,18	0,0151	1,235	0,00053
Água deionizada	79,9	45,49	0,0192	1,239	0,00061

Fonte: Autoria própria.

Devido aos resultados apresentados na Tabela 4.4 representarem apenas testes preliminares para o levantamento das características e do comportamento dos circuitos de medição para diferentes compostos químicos, adotou-se o uso de uma população de 10 valores para os cálculos de média aritmética e desconsiderou-se o desvio padrão dessas grandezas durante a elaboração dos gráficos, uma vez que devido à sua pequena magnitude comparada aos valores de média, eles se tornariam praticamente invisíveis junto às curvas.

A Figura 4.14 mostra o gráfico com os dados das capacitâncias médias contidas na Tabela 4.4.

Figura 4.14 – Gráfico da capacitância média da PCI capacitiva para substâncias com permissividades elétricas conhecidas.



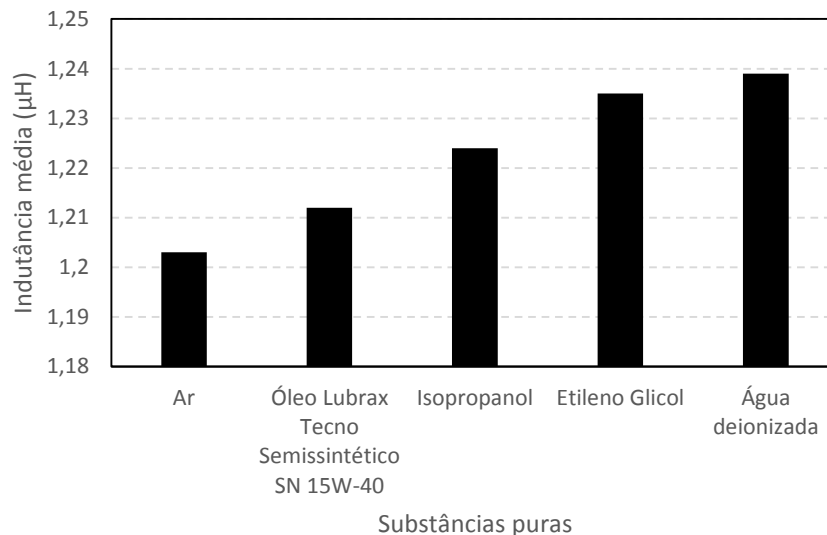
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Equação (2.1), para um capacitor cuja a área das placas e a distância entre elas sejam valores fixos, sua capacitância é diretamente proporcional ao valor da permissividade elétrica (absoluta ou relativa) do meio que o envolve. Nota-se que a curva mostrada pela Figura 4.14 apresenta características de linearidade, porém não como uma reta matemática, como deveria ser em teoria. Isso se deve a um conjunto de fatores combinados: os valores de permissividade elétrica de cada uma das cinco substâncias utilizadas serem aproximados e terem sido estimados para cada composto, a existência de valores fixos de capacitâncias entre as trilhas da PCI (originadas pelo seu *layout* e *design*) e o fato de as trilhas da PCI ficarem parcialmente submersas nos fluidos durante os testes (enquanto uma parte

continua envolta por ar ambiente). Apesar disso, é possível perceber a coerência dessas informações com dados e conceitos teóricos da literatura.

A Figura 4.15 mostra o gráfico com os dados das indutâncias médias contidas na Tabela 4.4.

Figura 4.15 – Gráfico da indutância média da PCI indutiva para substâncias puras.



Fonte: Autoria própria.

Para valores de indutância, o valor da permissividade elétrica da substância que envolve a bobina não tem um significado tão importante quanto a sua permeabilidade magnética (absoluta ou relativa). Em teoria, de acordo com a Equação (2.3), caso a bobina utilizada nesses experimentos estivesse completamente envolta nas substâncias testadas, a sua indutância no ar deveria ser maior do que quando imersa em água, uma vez que a água, por ser um composto com características diamagnéticas, possui uma permeabilidade magnética relativa (μ_r) ligeiramente menor que a do ar, que é um meio paramagnético. Contudo, conforme ilustrado na Figura 4.2, os indutores planares desenvolvidos estão dispostos em uma PCI e portanto envoltos apenas parcialmente nos diferentes meios utilizados (sem a presença dos fluídos entre seus enrolamentos e na face fixada à placa), fazendo com que as características teóricas esperadas não se apliquem totalmente à sua estrutura. Foi possível também notar um aumento da indutância lida pelo circuito à medida que as condutividades elétricas das substâncias também se elevam.

Com relação à precisão e estabilidade dos circuitos, os experimentos realizados mostraram que as medidas dos sensores FDC2214 e LDC1614 apresentam uma oscilação apenas nos 12 bits menos significativos de um total de 28. Para a faixa de medição de frequências do FDC2214 (10 kHz a 10MHz), considerando a magnitude das capacitâncias dos eletrodos medidas nos experimentos e os indutores externos de 18 μ F (o que gera frequências de ressonância no arranjo LC da ordem de 4 a 6 MHz), essa oscilação é de cerca de 10^{-3} pF. Para o LDC1614 (1 kHz a 10MHz), considerando a magnitude das indutâncias das bobinas planares medidas nos experimentos e os capacitores externos de 330 pF (o que gera frequências de ressonância no arranjo LC da ordem de 7 a 8 MHz), essa oscilação é da ordem de 10^{-4} μ F. Esses valores se mostram coerentes com os desvios padrão obtidos durante os experimentos, principalmente nos testes envolvendo substâncias puras, em que os compostos possuem alto grau de homogeneidade e estão estáticos.

Quanto a eficiência da tecnologia indutiva investigada, de posse de todas as informações apresentadas até aqui, fica evidente a sua complementaridade à técnica capacitiva no processo de identificação das diferentes fases no separador. Enquanto o método capacitivo apresenta a característica de possuir uma maior variação dos valores para as diferentes substâncias testadas, permitindo assim uma melhor identificação dos compostos, o circuito indutivo apresenta uma melhor confiabilidade e menor saturação para fases de condutividades elétricas mais elevadas, como a água salgada e algumas emulsões, o que torna o uso da tecnologia híbrida um campo promissor para a aplicação de separação. Apesar disso, optou-se por não utilizá-la na construção do protótipo final do sensor de nível, uma vez que para uma aplicação não envolvendo fluidos de alta condutividade, ela traria uma maior complexidade ao circuito sem apresentar melhoras significativas no processo de identificação de fases.

4.2 Resultados do protótipo final do sensor de nível multicanal

Nesta seção serão detalhados os experimentos do sensor de nível desenvolvido com diferentes tipos de emulsões e substâncias puras, assim como a sua aplicação para o

imageamento das diferentes fases utilizadas. Todos os testes apresentados nessa seção utilizam o óleo mineral transparente mencionado na seção 3.4.

4.2.1 Experimentos específicos com emulsões

Para a realização desse experimento, diferentes concentrações de água e de óleo foram agitadas em forma de rotação a uma velocidade de 500 rpm para garantir a sua homogeneidade, sendo as medições com o sensor feitas simultaneamente a isso, como mostra a Figura 4.16.

Figura 4.16 – Misturador produzindo emulsões simultaneamente à medição do sensor de nível.



Fonte: Autoria própria.

Como a alteração do nível da mistura influencia no valor da capacitância medida em cada canal do sensor, com ele fixo ao misturador, o mesmo recipiente (Figura 4.16) e o mesmo volume de emulsão (500 mL) foram adotados para todos os testes. Desse modo, para garantir a correta proporção entre a água e o óleo em cada um dos procedimentos, a cada nova medição descartava-se a emulsão utilizada e uma nova era produzida. Com isso, a fim de se obter o comportamento característico das capacitâncias dos eletrodos do sensor para esses diferentes tipos de emulsão, foram traçadas as curvas do seu 14º e 15º capacitor para essas misturas. Nesta contagem considera-se o 1º capacitor o que está geometricamente mais próximo do circuito dos FDC2214 e o 16º capacitor o que está mais longe dele. Os resultados de todas essas medidas podem ser vistos na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 – Valores de média e desvio padrão das capacitâncias do 14º eletrodo do sensor de nível em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.

Proporção de água (200 µS/cm) em emulsão de água e óleo (% em volume)	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
12,50	45,13	0,4568
22,20	45,21	0,1369
30,00	45,34	0,1276
37,80	45,65	0,2487
50,00	47,11	0,0774
66,70	50,16	0,0930
75,00	50,88	0,0541
77,27	50,97	0,1434
79,16	51,04	0,0782
80,76	51,16	0,0439
82,13	51,22	0,0412
84,36	51,30	0,1004
86,09	51,34	0,1863
87,48	51,34	0,1733

Fonte: Autoria própria.

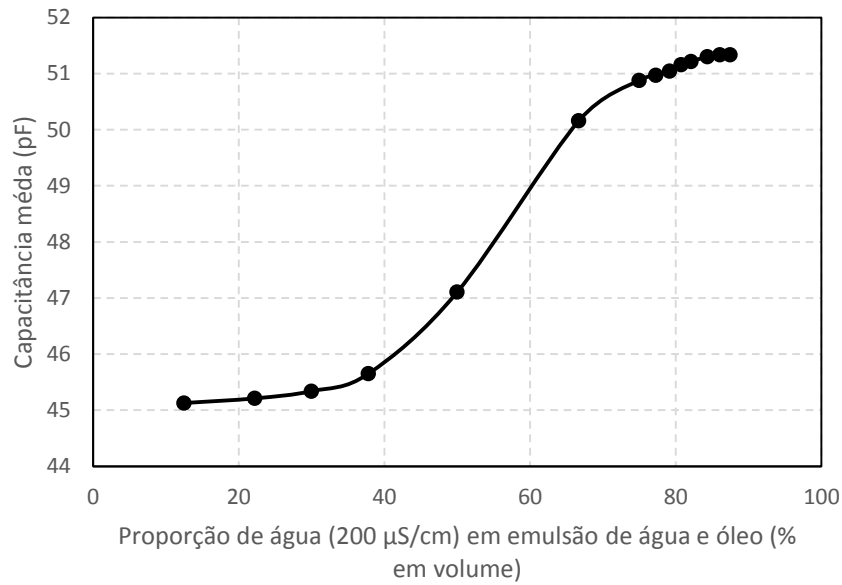
Tabela 4.6 – Valores de média e desvio padrão das capacitâncias do 15º eletrodo do sensor de nível em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.

Proporção de água (200 μS/cm) em emulsão de água e óleo (% em volume)	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
12,50	45,07	0,1702
22,20	45,17	0,3760
30,00	45,31	0,1967
37,80	45,83	0,2716
50,00	47,37	0,4065
66,70	49,31	0,1049
75,00	49,71	0,2017
77,27	49,80	0,2528
79,16	49,88	0,0835
80,76	49,93	0,1450
82,13	49,97	0,2390
84,36	50,01	0,1082
86,09	50,03	0,1842
87,48	50,03	0,2156

Fonte: Autoria própria.

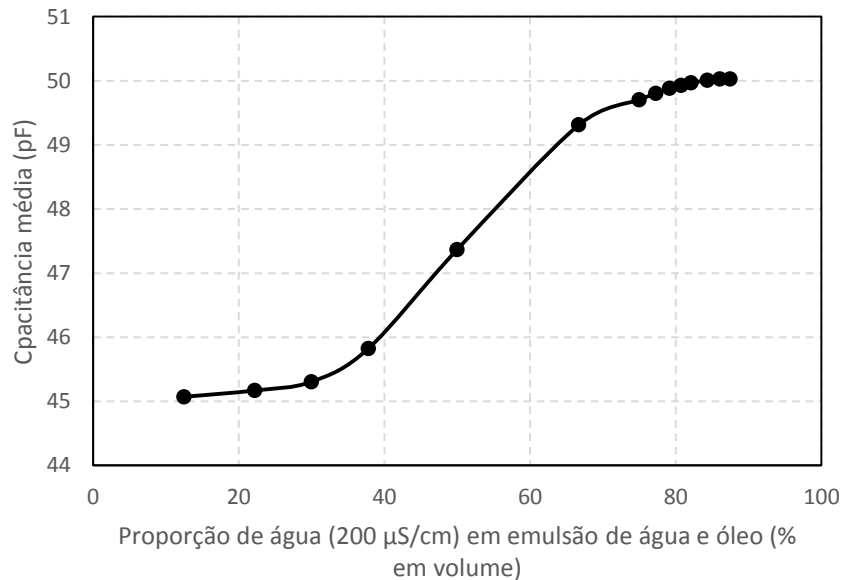
Devido ao óleo utilizado para a produção das emulsões da Tabela 4.5 e da Tabela 4.6 interagir com a água gerando uma mistura de baixa viscosidade (alta movimentação do fluido nos capacitores) e pouca homogeneidade química, os valores de capacitância obtidos em todos esses experimentos variavam a partir da primeira casa decimal de uma leitura para outra, o que gerou a necessidade do cálculo da média aritmética e do desvio padrão dessas grandezas durante a aquisição dos dados. Para isso, foram coletados dados de capacitância durante cerca de três minutos dos canais 14 e 15 do sensor para cada proporção de composição das emulsões. Essa coleta resultou em 1000 aquisições de dados para cada um dos dois canais em cada uma das 14 emulsões testadas, gerando um total de 28000 valores adquiridos. A partir então dessas informações, foram calculados os valores de capacitância média e desvio padrão presentes na Tabela 4.5 e na Tabela 4.6, gerando os gráficos da Figura 4.17 e da Figura 4.18, respectivamente.

Figura 4.17 – Gráfico da capacitância média do 14º eletrodo do sensor de nível em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.18 – Gráfico da capacitância média do 15º eletrodo do sensor de nível em emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.



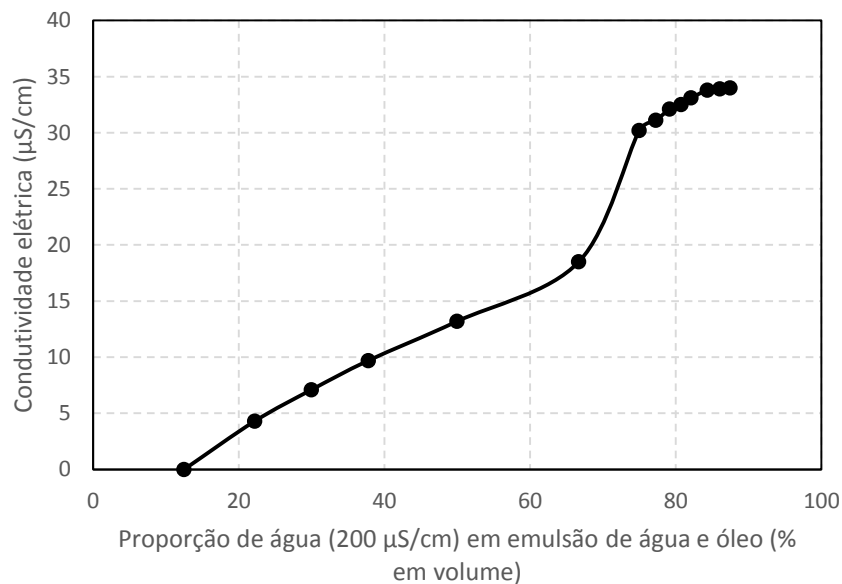
Fonte: Autoria própria.

A partir dessas linhas de tendência percebe-se que emulsões com proporções de água menores do que 50% em volume apresentam os menores valores de capacitância do conjunto de dados e com desvio padrão amostral médio (entre os gráficos da Figura 4.17 e da Figura

4.18) de 0,2823, significativamente menor do que o desvio padrão populacional médio das duas curvas, de 2,3289. O mesmo ocorre com as emulsões com concentrações de água maiores do que 50% em volume, as quais apresentam os maiores valores de capacitância do conjunto de dados e com desvio padrão amostral médio de 0,3, também significativamente menor do que o desvio padrão populacional médio de todo o experimento (2,3289). Essa análise permite identificar a mistura de composição 50% água e 50% óleo como sendo o ponto de inversão entre emulsões. Para concentrações menores do que 50% de água, as emulsões são do tipo W/O, enquanto para proporções maiores do que essa, são do tipo O/W.

Como a medição da condutividade elétrica em emulsões, além de outras técnicas, é uma das maneiras mais assertivas de se afirmar se uma mistura é de fato do tipo W/O ou O/W, através do uso do condutivímetro AKSO foram medidas as condutividades elétricas de cada umas das emulsões produzidas, obtendo-se os resultados mostrados no gráfico da Figura 4.19.

Figura 4.19 – Gráfico da condutividade elétrica de emulsões com diferentes proporções de água da rede de saneamento e óleo.



Fonte: Autoria própria.

Comparando-se os gráficos da Figura 4.17 e da Figura 4.18 com o gráfico apresentado pela Figura 4.19 percebe-se que na região contendo emulsões com concentração de água entre 50 e 75% ocorrem mudanças de tendência tanto nas curvas de capacitância das placas do sensor como na curva da condutividade elétrica da mistura testada. Esse fato ajuda a

confirmar as observações e conclusões feitas anteriormente a respeito do ponto de inversão das emulsões e suas respectivas classificações quanto à organização física de seus componentes (W/O e O/W).

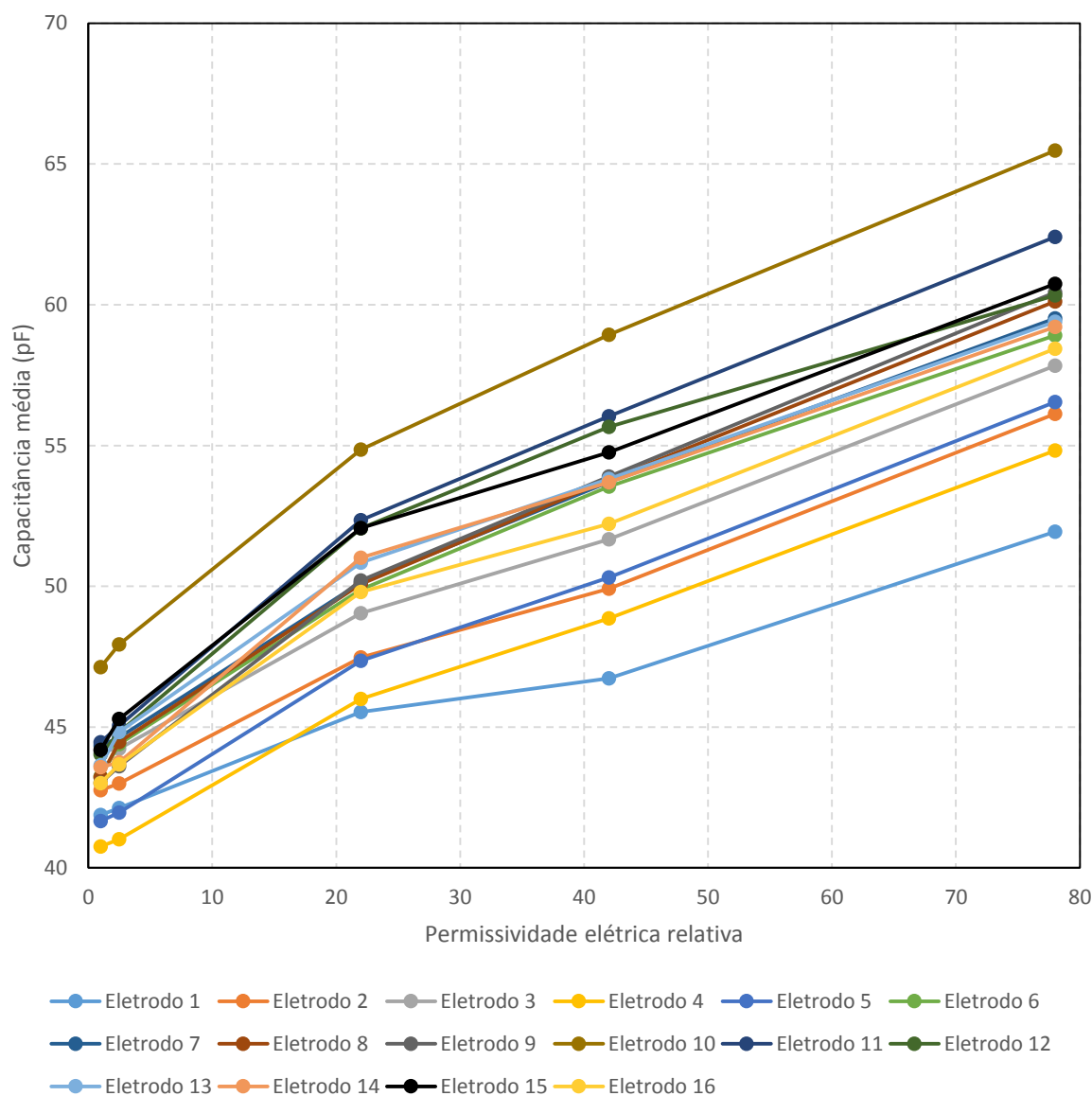
Durante os testes com essas emulsões, verificou-se também que a maneira com que as suas concentrações são geradas não influencia na condutividade elétrica. Ou seja, independentemente se para cada composição de emulsão adota-se água e óleo novos, ou inicia-se com alta concentração de óleo e adiciona-se água aos poucos ou vice-versa, a curva de condutividade mostrada na Figura 4.19 não apresenta alterações significativas em sua forma. Isso se deve ao tipo de óleo utilizado nessas misturas, que apresenta pouca interatividade físico-química com a água.

4.2.2 Experimentos com substâncias puras

A fim de se caracterizar o comportamento do circuito de medição de capacitância do sensor de nível e obter esses valores em função da permissividade elétrica do meio, foi realizado o experimento de imersão simultânea dos seus 16 eletrodos em diferentes substâncias (ar ambiente, óleo mineral transparente, isopropanol, etileno glicol e água deionizada – utilizando o reservatório da Figura 3.17), as quais se conhecia previamente e com aproximação o valor da permissividade elétrica relativa (Tabela 4.4). A Tabela A-1, no Apêndice, mostra todos esses resultados.

Como neste experimento as substâncias não foram agitadas durante as medições e também possuíam alta homogeneidade química, os valores de capacitância média e desvio padrão foram calculados utilizando-se um conjunto de 30 amostras para cada um dos cinco valores de capacitância de cada um dos 16 canais de medição do sensor, totalizando um universo geral de 2400 leituras realizadas. O gráfico da Figura 4.20 mostra todos esses resultados reunidos.

Figura 4.20 – Gráfico da capacitância de todos os eletrodos do sensor de nível para substâncias com diferentes permissividades elétricas relativas.



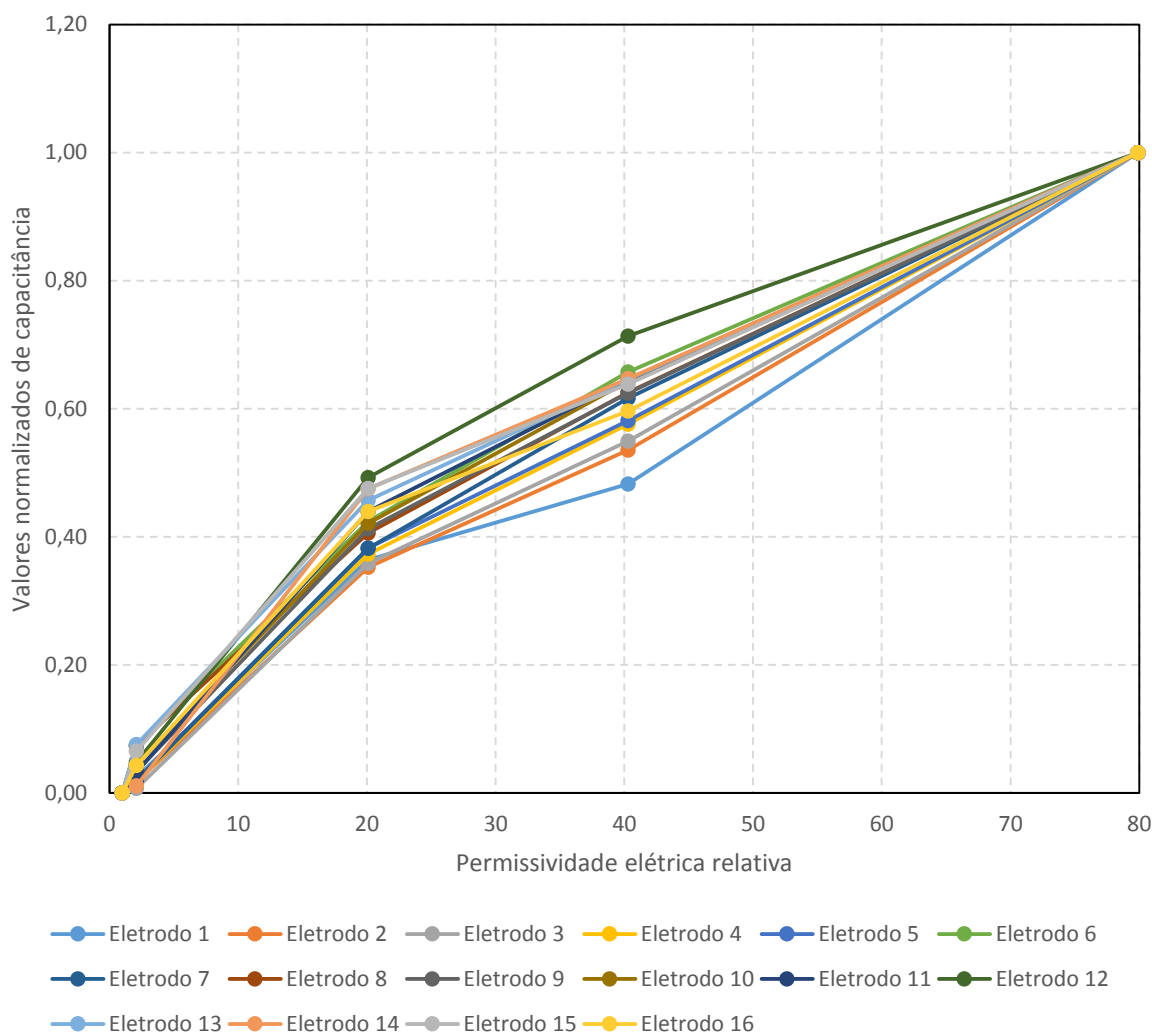
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Equação (2.1), a curva da capacitância de um capacitor em função da permissividade elétrica relativa do meio que o envolve deve ser uma reta matematicamente perfeita. Contudo, observando-se a Figura 4.20 nota-se que as curvas de cada capacitor do sensor não formam retas teóricas. Primeiramente, isso pode ser explicado pelo fato de que as permissividades elétricas relativas de cada uma das substâncias testadas foram estimadas segundo dados tabelados e previamente conhecidos, não tendo sido medidas efetivamente (devido à falta de equipamentos para isso). Segundo, em razão da fórmula mostrada na Equação (2.1) só ser totalmente válida para capacitores que estejam em um espaço infinito,

sem a presença de outros capacitores em suas proximidades e conseqüentemente sem a influência mútua entre seus campos elétricos gerados, o que não ocorre no sensor de nível. Terceiro, em razão de que, novamente, a fórmula mostrada na Equação (2.1) só é totalmente válida para capacitores que sejam constituídos por duas placas paralelas completamente envoltas em um mesmo meio material, outra configuração que o sensor não possui.

A Figura 4.21 mostra os mesmos dados da Figura 4.20, porém normalizados a partir dos valores médios de capacitância do ar e da água de cada um dos eletrodos, presentes na Tabela A-1. Essa normalização é executada para cada um dos 16 capacitores do sensor de nível, a partir da Equação (3.3).

Figura 4.21 – Gráfico da capacitância normalizada de todos os eletrodos do sensor de haste para substâncias com diferentes permissividades elétricas relativas.



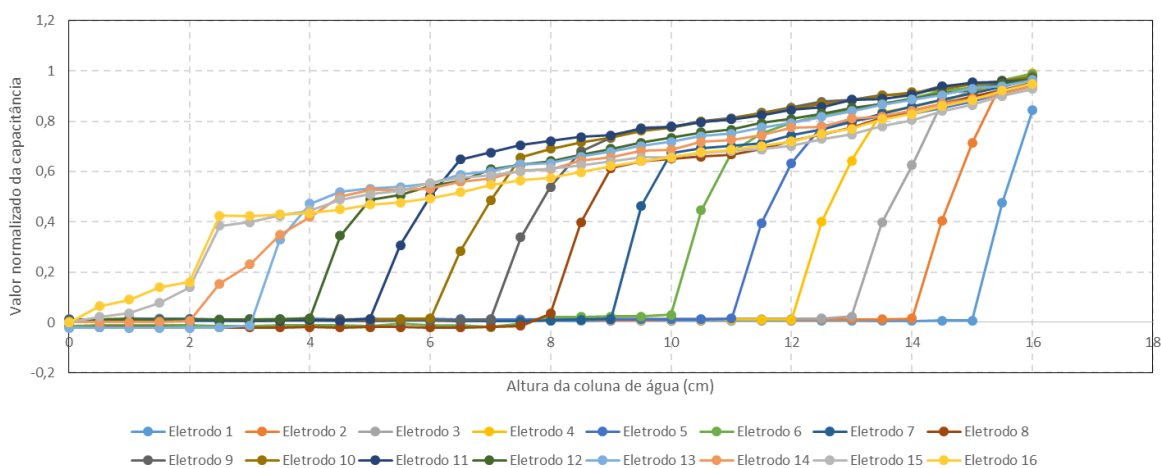
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.20 nota-se diferenças significativas nas medidas de capacitância de cada um dos eletrodos, resultado de suas diferentes disposições e *designs* na estrutura desenvolvida. A partir da normalização desses dados (Figura 4.21), foi possível obter uma aproximação considerável entre esses valores, situando suas curvas em uma faixa mais estreita de variação (melhor visualizada nos experimentos subsequentes deste capítulo), o que possibilitou a realização de uma calibração dos 16 eletrodos a partir das mesmas faixas de capacitâncias normalizadas, ao invés de uma calibração individual para cada um deles. Isso tornou o seu código de controle mais confiável e menos complexo.

4.2.3 Experimento de altura de coluna de fluidos

Com a finalidade de observar o comportamento e as medidas do sensor de nível para diferentes profundidades das interfaces em sua região sensora, foram realizadas medições da capacitância de cada um dos 16 eletrodos do dispositivo para diferentes profundidades de água e óleo mineral transparente (utilizando o reservatório apresentado na Figura 3.17), iniciando-se com o sensor completamente submerso nesses fluidos (altura da coluna de 16 cm), e baixando-se essa profundidade de 0,5 em 0,5 cm. O gráfico da Figura 4.22 ilustra esse experimento (com valores normalizados de capacitância – Equação (3.3)) realizado com a água da rede de saneamento.

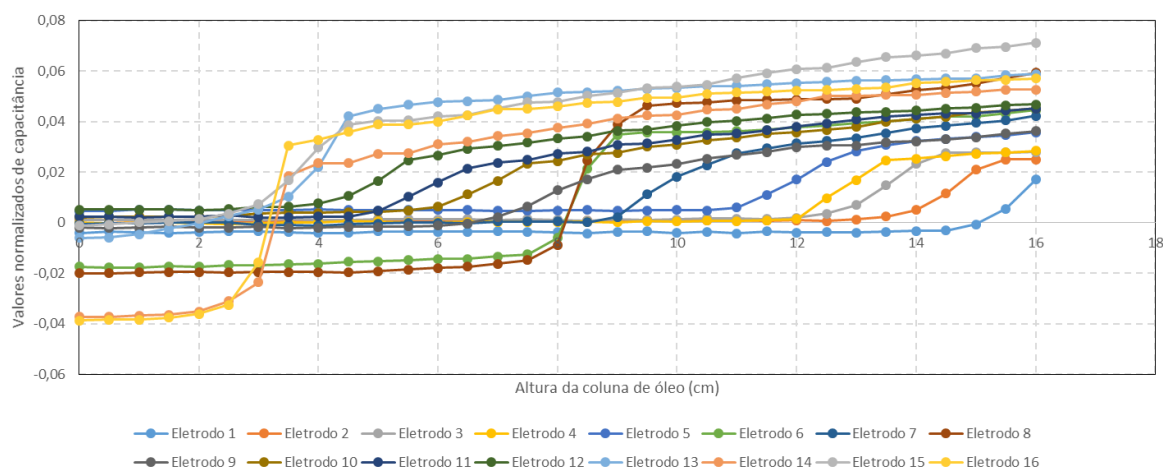
Figura 4.22 – Gráfico das capacitâncias normalizadas do sensor de nível em função da altura da coluna de água.



Fonte: Autoria própria.

Para o experimento com óleo, foram adotados exatamente os mesmos procedimentos anteriormente descritos para a água. O gráfico da Figura 4.23 mostra os resultados obtidos para esse teste (com valores normalizados de capacitância – Equação (3.3)).

Figura 4.23 – Gráfico das capacitâncias normalizadas do sensor de nível em função da altura da coluna de óleo.



Fonte: Autoria própria.

Através desses experimentos é possível notar que o sensor de nível é capaz de diferenciar de maneira satisfatória o tipo de substância presente em seus eletrodos, uma vez que tanto para o óleo como para a água apresenta regiões de transição entre essas fases bem definidas (ainda assim com melhor definição para a água).

4.2.4 Experimento dinâmico de identificação de substâncias

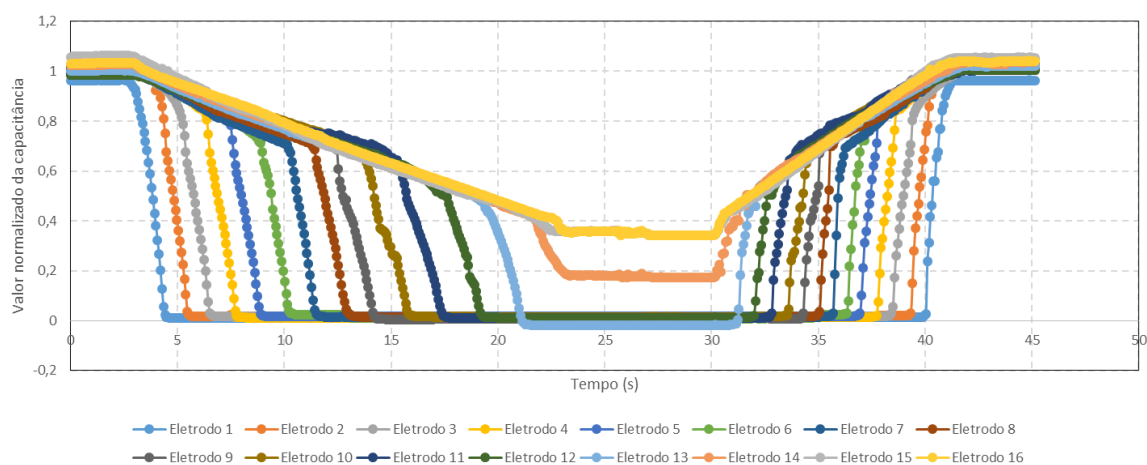
Nas seções 4.2.2 e 4.2.3 foram mostrados os resultados estáticos de monitoramento dos dados lidos pelo sensor de nível para diferentes substâncias testadas. Essas informações permitem que se conheça o grau de acurácia do dispositivo para a identificação dos diferentes compostos que se fazem presente em processos de separação de petróleo *onshore* e *offshore*. Contudo, para que se identifique a resposta do sensor em processos dinâmicos de movimentação dos fluidos, faz-se necessário um monitoramento temporal de todo o sistema durante as variações de nível das diferentes interfaces.

Com base nisso, assim como na seção 4.2.3, para a realização deste experimento foi feita uma normalização (Equação (3.3)) dos valores de capacitância medidos em cada canal, levando em conta, para isso, os seus valores médios obtidos para cada eletrodo nas

substâncias que apresentam os menores e maiores valores da grandeza, o ar e a água respectivamente.

A partir disso, foram realizadas alterações nos níveis de diferentes combinações de substâncias juntamente com o monitoramento deste processo, possibilitando assim a identificação em tempo real do tipo de fluido presente em cada um dos 16 eletrodos do sensor. A Figura 4.24 mostra os resultados obtidos no teste dinâmico realizado entre ar e água, iniciando-se com todos os capacitores do sensor envoltos em água (utilizando o mesmo reservatório apresentado na Figura 3.17), depois a drenagem do líquido até que apenas os dois últimos canais estivessem imersos no fluido (não era possível drenar completamente o reservatório devido à torneira presente em sua região inferior, cujo nível de dreno estava logo acima do 15º canal) e, por fim, a reinsertão de água no reservatório de modo que o seu nível voltasse ao estado inicial do experimento.

Figura 4.24 – Gráfico das capacitâncias normalizadas do sensor de nível durante o experimento dinâmico entre ar e água.

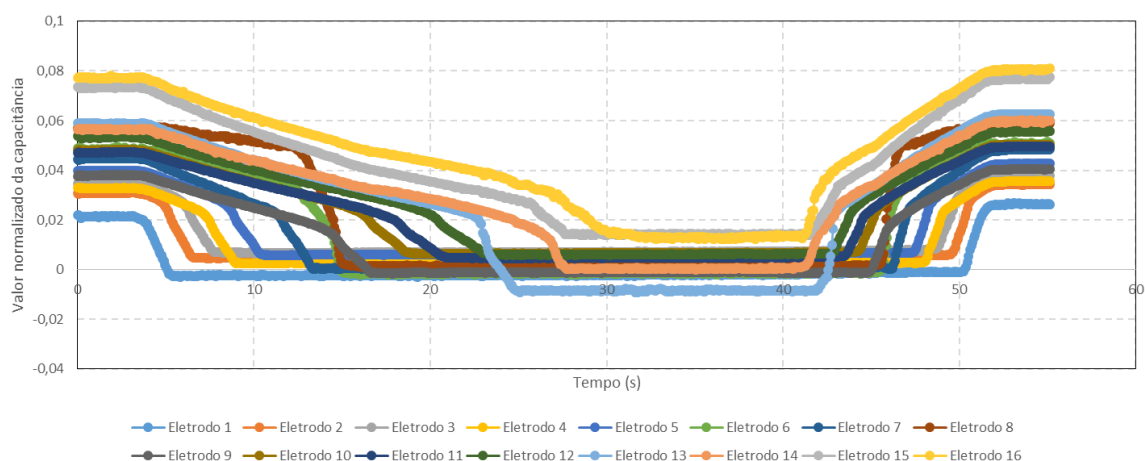


Fonte: Autoria própria.

Através da análise das curvas da Figura 4.24, nota-se que neste experimento, durante a transição dos eletrodos do sensor da água para o ar, há uma relativa linearidade tanto no decaimento quanto no crescimento das capacitâncias medidas, sendo as regiões de transição bem definidas e próximas à função degrau. Como cada uma das medidas adquiridas levam em torno de 70 milissegundos para serem registradas, processadas e apresentadas pelo *software*, o sensor se mostra plenamente aceitável para uma aplicação envolvendo um tanque separador real, uma vez que nele a dinâmica de movimentação de fluidos é lenta quando comparada com essa eletrônica.

A Figura 4.25 mostra os resultados do teste dinâmico realizado entre ar e óleo mineral transparente, seguindo a mesma metodologia e o mesmo procedimento adotado no teste envolvendo apenas ar e água.

Figura 4.25 – Gráfico das capacitâncias normalizadas do sensor de nível durante o experimento dinâmico entre ar e óleo.



Fonte: Autoria própria.

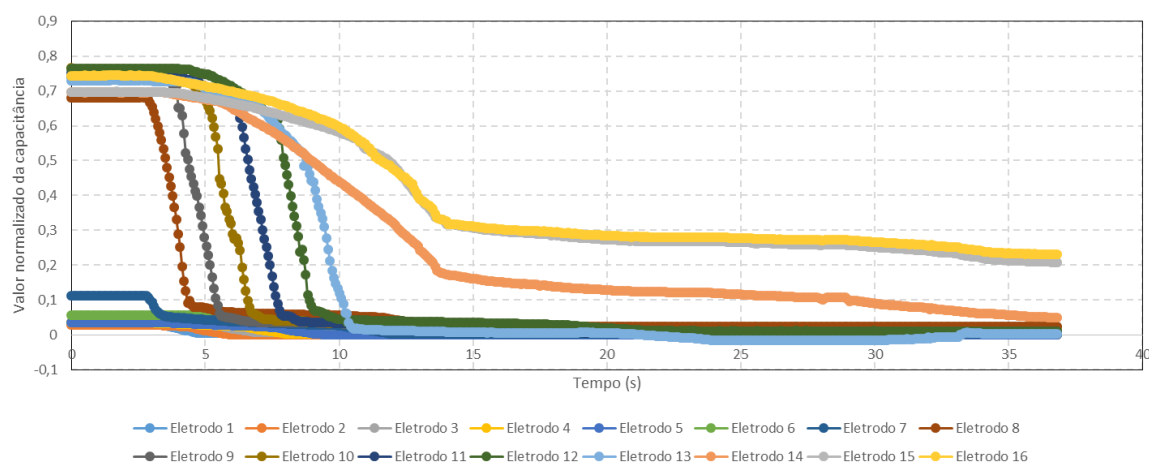
No experimento entre ar e óleo nota-se a mesma tendência de decaimento e crescimento linear das capacitâncias do sensor à medida que se diminui ou aumenta a altura da coluna de fluido no reservatório. Contudo, devido ao óleo possuir uma permissividade elétrica significativamente mais próxima à do ar quando comparada à da água, as regiões de transição da Figura 4.25 não são tão nítidas e organizadas como as da Figura 4.24.

Em ambos os testes nota-se que durante a transição da água ou do óleo para o ar ocorrem variações de capacitância mais rápidas à medida que o eletrodo está mais próximo da interface entre as duas substâncias. Isso ocorre porque os campos elétricos formados por todos os eletrodos do sensor sofrem influência mútua entre eles, de maneira que mesmo as placas que não estão sujeitas fisicamente à interface das substâncias tenham também seus valores de capacitância alterados. Assim, enquanto um determinado eletrodo não está em contato direto com a fronteira entre os fluidos, à medida que a sua posição se altera, a capacitância desse canal também se modifica, porém não de maneira tão significativa quanto quando está em contato direto com a linha divisória.

A fim de se obter a resposta dinâmica do sensor também para uma composição entre ar, óleo e água, foi realizado experimento iniciando-se com os seus 7 primeiros capacitores imersos em óleo e o restante em água (utilizando novamente o mesmo reservatório

apresentado na Figura 3.17). A partir disso, drenou-se tanto o óleo como a água, até o ponto em que restasse apenas água circundando os dois últimos canais do dispositivo. A Figura 4.26 mostra os resultados desse experimento.

Figura 4.26 – Gráfico das capacitâncias normalizadas do sensor de nível durante o experimento dinâmico entre ar, óleo e água.



Fonte: Autoria própria.

Neste último experimento, assim como nos outros, há a influência da oleofilia e da hidrofilia que a superfície do sensor possui, fazendo com que mesmo depois que a água ou o óleo não estejam mais presentes nos canais de medição, ainda permaneça uma fina camada dessas substâncias (mais efetiva no caso do óleo) presente temporariamente nos capacitores próximos à interface e que anteriormente estavam imersos no fluido. Contudo, a capacitância de um eletrodo apenas com essa fina camada de óleo ou de água pode ser nitidamente diferenciada da capacitância de quando ele está totalmente imerso nesses fluidos. Além do mais, através da análise, via *software*, do conjunto de dados das fases obtidos, é possível realizar correções de eventuais erros que possam aparecer nesse sentido. Por exemplo, se por ventura um canal identifica óleo ou água em sua região, mas os seus canais adjacentes tanto para cima como para baixo estão identificando ar, então trata-se de um erro de leitura muito provavelmente causado pela fina camada de fluido nesse eletrodo, uma vez que essa configuração de fases é fisicamente impossível.

De maneira geral, é possível notar que em todos os testes dinâmicos realizados foi possível identificar a fidelidade dos dados obtidos com a situação real experimentada. A correlação das faixas de capacitâncias normalizadas mostradas na Figura 4.21 para cada uma das substâncias puras testadas com as faixas de capacitâncias normalizadas apresentadas pela

sequência de gráficos da Figura 4.22 até a Figura 4.26 nos experimentos dinâmicos mostram uma conformidade dos dados obtidos, o que permite validar a eficiência do sensor desenvolvido no processo de identificação de fases no separador.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados de todos os experimentos realizados, pode-se afirmar que o sensor de nível desenvolvido mostrou-se eficiente na realização do monitoramento para o qual foi concebido. No processo real de funcionamento de tanques separadores, a movimentação das interfaces entre os fluidos ocorre de maneira lenta quando comparada à velocidade de aquisição, processamento e apresentação dos dados do sensor pelos *softwares* e computadores, tornando o sistema capaz de identificar de maneira satisfatória a dinâmica dos compostos presentes em seu interior. Somando-se à isso, o cálculo de normalização se mostrou bastante eficiente no processo chave de reconhecimento de substâncias, uma vez que ele é capaz de manipular valores dispersos de capacitâncias de cada canal e situá-los nas mesmas faixas normalizadas, eliminando assim a necessidade de calibragem de cada eletrodo individualmente. Quanto às detecções de falsas substâncias, apesar de serem consequência da afinidade química entre a superfície do sensor e o composto em contato com ela, há a possibilidade de serem mitigadas através da aplicação de produtos antiaderentes existentes no mercado para esse tipo de finalidade.

Do ponto de vista da resolução do sensor, como o dispositivo foi desenvolvido para instrumentar o protótipo de separador da UTFPR, seu *layout*, número de canais e dimensões foram pensadas para que essa necessidade fosse atendida sem sub ou sobre dimensionamentos em sua eletrônica. Para a o aumento dessa resolução e uma maior exatidão no monitoramento das interfaces, faz-se necessário uma redução nas dimensões de cada eletrodo e por consequência um aumento no número de capacitores de medição.

Para trabalhos futuros, além das possibilidades de melhorias já mencionadas, pode-se também incrementar a eletrônica do sensor, adicionando ao dispositivo o circuito LDC1614, gerando assim uma tecnologia de monitoramento híbrida capaz de trazer erros ainda menores para as medições, especialmente nos casos de presença de água salgada, em que os canais do capacitor tendem a entrar em curto-circuito. Há também a possibilidade de alteração do *layout* construtivo do dispositivo, que não só é capaz de reduzir as distâncias entre os circuitos de medição e suas terminações sensoras (capacitores e indutores), diminuindo assim as capacitâncias e indutâncias parasitas no sistema e, conseqüentemente, as interferências que elas podem gerar nos sinais que nele transitam, como também pode auxiliar na ampliação do

número de canais de medição do sensor, uma vez que essa prática exige também um aumento do número de circuitos integrados presentes na eletrônica.

Este trabalho traz uma contribuição relevante para a área de sensores e instrumentação eletrônica de processos de separação multifásica na indústria petrolífera, uma vez que apresenta uma nova tecnologia e um novo conceito construtivo para os sensores de nível de interfaces, capaz de identificar com sucesso as diferentes fases em aplicações controladas e reais de separação, sem sofrer perda de qualidade por influência de curtos-circuitos. Além do mais, apresenta maior segurança e facilidade de produção e manutenção do que outras técnicas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. L. “Estabilidade de Emulsões De Água-em-Óleo na Presença de Campo Elétrico Externo”, *Dissertação de mestrado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

AKHNEIFER, A. E. M. “Development of A Multi-Interface Level Measurement System”, *MSc dissertation*, Dept. of Electrical Engineering and Electronics, UMIST, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60079-0**: Equipamentos para atmosferas explosivas. Parte 0: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60079-11**: Atmosferas explosivas. Parte 11: Proteção de equipamento por segurança intrínseca. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60079-14**: Atmosferas explosivas. Parte 14: Projeto, seleção e montagem de instalações elétricas. Rio de Janeiro, 2006.

ASRAN, A. “Development of A Multi-Interface Level Measurement System Using A Segmented Capacitance Sensor”, *MSc dissertation*, Dept. of Electrical Engineering and Electronics, UMIST, 1998.

ARDITTY, S.; SCHMITT, V.; KAHN, J. G.; LEAL-CALDERON, F. “Materials Based on Solid-Stabilized Emulsions”, *Journal of Dispersion Science and Interface Science*, 275, p.659-664, 2004.

ARDUINO. **Arduino Nano**. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

ARNOLD, K. E.; SMITH, H. V. “Crude Oil Emulsion. IN: Bradley”, *Petroleum Engineering Handbook*, 3rd Ed., Cap. 19, Richardson-Texas-USA, *Society of Petroleum Engineer*, 1992.

AUFLEM, I. H. “Influence of Asphaltene Aggregation and Pressure on Crude Oil Emulsion Stability”, Department of Chemical Engineering, Norwegian University of Science and Technology - Trondheim, 2002.

AVEYARD, R.; BINKS, B. P.; CLINT, J. H. “Emulsion Stabilised Solely by Colloidal Particles”, *Advances in Colloid and Interface Science*, 100-102, p. 503-546, 2003.

BERTHOLD. **Solutions for Oil and Gas Production**. 2018. Disponível em: <<https://www.berthold.com/en/pc/level-measurement/multiphase-and-interface-level>>. Acesso em: 08 nov. 2018.

BETTA, G.; PIETROSANTO, A.; SCAGLIONE, A. “Microcontroller-Based Performance Enhancement of an Optical Fiber Level Transducer”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Volume 47, No. 2, April 1998.

CHEN, J.; VOGEL, R.; HEINRICH, G.; CLAUSSE, D.; DUTSCHK, V. “Influence of the Particle Type on the Rheological behavior of Pickering Emulsion”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 382, p. 238-245, 2011.

CHRISTIAN MICHELSEN RESEARCH AS. **Ultrasonic interface level detector**. Disponível em: <http://www.cmr.no/avd10/nedlasting/Brosjyre_UID.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2018.

CUNHA R. E. P. “Modelagem Matemática da Separação Gravitacional de Emulsões de Petróleo”, *Dissertação de Mestrado*, PEP/UNIT, Aracaju, SE, Brasil, 2007.

DA SILVA, M. J. “Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging”, Technische Universität Dresden, May 2005.

EMERSON PROCESS MANAGEMENT. **Level User Guide for the Instrument and Project Engineer in the Refining Industry**. 2009.

EMERSON PROCESS MANAGEMENT. **Rosemount™ Level Measurement Solutions**. 2019. Disponível em: <<https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-rosemount-level-measurement-solutions-en-76356.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2019.

FALCONE, G.; HEWITT, G. F.; ALIMONTI C. **Multiphase Flow Metering**. 1ª ed. Oxford, UK. Elsevier, 2009.

FRISING, T.; NOÏK, C.; DALMAZZONE, C.; PEYSSON, Y.; PALERMO, T. “Contribution of the Sedimentation and Coalescence Mechanisms to the Separation of Concentrated Water-in-Oil Emulsions”, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 29, p. 827-834, 2008.

GEORDIEVA, D.; SCHMITT, V.; LEAL-CALDERON, F.; LANGEVIN, D. “On the Possible Role of Surface Elasticity in Emulsion Stability”, *Langmuir*, 25 (10), p. 5565-5573, 2009.

HI-LINK. **HLK-PM-12 Power Module**. 2019. Disponível em: <http://www.hlktech.net/product_detail.php?ProId=56>. Acesso em: 09 mai. 2019.

HJERTAKER, B. T.; JOHANSEN, G. A.; JACKSON, P. “Recent developments in hydrocarbon separator interface imaging”, *Proc. of SPIE*, 4188, pp 81-92, 2001.

HUANG, S.; GREEN, R. G.; PLASKOWSKI, A.; BECK, M. S. “A high frequency stray-immune capacitance transducer based on the charge transfer principle”, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, pp 368-373, 1988.

ISAKSEN Ø; DICO, A. S.; HAMMER, E. A. “A capacitance based tomography system for interface measurement in separation vessels”, *Meas. Sci. Technol.*, 5, pp 1262-1271, 1994.

JURADO, E.; BRAVO, V.; CAMACHO, F.; VICARIA, J. M.; FERNÁNDEZ-ARTEAGA, A. “Estimation of the Distribution of Droplet Size, Interfacial Area and Volume in Emulsions”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, 295, p. 91-98, 2007.

KILPATRICK, P. K. “Water-in-Crude Oil Emulsion Stabilization: Review and Unanswered Questions”, *Energy & Fuels*, 26, p. 4017- 4026, 2012.

KRALOVA, I.; SJÖBLOM, J.; ØYE, G.; SIMON, S.; GRIMES, B. A.; PASO, K. “Heavy Crude Oils-Particle Stabilized Emulsions”, *Colloid and Interface Science*, 169, p. 106-127, 2011.

LAREDJ-BOUREZG, F.; CHEVALIER, Y.; BOYRON, O.; BOLZINGER, MARIE-ALEZANDRINE. “Emulsions Stabilized with Organic Solid Particles”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical. Engineering Aspects*, 413, p. 252-259, 2012.

MENG, G; JAWORSKI, A. J.; KIMBER, J. C. S. “A multi-electrode capacitance probe for phase detection in oil–water separation processes: design, modelling and validation”, University of Manchester: School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, March 2006.

MERIBOUT, M.; NAAMANY, A. A.; BUSAIDI, K. A. “Interface Layers Detection in Oil Field Tanks: A Critical Review”, Petroleum Institute, Sultane Qaboos University, Petroleum Development Oman, October 2011.

MICROCHIP. **8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash**. 2015. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf>. Acesso em: 09 mai. 2019.

MICROCHIP. **Low-Power, Low-Cost, High-Resolution Contactless Sensing Technique for Variety of Applications**. 2019. Disponível em: <<https://br.mouser.com/ti-fdc2214-q1/>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

MOHAN, S. S.; HERSHENSON, M. M.; BOYD, S. P; LEE, T. H. “Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances”, Stanford University: Electrical Engineering Department, IBM, October 1999.

MORADI, M.; ALVARADO, V.; HUZURBAZAR, S. “Effect of Salinity on Water-in-Crude Oil Emulsion: Evaluation through Drop-Size Distribution Proxy”, *Energy & Fuels*, 25, p. 260-268, 2011.

ROSSIT, R. “Curso de Segurança Intrínseca”, Sense – Sensores e Instrumentos, 2019.

SALAGER, J. L. “Emulsion Properties and Related Know-how to Attain Them”. In: Marti-Mestres, G.; Nielloud, F. *Pharmaceutical emulsions and suspensions*, cap. 2 e 3, New York, Marcel Dekker Inc., 2000.

SOUZA, W. D. J. “Estudo da Estabilidade de Emulsões De Água-Óleo: Efeito do Teor de Fase Dispersa na Velocidade de Sedimentação da Emulsão”, *Dissertação de mestrado*, Universidade Tiradentes, 2014.

SPEIGHT, J. G. “The Chemistry and Technology of Petroleum”. 4th. Ed. New-York: Marcel Dekker; 2007.

SYED, T. “2D/3D magnetic arrays for imaging”, MSc dissertation, Dept. of Electrical Engineering and Electronics, UMIST, 2004.

TAPSON, J.; GREENE, J. R. “Improved capacitance measurement by means of resonance locking”, University of Cape Town: Department of Electrical Engineering, October 1993.

TEXAS INSTRUMENTS. **FDC1004 4-Channel Capacitance-to-Digital Converter for Capacitive Sensing Solutions**. 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/fdc1004.pdf>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **FDC1004 EVM User's Guide**. 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/snau163c/snau163c.pdf>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **FDC2214 and FDC2214 EVM User's Guide**. 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/snou138a/snou138a.pdf>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **FDC2x1x EMI-Resistant 28-Bit,12-Bit Capacitance-to-Digital Converter for Proximity and Level Sensing Applications**. 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/fdc2214.pdf>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **LDC131x and LDC161x EVM User's Guide**. 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/snou135a/snou135a.pdf>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **LDC1612, LDC1614 Multi-Channel 28-Bit Inductance to Digital Converter (LDC) for Inductive Sensing**. 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ldc1614.pdf>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **CD74HC4051 Analog Multiplexer and Demultiplexer**. 2002. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc4051-ep.pdf>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **High-speed CMOS 8-channel analog multiplexer & demultiplexer**. 2019. Disponível em: <<http://www.ti.com/product/CD74HC4051>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

TRACERCO. **Specialist Measurement Instruments – Tracerco Profiler**. 2005. Disponível em: <<http://www.tracerco.com/products-specialistinstruments-profiler.htm>>. Acesso em: 08 nov. 2018.

YANG, W. Q.; BRANT, M. R.; BECK, M. S. “A multi-interface level measurement system using a segmented capacitance transducer for oil separators”, *Meas. Sci. Technol.*, 5 (9), pp 1177-1180, 1994.

YANG, W. “Sensors and instrumentation for monitoring and control of multi-phase separation”, University of Manchester: School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, July 2006.

WENKIE, T. **Ensure Safety While Providing Better Level and Volume Measurement Option**. 2019. Disponível em: <<https://www.flowcontrolnetwork.com/api-18-2-safety-level-volume-measurement/>>. Acesso em: 21 ago. 2019.

APÊNDICE A – Caracterização do sensor de nível final

Tabela A-1 – Valores de média e desvio padrão das capacitâncias de todos os capacitores do sensor de haste para substâncias com diferentes permissividades elétricas relativas.

	Substância	Permissividade elétrica relativa	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
Eletrodo 1	Ar	1	41,87	0,0071
	Óleo mineral transparente	2,1	42,12	0,0057
	Isopropanol	20,1	45,53	0,0025
	Etileno Glicol	40,3	46,73	0,0149
	Água deionizada	79,9	51,93	0,0188
Eletrodo 2	Ar	1	42,76	0,0139
	Óleo mineral transparente	2,1	42,99	0,0092
	Isopropanol	20,1	47,47	0,0125
	Etileno Glicol	40,3	49,91	0,0091
	Água deionizada	79,9	56,13	0,0473
Eletrodo 3	Ar	1	44,14	0,0062
	Óleo mineral transparente	2,1	44,23	0,0121
	Isopropanol	20,1	49,05	0,0073
	Etileno Glicol	40,3	51,66	0,0026
	Água deionizada	79,9	57,84	0,0131
Eletrodo 4	Ar	1	40,76	0,0040
	Óleo mineral transparente	2,1	41,02	0,0116
	Isopropanol	20,1	46,00	0,0070
	Etileno Glicol	40,3	48,86	0,0054
	Água deionizada	79,9	54,82	0,0987
Eletrodo 5	Ar	1	41,66	0,0035
	Óleo mineral transparente	2,1	41,97	0,0073
	Isopropanol	20,1	47,35	0,0029
	Etileno Glicol	40,3	50,31	0,0033
	Água deionizada	79,9	56,55	0,0410
Eletrodo 6	Ar	1	43,25	0,0107
	Óleo mineral transparente	2,1	44,40	0,0122
	Isopropanol	20,1	49,89	0,0634
	Etileno Glicol	40,3	53,54	0,0550
	Água deionizada	79,9	58,91	0,1649
Eletrodo 7	Ar	1	44,34	0,0035
	Óleo mineral transparente	2,1	44,63	0,0116
	Isopropanol	20,1	50,14	0,0114
	Etileno Glicol	40,3	53,70	0,0569
	Água deionizada	79,9	59,52	0,1011
Eletrodo 8	Ar	1	43,22	0,0097
	Óleo mineral transparente	2,1	44,47	0,0151
	Isopropanol	20,1	50,08	0,0065
	Etileno Glicol	40,3	53,79	0,0561
	Água deionizada	79,9	60,11	0,0819

Eletrodo 9	Substância	Permissividade elétrica relativa	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
	Ar	1	43,02	0,0031
	Óleo mineral transparente	2,1	43,61	0,0099
	Isopropanol	20,1	50,21	0,0028
	Etileno Glicol	40,3	53,90	0,0228
Água deionizada	79,9	60,44	0,1440	
Eletrodo 10	Substância	Permissividade elétrica relativa	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
	Ar	1	47,13	0,0058
	Óleo mineral transparente	2,1	47,94	0,0152
	Isopropanol	20,1	54,85	0,0027
	Etileno Glicol	40,3	58,93	0,0223
Água deionizada	79,9	65,48	0,0224	
Eletrodo 11	Substância	Permissividade elétrica relativa	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
	Ar	1	44,46	0,0028
	Óleo mineral transparente	2,1	45,05	0,0111
	Isopropanol	20,1	52,35	0,0033
	Etileno Glicol	40,3	56,04	0,0127
Água deionizada	79,9	62,41	0,0305	
Eletrodo 12	Substância	Permissividade elétrica relativa	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
	Ar	1	44,03	0,0110
	Óleo mineral transparente	2,1	44,81	0,0150
	Isopropanol	20,1	52,06	0,0300
	Etileno Glicol	40,3	55,66	0,0266
Água deionizada	79,9	60,33	0,0173	
Eletrodo 13	Substância	Permissividade elétrica relativa	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
	Ar	1	43,64	0,0022
	Óleo mineral transparente	2,1	44,83	0,0168
	Isopropanol	20,1	50,84	0,0046
	Etileno Glicol	40,3	53,81	0,2078
Água deionizada	79,9	59,39	0,0716	
Eletrodo 14	Substância	Permissividade elétrica relativa	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
	Ar	1	43,58	0,0883
	Óleo mineral transparente	2,1	43,75	0,0219
	Isopropanol	20,1	51,01	0,0050
	Etileno Glicol	40,3	53,69	0,0175
Água deionizada	79,9	59,21	0,1278	
Eletrodo 15	Substância	Permissividade elétrica relativa	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
	Ar	1	44,19	0,0107
	Óleo mineral transparente	2,1	45,28	0,0145
	Isopropanol	20,1	52,06	0,0054
	Etileno Glicol	40,3	54,75	0,2112
Água deionizada	79,9	60,74	0,1465	
Eletrodo 16	Substância	Permissividade elétrica relativa	Capacitância média (pF)	Desvio padrão (pF)
	Ar	1	43,01	0,0059
	Óleo mineral transparente	2,1	43,67	0,0225
	Isopropanol	20,1	49,79	0,0091
	Etileno Glicol	40,3	52,21	0,2031
Água deionizada	79,9	58,44	0,1186	

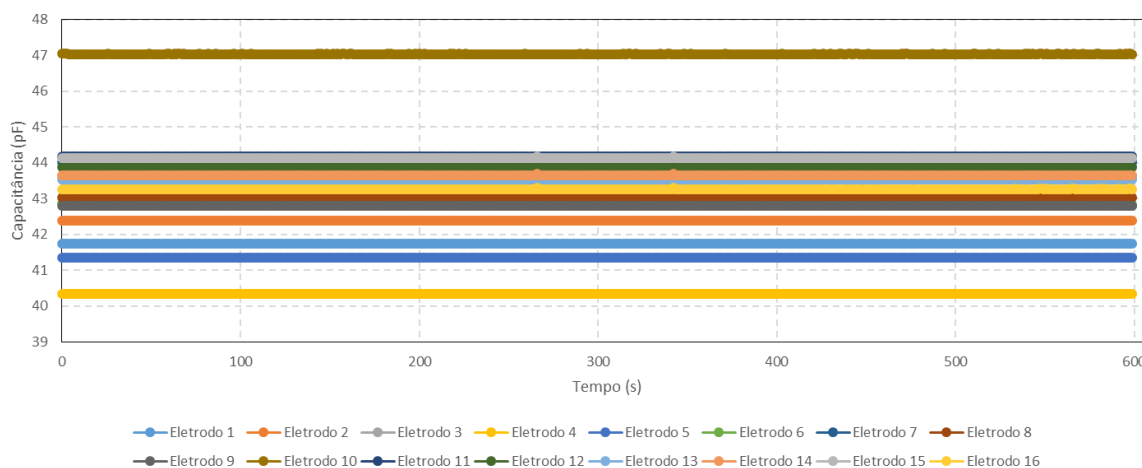
Fonte: Autoria própria.

Experimento de *drift* de temperatura

O teste de *drift* de temperatura tem o objetivo de identificar eventuais regimes transitórios nas medidas realizadas pelo sensor desde o momento em que ele inicia o seu funcionamento. Esse comportamento transitório pode ocorrer em alguns circuitos devido ao aquecimento de seus componentes à medida em que o dispositivo permanece alimentado eletronicamente.

Neste experimento, o monitoramento do sensor foi realizado com ele totalmente envolto pelo ar ambiente, a uma temperatura de aproximadamente 16 °C e durante um intervalo de tempo de 10 minutos, sendo que durante esse período foram adquiridos os valores de capacitância de cada um dos 16 eletrodos do dispositivo, a uma frequência de uma leitura por segundo (1 Hz). Foi escolhido o ar ambiente, para garantir que eventuais variações de capacitância não pudessem ter como influência variações da permissividade elétrica do fluido circundante, no caso de ele ter a sua temperatura alterada por conta do aquecimento da eletrônica do sensor. A Figura A-1 mostra os resultados desse experimento.

Figura A-1 – Gráfico do comportamento do sensor de nível em regime temporal.



Fonte: Autoria própria.

A partir dessas informações, pode-se notar que o sensor de haste não sofre influência visível do aquecimento de sua eletrônica durante o regime temporal de seu funcionamento, ou seja, o dispositivo não apresenta regimes transitórios durante o seu processo de medição.

O valor médio dos desvios padrão de cada um dos 16 conjuntos de 600 capacitâncias medidas é igual a 0,002327, número que ratifica a estabilidade do sensor como um todo.