

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THIAGO DA SILVA ORNELLAS

**SENSORES INDUTIVOS DE BAIXO CUSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE NÍVEIS DE
INTERFACE DE FLUIDOS COM PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DISTINTAS**

VITÓRIA – ES

2023

THIAGO DA SILVA ORNELLAS

**SENSORES INDUTIVOS DE BAIXO CUSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE NÍVEIS DE
INTERFACE DE FLUIDOS COM PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DISTINTAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito para obtenção do título de “Mestre”.

Área de Concentração: Telecomunicações e Tecnologia da Informação (TTI).

Orientadora: Profa. Maria José Pontes

Co-orientador: Prof. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

VITÓRIA – ES

2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

Ornellas, Thiago da Silva, 1982- O74s

Sensores indutivos de baixo custo para identificação de níveis
de interface de fluidos com propriedades magnéticas distintas /
Thiago da Silva Ornellas. - 2023.

58 f. : il.

Orientadora: Maria José Pontes.

Coorientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -

Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Eletromagnetismo. 2. Indutância. 3. Sensores Remotos. 4.
Microcontroladores. 5. Osciladores. 6. Amplificadores
eletrônicos. I. Pontes, Maria José. II. Segatto, Marcelo Eduardo
Vieira. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

THIAGO DA SILVA ORNELLAS

**SENSORES INDUTIVOS DE BAIXO CUSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE NÍVEIS DE
INTERFACE DE FLUIDOS COM PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DISTINTAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

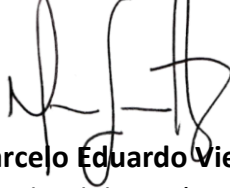
Trabalho aprovado. Vitória – ES, 24 Abril de 2023.



Prof. Dra. Maria Jose Pontes

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Orientadora



Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Co-orientador



Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos

Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Examinador Externo



Prof. Dr. Carlos Eduardo Schmidt Castellani

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Examinador PPGE

VITÓRIA, ES

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela saúde e pela oportunidade de desenvolver um trabalho de pós-graduação em uma instituição de ensino superior conceituada no país.

À minha família pela paciência e compreensão durante o curso, devido à minha ausência durante os estudos.

Aos meus orientadores, professora Maria José Pontes e Marcelo Segatto pelo suporte, orientação e pela confiança em acreditar na conclusão deste trabalho.

A todos os meus professores que ministraram as disciplinas durante o mestrado, se esforçando ao máximo para entregar um ensino de qualidade, mesmo em um período complicado de pandemia.

Agradecimentos à empresa Petrobras, a Fundação Espírito-Santense de Tecnologia (FEST) e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo aporte financeiro. Ao Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento (CPID), LabTel e NEMOG pelo suporte e instalações de laboratório, além do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Espírito Santo (PPGEE).

Agradecimentos à Petrobras pelo projeto Sensores: “Fibra Óptica na Medição de Nível e de Interface Água-Óleo em Tanques de Produção”, que teve grande contribuição para a conclusão desta dissertação.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, **Cristóvão** (in memorian) e **Romilda** por toda dedicação, amor e carinho durante todos esses anos. Agradeço por todos os ensinamentos e por todas as lições de vida.*

*Aos meus irmãos **Aline** e **Raphael** por todo incentivo e companheirismo, tornando pessoas muito importantes para a conclusão dessa dissertação.*

*À **Mariana** por ter passado os últimos anos ao meu lado me dando força e acreditando na minha capacidade de entrega desse trabalho.*

RESUMO

Na indústria são identificados vários métodos de medição e monitoração de níveis de fluidos, desde elementos flutuadores a sensores ultrassônicos [19], ambos com suas vantagens e desvantagens. Esta dissertação desenvolveu um conjunto de sensores indutivos para identificação de níveis de interface de fluidos multifásicos. Os sensores são distribuídos verticalmente no interior de um tubo, para que o mesmo seja instalado dentro de tanques de armazenamento de fluidos heterogêneos. Cada sensor indutivo tem a capacidade de diferenciar os fluidos devido à variação do acoplamento magnético existente entre os enrolamentos primário e secundário da estrutura de cada sensor.

Dessa forma, a indutância mútua entre os enrolamentos é responsável pela variação da reatância indutiva do circuito equivalente. O circuito eletrônico de cada sensor é projetado para que o acréscimo de reatância indutiva favoreça o casamento de impedância, otimizando a potência de saída, lida pela etapa de interrogação do sistema. Foi demonstrado que, com esse mecanismo de detecção, os sensores necessitam de pouca corrente elétrica, visto que não se trata especificamente de medição de condutividade, o que implicaria na medida da corrente elétrica induzida no fluido, resultando em um processo menos seguro em um ambiente industrial.

Além disso, um supervisor foi desenvolvido para monitoração dos níveis de interface dos fluidos em tempo real. Os testes realizados permitiram medidas de nível a partir de 3,3 cm de espessura com erro relativo de 8% aproximadamente. A resolução da medida do nível de fluidos é projetada baseando-se no espaçamento vertical entre os sensores.

Palavras-chave: Sensores indutivos, níveis de interface multifásicos, acoplamento magnético, indutância mútua, casamento de impedância.

ABSTRACT

In the industry, several methods of measuring and monitoring fluid and interface levels are identified, from floating elements to ultrasonic sensors [19], both with their advantages and disadvantages. This Master thesis developed a set of inductive sensors to identify fluids as well as the interface between two different fluids. The sensors are distributed vertically inside a tube, so that it can be installed within heterogeneous fluid storage tanks. Each inductive sensor has the ability to differentiate fluids due to the variation in the magnetic coupling existing between the primary and secondary windings of each sensor structure.

Thus, the mutual inductance between the windings is responsible for the variation in the inductive reactance of the equivalent circuit. The electronic circuit of each sensor is designed so that the addition of inductive reactance favors impedance matching, optimizing the output power read by the interrogation stage of the system. It was demonstrated that, with this detection mechanism, the sensors require little electrical current, since it is not specifically about measuring conductivity, it means induction of electrical current in the fluid, resulting in a safer process.

In addition, a supervisory software was developed to monitor fluid levels in real time. The tests carried out allowed level measurements from 3.3 cm thick with a relative error of approximately 8%. The resolution of the fluid level measurement is designed based on the vertical spacing between the sensors.

Keywords: Inductive sensors, multiphase interface levels, magnetic coupling, mutual inductance, impedance matching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito com indicação da indutância mútua entre os enrolamentos	19
Figura 2 - Enrolamentos primário e secundário magneticamente acoplados	20
Figura 3 - Oscilador Colpitts	24
Figura 4 - Estruturas dos MOSFETs NMOS e PMOS	26
Figura 5 - Criação de zona de depleção.....	26
Figura 6 - Formação de canal invertido entre Source e Drain	27
Figura 7 - Inversão completa do canal entre Source e Drain	27
Figura 8 - Amplificador Inversor	28
Figura 9 - Amplificador não-inversor.....	29
Figura 10 - Somador de Tensão.....	29
Figura 11 - Subtrator de Tensão.....	30
Figura 12 - Comparador de Tensão	30
Figura 13 - Diferenciador Ativo	31
Figura 14 - Integrador Ativo	32
Figura 15 - Analisador de Impedâncias MFIA (Zurich Instruments)	33
Figura 16 - Bobinadeira MEGA MGB LS1.....	33
Figura 17 - Sensor ao ar livre.....	35
Figura 18 - Sensor imerso em óleo.....	36
Figura 19 - Sensor imerso em água	36
Figura 20 - Enrolamento primário do sensor	37
Figura 21 - Enrolamento secundário do sensor	37
Figura 22 - Tubo de PVC para proteção do sensor	38
Figura 23 - Encaixe do tubo de PVC.....	38
Figura 24 - Sensor protegido com massa epóxi	39
Figura 25 - Diagrama para identificação da frequência alvo.....	39
Figura 26 - Arranjo de sensores imersos em um tanque multifásico	40
Figura 27 - Impedâncias de entrada e saída.....	41
Figura 28 - Comportamento da impedância do circuito com o sensor ao ar livre no intervalo de 100 kHz e 1,0 MHz (40/80 espiras)	42
Figura 29 - Comportamento da impedância do circuito no intervalo de 1,0MHz e 1,5MHz (40/80 espiras)	43
Figura 30 - Comparativo da impedância equivalente do circuito (a) ao ar livre (vermelho) e (b) imerso em água (verde)	44
Figura 31 - Identificação da corrente do enrolamento secundário através do resistor Shunt ...	45
Figura 32 - Tensão no resistor Shunt (sensor fora da água)	46
Figura 33 - Tensão no resistor Shunt (sensor imerso na água)	46
Figura 34 – Placa de desenvolvimento ESP32 ESP-WROOM-32	48
Figura 35 - Rotina de análise das leituras dos sensores.....	49
Figura 36 - Rotina de aquisição das leituras dos sensores.....	49
Figura 37 – Exemplo de um arquivo de parâmetros dos 4 sensores	50
Figura 38 - Reservatório real (a) e Supervisório (b)	51
Figura 39 - Caracterização de cada sensor	52
Figura 40 - Sensor ao ar livre ($V_{ADC} = 1,289 \text{ V}$).....	53
Figura 41 - Sensor imerso em óleo ($V_{ADC} = 2,207 \text{ V}$).....	53
Figura 42 - Sensor imerso em água ($V_{ADC} = 3,457 \text{ V}$)	54

Figura 43 - Caracterização do sensor conforme saídas do conversor ADC.....	55
Figura 44 – Exemplo prático de funcionamento do conjunto de sensores	55
Figura 45 - Comportamento da impedância do circuito no intervalo de 1,0MHz e 1,5MHz (60/60 espiras, frequência alvo: 1,23MHz)	57
Figura 46 - Tensão no resistor Shunt (sensor fora da água)	58
Figura 47 - Tensão no resistor Shunt (sensor imerso na água)	59
Figura 48 - Comportamento da impedância do circuito no intervalo de 1,0 MHz e 1,5 MHz (60/60 espiras, frequência alvo: 1,27 MHz)	60
Figura 49 - Corrente elétrica no resistor Shunt (sensor fora da água).....	61
Figura 50 - Corrente elétrica no resistor Shunt (sensor imerso na água)	61
Figura 51 - Comportamento da impedância do circuito (água ultra pura X água corrente).....	63
Figura 52 - Tensão no resistor Shunt (sensor imerso em água ultra pura).....	64
Figura 53 - Tensão no resistor Shunt (sensor imerso em água corrente).....	64

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	densidade
L	indutância
λ	fluxo magnético
i	corrente elétrica
V_{fem}	força eletromotriz
N	número de espiras
ϕ	fluxo magnético por espira
B	densidade de fluxo magnético
M_{21}	indutância mútua
$\mathcal{P}$	permeância
K	acoplamento magnético
μ_r	permeabilidade magnética relativa
μ_0	permeabilidade magnética no vácuo
H	intensidade de campo magnético
l	comprimento do solenóide
J_m	densidade de corrente de magnetização
M	magnetização
χ_m	susceptibilidade magnética
C	capacitância
C_{eq}	capacitância equivalente
V_-	entrada inversora
V_+	entrada não-inversora
A_0	ganho do amplificador operacional
R	resistência
f_c	frequência de corte
Z_s	impedância de entrada
Z_c	impedância de carga
ΔX_L	variação da reatância indutiva
ΔL	variação da indutância
I_2	corrente elétrica do enrolamento secundário
V_{shunt}	tensão no resistor <i>shunt</i>
I_p	corrente de pico
ADC	<i>Analog/Digital Converter</i>
V_{ADC}	tensão de entrada do ADC
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
IHM	Interface Homem-Máquina

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	13
1.1 SENSORES INDUTIVOS.....	15
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
1.3 DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA	16
CAPÍTULO 2. EMBASAMENTO TEÓRICO DO SISTEMA DE SENSORES	17
2.1. INDUTÂNCIA E MAGNETIZAÇÃO DE MATERIAIS	17
2.1.1 AUTO-INDUTÂNCIA E INDUTÂNCIA MÚTUA	17
2.1.2 INDUTÂNCIA MÚTUA EM TERMOS DA PERMEÂNCIA.....	19
2.1.3 ACOPLAMENTO MAGNÉTICO	21
2.1.4 PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO MEIO	21
2.2. ELEMENTOS DO SISTEMA DE INTERROGAÇÃO	23
2.2.1 OSCILADORES	23
2.2.2 OSCILADOR <i>COLPITTS</i>	24
2.2.3 MOSFET	25
2.2.4 AMPLIFICADOR OPERACIONAL	27
2.3. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL	32
2.4. DIMENSIONAMENTO E FABRICAÇÃO DAS BOBINAS.....	33
CAPÍTULO 3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL, CARACTERIZAÇÃO E INTERROGAÇÃO	34
3.1 MONTAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR INDUTIVO.....	34
3.2 RESULTADOS E INTERROGAÇÃO DO SISTEMA SENSOR	44
3.3 PLATAFORMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	47
CAPÍTULO 4. EXPERIMENTOS E CARACTERIZAÇÃO	52
4.1 CARACTERIZAÇÃO DE CADA SENSOR	52
CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1 SENSOR COM 60/60 ESPIRAS	57
5.2 TESTES COM ÁGUA ULTRA PURA	62
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Pesquisas em tecnologias de detecção de níveis de fluidos em reservatórios são de grande importância, pois são essenciais nas aplicações industriais, como para monitoração do armazenamento de combustíveis, tratamento bioquímico, alertas de transbordamento, entre outros [1]. Os sensores são capazes de identificar líquidos, pastas, pós e sólidos em áreas com perigo de explosão, produtos quimicamente agressivos e em aplicações higiênicas da indústria alimentícia e farmacêutica [2].

Por exemplo podem ser utilizados para evitar gastos desnecessários e paradas de planta não programadas que podem prejudicar a produção da indústria. Podem identificar a qualidade da água de acordo com a pureza e grau de salinidade.

Uma vez que o nível do líquido é detectado, o sensor converte a informação em um sinal elétrico, que é processado e enviado a um sistema supervisor. O sistema pode dessa forma acionar um alarme, uma bomba, uma válvula ou até mesmo uma sequência de operações automáticas visando o tratamento do líquido de forma eficiente e segura.

Existem os sensores de ponto, que são utilizados para indicar se o líquido alcançou um ponto específico no reservatório e existem os sensores contínuos, que realizam de forma precisa a medição atual do nível. Existem sensores invasivos, que necessitam do contato direto com o líquido e sensores sem contato, que utilizam ondas mecânicas ou eletromagnéticas para a identificação do nível.

Na indústria de óleo e gás, existem duas categorias de sensores de nível: sensores que são capazes de identificar apenas um nível de fluido (topo) e sensores de interface, que são utilizados na monitoração de fluidos multifásicos, em que há presença de fluidos heterogêneos, como por exemplo ar, óleo e água [3].

A medição da quantidade de água e óleo em tanques de armazenamento é essencial no controle de processo e produção na área do petróleo. Essas tecnologias têm a capacidade de medir os níveis de ar, óleo, emulsão e água, pois apresentam densidades distintas, resultando em misturas multifásicas [4].

Nestas circunstâncias é necessária a utilização de métodos em que os elementos sensores são mergulhados nos fluidos para identificação de suas propriedades específicas. Exemplos desses métodos são: eletrodos, sensores

capacitivos, sensores de pressão diferencial, sensores vibratórios, radar de onda guiada e fibra óptica.

Sensores condutivos à base de eletrodos são muito utilizados, com as vantagens de terem baixo custo, sem componentes móveis e empregados em mais de um ponto de operação. Porém eles têm as desvantagens da necessidade do contato direto com o fluido, permitindo com o tempo o desgaste do elemento sensor e contaminação devido a depósitos de materiais em suas superfícies, comprometendo os resultados das leituras [3].

O sensor de interface capacitivo é composto por duas placas imersas no reservatório, sendo que o líquido tem o papel de dielétrico. Conforme há a alteração dos níveis dos líquidos, a capacitância também é alterada devido à variação da constante dielétrica equivalente dos líquidos existentes no reservatório.

Sensores que utilizam pressão diferencial (*DP*) podem ser utilizados para medir a interface entre dois fluidos que possuem diferentes densidades (ρ). Ao contrário da medição de nível hidrostático, a diferença entre as densidades ($\rho_1 - \rho_2$) de ambos os líquidos deve ser considerada para o cálculo da pressão diferencial. Como o cálculo para medição do nível de interface é baseado na diferença das densidades do produto, o *DP* resultante é pequeno. Isso pode tornar a precisão do método *DP* não confiável. Fatores externos como temperatura e mudanças de densidade dos líquidos podem produzir efeitos indesejados na leitura e comprometem o resultado desejado [5].

Sensores vibratórios atuam utilizando uma ou duas hastes em forma de diapasão como meio de medir os níveis de líquidos heterogêneos. Devido à diferença de viscosidade dos líquidos, há uma variação de absorção de energia de vibração causada pela mudança do amortecimento mecânico.

Radar de onda guiada é um dispositivo que emite pulsos de micro-ondas em uma haste metálica imersa no reservatório. Parte da energia é refletida pela primeira camada (topo) e uma outra parte é transmitida até a segunda camada, sendo refletida por essa interface. Dessa forma, é possível medir os tempos de retorno das duas ondas refletidas, estimando o nível total e o nível da interface dos fluidos.

FBGs (*Fiber Bragg Grating*) são sensores a fibra óptica sensíveis a pressão e temperatura. Esses sensores podem ser acoplados a diafragmas e instalados em reservatórios para sensoramento da pressão e temperatura de líquidos e consequentemente a identificação dos níveis de interface. O desenvolvimento desses sensores a fibra óptica já é uma realidade com tendência de uso crescente na indústria, necessitando de um investimento relativamente alto nas etapas de

interrogação do sistema. Essa tecnologia se destaca devido à estabilidade, segurança, imunidade eletromagnética e capacidade de multiplexação de canais [6].

Os principais instrumentos de medição de nível atualmente são os que utilizam pressão diferencial, radar, magnéticos e por flutuação magnética, pois são tecnologias já consolidadas no mercado [7].

1.1 SENSORES INDUTIVOS

Esse trabalho trata de uma outra classe de sensores: os indutivos. Esses sensores têm a vantagem de permitir o encapsulamento do dispositivo, evitando o contato direto entre o elemento sensor e os fluidos, além de ser uma solução que demanda um investimento relativamente inferior aos descritos acima.

Existem alguns métodos para o desenvolvimento de sensores indutivos: solenóides [8], toróides [9], [10], sensores Hall, além de associações entre eles [11]. O conjunto de sensores indutivos desse trabalho foi inspirado em um equipamento comercial chamado *iPhase*. Conforme documentação do equipamento [12], o perfilador *iPhase* tem a capacidade de medir a condutividade elétrica da água presente ao redor de elementos sensores toroidais, através da corrente induzida gerada pelo fluxo magnético no núcleo de cada toróide. Porém, os testes comprovaram a necessidade da água ser salinizada (presença de íons Na^+ e Cl^-). Dessa forma, foi verificado que o *iPhase* é ineficiente no processo de identificação da interface de óleo, já que os sensores se comportaram de forma idêntica quando mergulhados em óleo ou expostos no ar.

Diferente do *iPhase*, o perfilador desenvolvido nessa dissertação apresenta sensores compostos por pares de solenóides, devido à relativa facilidade e simplicidade de construção. Foi utilizada uma bobinadeira no processo de enrolamento de suas espiras. Os pares de solenóides foram arranjados em série no interior de um tubo vertical e mergulhados em tanques multifásicos para a identificação dos níveis de fluidos existentes, utilizando o princípio da indução eletromagnética. Dessa forma, os sensores indutivos podem identificar fluidos multifásicos que apresentem características magnéticas distintas (por exemplo: ar, óleo, emulsão e água). Cada sensor é composto por dois solenóides: um enrolamento primário e outro enrolamento secundário. O enrolamento primário é alimentado por sua fonte de corrente senoidal, composto por um oscilador e um amplificador de sinais. Inicialmente, os protótipos dos osciladores/amplificadores foram desenvolvidos em placas de fenolite ilhadas perfuradas. Posteriormente foram geradas placas de circuito

impresso também em fenolite por meio de uma fresadora. A versão final do protótipo foi confeccionada em placa de fibra de vidro.

Na saída de cada enrolamento secundário foi desenvolvido um circuito interrogador microcontrolado que captura os sinais analógicos que representam um ganho proporcional às propriedades magnéticas do fluido presente ao redor de cada sensor. Os dados de todos os sensores são disponibilizados em um supervisor que informa em tempo real a quantidade (i.e., nível) de cada fluido existente na mistura multifásica.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta a montagem, caracterização e interrogação de sensores indutivos para a monitoração de nível de fluidos em misturas multifásicas. Além da Introdução, o Capítulo 2 contém o embasamento teórico do sistema de sensores do trabalho. A descrição do trabalho realizado é discutida no Capítulo 3. Os experimentos e caracterização estão descritos no Capítulo 4. Os resultados e discussões são apresentados no Capítulo 5. As conclusões estão presentes no Capítulo 6.

1.3 DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA

Como resultado da pesquisa realizada nesta dissertação foi apresentado o artigo “Sensor Indutivo de Baixo Custo para Identificação de Fluidos com Propriedades Magnéticas Distintas” no SBMO 2022 (Simpósio da Sociedade Brasileira de Micro-ondas e Optoeletrônica), em Natal-RN entre os dias 13 e 16 de novembro de 2022.

CAPÍTULO 2. EMBASAMENTO TEÓRICO DO SISTEMA DE SENSORES

Este capítulo descreve os conceitos de eletromagnetismo envolvidos na construção e princípio de funcionamento dos sensores indutivos. Discute-se também o método utilizado para o desenvolvimento do circuito oscilador e a etapa de amplificação e retificação do sinal. Também são abordadas as técnicas utilizadas para identificação dos pontos de interesse para otimização dos sensores com o auxílio dos equipamentos de bancada existentes em laboratório.

2.1. INDUTÂNCIA E MAGNETIZAÇÃO DE MATERIAIS

2.1.1 AUTO-INDUTÂNCIA E INDUTÂNCIA MÚTUA

Indutância (L) é uma constante de proporcionalidade que identifica a capacidade de um circuito de concatenar fluxo magnético (λ) por corrente elétrica (I). [13]

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (1)$$

A indutância definida pela equação 1 é chamada de auto-indutância, já que o fluxo concatenado é gerado pelo próprio indutor. De acordo com a Lei de Faraday, também conhecida como a lei da indução eletromagnética, quando há uma taxa de variação no tempo (t) do fluxo magnético em um circuito, surge uma força eletromotriz induzida V_{fem} (em volts) em seus terminais. [13]

$$V_{fem} = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (2)$$

De acordo com as equações 1 e 2:

$$V_{fem} = - L \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

Ou seja, a corrente elétrica (I) deve ser variável no tempo para que exista uma diferença de potencial nos terminais do indutor. Caso contrário, o indutor passa a se comportar como um curto-circuito em regime permanente.

Tratando-se de um enrolamento, N é o número de espiras e ϕ é o fluxo em cada espira.

$$\lambda = N \phi \quad (4)$$

$$V_{fem} = - \frac{d\lambda}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

O sinal negativo indica que a tensão induzida V_{fem} se opõe ao fluxo que a produziu. Essa oposição está relacionada à lei de Lenz, que considera que o sentido de fluxo da corrente no enrolamento é tal que o campo magnético produzido pela corrente induzida se opõe ao campo magnético original.

Se existir um enrolamento secundário próximo, então haverá uma interação magnética entre eles. Quatro componentes de fluxo (ϕ_{11} , ϕ_{12} , ϕ_{21} e ϕ_{22}) são geradas. O fluxo ϕ_{21} por exemplo, é o fluxo que passa através do enrolamento 2 devido à corrente do enrolamento 1. Se $\mathbf{B}_1$ é a densidade de fluxo magnético devido à corrente do enrolamento 1 e S_2 é a área do enrolamento secundário, então:

$$\phi_{21} = \int_{S_2} \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{S} \quad (6)$$

É definida a indutância mútua M_{21} como a razão entre o fluxo concatenado $\lambda_{21} = N_2 \phi_{21}$ sobre o enrolamento secundário devido à corrente do enrolamento primário:

$$M_{21} = \frac{\lambda_{21}}{I_1} = \frac{N_2 \phi_{21}}{I_1} \quad (7)$$

O efeito da indutância mútua entre os enrolamentos primário e secundário permitirá identificar os níveis de interface dos fluídos no interior do reservatório de armazenamento.

As indutâncias dos enrolamentos primário e secundário são obtidas a partir dos outros componentes de fluxo:

$$L_1 = \frac{\lambda_{11}}{I_1} = \frac{N_1(\phi_{11} + \phi_{12})}{I_1} \quad (8)$$

$$L_2 = \frac{\lambda_{22}}{I_2} = \frac{N_2(\phi_{21} + \phi_{22})}{I_2} \quad (9)$$

A Figura 1 ilustra o circuito envolvendo a indutância mútua entre os enrolamentos:

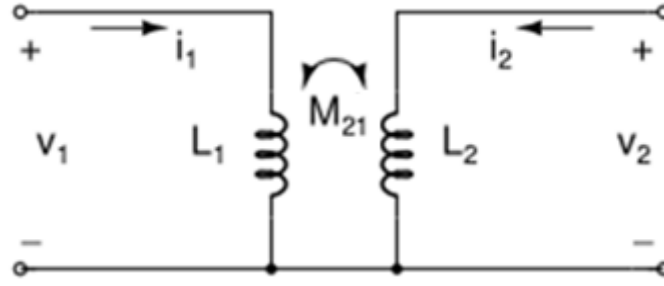


Figura 1 - Circuito com indicação da indutância mútua entre os enrolamentos

2.1.2 INDUTÂNCIA MÚTUA EM TERMOS DA PERMEÂNCIA

O fluxo magnético ϕ também pode ser relacionado à corrente no enrolamento pela equação:

$$\phi = \mathcal{P}NI \quad (10)$$

N é o número de espiras e $\mathcal{P}$ é a permeância do espaço atravessado pelo fluxo. A permeância é uma grandeza que descreve as propriedades magnéticas deste espaço. Se o espaço atravessado pelo fluxo contém um material magnético (ferro, níquel ou cobalto), a permeância varia com o fluxo, o que dá origem a uma relação entre ϕ e I . O fluxo também é proporcional ao número de espiras do enrolamento, conforme a equação 9. A partir das equações 3, 5 e 10 obtém-se:

$$V_{fem} = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d}{dt}(\mathcal{P}NI) = N^2\mathcal{P} \frac{dI}{dt} = L \frac{dI}{dt} \quad (11)$$

A equação 11 mostra que a indutância é proporcional ao quadrado do número de espiras do enrolamento.

Portanto, a indutância mútua ocorre quando há dois enrolamentos magneticamente acoplados. O enrolamento primário é alimentado por uma fonte de corrente variável I_1 estabelecida nas N_1 espiras. O enrolamento secundário é posicionado próximo ao primário, com um núcleo entre eles. O fluxo magnético produzido pela corrente I_1 pode ser dividido em duas componentes, ϕ_{11} e ϕ_{21} .

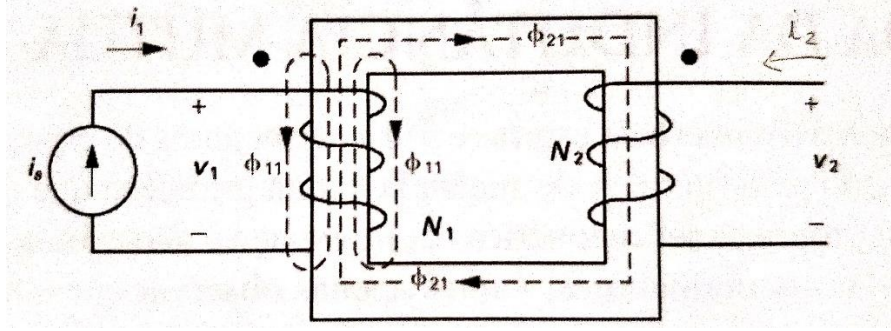


Figura 2 - Enrolamentos primário e secundário magneticamente acoplados

A componente ϕ_{11} é o fluxo gerado pela corrente I_1 que atravessa apenas as N_1 espiras e ϕ_{21} é o fluxo gerado por I_1 que também atravessa as N_2 espiras. Portanto, ϕ_1 é o fluxo total que atravessa o enrolamento primário:

$$\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{21} \quad (12)$$

O fluxo ϕ_1 e seus componentes estão relacionados à corrente I_1 e podem ser expressos como:

$$\phi_1 = \mathcal{P}_1 N_1 I_1 \quad (13)$$

$$\phi_{11} = \mathcal{P}_{11} N_1 I_1 \quad (14)$$

$$\phi_{21} = \mathcal{P}_{21} N_1 I_1 \quad (15)$$

Conforme as equações 12, 13, 14 e 15 temos o somatório das permeâncias:

$$\mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_{11} + \mathcal{P}_{21} \quad (16)$$

A tensão induzida v_2 gerada no enrolamento secundário pode ser encontrada com auxílio da Lei de Faraday:

$$v_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = \frac{d(N_2 \phi_{21})}{dt} = N_2 \frac{d(\mathcal{P}_{21} N_1 I_1)}{dt} = N_2 N_1 \mathcal{P}_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (17)$$

A indutância mútua M_{21} entre os enrolamentos primário e secundário, em termos do número de espiras e permeância é encontrada através da equação 18.

$$M_{21} = N_2 N_1 \mathcal{P}_{21} \quad (18)$$

O índice de M_{21} informa que a tensão induzida no enrolamento secundário é gerada pela corrente do enrolamento primário. Dessa forma é possível verificar que a amplitude da tensão induzida v_2 no enrolamento secundário é diretamente

proporcional à permeância $\mathcal{P}_{21}$, presente no espaço percorrido pelo fluxo gerado pela corrente I_1 e que atravessa o enrolamento secundário.

2.1.3 ACOPLAMENTO MAGNÉTICO

Desenvolvendo a equação geral de armazenamento de energia em indutores é possível definir um parâmetro importante: o acoplamento magnético (k) entre dois enrolamentos. Essa grandeza varia entre 0 e 1 e é definida como:

$$k = \frac{M_{21}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (19)$$

O acoplamento magnético máximo significa que todas as linhas de fluxo de um enrolamento atravessam o outro enrolamento ($k = 1$). Para um acoplamento magnético parcial, apenas parte do fluxo é atravessado ($0 \leq k < 1$).

Ou seja, o acoplamento magnético é uma grandeza que identifica a influência magnética entre dois enrolamentos próximos. Se as propriedades magnéticas do núcleo compreendido entre os dois enrolamentos são alteradas, então o acoplamento magnético também é alterado. Portanto, a proposta desse trabalho é desenvolver sensores indutivos que sejam sensíveis a pequenas mudanças das propriedades magnéticas dos fluidos existentes no interior dos enrolamentos primário e secundário. Tais fluidos têm o papel de núcleo e são responsáveis por apresentar permeâncias específicas e, conseqüentemente, apresentar acoplamentos magnéticos específicos. O dimensionamento das bobinas considera esses efeitos e afeta diretamente a resolução e precisão de cada sensor.

2.1.4 PERMEABILIDADE MAGNÉTICA DO MEIO

Em geral, pode-se classificar os materiais em termos de suas propriedades magnéticas através do parâmetro de permeabilidade magnética relativa (μ_r). Esse parâmetro relaciona a indução magnética do material em um determinado ponto, em função do campo magnético existente nesse mesmo ponto. Um material pode ser classificado em diamagnético, paramagnético ou ferromagnético.

Um material é diamagnético quando $\mu_r \approx < 1$. Um exemplo é o cobre ($\mu_r = 0,999995$). São materiais em que os campos magnéticos, devido aos movimentos

de translação dos elétrons em torno do núcleo e de rotação dos elétrons em torno de seus próprios eixos se cancelam mutuamente. Logo, o momento magnético permanente de cada átomo é zero, ou seja, os materiais são fracamente afetados pelo campo magnético.

Um material é paramagnético quando $\mu_r \approx 1$. Um exemplo é o alumínio ($\mu_r = 1,000021$). São materiais em que os campos magnéticos produzidos pelos movimentos de translação dos elétrons em torno do núcleo e de rotação dos elétrons em torno de seus próprios eixos não se cancelam completamente. Logo, o momento magnético permanente é não-nulo.

Um material é ferromagnético quando $\mu_r \gg 1$ (muito maior que 1). Um exemplo é o ferro ($\mu_r = 7000$). São materiais em que os átomos têm momento magnético permanente relativamente grande, com comportamento não-linear. Além disso, são capazes de serem magnetizados fortemente por um campo magnético, restando um grau considerável de magnetização mesmo quando retirados do campo [13].

A densidade de fluxo magnético B no interior de um solenóide é diretamente proporcional à permeabilidade magnética do material presente em seu interior, onde H é a intensidade de campo magnético gerada pela corrente elétrica e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (20)$$

De acordo com a Lei de *Ampère*, a integral de linha da componente tangencial da intensidade de campo magnético H em torno de um caminho fechado é igual à corrente líquida I_{env} envolvida pelo caminho:

$$\oint H \cdot d\mathbf{l} = I_{env} \quad (21)$$

Para um solenóide longo, temos a equação 21 convertida para:

$$H l = NI \quad (22)$$

Na equação 22, N é o número de espiras, I é a corrente elétrica e l é o comprimento do solenóide. Conforme as equações 20 e 22, a densidade de fluxo magnético em seu eixo pode ser aproximada para:

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r NI}{l} \quad (23)$$

Portanto, quanto maior a permeabilidade magnética do material no interior de um solenóide, maior será a densidade de fluxo magnético, favorecendo o aumento do acoplamento magnético entre os enrolamentos.

2.2. ELEMENTOS DO SISTEMA DE INTERROGAÇÃO

2.2.1 OSCILADORES

Um oscilador eletrônico é um circuito que gera uma fonte de sinal periódico, geralmente senoidal, quadrada ou triangular. Esse circuito tem a capacidade de converter uma tensão contínua (DC) proveniente de uma fonte de alimentação em um sinal de corrente alternada (AC). Osciladores são caracterizados pela frequência e amplitude do sinal gerado. [7]

Existem osciladores de baixa frequência (LFO) que geram frequências abaixo de 20 Hz, tipicamente utilizados em metrônimos e sintetizadores de áudio.

Osciladores na faixa de 16 Hz a 20 kHz têm o propósito por exemplo de gerar sinais audíveis, ou seja, dentro do espectro sonoro.

Já osciladores RF produzem portadoras de rádio frequência em sistemas de comunicação, entre o intervalo de 100 kHz a 100 GHz (no caso de 100 GHz são para aplicações específicas).

Osciladores harmônicos apresentam componentes amplificadores como por exemplo transistores ou amplificadores operacionais, conectados em um loop de realimentação (*Feedback*) através de componentes passivos, fornecendo um filtro seletivo de frequência. No estágio inicial, quando o circuito é alimentado, um ruído eletrônico fornece um sinal diferente de zero para início das oscilações. O ruído percorre o loop, é amplificado e filtrado até convergir rapidamente em uma onda senoidal com uma frequência central dependente do filtro.

Circuitos osciladores de realimentação são classificados de acordo com o tipo de filtro seletivo de frequência utilizado no loop de *feedback*:

- Circuito oscilador RC: o filtro é uma rede de resistores e capacitores, muito utilizado nas frequências de áudio. Exemplos são: *Phase Shift Oscillator* e *Wien Bridge*.

- Circuito oscilador LC: o filtro é um circuito sintonizado (chamado de circuito tanque) que consiste de um ou mais indutores e capacitores em paralelo, formando uma rede ressonante. A carga elétrica existente na rede é intercalada entre indutor e capacitor, de modo que o circuito sintonizado possa armazenar energia elétrica oscilando em sua frequência de ressonância. Um componente amplificador adiciona energia para compensar as perdas resistivas no circuito, além de fornecer energia para o sinal de saída. Osciladores LC típicos são: *Hartley*, *Colpitts* e *Clapp circuits*.
- Circuito oscilador a Cristal: o filtro é um cristal piezoelétrico (geralmente um cristal de *quartz*) que vibra como um ressonador na frequência alvo de saída.

2.2.2 OSCILADOR COLPITTS

Colpitts é um oscilador LC baseado em um circuito tanque que consiste em um único indutor e dois capacitores, projetados para que oscilem em uma frequência pré-determinada, funcionando como um filtro passa-banda [x8]. Uma característica específica do *Colpitts* é que a realimentação para o componente amplificador (transistor ou amplificador operacional) é obtida pela divisão de tensão entre os dois capacitores do circuito tanque, conforme a Figura 3.

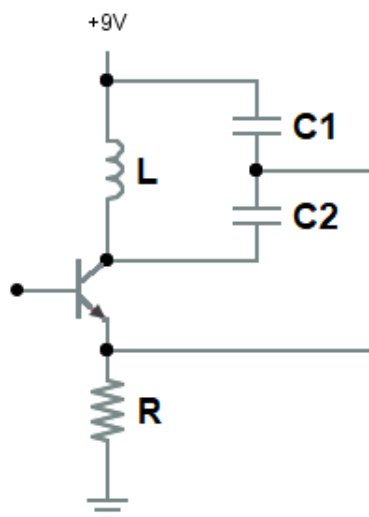


Figura 3 - Oscilador Colpitts

A realimentação é essencial devido às perdas de energia durante os ciclos, necessitando da compensação gerada pelo ganho do dispositivo (transistor) [x9].

Para a determinação da frequência de oscilação, considera-se que C_1 e C_2 estão em série. Logo a capacitância equivalente do circuito tanque é:

$$C_{eq} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (23)$$

Portanto, como o indutor L está em paralelo com C_{eq} , igualamos a reatância indutiva com a reatância capacitiva para encontrar a frequência de oscilação: [x8]

$$j\omega L = \frac{j}{\omega C_{eq}} \rightarrow \omega^2 = \frac{1}{LC_{eq}} \rightarrow 2\pi f = \sqrt{\frac{1}{LC_{eq}}} \rightarrow$$

$$\boxed{f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}} \quad (24)$$

Os valores específicos de C_1 e C_2 são projetados de modo que a relação entre eles produza a proporção necessária de sinal de realimentação. No entanto, a relação de tensões através de dois capacitores em série é inversamente proporcional à relação dos valores. Ou seja, o capacitor com menor capacitância tem a maior tensão em seus terminais. A principal vantagem do oscilador *Colpitts* é que o único indutor do circuito tanque evita qualquer efeito de indutância mútua entre dois indutores (como visto no oscilador *Hartley*), onde o campo magnético variável em um indutor induz uma corrente elétrica em outro indutor. Isso afetaria a indutância total dos indutores e, assim, alteraria a frequência de ressonância do circuito tanque.

2.2.3 MOSFET

MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) é um tipo de transistor que apresenta um canal com material semicondutor, em que o terminal de controle é composto por uma camada de polisilício, separado por uma fina camada de óxido isolante. O MOSFET utiliza o efeito de campo elétrico no processo de chaveamento e amplificação de sinais. Dessa forma, eles podem ser utilizados tanto em circuitos analógicos como digitais, atingindo excelentes resultados de amplificação e rápida capacidade de chaveamento, além de suportar altas correntes [x10].

Os MOSFETs podem apresentar um canal de material semicondutor tipo N ou tipo P, sendo chamados de NMOS ou PMOS, respectivamente. Sua estrutura é composta por três terminais: Dreno, Fonte e Porta (*Drain*, *Source* e *Gate*).

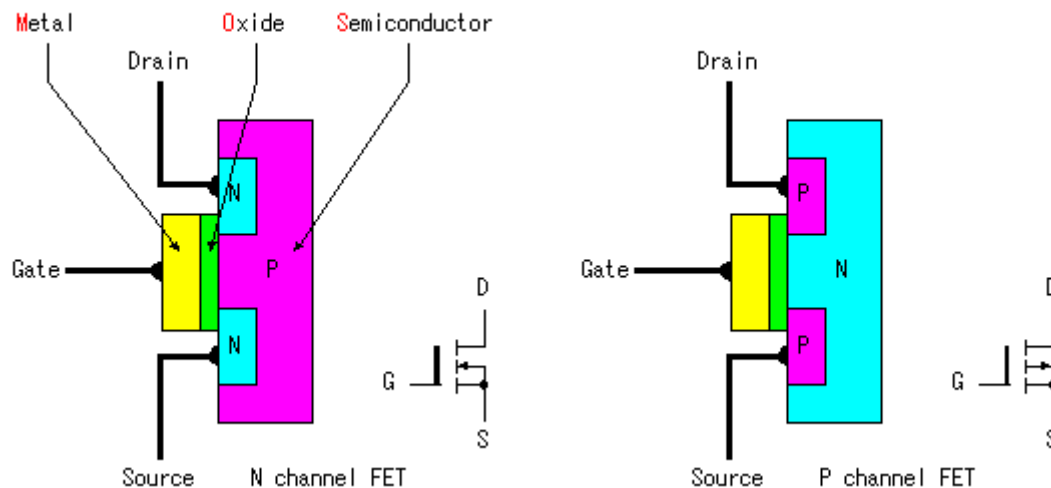


Figura 4 - Estruturas dos MOSFETs NMOS e PMOS

Mesmo que não exista uma conexão elétrica entre o *Gate* e o canal semicondutor, a tensão no *Gate* cria um efeito de campo. Na junção PN é naturalmente criada uma região de depleção mesmo na ausência de campo elétrico. Esse é o estado natural quando a tensão de *Gate* é zero, ou seja, o MOSFET está operando na zona de corte. A medida em que há um aumento da tensão de *Gate*, buracos são repelidos da região semicondutora entre o *Source* e o *Drain*. Em eletrônica, entende-se que buraco é a falta de um elétron em uma posição onde poderia existir em um átomo. Ou seja, para semicondutores um buraco pode ser entendido como o “oposto” de um elétron.

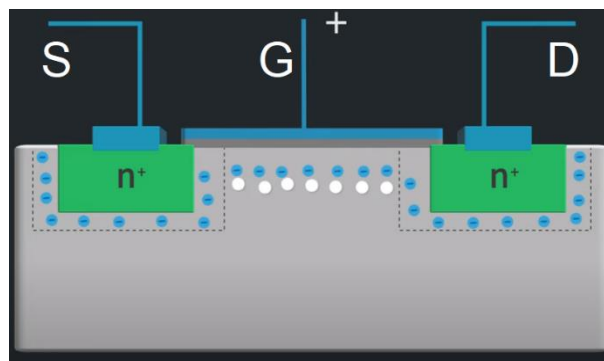


Figura 5 - Criação de zona de depleção

Como as cargas positivas são repelidas, apenas cargas negativas permanecem nessa região, criando uma região de depleção no canal de interligação entre *Source* e *Drain*, conforme Figura 5. À medida que a tensão de *Source* aumenta, inicia uma inversão do canal na região entre *Source* e *Drain*, conforme a Figura 6.

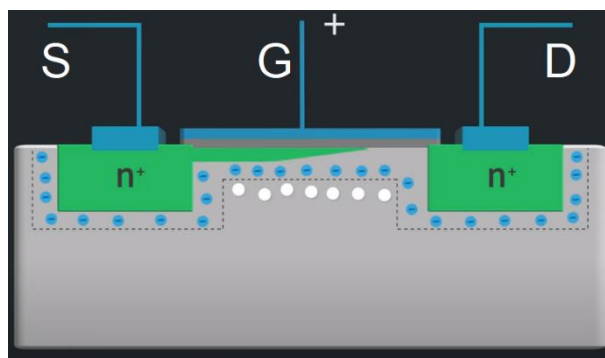


Figura 6 - Formação de canal invertido entre Source e Drain

No entanto, enquanto a tensão de *Gate* não se iguala à tensão de limiar do MOSFET, a região com os portadores livres ainda não se conecta entre o *Source* e o *Drain*. Essa área de operação é chamada de pinçamento (*pinch-off*). À medida que a tensão de *Gate* aumenta (campo elétrico aumenta), a tensão limite (*threshold voltage*) é ultrapassada permitindo a inversão completa do canal entre *Source* e *Drain*, possibilitando que elétrons possam fluir nessa região. Nesse momento, se uma tensão é aplicada entre *Source* e *Drain*, a região permitirá a passagem de corrente elétrica, conforme a Figura 7.

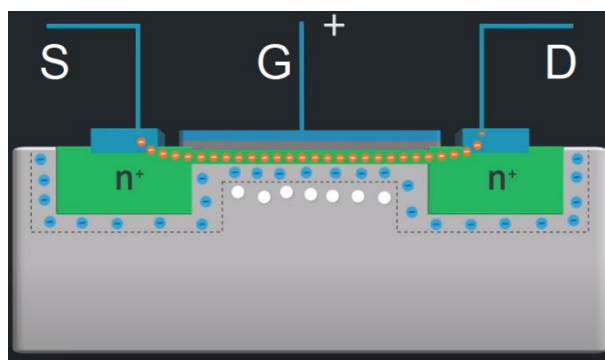


Figura 7 - Inversão completa do canal entre Source e Drain

Dessa forma, a tensão V_{GS} aplicada ao *Gate* controla a largura do canal e, conseqüentemente, a corrente elétrica entre *Drain* e *Source* (I_D).

2.2.4 AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Um amplificador operacional é um circuito integrado complexo composto de inúmeros transistores, diodos, resistores, além de outros componentes eletrônicos. Ele possui duas entradas, a inversora (V_-) e a não-inversora (V_+). Possui uma saída (V_o) e dois terminais de alimentação: um positivo (V_{cc+}) e outro negativo (V_{cc-}) [x11].

A operação básica do amplificador operacional é de amplificar a tensão diferencial existente entre os terminais de entrada V^+ e V^- com um ganho específico A_o , conforme a equação 25:

$$V_o = A_o(V^+ - V^-) \quad (25)$$

Um amplificador operacional tem as seguintes características:

- Impedância de entrada extremamente alta: essa característica permite uma alta sensibilidade, ou seja, qualquer tensão diferencial aplicada às entradas é amplificada.
- Impedância de saída muito baixa: essa característica permite um ótimo rendimento do amplificador em relação ao sinal amplificado, garantindo uma ótima transferência de potência para a carga.
- Ganho de tensão em malha aberta muito elevado: essa característica permite uma ótima amplificação, mesmo com uma pequena amplitude do sinal de entrada.
- Largura de banda relativamente alta: essa característica permite a amplificação de sinais mesmo com frequências muito altas, desde DC a centenas de MHz.

Aplicações básicas do amplificador operacional:

- Amplificador inversor: O sinal está ligado à entrada inversora (V^-) por meio de um resistor (R_1) e a entrada não-inversora (V^+) é aterrada. Entre os terminais da entrada inversora e a saída (V_o) há um resistor (R_2) de realimentação.

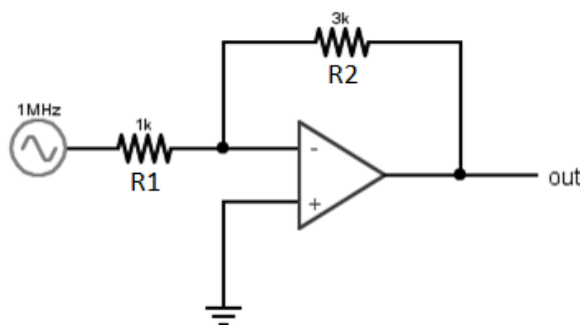


Figura 8 - Amplificador Inversor

O ganho do amplificador inversor reflete a inversão de fase na saída e é dado por:

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} \quad (26)$$

- Amplificador não-inversor: O sinal está ligado à entrada não-inversora (V_+), de modo que o sinal amplificado não terá fase invertida. O resistor da entrada inversora (R_1) está aterrado e o resistor de realimentação (R_2) está entre os terminais da entrada inversora e a saída (V_o).

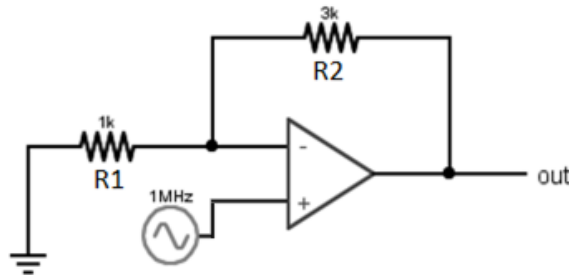


Figura 9 - Amplificador não-inversor

O sinal de entrada é ligado diretamente ao terminal não-inversor, de modo que o sinal amplificado não terá fase invertida. O ganho do amplificador não-inversor é dado por:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (27)$$

- Somador de tensão: nessa configuração há um amplificador inversor com várias entradas, cada uma com um ganho dependente do respectivo resistor de entrada (R_x).

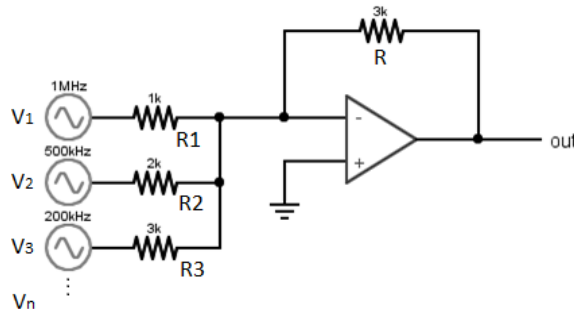


Figura 10 - Somador de Tensão

A expressão da tensão de saída no caso em que $R_1 = R_2 = R_3 = R_n$ é a seguinte:

$$V_o = -\frac{R}{R_n} (V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n) \quad (28)$$

Caso $R = R_n$, a expressão fica reduzida a:

$$V_o = -(V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n) \quad (29)$$

- Subtrator de tensão: é basicamente um amplificador diferencial com o mesmo ganho nas entradas inversora e não-inversora.

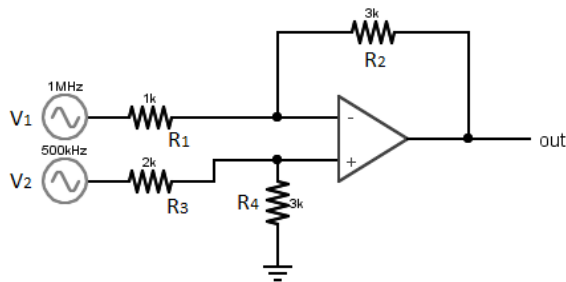


Figura 11 - Subtrator de Tensão

A expressão da tensão de saída é a seguinte:

$$V_o = \frac{R_4}{R_3} V_2 - \frac{R_2}{R_1} V_1 \quad (30)$$

Se no circuito, $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$, a expressão da tensão de saída é:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (31)$$

Além disso, se $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, a expressão fica reduzida a:

$$V_o = (V_2 - V_1) \quad (32)$$

- Comparador de tensão: nessa configuração há uma tensão de referência usada na comparação (zero, positiva ou negativa), gerando uma saída desejada após a comparação.

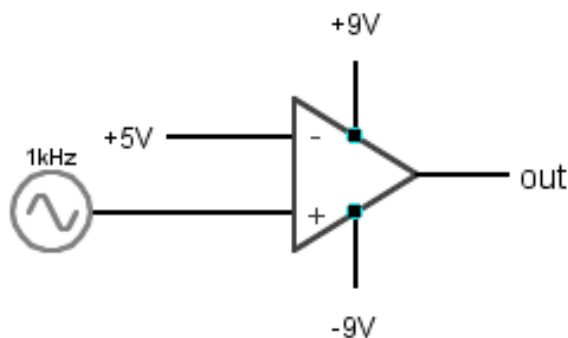


Figura 12 - Comparador de Tensão

Como o ganho de tensão do amplificador operacional em malha aberta é muito elevado, a saída terá dos valores possíveis:

$$\begin{aligned} V_o &= +V_{cc}, \text{ quando } V_+ > V_- \\ V_o &= -V_{cc}, \text{ quando } V_- > V_+ \end{aligned} \quad (33)$$

- Diferenciador Ativo: essa configuração pode ser considerada como um filtro passa-altas em que a frequência do sinal de entrada é bem menor que a sua frequência de corte.

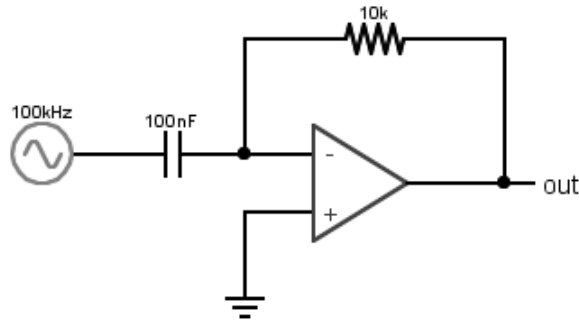


Figura 13 - Diferenciador Ativo

A frequência de corte do circuito é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (34)$$

Para frequências maiores que f_c , o capacitor comporta-se como um curto-circuito, de modo que o circuito funciona como um amplificador inversor de ganho elevado, ou seja, a tensão de saída é V_{cc} . Para frequências bem menores que f_c , o capacitor mantém a sua característica de função diferencial envolvendo corrente e tensão, de modo que a tensão de saída é proporcional à derivada da tensão de entrada, conforme a equação 35:

$$V_o = -RC \frac{d}{dt} V_i \quad (35)$$

- Integrador Ativo: essa configuração pode ser considerada como um filtro passa-baixas em que a frequência do sinal de entrada é bem maior que a sua frequência de corte.

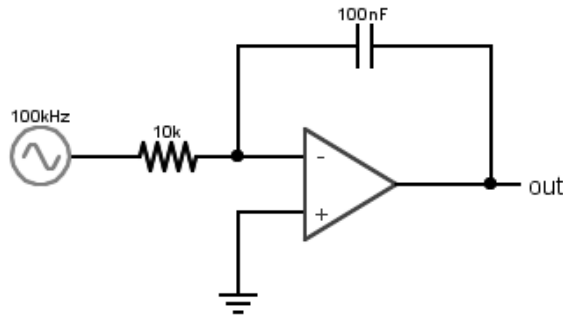


Figura 14 - Integrador Ativo

A frequência de corte do circuito também é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (36)$$

Para frequências menores que f_c , o capacitor comporta-se como uma alta impedância, de modo que o circuito funciona como um amplificador inversor de ganho elevado, ou seja, a tensão de saída é V_{cc} . Para frequências bem maiores que f_c , o capacitor mantém a sua característica de função diferencial envolvendo corrente e tensão, de modo que a tensão de saída é proporcional à integral da tensão e entrada, conforme a equação 37:

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i dt \quad (37)$$

2.3. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Um analisador de impedâncias é um equipamento de bancada utilizado para identificar a impedância equivalente de um circuito. Esse equipamento tem a capacidade de fornecer uma fonte de tensão senoidal a um circuito em um intervalo de frequências, fornecendo como saída, curvas de impedância e fase no domínio da frequência em escala linear ou logarítmica. Dessa forma, o analisador de impedâncias desempenha um papel importante na medição LCR (indutância, capacitância e resistência) de uma carga, podendo ser utilizado para caracterização de sensores, supercapacitores e semicondutores, além de materiais como polímeros dielétricos, cerâmicos, compósitos e nanoestruturas. O analisador de impedâncias utilizado nesse trabalho é o *MFIA* da *Zurich Instruments*.



Figura 15 - Analisador de Impedâncias MFA (Zurich Instruments)

Esse modelo é capaz de gerar sinais com frequências entre 1 mHz e 5 MHz, para medições de impedâncias entre 1 mΩ e 1 TΩ com precisão de 0,05%. Apresenta uma interface USB para comunicação com PC através do software *LabOne*. O software inclui uma interface gráfica do usuário (GUI) baseada em *browser*, disponibilizando várias ferramentas e funcionalidades divididas em 3 categorias: aquisição de dados, processamento de sinais e instrumentação.

2.4. DIMENSIONAMENTO E FABRICAÇÃO DAS BOBINAS

Uma bobinadeira é um equipamento de bancada utilizado para enrolar fios esmaltados em um carretel com o auxílio de dois eixos: um eixo responsável por guiar o fio e outro eixo responsável pelo giro do carretel. Dessa forma, é possível construir solenóides e transformadores de forma ágil e com controle de número de espiras.



Figura 16 - Bobinadeira MEGA MGB LS1

A bobinadeira MEGA MGB LS1 (utilizada nesse trabalho) tem um sistema para entrada de parâmetros. Os principais parâmetros são:

- Controle de velocidade de rotação;
- Controle de sentido horário ou anti-horário;

- Avanço para espalhamento do fio, informando o diâmetro do fio a ser bobinado em milímetros;
- Número de espiras;
- Coordenada X menor, informando a posição inicial do carretel;
- Coordenada X maior, informando a posição final do carretel.

CAPÍTULO 3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL, CARACTERIZAÇÃO E INTERROGAÇÃO

Descreve-se a seguir, as montagens dos protótipos dos sensores indutivos, contendo cada elemento utilizado, assim como o sistema de interrogação que é composto por circuitos capazes de detectar as variações de indutância quando os elementos sensores são inseridos nos diferentes meios (ar, água ou óleo) e posteriormente são armazenadas as leituras. Os experimentos foram realizados no laboratório de eletrônica do CPID (Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento), localizado em Cariacica – ES.

3.1 MONTAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR INDUTIVO

Cada sensor indutivo foi construído com o auxílio da bobinadeira modelo *MEGA MGB LS1* (detalhada no Cap. 2, Seção 2.4).

Como anteriormente mencionado, cada sensor é baseado em dois enrolamentos: o primário recebe uma corrente senoidal I_1 através de um circuito oscilador. Essa corrente senoidal do primário gera um fluxo magnético variável, sendo que parte desse fluxo é envolvido pelo enrolamento secundário devido à proximidade entre eles, resultando no surgimento de uma corrente elétrica I_2 proporcional à densidade de fluxo magnético envolvido pelo enrolamento secundário. Conforme a equação 18, pode-se variar a densidade do fluxo magnético no interior do solenóide na presença de materiais com permeabilidades magnéticas distintas. Portanto, os sensores indutivos foram projetados para identificar as variações de densidade de fluxo magnético quando imersos em meios distintos (ar, óleo, emulsão ou água).

As Figuras 17, 18 e 19 demonstram as equações de indutância mútua, acoplamento magnético e tensão induzida para os diversos tipos de fluidos (ar, óleo e água).

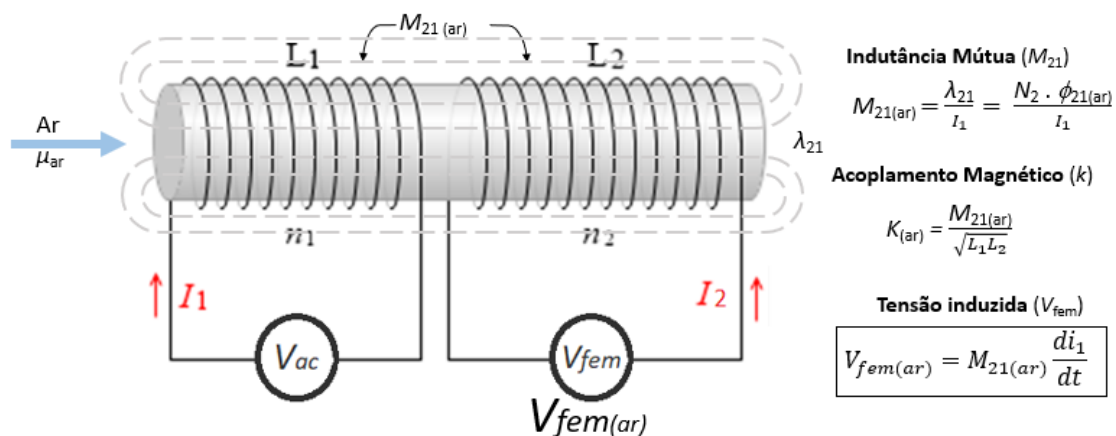


Figura 17 - Sensor ao ar livre

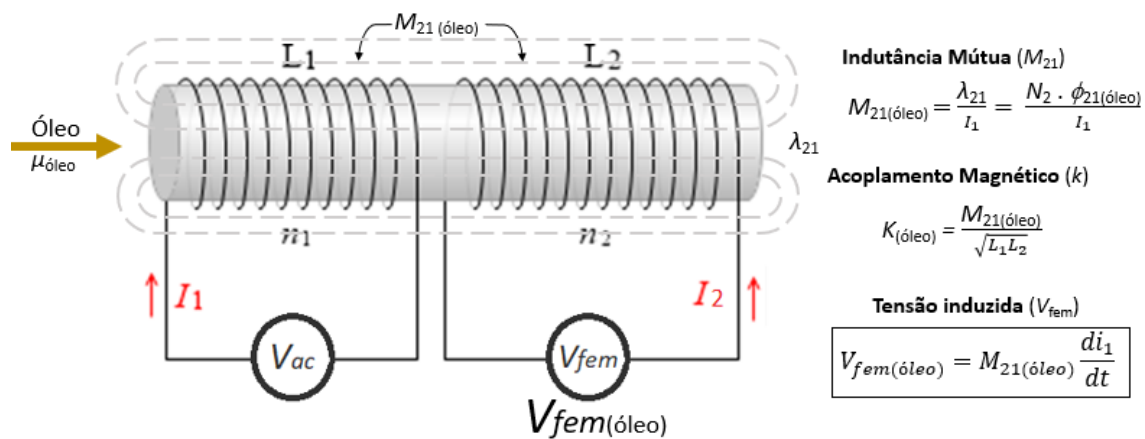


Figura 18 - Sensor imerso em óleo

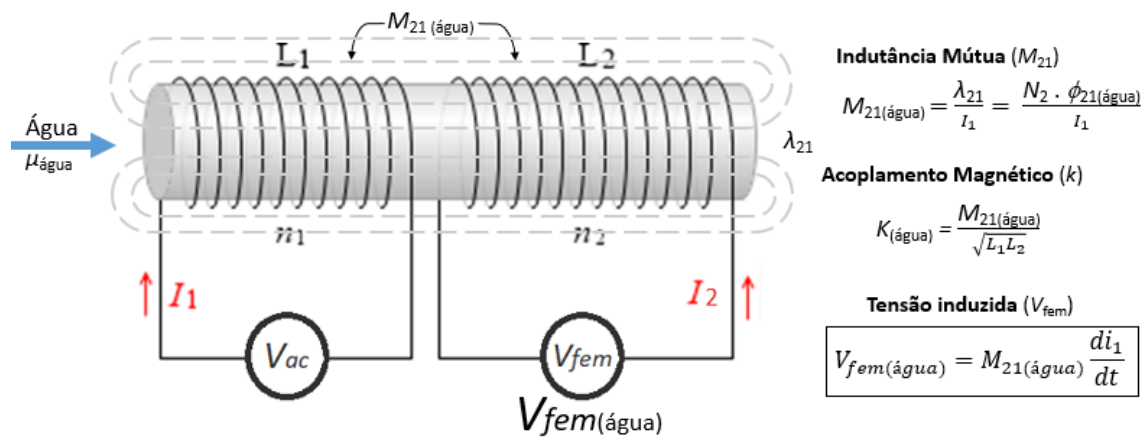


Figura 19 - Sensor imerso em água

Foi utilizado um tubo vertical de PVC com 4 cm de diâmetro como estrutura para os sensores indutivos.

Cada sensor foi construído em um pedaço de tubo de PVC utilizado como carretel para os enrolamentos primário e secundário. O primeiro sensor foi construído com 40 espiras no enrolamento primário e 80 espiras no enrolamento secundário, utilizando fio esmaltado AWG32 (0,203 mm de diâmetro). Esses valores de número de espiras e diâmetro do fio foram projetados para permitir que os sensores indutivos fossem instalados de forma eficaz no interior da estrutura de PVC de 4 cm de diâmetro.

Inicialmente é enrolado o primário, conforme a Figura 20. Um parafuso foi utilizado para fixar os terminais dos enrolamentos.

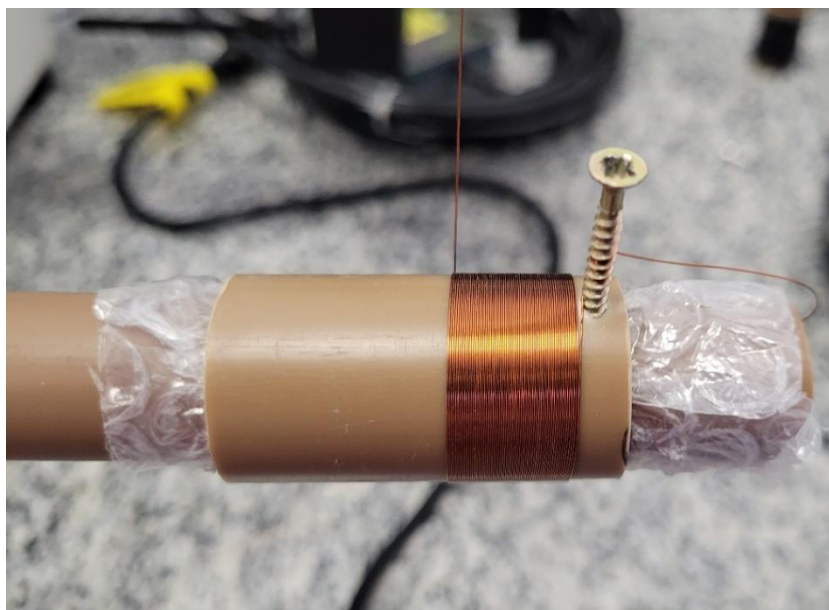


Figura 20 - Enrolamento primário do sensor

O enrolamento primário é envolvido com fita isolante para evitar que seja desfeita a bobina. Logo após é enrolado o secundário.

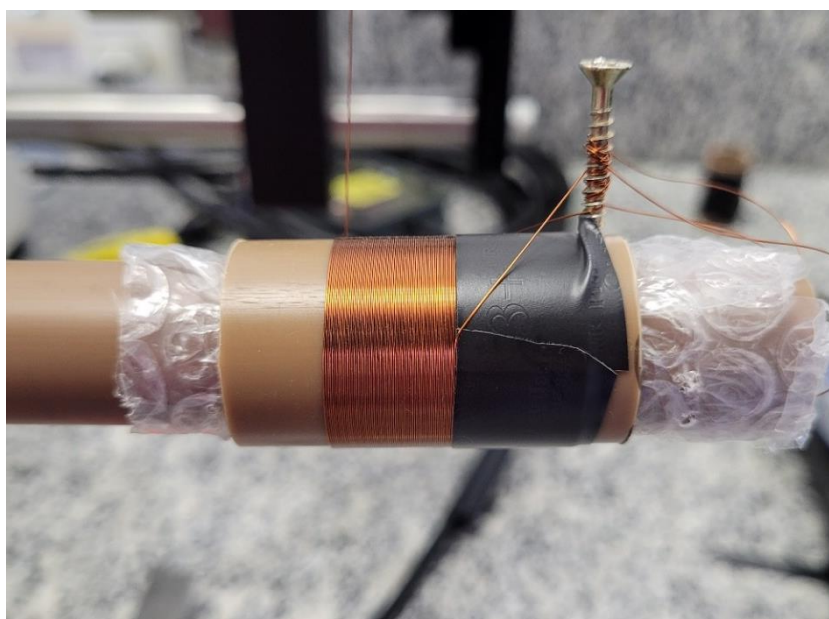


Figura 21 - Enrolamento secundário do sensor

O enrolamento secundário também é envolvido com fita isolante com o cuidado de separar os 4 terminais do sensor (terminais 1 e 2 do enrolamento primário e 3 e 4 do enrolamento secundário). Um pedaço de tubo de PVC com diâmetro um pouco maior é utilizado para proteger o sensor, conforme Figuras 22 e 23.

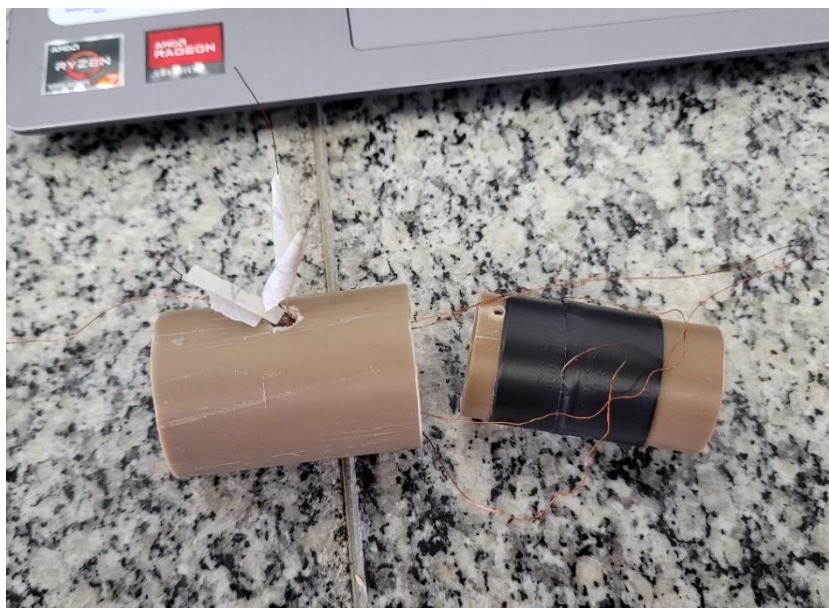


Figura 22 - Tubo de PVC para proteção do sensor

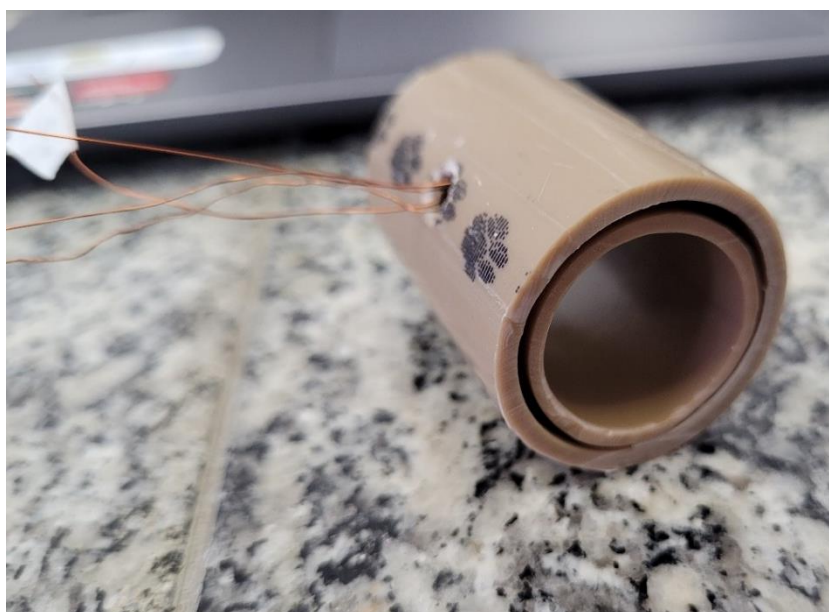


Figura 23 - Encaixe do tubo de PVC

As extremidades dos tubos foram preenchidas com massa epóxi, para evitar o contato direto dos líquidos com os enrolamentos.



Figura 24 - Sensor protegido com massa epóxi

Quando testados em meios distintos, foram verificadas alterações na impedância equivalente do circuito, ou seja, um aumento ou redução da resistência e da reatância). A Figura 25 mostra o diagrama considerado. Dessa forma, o circuito de cada sensor é projetado para que essas alterações na impedância equivalente sejam sensíveis na etapa de interrogação do sistema.

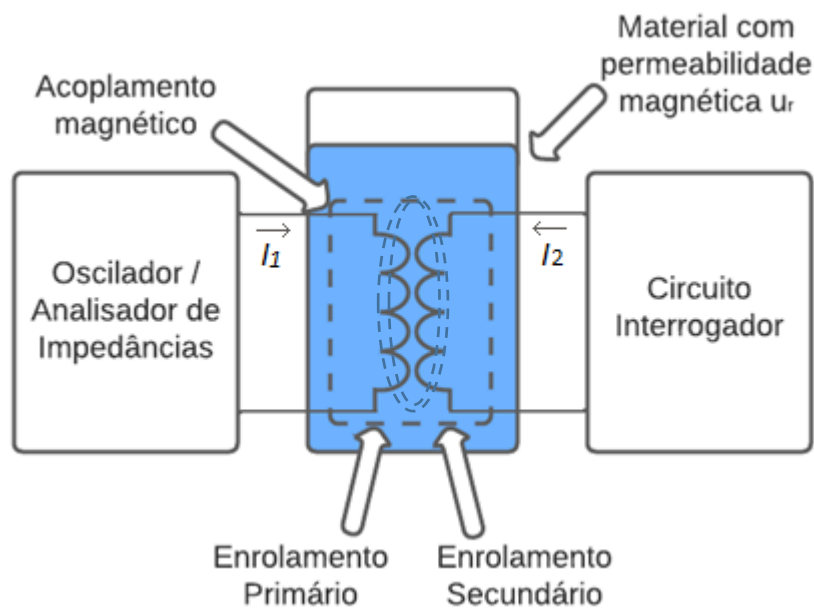


Figura 25 - Diagrama para identificação da frequência alvo

Com o arranjo de vários sensores distribuídos verticalmente, conforme demonstrado na Figura 26, é possível a identificação dos níveis de fluidos existentes no reservatório, visto que cada sensor estará imerso em um fluido específico, identificando as características magnéticas do mesmo. Logo, na saída

de cada sensor foi desenvolvido um circuito interrogador que captura o sinal analógico gerado pelo enrolamento secundário, que representa um ganho proporcional às propriedades magnéticas do fluido presente ao redor do sensor.

Os dados de todos os sensores são enviados para um supervisor que informa em tempo real a quantidade (i.e. nível) das interfaces dos fluidos existentes na mistura multifásica.

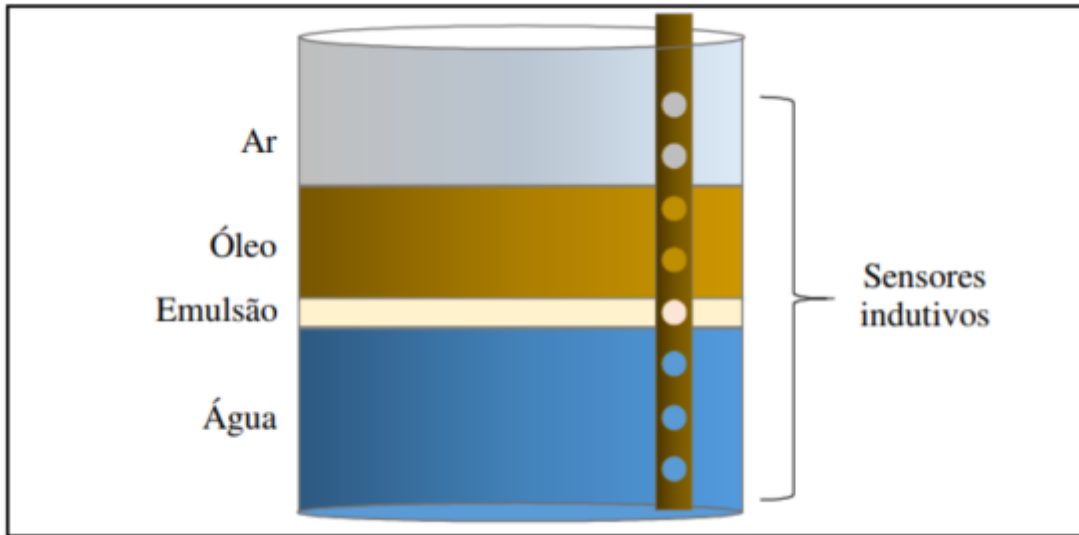


Figura 26 - Arranjo de sensores imersos em um tanque multifásico

Para identificar o comportamento dos sensores quando imersos em diferentes meios, foi utilizado um analisador de impedâncias modelo MFIA da *Zurich Instruments* (descrito no Cap. 2, Seção 2.3). Como dito, um analisador de impedâncias tem a capacidade de alimentar o enrolamento primário com um sinal senoidal, parametrizado em um intervalo considerado de frequências. A partir desta análise foi possível levantar curvas no domínio da frequência identificando as características resistivas e reativas do sensor quando imerso em ar, óleo ou água. A frequência alvo é aquela em que é identificada a maior variação das grandezas resistivas e reativas do circuito quando testadas nos diferentes fluidos.

De acordo com o teorema da transferência de potência, há uma transferência máxima quando a impedância de entrada (Z_S) é igual ao conjugado da impedância de carga (Z_L) [x12], conforme as equações 38 e 39. O circuito considerado é ilustrado na Figura 27.

$$Z_S = \overline{Z_L} \rightarrow R_S + jX_S = R_L - jX_L \quad (38)$$

$$R_S = R_L \quad e \quad X_S = -X_L \quad (39)$$

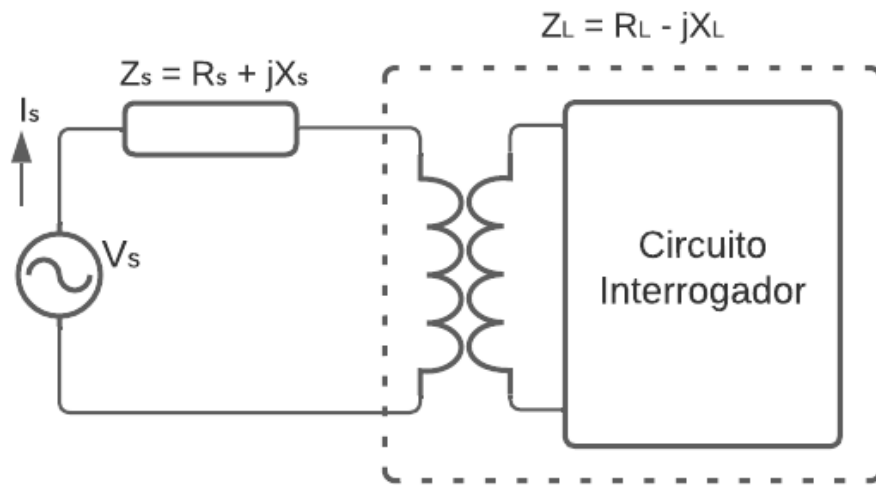


Figura 27 - Impedâncias de entrada e saída

No teste inicial, o analisador de impedâncias foi parametrizado para alimentar o sensor com frequências entre 100 kHz e 1,5 MHz. O resultado inicial mostrou que para frequências abaixo de 1,0 MHz, a impedância equivalente do circuito ($Z_s + Z_L$) praticamente não foi alterada quando o sensor foi imerso em água, óleo ou ar. A Figura 28 mostra o comportamento da impedância absoluta (linha azul), reatância (linha verde), resistência (linha azul claro) e fase (linha vermelha).

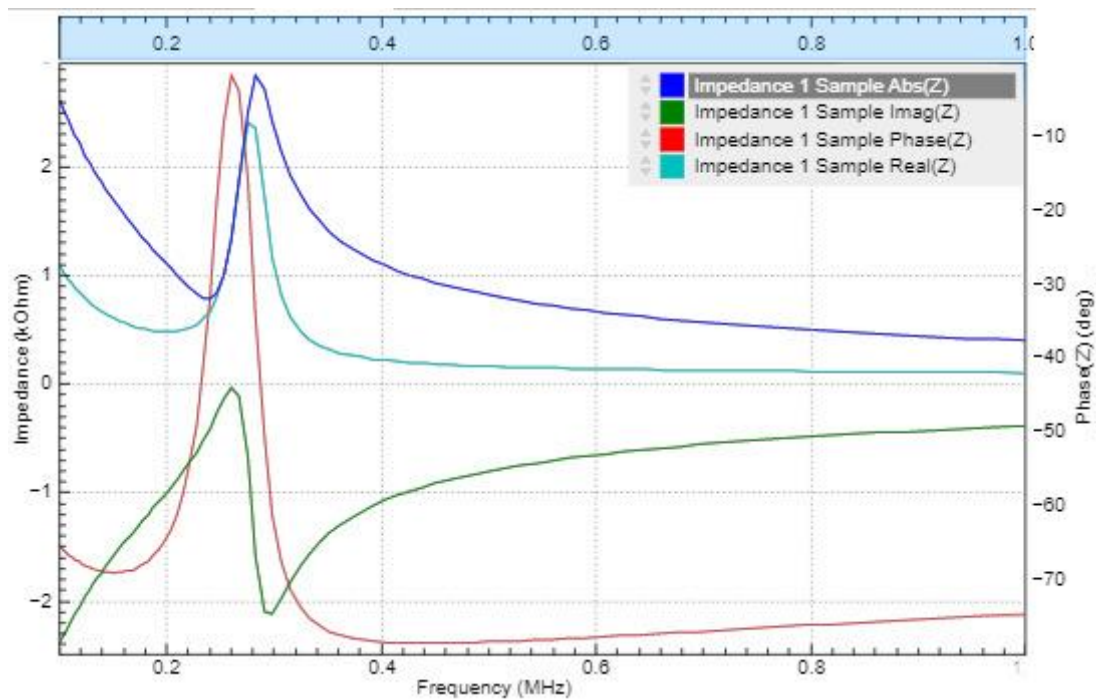


Figura 28 - Comportamento da impedância do circuito com o sensor ao ar livre no intervalo de 100 kHz e 1,0 MHz (40/80 espiras)

As curvas obtidas nos testes do sensor imerso em água (quando também submetido a frequências de 100 kHz a 1,0 MHz) foram praticamente idênticas às da Figura 28. Ou seja, observa-se que as impedâncias não sofreram alterações quando o sensor foi alimentado nas frequências abaixo de 1,0 MHz. Uma possível justificativa é o fato dos fluidos utilizados, para o intervalo de frequências considerado, não interferirem nas densidades de fluxo magnético nos núcleos dos enrolamentos primário e secundário, conforme descritas nas equações 4, 5 e 6.

O segundo teste foi realizado com aumento das frequências do oscilador para a faixa de 1,0 MHz a 1,5 MHz, resultando nas curvas da Figura 29.

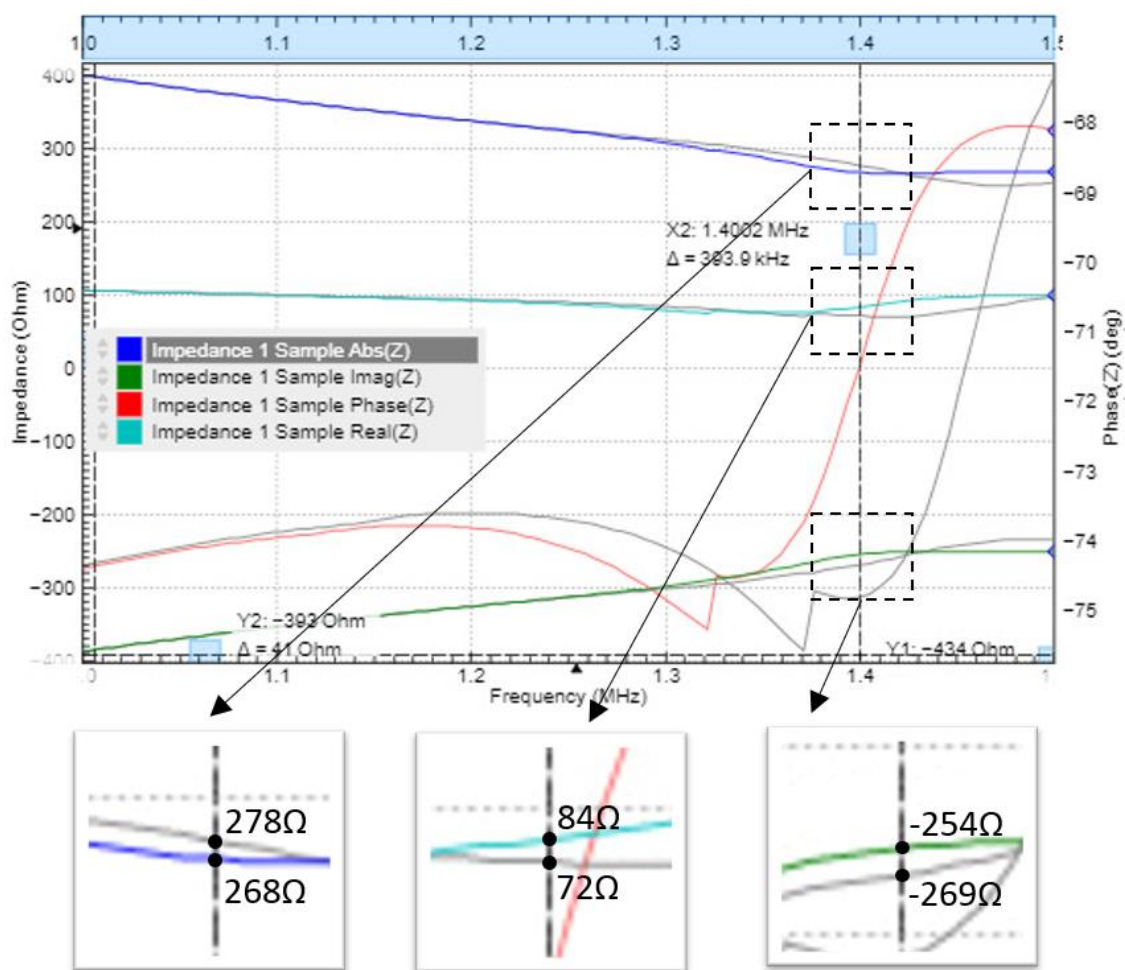


Figura 29 - Comportamento da impedância do circuito no intervalo de 1,0MHz e 1,5MHz (40/80 espiras)

Nesse intervalo de frequências foi possível identificar uma variação na impedância do circuito, principalmente na frequência próxima de 1,4 MHz. As curvas (linhas cinza) correspondem às leituras do sensor ao ar livre e as coloridas são quando o sensor permaneceu imerso em água. As alterações na impedância equivalente são mostradas na Tabela 1.

Grandeza	Ao ar livre	Na água
Real (R)	72 ohms	84 ohms
Imaginária (X)	-269 ohms	-254 ohms
Impedância Absoluta (Z)	278 ohms	268 ohms
Fase (θ)	-75°	-72°
Capacitância (F)	423 pF	448 pF

Tabela 1 - Impedância do circuito (freq. 1,4 MHz) (40/80 espiras)

No plano de Argand-Gauss é verificada uma correção parcial no casamento de impedância quando o sensor é imerso em água. A redução da reatância capacitiva (de -269Ω para -254Ω) e o aumento da resistência (de 72Ω para 84Ω) resultaram na redução da impedância absoluta do circuito (de 278Ω para 268Ω), conforme Figura 30.

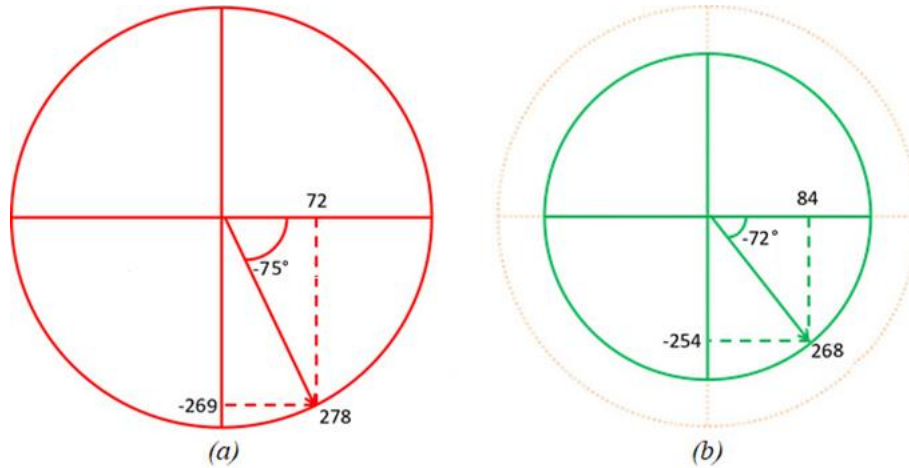


Figura 30 - Comparativo da impedância equivalente do circuito (a) ao ar livre (vermelho) e (b) imerso em água (verde)

Quando o sensor é imerso em água é possível verificar um acréscimo de reatância indutiva ΔX_L :

$$\Delta X_L = -254 - (-269) = 15 \Omega \quad (40)$$

Pode-se afirmar que, na frequência de $1,4 \text{ MHz}$, esse acréscimo de reatância indutiva significa um aumento da indutância no circuito equivalente de:

$$\Delta X_L = j\omega \Delta L_{\text{água}} \quad (41)$$

$$\Delta L_{\text{água}} = \frac{15}{2\pi \cdot 1,4 \cdot 10^6} = 1,7 \mu H \quad (42)$$

3.2 RESULTADOS E INTERROGAÇÃO DO SISTEMA SENSOR

Através da Figura 1 é possível identificar as indutâncias do circuito do enrolamento secundário: a indutância mútua M_{21} (equação 4) e a auto-indutância L_2 (equação 6). Na frequência alvo encontrada ($1,4 \text{ MHz}$) gerada pelo analisador de impedâncias, há um aumento na densidade de fluxo magnético no núcleo do

sensor quando imerso em água devido ao acréscimo de reatância indutiva X_L . Como o circuito do sensor é capacitivo ao ar livre, pode-se afirmar que esse acréscimo de reatância indutiva quando imerso em água é responsável pelo aumento de corrente no circuito do enrolamento secundário devido à correção parcial do casamento de impedância. Esse aumento de corrente elétrica no enrolamento secundário foi comprovado através de um resistor *Shunt*, conforme ilustrado na Figura 31.

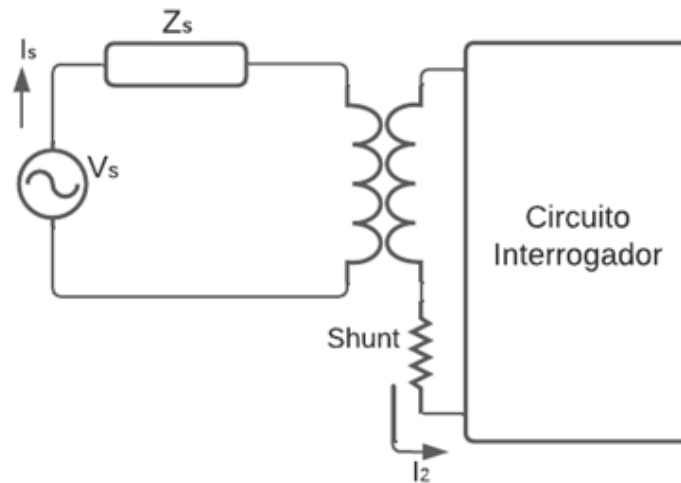


Figura 31 - Identificação da corrente do enrolamento secundário através do resistor *Shunt*

A corrente I_2 do enrolamento secundário pode ser medida através de um osciloscópio entre os terminais do resistor *Shunt*. O resistor *Shunt* foi dimensionado para 10 Ω . Dessa forma, o osciloscópio irá gerar uma forma de onda correspondente a I_2 :

$$I_2 = \frac{V_{Shunt}}{10} \quad (43)$$

As Figuras 32 e 33 mostram os resultados obtidos, onde a amplitude da tensão no resistor *Shunt* é medido em função do ganho de potência do circuito equivalente:

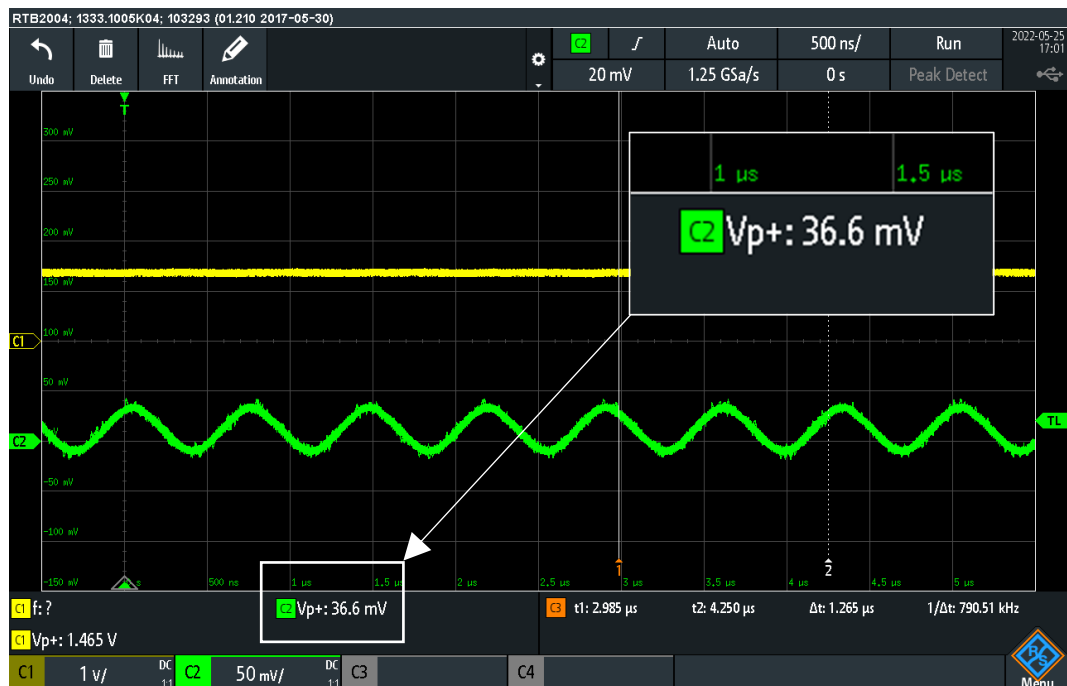


Figura 32 - Tensão no resistor Shunt (sensor fora da água)
(freq. 1,4 MHz, 40/80 espiras)

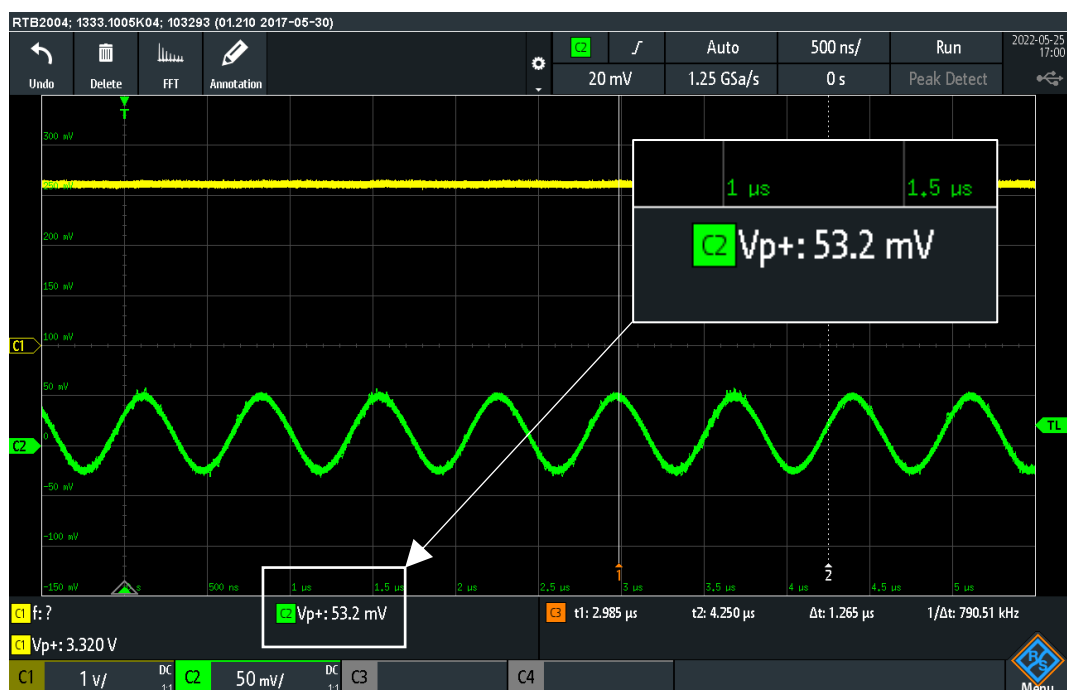


Figura 33 - Tensão no resistor Shunt (sensor imerso na água)
(freq. 1,4 MHz, 40/80 espiras)

Comparando as linhas verdes das Figuras 32 e 33 é possível obter o ganho de potência do circuito quando o sensor é imerso em água.

- Corrente de pico do enrolamento secundário (no ar):

$$I_{P_{AR}} = \frac{36,6 \cdot 10^{-3}}{10} = 3,66 \text{ mA} \quad (44)$$

- Corrente de pico do enrolamento secundário (na água):

$$I_{P_{\text{ÁGUA}}} = \frac{53,2 \cdot 10^{-3}}{10} = 5,32 \text{ mA} \quad (45)$$

Portanto, quando o sensor é imerso em água, é verificado um ganho na amplitude da corrente no enrolamento secundário conforme equação 45, que caracteriza um aumento na transferência de potência da fonte, resultando em um melhor casamento de impedâncias do circuito.

O ganho de corrente identificado no resistor *Shunt* resulta no ganho de tensão no enrolamento secundário, conforme equação 3. Esse ganho de tensão é amplificado e retificado na próxima etapa do circuito. As linhas contínuas (amarelas) das Figuras 32 e 33 são o resultado da etapa de amplificação e retificação das linhas verdes. O sinal analógico amarelo de cada sensor é lido pela sua entrada ADC 12 bits (*Analog to Digital Converter*) específica no microcontrolador. O microcontrolador realiza a varredura de todos os sensores que estão distribuídos verticalmente, para identificar os níveis dos fluidos multifásicos presentes no tanque. As leituras dos sensores são disponibilizadas em tempo real no supervisório.

3.3 PLATAFORMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

Para o desenvolvimento da plataforma de leitura dos sensores, foi utilizada a placa de desenvolvimento ESP32 ESP-WROOM-32, que apresenta as seguintes especificações técnicas:

- CPU: Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6;
- ROM: 448 KBytes;
- RAM: 520 KBytes;
- Flash: 4 MB;
- Clock: 80 à 240MHz (Ajustável);
- Wi-Fi 802.11 b/g/n: 2.4 à 2.5 GHz;
- Bluetooth BLE 4.2 BR/EDR e BLE (Bluetooth Low Energy);

- Conexão WiFi 2.4Ghz (máximo de 150 Mbps);
- Modos de operação: STA/AP/STA+AP;
- Portas GPIO: 16
- Entradas analógicas: 16 canais ADC de 12 bits.

A placa de desenvolvimento ESP32-WROOM-32 foi escolhida principalmente pelo custo acessível, além da resolução de 12 bits das entradas analógicas (ADC). Além disso, sua programação é facilitada necessitando apenas de um cabo USB e uma plataforma de programação compatível com *MicroPython*.



Figura 34 – Placa de desenvolvimento ESP32 ESP-WROOM-32

Portanto, para o desenvolvimento da plataforma de aquisição de dados (leitura dos sensores e supervisor), o microcontrolador ESP32 foi programado na linguagem de programação *MicroPython*. *MicroPython* é uma implementação reduzida e eficiente do *Python* que inclui um reduzido subconjunto de bibliotecas otimizadas para ser executado em microcontroladores, em que os ambientes são restritos em processamento e memória. [x13]

Python é uma linguagem de programação de alto nível útil para o desenvolvimento de diversas aplicações como: desenvolvimento WEB, *Windows*, *Linux*, *MacOS*, *Machine Learning*, Inteligência Artificial, jogos, entre outros. É baseada em diversos estilos de programação, como programação funcional, procedural e orientada a objetos. É uma linguagem *Open Source* e gratuita, com uma sintaxe simples e mais objetiva possível. Apresenta bibliotecas e *frameworks* disponíveis para a linguagem, ampliando ainda mais a possibilidade de desenvolvimento.

As principais rotinas de programação do microcontrolador são:

- Aquisição das leituras das entradas ADC;
- Análise das leituras.

```
/* Importação das bibliotecas */  
from machine import ADC,Pin,WDT,Timer  
  
/* Definindo os 4 pinos ADC */  
adc1=ADC(Pin(36))  
adc2=ADC(Pin(39))  
adc3=ADC(Pin(34))  
adc4=ADC(Pin(35))  
  
/* Lendo os 4 sensores */  
def ler_ADCs():  
    global s1, s2, s3, s4  
    s1 = adc1.read()  
    s2 = adc2.read()  
    s3 = adc3.read()  
    s4 = adc4.read()
```

Figura 36 - Rotina de aquisição das leituras dos sensores

```
/* Análise das leituras dos 4 sensores */  
def analise (s1, s2, s3, s4):  
  
    /* Reservatório com 100% de ar */  
    if (s1 <= s1_ar_max) and (s2 <= s2_ar_max) and (s3 <= s3_ar_max) and  
    (s4 <= s4_ar_max):  
        ar=100  
        oleo=0  
        agua=0  
  
    /* Reservatório com 75% de ar, 25% de óleo e 0% de água */  
    elif (s1 > s1_ol_min and s1 <= s1_ol_max) and (s2 <= s2_ar_max) and (s3 <= s3_ar_max)  
    and (s4 <= s4_ar_max):  
        ar=75  
        oleo=25  
        agua=0  
        .  
        .  
        .  
        .
```

Figura 35 - Rotina de análise das leituras dos sensores

Portanto, cada sensor envia um valor de tensão analógica entre 0,0 V e 3,5 V para sua respectiva entrada ADC do ESP32. O microcontrolador converte esse valor analógico em digital (*ADC – Analog-to-digital Converter*). Como as entradas ADC do ESP32 têm resolução de 12 bits, então o valor de tensão entre 0,0 V e 3,5 V é convertido em um valor numérico entre 0 e 4095 ($2^{12} = 4096$ valores possíveis).

O supervisor foi desenvolvido para carregar um arquivo contendo os parâmetros de funcionamento de cada sensor, visto que fisicamente não é possível construir sensores com comportamentos idênticos. Esses parâmetros correspondem aos intervalos em que cada sensor diferencia a água, óleo e ar.

Abaixo segue um exemplo do arquivo de parâmetros dos sensores:

0,2100,2101,3000,3001,4095
0,2100,2101,3000,3001,4095
0,2000,2001,2400,2401,4095
0,2100,2101,2400,2401,4095

Figura 37 – Exemplo de um arquivo de parâmetros dos 4 sensores

A rotina de análise das leituras dos sensores (Figura 36) carrega os parâmetros dos sensores e identifica os níveis das interfaces conforme exemplo abaixo:

- Leituras ADC entre 0 e 2100: o sensor 1 identificará como ar;
- Leituras ADC entre 2101 e 3000: o sensor 1 identificará como óleo;
- Leituras ADC entre 3001 e 4095: o sensor 1 identificará como água;

Consequentemente, as linhas 2, 3 e 4 são os parâmetros dos sensores 2, 3 e 4, respectivamente.

Como dito nessa seção, o supervisor (ilustrado na Figura 38b) foi desenvolvido em *MicroPython* e apresenta uma interface gráfica que informa os níveis dos fluidos multifásicos do reservatório, baseados na identificação das características magnéticas dos fluidos pelos sensores posicionados verticalmente na estrutura (Figura 38a). No exemplo abaixo é possível identificar que os 2 primeiros sensores estão imersos em água, o terceiro sensor está imerso em óleo e o quarto sensor está ao ar livre. Dessa forma, o supervisor identificou a presença de 50% de água, 25% de óleo e 25% de ar. No lado direito é possível visualizar as leituras dos conversores ADC enviadas pelo microcontrolador, conforme Tabela 2:

Sensores	Leitura do ADC (12 bits)
Sensor 4	1629
Sensor 3	2860
Sensor 2	3956
Sensor 1	4012

Tabela 2 – Leituras dos sensores

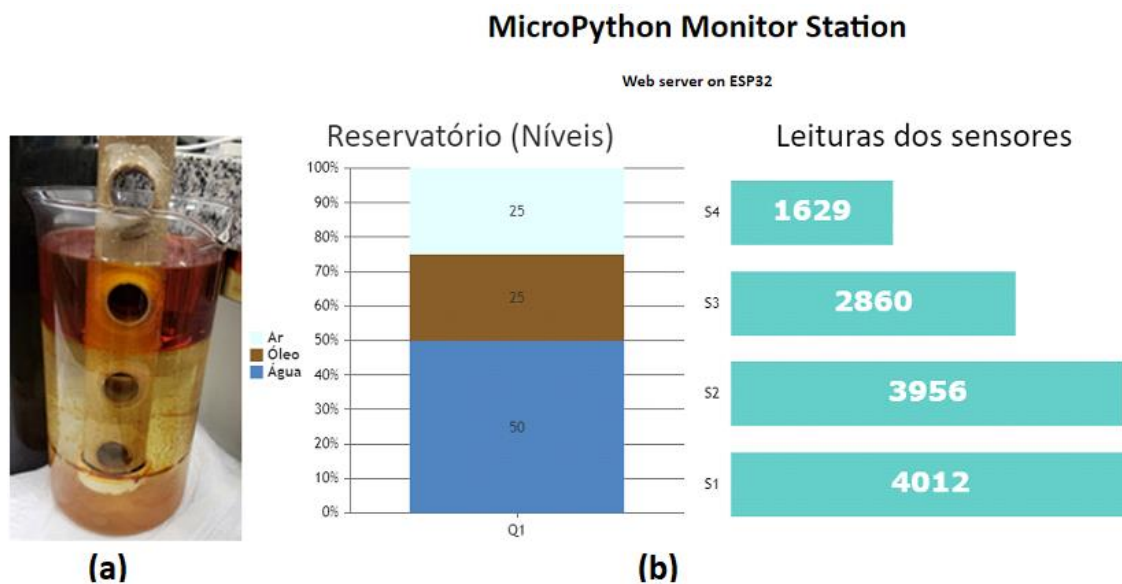


Figura 38 - Reservatório real (a) e Supervisório (b)

CAPÍTULO 4. EXPERIMENTOS E CARACTERIZAÇÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DE CADA SENSOR

A caracterização de cada sensor indutivo foi realizada de acordo com a corrente induzida no enrolamento secundário, quando o sensor é imerso em diferentes tipos de fluidos. Nos experimentos apresentados a seguir, é possível relacionar a amplitude da corrente do enrolamento secundário com a tensão amplificada e retificada entregue à entrada ADC do microcontrolador, conforme demonstrado na Figura 39. Nessa etapa, o analisador de impedâncias foi substituído por uma fonte de sinal projetada e baseada no oscilador *Colpitts*, conforme detalhado no Cap. 2, Seção 2.2.2.

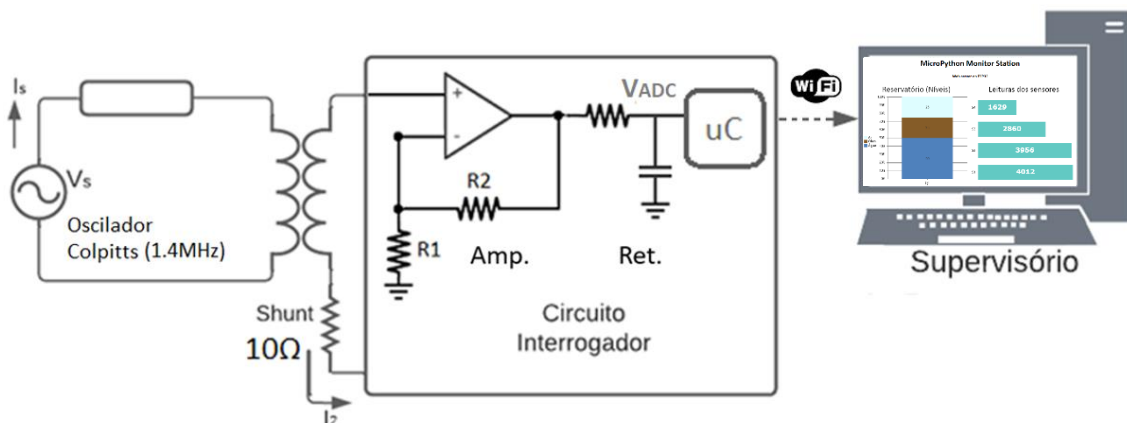


Figura 39 - Caracterização de cada sensor

Basicamente, o circuito interrogador é composto por uma etapa de amplificação (amplificador operacional) e uma etapa de retificação através de um filtro passa-baixas. A saída retificada (V_{ADC}) é interligada à entrada analógica ADC de 12 bits do microcontrolador. Portanto, V_{ADC} é diretamente proporcional à amplitude da tensão senoidal entregue pelo enrolamento secundário do sensor. A saída retificada V_{ADC} é apresentada através das curvas na cor verde das Figuras 40, 41 e 42, em que o sensor é imerso respectivamente no ar, óleo e água.

Novamente foram realizadas medições da corrente I_2 no enrolamento secundário para o comparativo do ganho de potência quando o sensor imerso em ar -> óleo -> água.

Conforme a equação 43, a corrente de pico medida em cada um dos meios assume os seguintes valores:



Figura 40 - Sensor ao ar livre ($V_{ADC} = 1,289 \text{ V}$)

- Corrente de pico do enrolamento secundário (no ar):

$$I_{PAR} = \frac{57,6 \cdot 10^{-3}}{10} = 5,76 \text{ mA} \quad (46)$$

$$V_{ADC_{AR}} = 1,289 \text{ V} \quad (47)$$

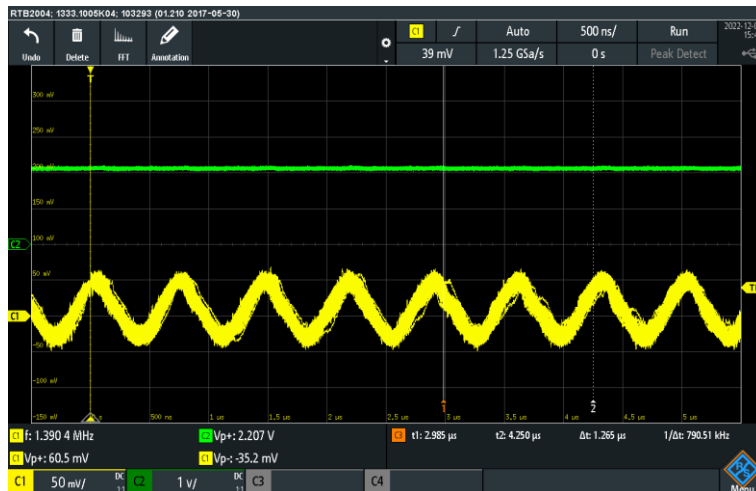


Figura 41 - Sensor imerso em óleo ($V_{ADC} = 2,207 \text{ V}$)

- Corrente de pico do enrolamento secundário (no óleo):

$$I_{P_{ÓLEO}} = \frac{60,5 \cdot 10^{-3}}{10} = 6,05 \text{ mA} \quad (48)$$

$$V_{ADC_{ÓLEO}} = 2,207 \text{ V} \quad (49)$$



Figura 42 - Sensor imerso em água ($V_{ADC} = 3,457 \text{ V}$)

- Corrente de pico do enrolamento secundário (na água):

$$I_{P_{\hat{A}GUA}} = \frac{67,4 \cdot 10^{-3}}{10} = 6,74 \text{ mA} \quad (50)$$

$$V_{ADC_{\hat{A}GUA}} = 3,457 \text{ V} \quad (51)$$

Como já mencionado no Cap. 3, Seção 3.3, o conversor AD (ADC) converte um valor analógico de 0,0 V a 3,5 V (curvas nas cores verde das Figuras 40, 41 e 42) em um valor de 0 a 4095 (12 bits). Portanto:

$$V_{OUT_{AR}} = \frac{4095}{3,5} 1,289 = 1508 \quad (52)$$

$$V_{OUT_{\hat{O}LEO}} = \frac{4095}{3,5} 2,207 = 2582 \quad (53)$$

$$V_{OUT_{\hat{A}GUA}} = \frac{4095}{3,5} 3,457 = 4045 \quad (54)$$

Por exemplo, para este sensor utilizado nos testes, o seu arquivo de parâmetros deve respeitar um intervalo válido para os valores encontrados nas equações 52, 53 e 54. A curva observada na Figura 43 exemplifica um intervalo válido para o sensor em questão:

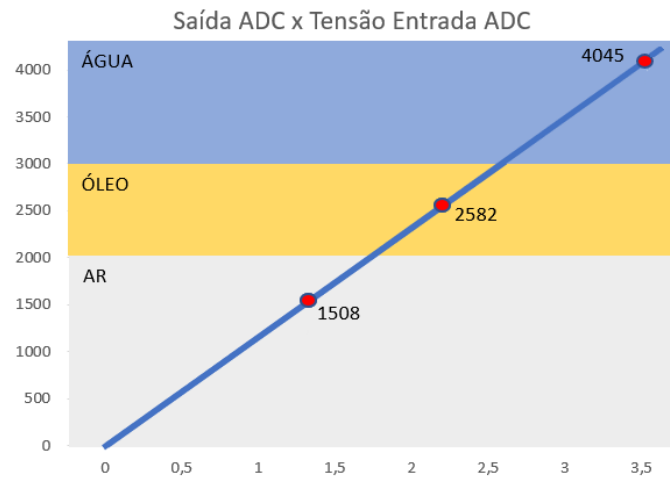


Figura 43 - Caracterização do sensor conforme saídas do conversor ADC

Portanto, conforme os resultados obtidos das saídas do conversor ADC, um exemplo válido do arquivo de parâmetros do sensor é descrito abaixo:

0,2000,2001,3000,3001,4095

Ou seja:

- uma saída entre 0 e 2000 o sensor identificará o fluido como ar.
- Uma saída entre 2001 e 3000, o sensor identificará o fluido como óleo.
- Uma saída entre 3001 e 4095, o sensor identificará o fluido como água.

Logo, a configuração final corresponde a um protótipo contendo um conjunto de 4 sensores funcionando em cascata, distribuídos verticalmente no interior de um tubo, conforme a Figura 44. Cada sensor possui sua fonte de alimentação senoidal, além do conjunto amplificador/retificador (que compõem o circuito interrogador).

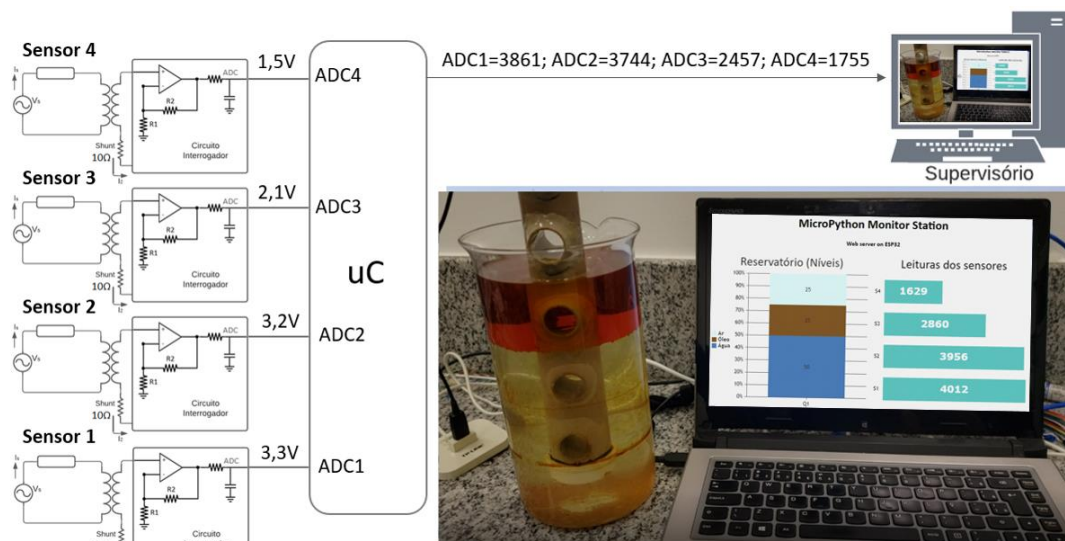


Figura 44 – Exemplo prático de funcionamento do conjunto de sensores

Uma vez definidos os parâmetros, ou seja, os intervalos de saída do conversor ADC de cada sensor capaz de identificar os meios (ar, óleo e água), foi possível programar o supervisor para mostrar através de uma IHM (Interface Homem-Máquina) os níveis das interfaces (ar, óleo e água) em tempo real.

A partir das montagens e caracterização descritas no Capítulo 4, discute-se a seguir os resultados e medidas de nível de interface realizadas com o protótipo obtido.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 SENSOR COM 60/60 ESPIRAS

Como descrito no Cap. 3, Seção 3.1, o primeiro sensor construído foi composto por 40 espiras no enrolamento primário e 80 espiras no enrolamento secundário. Com o propósito de realizar novos experimentos e novos resultados, foi construída uma nova estrutura de sensor com a relação de 60 espiras no primário e 60 no secundário, mantendo um total de 120 espiras por sensor.

O circuito também foi montado conforme diagrama da Figura 25. O software *LabOne* do analisador de impedâncias gerou as curvas no domínio da frequência, conforme Figura 45.

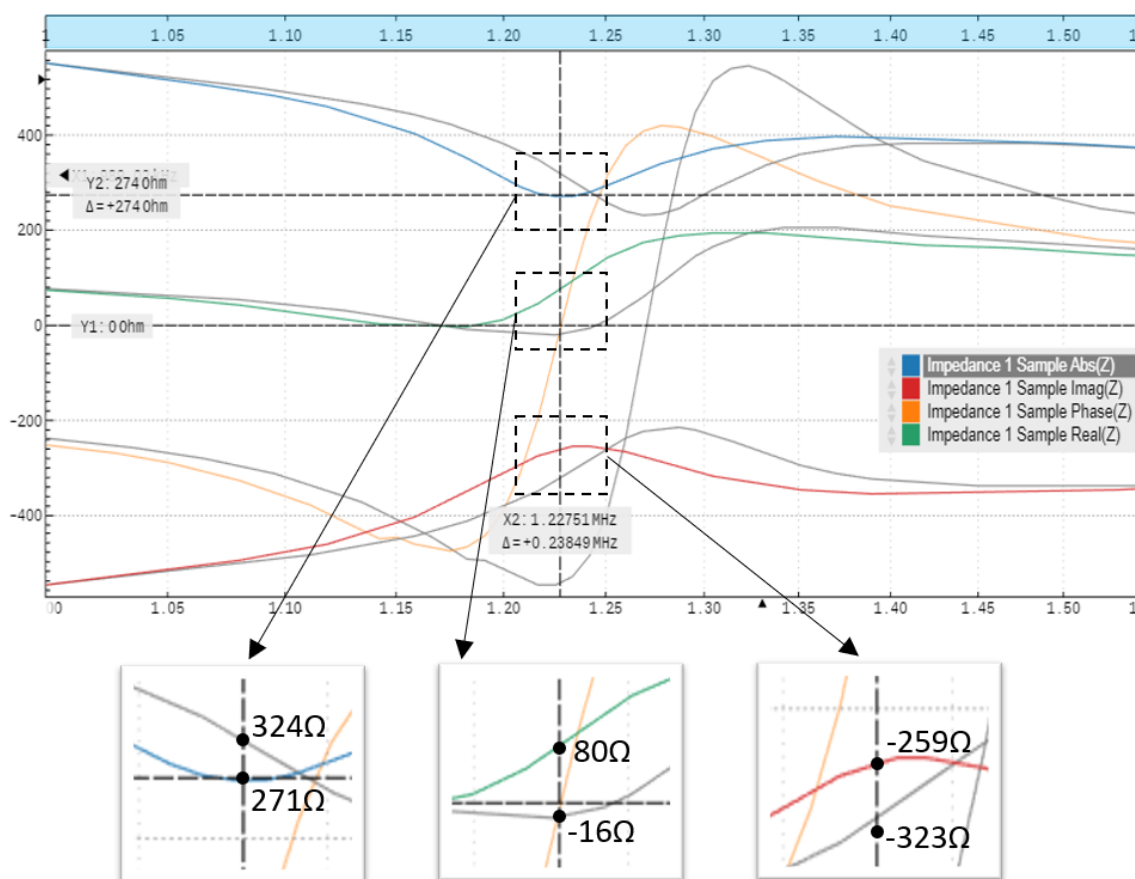


Figura 45 - Comportamento da impedância do circuito no intervalo de 1,0MHz e 1,5MHz (60/60 espiras, frequência alvo: 1,23MHz)

Nesse intervalo de frequências foi possível identificar uma variação na impedância do circuito, principalmente na frequência próxima de 1,23 MHz. As curvas (linhas cinza) correspondem às leituras do sensor ao ar livre e as coloridas

são quando o sensor permaneceu imerso em água. As alterações na impedância equivalente são mostradas na Tabela 3.

Grandeza	Ao ar livre	Na água
Real (R)	-16 ohms	80 ohms
Imaginária (X)	-323 ohms	-259 ohms
Impedância Absoluta (Z)	324 ohms	271 ohms
Fase (θ)	-93°	-73°
Capacitância (F)	401 pF	500 pF

Tabela 3 - Impedância do circuito (freq. 1,23MHz) (60/60 espiras)

Quando o sensor é imerso em água é possível verificar um acréscimo de reatância indutiva ΔX_L :

$$\Delta X_L = -259 - (-323) = 64 \, \Omega \quad (55)$$

Pode-se afirmar que, na frequência de 1,23 MHz, esse acréscimo de reatância indutiva significa um aumento da indutância no circuito equivalente de:

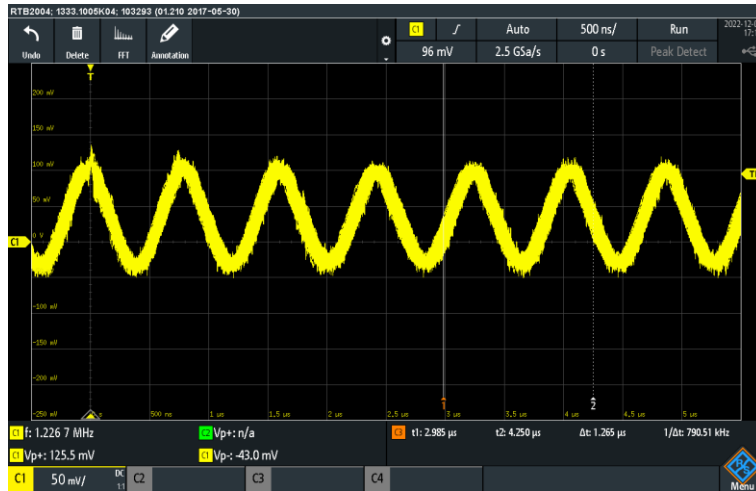
$$\Delta X_L = j\omega \Delta L_{\text{água}} \quad (56)$$

$$\Delta L_{\text{água}} = \frac{64}{2\pi \cdot 1,23 \cdot 10^6} = 8,3 \, \mu H \quad (57)$$

Com o auxílio do resistor *shunt* no secundário (conforme Figura 31) foi possível também confirmar o aumento de corrente elétrica quando o sensor foi imerso em água.



*Figura 46 - Tensão no resistor Shunt (sensor fora da água)
(freq. 1,23 MHz, 60/60 espiras)*



*Figura 47 - Tensão no resistor Shunt (sensor imerso na água)
(freq. 1,23 MHz, 60/60 espiras)*

Comparando as ondas mostradas na cor amarela das Figuras 46 e 47 é possível observar também o ganho de potência do circuito quando o sensor é imerso em água.

- Corrente de pico do enrolamento secundário (no ar):

$$I_{PAR} = \frac{103,5 \cdot 10^{-3}}{10} = 10,35 \text{ mA} \quad (58)$$

- Corrente de pico do enrolamento secundário (na água):

$$I_{P_{\text{ÁGUA}}} = \frac{125,5 \cdot 10^{-3}}{10} = 12,55 \text{ mA} \quad (59)$$

Avaliando novamente as curvas de impedância da Figura 45, é possível identificar um outro ponto de interesse, na frequência de 1,27 MHz, destacadas na Figura 48:

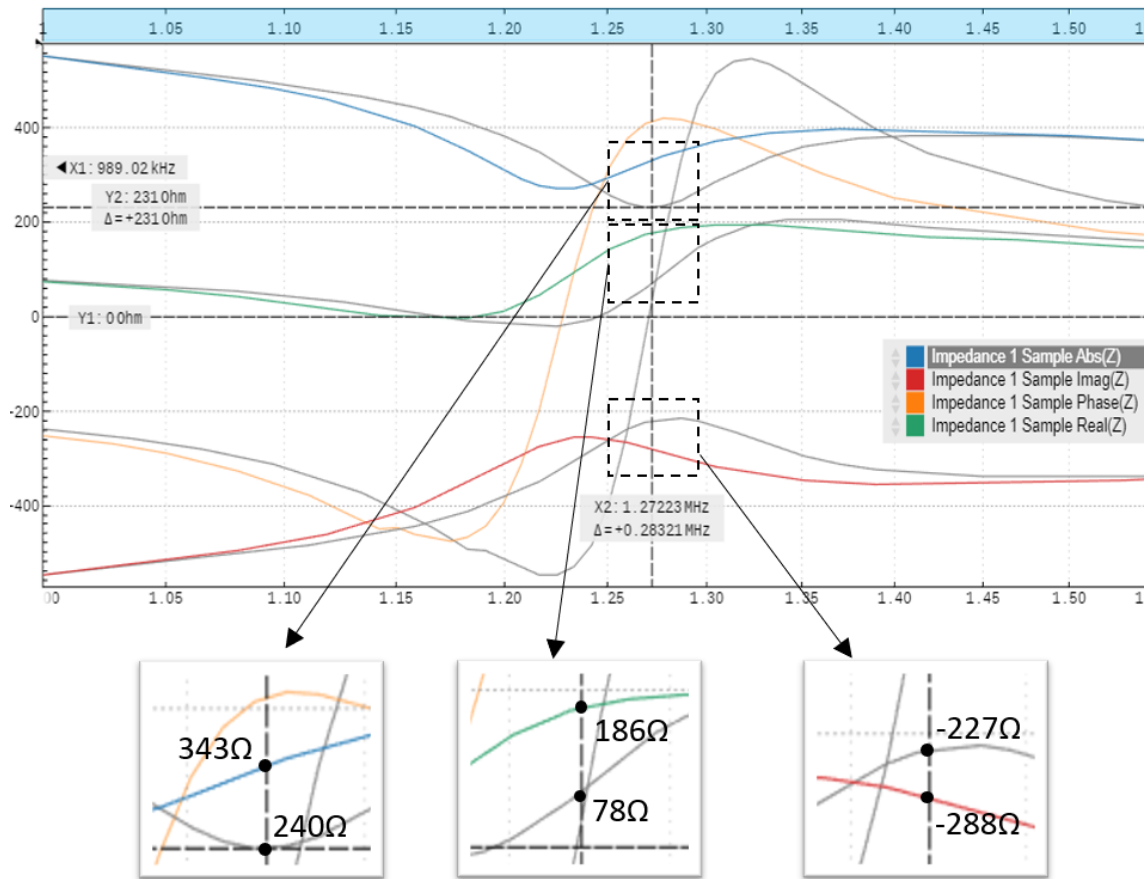


Figura 48 - Comportamento da impedância do circuito no intervalo de 1,0 MHz e 1,5 MHz (60/60 espiras, frequência alvo: 1,27 MHz)

As alterações na impedância equivalente são mostradas na Tabela 4.

Grandeza	Ao ar livre	Na água
Real (R)	78 ohms	186 ohms
Imaginária (X)	-227 ohms	-288 ohms
Impedância Absoluta (Z)	240 ohms	343 ohms
Fase (θ)	-71°	-57°
Capacitância (F)	552 pF	435 pF

Tabela 4 - Impedância do circuito (freq. 1,27 MHz) (60/60 espiras)

Nesse caso particular, quando o sensor é imerso em água é possível verificar um **decréscimo** de reatância indutiva ΔX_L :

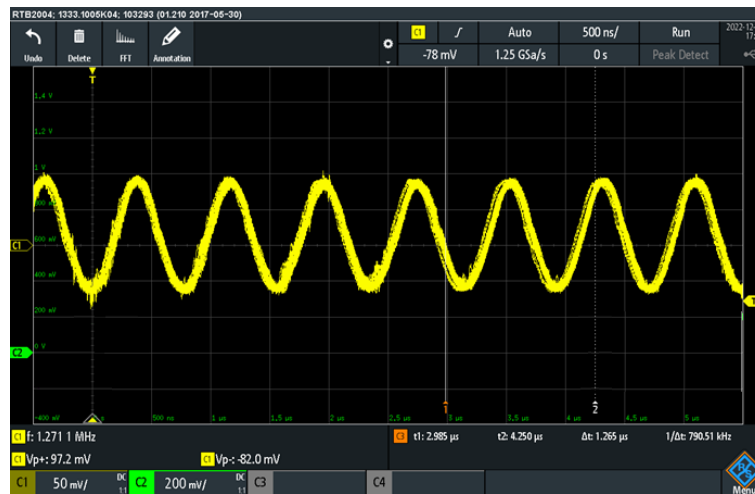
$$\Delta X_L = -288 - (-227) = -61 \, \Omega \quad (60)$$

Pode-se afirmar que, na frequência de 1,27MHz, esse **decréscimo** de reatância indutiva significa uma redução da indutância no circuito equivalente de:

$$\Delta X_L = j\omega \Delta L_{\text{água}} \quad (61)$$

$$\Delta L_{\text{água}} = \frac{-61}{2\pi \cdot 1,27 \cdot 10^6} = -7,6 \, \mu H \quad (62)$$

Com o auxílio do resistor *shunt* no secundário (conforme figura 31) foi possível também confirmar a redução de corrente elétrica quando o sensor foi imerso em água.



*Figura 49 - Corrente elétrica no resistor Shunt (sensor fora da água)
(freq. 1,27 MHz, 60/60 espiras)*



*Figura 50 - Corrente elétrica no resistor Shunt (sensor imerso na água)
(freq. 1,27 MHz, 60/60 espiras)*

Comparando as ondas mostradas na cor amarela nas Figuras 49 e 50 é possível estimar a perda de potência do circuito quando o sensor é imerso em água. Ou seja, verifica-se a redução da corrente de pico quando o sensor é imerso em água, como expresso nas equações (63) e (64).

- Corrente de pico do enrolamento secundário (no ar):

$$I_{P_{AR}} = \frac{97,2 \cdot 10^{-3}}{10} = 9,72 \text{ mA} \quad (63)$$

- Corrente de pico do enrolamento secundário (na água):

$$I_{P_{ÁGUA}} = \frac{71,3 \cdot 10^{-3}}{10} = 7,13 \text{ mA} \quad (64)$$

Ou seja, esses dois testes comprovam o comportamento da impedância equivalente do conjunto sensor + circuito interrogador diante da frequência de alimentação do circuito:

- Frequência de 1,23 MHz: aumento da reatância indutiva e queda da impedância absoluta quando o sensor imerso em água;
- Frequência de 1,27 MHz: queda de reatância indutiva e aumento da impedância absoluta quando o sensor imerso em água;

Dessa forma, foi demonstrado que o analisador de impedâncias pode ser utilizado como uma ótima ferramenta para otimização dos sensores indutivos, identificando os pontos de interesse, como a frequência de operação em que temos a maior variação da impedância equivalente do circuito, quando o sensor é imerso em fluidos com permeabilidades magnéticas distintas.

Nos testes realizados, as equações 42 e 57 demonstraram que o analisador de impedâncias identificou que o elemento sensor com relação de espiras 60/60 se sobressaiu em relação ao sensor com relação de 40/80, conforme a Tabela 5 abaixo:

Relação de espiras do sensor	Variação da indutância entre ar e água
40/80	1,7 μH
60/60	8,3 μH

Tabela 5 - Elemento sensor 60/60 com maior variação de indutância (entre ar e água)

5.2 TESTES COM ÁGUA ULTRA PURA

Água ultra pura refere-se a água destilada que geralmente passa por um processo de osmose reversa, desionização e ultra filtração. Ou seja, é um tipo de água livre de compostos que possam gerar condutividade elétrica.

Os valores de resistividade e condutividade da água ultra pura são: [14]

- Água ultra pura a 25°C:
 - Resistividade: 18,2 MΩ·cm
 - Condutividade: 0,054 μS/cm
- Água purificada a 25°C:
 - Resistividade: 5 MΩ·cm
 - Condutividade: 0,2 μS/cm

O teste com água ultra pura foi útil para comprovar que os sensores indutivos desse trabalho não utilizam o princípio da condutividade elétrica. Muitos sensores indutivos no mercado (como o *iPhase* [12]) necessitam que a água tenha um certo grau de salinidade, ou seja, íons que permitem a formação de corrente elétrica no fluido.

No intervalo entre 1,0 MHz e 1,5 MHz foi possível identificar uma frequência de interesse (1,26 MHz) em que há uma considerável variação na impedância do circuito. As curvas da cor cinza correspondem às leituras do sensor em água corrente e as curvas coloridas correspondem em água ultra pura.

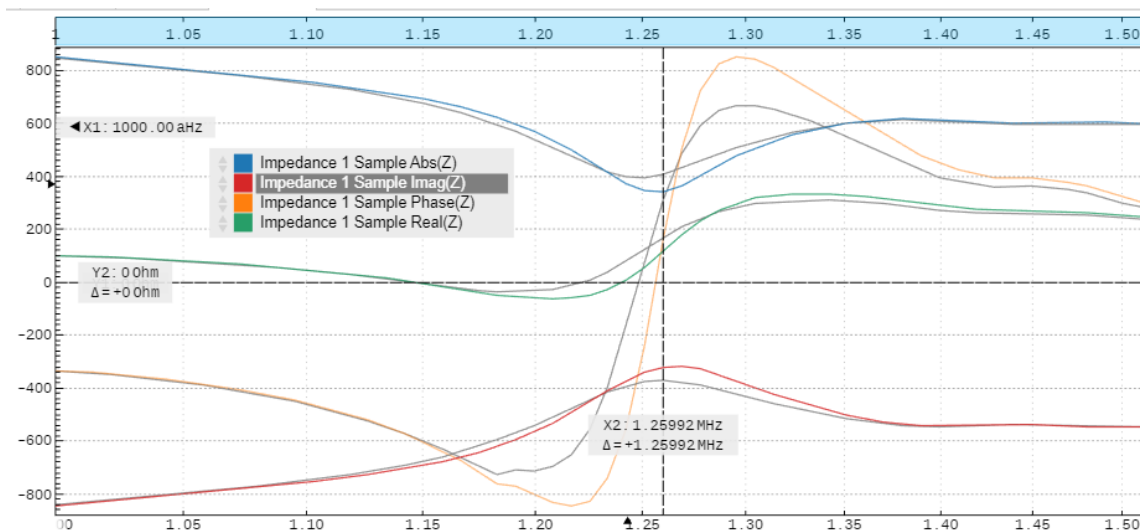


Figura 51 - Comportamento da impedância do circuito (água ultra pura X água corrente) (60/60 espiras)

As alterações na impedância equivalente são mostradas na Tabela 6.

Grandeza	Em água ultra pura	Em água corrente
Real (<i>R</i>)	119 ohms	154 ohms
Imaginária (<i>X</i>)	-324 ohms	-362 ohms
Impedância Absoluta (<i>Z</i>)	345 ohms	393 ohms
Fase (<i>θ</i>)	-70°	-67°
Capacitância (<i>F</i>)	344 pF	295 pF

Tabela 6 - Impedância do circuito (freq. 1,26 MHz) (60/60 espiras)

Quando o sensor é imerso em água ultra pura é possível verificar um acréscimo de reatância indutiva ΔX_L :

$$\Delta X_L = -324 - (-362) = 38 \Omega \quad (65)$$

Pode-se afirmar que, na frequência de 1,26 MHz, esse acréscimo de reatância indutiva significa um aumento da indutância no circuito equivalente de:

$$\Delta X_L = j\omega \Delta L_{\text{águaUP}} \quad (66)$$

$$\Delta L_{\text{águaUP}} = \frac{38}{2\pi \cdot 1,26 \cdot 10^6} = 4,8 \mu H \quad (67)$$



Figura 52 - Tensão no resistor Shunt (sensor imerso em água ultra pura)
(freq. 1,26 MHz, 60/60 espiras)



Figura 53 - Tensão no resistor Shunt (sensor imerso em água corrente)
(freq. 1,26 MHz, 60/60 espiras)

Comparando as ondas de cor amarela das Figuras 52 e 53 é possível obter também o ganho de potência do circuito quando o sensor é imerso em água ultra pura:

- Corrente de pico do enrolamento secundário (em água corrente):

$$I_{P_{AR}} = \frac{76,7 \cdot 10^{-3}}{10} = 7,67 \text{ mA} \quad (68)$$

- Corrente de pico do enrolamento secundário (em água ultra pura):

$$I_{P_{\acute{A}GUA}} = \frac{80,1 \cdot 10^{-3}}{10} = 8,01 \text{ mA} \quad (69)$$

As saídas retificadas são mostradas através das linhas de cor verde:

$$V_{ADC_{\acute{A}GUA-UP}} = 3,330 \text{ V} \quad (70)$$

$$V_{ADC_{\acute{A}GUA}} = 1,787 \text{ V} \quad (71)$$

Portanto, nos resultados apresentados na Figura 51 e Tabela 6, em que se observa a impedância do circuito no domínio da frequência, é possível demonstrar a eficiência dos sensores desse trabalho, que são sensíveis até mesmo para a água ultra pura, que apresenta altíssima resistividade.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados práticos obtidos nesse trabalho indicam a possibilidade de desenvolvimento de projetos baseados em sensores indutivos de baixo custo para sensoriamento de fluidos multifásicos que apresentem propriedades magnéticas distintas. Cada sensor é composto por um par de solenóides enrolados em pequenos tubos de PVC. Os sensores foram construídos utilizando uma bobinadeira. Esses sensores foram arranjados em série no interior de um tubo vertical e mergulhados em tanques multifásicos para a identificação dos níveis de fluidos existentes, utilizando o princípio da indução eletromagnética. Dessa forma, os sensores indutivos puderam identificar fluidos multifásicos que apresentem características magnéticas distintas (por exemplo: ar, óleo, emulsão e água).

A capacidade de encapsulamento dos sensores, as pequenas correntes elétricas de alimentação dos enrolamentos ($< 20 \text{ mA}$) sem a necessidade de induzir corrente elétrica nos fluidos (princípio da condutividade) e a baixa frequência de operação ($\leq 1,4 \text{ MHz}$) apontam para uma solução otimizada e relativamente segura para operação em áreas classificadas.

Com a utilização de um analisador de impedâncias, foi possível comprovar que sensores indutivos aqui apresentados podem ser desenvolvidos, inclusive com outras configurações para identificação (sensoriamento) de outros tipos de materiais. Esses sensores indutivos de baixo custo foram analisados no domínio da frequência e encontrados pontos de interesse em que o comportamento permitisse distinguir fluidos com permeabilidade magnética distintas. Com a frequência alvo encontrada, foi possível desenvolver osciladores do tipo *Colpitts*, que são caracterizados como osciladores de baixo custo e consumo.

Na etapa de interrogação, foram desenvolvidos circuitos de amplificação e retificação, utilizando amplificadores operacionais e filtros passa-baixas. Todo o desenvolvimento foi baseado em componentes eletrônicos de baixo custo, visando uma solução relativamente acessível.

Uma placa de desenvolvimento ESP32 ESP-WROOM-32 (*Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6*) foi programada para processar as saídas retificadas dos sensores através das entradas ADC (*Analog-to-Digital Converter*) de 12bits. Ou seja, o microcontrolador realiza a varredura de todos os sensores que estão distribuídos verticalmente, para identificar os níveis dos fluidos multifásicos presentes no reservatório. As leituras são disponibilizadas em tempo real em um supervisor através de um servidor *Web* no ESP32. O supervisor foi desenvolvido em *MicroPython* e apresenta uma interface gráfica que informa os níveis dos fluidos

multifásicos, baseados na identificação das características magnéticas dos fluidos pelos sensores posicionados verticalmente na estrutura, além de identificar a proporção de ar/óleo/água contida no reservatório. O supervisor tem a capacidade de carregar parâmetros individuais dos sensores, identificando as características específicas de cada, visto que não é possível fisicamente construir sensores com comportamentos idênticos. Esses parâmetros correspondem aos intervalos em que cada sensor diferencia a água, óleo e ar.

Como perspectiva e trabalhos futuros, propõe-se:

- Desenvolver um conjunto maior de sensores para leitura de fluidos em grandes reservatórios. Como a estrutura do sensor proposto é modular, pode-se produzir linhas de sensores que alcancem reservatórios com dezenas de metros;
- Implementação de novos sensores indutivos com outras relações de espiras visando maior sensibilidade e otimização no sensoriamento;
- Aplicação de sensores de temperatura para o processo de compensação na etapa de identificação das propriedades magnéticas dos fluidos;
- Desenvolvimento de sensores para identificação de qualidade da água e níveis de salinidade;
- Desenvolvimento de plataforma para disponibilizar dados remotamente.
- Implementação e aplicação de lógica difusa (*Fuzzy*) para maior precisão na identificação dos níveis de fluidos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Carlos A. F. Marques, Gang-Ding Peng, and David J. Webb, *"Highly sensitive liquid level monitoring system utilizing polymer fiber Bragg gratings"*. Optics Express Vol. 23, Issue 5, pp. 6058-6072 (2015).
- [2] – VEGA Brasil Indústria. <https://www.vega.com/pt-br/produtos/catalogo-de-produtos/nivel-continuo>.
- [3] - Instrumentação e Controle, <https://instrumentacaoecontrole.com.br/sensor-de-nivel-qual-e-o-melhor-para-o-seu-processo/>
- [4] - Jonas Laedson M. da S. Santos, Caio M. Nesello, Paulo R. de A. Mariz, Marcelo da S. Pedro, Arioston A. de Moraes Jr, Leopoldo O. A. Rojas, *"Modelagem e simulação de um separador trifásico de petróleo"*, 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (2017).
- [5] – Universidade Federal Fluminense. https://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2017/08/Aula06_Instrument-Nivel_1sem2017.pdf
- [6] - Arnaldo G. Leal-Junior, Carlos Marques, Anselmo Frizera, Maria José Pontes. *"Multi-interface level in oil tanks and applications of optical fiber sensors"*. Optical Fiber Technology, Volume 40, pp. 82-92 (Jan. 2018), Elsevier.
- [7] Manutenção e Suprimentos - <https://www.manutencaoesuprimentos.com.br/medidores-de-nivel-em-petroleo-e-gas/>
- [8] - Guirong Lu, Hao Hu, Baoxiang He, Shuyue Chen, *"A New-type Sensor for Monitoring Oil-water Interface level and Oil Level"*, The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments ICEMI'2009, p. 2-981, 2009.
- [9] – Kang Hui Song, Jang Hyon, Kim Gum Chol, Yu Song Chol, Kim Yong Hyok, *"A New Design of Inductive Conductivity Sensor for Measuring Electrolyte Concentration in Industrial Field"*, Sensors and Actuators: A. Physical (2019).
- [10] – A. Lopes Ribeiro, Helena M. Geirinhas Ramos, Pedro M. Ramos and J.M. Dias Pereira, *"Inductive conductivity cell for water salinity monitoring"*, Article, XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, January 2006.
- [11] - Lorena Parra, Sandra Sendra, Jaime Lloret, Ignacio Bosch. *"Development of a Conductivity Sensor for Monitoring Groundwater Resources to Optimize Water Management in Smart City Environments"*. Sensors 15, pp. 20990-21015 (Ago. 2015).
- [12] - *Operating instructions - iPhase* (01-TECHNICAL - 1376453 - 1 - 00).

- [13] - Matthew N. O. Shadiku, Elementos de Eletromagnetismo, 3a ed. 2004.
- [7] – *Electronic oscillator*, https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_oscillator
- [x8] – ECStudio, “Colpitts Oscillator”. <https://ecstudiosystems.com/discover/textbooks/basic-electronics/oscillators/colpitts-oscillator/>
- [x9] – *Learn about electronics*. <https://learnabout-electronics.org/Oscillators/osc23.php>
- [x10] - *How a MOSFET Works - with animation!* | Intermediate Electronics. https://www.youtube.com/watch?v=Bfvyj88Hs_o
- [x11] - E. Alves Cruz, S. Choueri Junior, Eletrônica Aplicada - 2a. Ed. Érica, 2009.
- [x12] - *HandsonRF, RF Circuits Impedance Matching Basics*, December 8, 2018, <https://handsonrf.com/rf-circuits-impedance-matching-basics/>
- [x13] – *MicroPython*, <https://micropython.org/>
- [14] – Laboratório de Biologia Molecular Estrutural – LABIME, <https://labime.paginas.ufsc.br/sistema-de-agua-milliq/>
- [17] - WU Sheng, LAN Hui, LIANG Jin-Jin, TIAN Yu, DENG Yun, LI Hong-Zhi, LIU Ning, “*Investigation of the Performance of an Inductive Seawater Conductivity Sensor*”, *Sensors & Transducers*, Vol. 186, Issue 3, March 2015, pp. 43-48.
- [19] - MAHMOUD MERIBOUT, MOHAMED HABLI, AHMED AL-NAAMANY, and KHAMIS AL-BUSAIDI, “*A New Ultrasonic-based device for Accurate Measurement of Oil, Emulsion, and Water Levels in Oil Tanks*”, *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.04CH37510)*, pp. 1942-1947, 2021.