

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/AUTOMAÇÃO**

**GUILHERME HEIM WEBER
JEAN PAULO NAKATU LONGO
PEDRO HENRIQUE WEISS MURAKAMI**

**APLICAÇÃO DE SENSORES CAPACITIVOS PARA
MONITORAMENTO DA FORMAÇÃO DE PARAFINA EM
OLOEDUTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

GUILHERME HEIM WEBER
JEAN PAULO NAKATU LONGO
PEDRO HENRIQUE WEISS MURAKAMI

**APLICAÇÃO DE SENSORES CAPACITIVOS PARA
MONITORAMENTO DA FORMAÇÃO DE PARAFINA EM
OLOEDUTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Marco José da Silva

Co-Orientador: MSc. Eduardo Nunes dos Santos

CURITIBA

2013

Guilherme Heim Weber
Jean Paulo Nakatu Longo
Pedro Henrique Weiss Murakami

Aplicação de sensores capacitivos para monitoramento da formação de parafina em oleodutos

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Industrial Elétrica ênfase Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 11 de Abril de 2013.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia Industrial Elétrica ênfase Automação

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Industrial Elétrica ênfase Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Marco José da Silva, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Eduardo Nunes dos Santos, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Marco José da Silva, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José da Silva Maia, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

WEBER, Guilherme H.; LONGO, Jean P. N.; MURAKAMI, Pedro H. W. **Aplicação de sensores capacitivos para monitoramento da formação de parafina em oleodutos.** 2013. 78f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica Ênfase em Automação -. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

O óleo bruto quando extraído de poços de petróleo é composto por várias substâncias, dentre elas diversos tipos de parafinas. As condições de escoamento e transporte deste composto podem fazer com que essas parafinas sejam depositadas na tubulação, o que, por sua vez, diminui gradualmente o escoamento do óleo bruto. Neste contexto desenvolveu-se um sistema para monitorar a deposição de parafinas em linhas de extração de petróleo. O princípio da técnica da detecção do acúmulo das parafinas baseia-se no fato de que cada substância possui propriedades de permissividade elétrica próprias, permitindo assim uma caracterização direta. Foi desenvolvido um circuito eletrônico capaz de medir a variação de capacitância de uma determinada substância em análise. Além do *hardware*, foi desenvolvido um *software* capaz de controlar o sistema através de uma comunicação direta com um microcontrolador. Foram realizados testes a fim de caracterizar e validar o sistema completo desenvolvido, observando o tempo de resposta, a linearidade e as medições com diferentes substâncias. Por fim, foi realizado um teste com parafina, verificando-se que o sistema de detecção proposto é promissor com relação à monitoração da formação de depósitos parafínicos.

Palavras-chave: Deposição de Parafinas. Impedância Elétrica. Sensor Parafínico.

ABSTRACT

WEBER, Guilherme H.; LONGO, Jean P. N.; MURAKAMI, Pedro H. W. **Application of capacitive sensors for online monitoring of wax deposition.** 2013. 78f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Elétrica Ênfase em Automação -. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

The crude oil extracted from oil fields is composed of various substances including different kinds of waxes. The conditions of flow and transport of this compound may cause wax to deposit and accumulate in the pipe wall, which may lead to gradually decrease the flow of crude oil. In this context, a measuring system was developed to monitor the deposition of wax on oil production lines. The developed system's measuring principle is based on the fact that every substance has an electric permittivity value which may be used for monitoring. In this way, an electronic circuit was developed which is able to measure the variation of capacitance due to substances in contact with a coplanar capacitive sensor. In addition, software was developed to control the entire system and communicate with a microcontroller where the different tasks are executed. Different tests were performed to characterize and validate the measuring system. Among these, test of response time, linearity and measurements accuracy with known commercial capacitors, as well test with different substances in a broad range of electric permittivity values. Eventually, a test of wax solidification was performed, showing promising results for wax deposition monitoring.

Keywords: Wax Deposition. Electrical Impedance. Wax Sensor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Parafina depositada na parede interna de oleoduto.....	13
Figura 2 - Representação do modelo elétrico para um fluido em escoamento	19
Figura 3 – Representação de um capacitor de placas planas paralelas	21
Figura 4 – Configuração básica para o circuito ponte de auto-equilíbrio.....	24
Figura 5 – Representação do circuito ponte de auto-equilíbrio	26
Figura 6 – Resposta em frequência do circuito ponte de auto-equilíbrio.....	27
Figura 7 – Resposta simplificada em frequência de um amplificador operacional não-ideal.....	27
Figura 8 – Representação em diagrama de blocos.....	30
Figura 9 – Sensor capacitivo desenvolvido	31
Figura 10 – Capacitor coplanar desenvolvido	32
Figura 11 – Visão geral diagrama em blocos do <i>hardware</i>	34
Figura 12 - Filtro passa-baixa implementado	35
Figura 13 – Representação do princípio de medição	36
Figura 14 – Circuito de Medição.....	37
Figura 15 – Placa de circuito impresso montada.....	40
Figura 16 – Diagrama de estados do <i>firmware</i>	43
Figura 17 - <i>Software</i> operando.....	44
Figura 18 – Configuração básica para o circuito ponte de auto-equilíbrio.....	46
Figura 19 – Célula de medição desenvolvida.....	47
Figura 20 – Bancada utilizada para experimentos	48
Figura 21 – Ganhos obtidos nas medições das substâncias	49
Figura 22 – Tempo de resposta modulada por 500 Hz	51
Figura 23 – Resposta de linearidade para capacitores definidos.....	54
Figura 24 – Medição com gasolina.....	55
Figura 25 - Diferentes substâncias.....	56
Figura 26 – Mistura de isopropanol e água	57
Figura 27 – Fusão da parafina	58
Figura 28 - Parafina líquida recém despejada no sensor	58
Figura 29 – Solidificação da parafina	59

Figura 30 – Aquisição da medição da parafina: Tensão de saída (V) X Tempo (s).....	60
Figura 31 – Resultados de teste de dilatação térmica do sensor.....	61
Figura 32 – Variação da permissividade relativa em função da temperatura...	61
Figura A 1 - Circuito esquemático do <i>hardware</i> parte 1	67
Figura A 2 - Circuito esquemático do <i>hardware</i> parte 2	68
Figura A 3 - Circuito esquemático do <i>hardware</i> parte 3	69
Figura B 1 - Abertura da porta serial	70
Figura B 2 - Porta serial aberta	70
Figura B 3 - Leitura do valor do AD	70
Figura B 4 - Exemplo de leitura do valor do AD	71
Figura B 5 - Gráfico	72
Figura B 6 - Gráfico 3D	72
Figura B 7 - Potenciômetro digital	73
Figura B 8 - Programação do DDS 2.....	74
Figura B 9 - Sincronismo e Varredura	75
Figura B 10 - Ondas em fase	76
Figura B 11 - Ondas defasadas.....	76
Figura B 12 - Geração do arquivo texto	77
Figura B 13 - Ambiente de gravação do arquivo texto	77
Figura B 14 - Arquivo de log das medidas gerado pelo <i>software</i>	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição química de um petróleo típico.....	11
Quadro 2 – Permissividade relativa para substâncias selecionadas líquidas a 25°C	23
Quadro 3 – Valores de capacitância no sensor capacitivo	33
Quadro 4 – Capacitores selecionados e respectivos valores reais	52
Quadro 5 – Resposta para capacitores entre 1 pF e 10 pF	53
Quadro 6 – Resposta para capacitores entre 15 pF e 47 pF	54
Quadro 7 – Diferentes substâncias	56
Quadro 8 – Valores da mistura de isopropanol e água	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 MOTIVAÇÃO	8
1.2 OBJETIVOS	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 PETRÓLEO	11
2.2 PARAFINAS	12
2.2.1 Depósitos de Parafinas	12
2.2.2 Fatores Importantes na Formação dos Depósitos de Parafinas.....	13
2.2.3 Métodos Preventivos	15
2.3 INVESTIGAÇÃO DA DEPOSIÇÃO DE PARAFINA	16
2.3.1 Técnicas de Medição de Depósitos Sólidos	17
2.4 MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA EM FLUIDOS	19
2.4.1 Condutividade e Permissividade	20
2.4.2 Impedância Elétrica	23
2.4.3 Circuito de Medição de Impedância Elétrica	24
3 DESENVOLVIMENTO	29
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	29
3.2 SENSOR CAPACITIVO	30
3.2.1 Modelo Analítico para Sensores Capacitivos Coplanares.....	32
3.3 <i>HARDWARE</i>	33
3.3.1 Circuito de Excitação.....	34
3.3.2 Circuito de Medição.....	35
3.3.3 Circuito Microcontrolador	38
3.3.4 <i>Hardware</i> Desenvolvido	40
3.4 <i>FIRMWARE</i>	41
3.4.1 Configuração dos Periféricos	41
3.4.2 Diagrama de Estados	43
3.5 <i>SOFTWARE</i>	44
4 TESTES E EXPERIMENTOS	46

4.1 EXPERIMENTOS PRÁTICOS PARA VALIDAÇÃO DO CIRCUITO AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDÂNCIA.....	46
4.2 TESTES DE DESEMPENHO DO SISTEMA.....	50
4.2.1 Balanceamento do Sistema.....	50
4.2.2 Tempo de Resposta ao Degrau	51
4.2.3 Linearidade.....	51
4.2.4 Teste com Diferentes Substâncias.....	55
4.3 MISTURA ÁGUA-ISOPROPANOL.....	56
4.4 SOLIDIFICAÇÃO DA PARAFINA.....	57
5 CONCLUSÃO	62
REFERÊNCIAS.....	64
APÊNDICE A – CIRCUITO ESQUEMÁTICO DO <i>HARDWARE</i>.....	67
APÊNDICE B - FUNCIONAMENTO E OPERAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i>	70

1 INTRODUÇÃO

Diante do atual cenário econômico mundial tem-se em evidência o petróleo e seus derivados como uma das principais *commodities* negociadas mundialmente. Devido a tal relevância, tem-se muito estudado sobre todos os processos que envolvem a exploração e produção do petróleo, gás natural e derivados.

A solução oleosa extraída, denominada óleo bruto, caracteriza-se como mistura complexa, composta basicamente de nafta, óleo lubrificante, parafinas, asfaltenos entre outros. Além disso, durante a exploração e produção do petróleo, não está presente apenas o óleo propriamente dito, mas pode haver presença de gás natural, gás carbônico e outros gases.

1.1 MOTIVAÇÃO

Dentre as substâncias que compõe o óleo bruto, as parafinas de alto peso molecular tendem a se depositar nas paredes do oleoduto, dependendo de algumas características operacionais. Quando o óleo é extraído, está a uma temperatura aproximada de 65 °C, e escoar por um oleoduto que encontra-se em uma temperatura menor, principalmente em operações submarinas, tal diferença de temperatura é muito relevante para a deposição das parafinas.

A deposição de parafinas está associada ao equilíbrio de fases. Esse processo é função das características intrínsecas do petróleo e das variações de temperatura e de pressão durante a produção. Assim sendo, o aparecimento de depósitos parafínicos se manifesta pela quebra deste equilíbrio, provocada pelo resfriamento do petróleo e/ou desprendimento das frações mais leves originalmente dissolvidas neste petróleo. As parafinas, quando expostas a uma determinada temperatura, precipitam-se em forma de cristais e caracteriza-se assim uma fase sólida, composta principalmente pelos componentes de maior peso molecular (SARACENO, 2007). Devido a esse elevado peso haverá então a deposição destas moléculas de parafinas precipitadas nas paredes internas do oleoduto.

As parafinas depositadas na superfície da parede interna da tubulação diminuem a intensidade do fluxo, ou seja, haverá uma menor vazão da solução

oleosa, devido ao fato de a deposição das parafinas diminuir a área livre da secção transversal do tubo para o escoamento.

A redução do escoamento provocada pela deposição de parafinas conduz então a uma sobrecarga do sistema, pois para manter o fluxo de volume constante da solução oleosa, é necessário aumentar a velocidade de escoamento no duto, demandando uma maior potência das bombas de extração e transporte. Este fato é muito relevante, pois o sistema de extração e transporte do óleo bruto iria requerer uma disponibilidade de energia elétrica muito maior para suprir a demanda em tais condições. Os equipamentos podem falhar e os operadores de planta precisariam dispor de treinamentos mais específicos para lidar com os problemas acima citados.

Todos esses fatores mencionados podem resultar em paradas não programadas na produção - para, por exemplo, executar limpeza nos dutos - e condições arriscadas de operação, podendo exigir trabalhos extensivos, perdas na produção e possibilidade de danos irreparáveis, requerendo o abandono ou substituição de equipamentos. Os procedimentos de remediação para os bloqueios dos oleodutos, gerados pela deposição de parafinas, podem provocar gastos elevados. Sendo assim, em toda a extensão do duto haveria um custo de bilhões de dólares para se realizar os devidos procedimentos de retirada das parafinas depositadas e limpeza (SARACENO, 2007).

Dada a importância do problema, vários trabalhos descreveram métodos de forma a monitorar a deposição de parafinas nos oleodutos. Sensores utilizando o princípio de resistência elétrica (DOS SANTOS, *et al.*, 2004), radiografia (EDALATI, *et al.*, 2006), sondas ultrassônicas e *strainingauges* (ZAMAN, *et al.*, 2004) e técnicas tomográficas (ALBOUDWARE, *et al.*, 2004).

A técnica utilizando sensores capacitivos tem um custo de desenvolvimento e manutenção baixo e possibilitará analisar a formação de parafinas e seus resultados servirão de base para estudos de modelos para a previsão dessa deposição. O estudo em geral, com base nos resultados, permite buscar métodos preventivos e corretivos para controlar a deposição de parafinas. Dentre estes métodos destacam-se o uso de inibidores químicos, a injeção de solventes aquecidos, o emprego de reações termoquímicas e a remoção mecânica.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema capaz de medir a deposição de parafina que ocorre em tubulações no processo de exploração de petróleo. O sistema é composto de um sensor capacitivo e uma eletrônica associada para medição da variação de capacitância. Desta forma, o sistema possui um *hardware* dedicado (incluindo um microcontrolador) cujas tarefas são definidas por um *firmware*. A eletrônica comunica com um *software* para controle de parâmetros do sistema e visualização de dados. Esse último interage diretamente com o usuário, permitindo o monitoramento, controle e armazenamento das informações medidas. Além de disponibilizar uma ferramenta de medição da deposição de parafina, este trabalho permitirá o desenvolvimento de novos estudos a partir das informações coletadas, disponibilizando uma base de informações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Vários assuntos são importantes para o desenvolvimento deste trabalho. A composição do petróleo, formas de transporte e deposição de parafinas, assim como os fatores que colaboram com tais fenômenos e os métodos preventivos já existentes que são utilizados para combater o problema serão abordados neste capítulo. Os princípios de medição de impedância elétrica também serão abordados, pois são a essência do sistema de medição da deposição de parafinas nos dutos.

2.1 PETRÓLEO

Cerca de 98% do petróleo é composto por hidrocarbonetos, que, baseados na composição química, são agrupados em 4 principais classes: alcanos, cicloalcanos, aromáticos e alcenos.

Em se tratando de petróleo, Thomas *et al.* (2001), relacionam a composição de um exemplo apresentado no Quadro 1.

Parafinas normais	14%
Parafinas ramificadas	16%
Parafinas cíclicas (naftênicas)	30%
Aromáticos	30%
Resinas e asfaltenos	10%

Quadro 1 – Composição química de um petróleo típico
Fonte: Adaptado de Thomas *et al.* (2001, p.11)

Os petróleos possuem essencialmente os mesmos hidrocarbonetos, mas em diferentes proporções, o que pode influenciar nas propriedades físicas dos diversos tipos de petróleo cru.

O teor de parafinas, na caracterização do petróleo, está relacionado com a presença dos hidrocarbonetos com mais de 18 átomos de carbono, que precipitam a certa temperatura.

2.2 PARAFINAS

As parafinas são componentes do petróleo constituídas por alcanos, com fórmula genérica C_nH_{2n+2} , sendo n o número de átomos de carbono que estão na molécula (SARACENO, 2007).

Em se tratando de deposição de parafinas nas paredes internas dos oleodutos, sabe-se que quanto maior for a cadeia molecular, maior é a temperatura de cristalização, ou seja, mais facilmente as parafinas irão se depositar.

2.2.1 Depósitos de Parafinas

De acordo com Dotto (2003), a formação de depósitos de parafinas é dividida em três etapas: a cristalização, o transporte de massa do seio do petróleo para a parede da tubulação e a fixação do depósito na mesma.

Tendo como base a pressão e temperatura dos reservatórios, as parafinas permanecem dissolvidas em meio ao óleo cru. No momento em que é iniciado o escoamento, existe um gradiente de temperatura do óleo mais quente para a tubulação mais fria, fazendo com que o fluido perca calor para o meio. Em aplicações submarinas, por exemplo, tem-se a temperatura da tubulação em aproximadamente 4°C.

Em uma dada temperatura começam a se formar os primeiros cristais de parafinas, que se depositam na tubulação, devido ao limite de solubilidade do petróleo ter sido alcançado. As moléculas de parafinas que se depositam, com maior peso molecular, formam um gel composto pela mistura de duas fases distintas (líquida e sólida). Essa temperatura é conhecida como Temperatura Inicial de Aparecimento dos Cristais (TIAC). Um depósito de parafinas consiste de uma estrutura porosa contendo de 14 a 17% de cristais de parafinas com óleo líquido em seus intersítios (BURGER, *et al.*, 1981).

Um fator que deve ser considerado, devido à sua importância, no processo de deposição das parafinas é a adesão. Essa é uma etapa determinante para que haja retenção das partículas de parafinas nas paredes dos dutos. O ancoramento mecânico é o mecanismo de adesão que se acredita ser predominante (BURGER, *et al.*, 1981). Sendo assim, os sólidos

que se precipitaram depositam-se gradualmente nas paredes internas da tubulação, formando o gel viscoso estruturado em camadas. Com o decorrer do tempo o gel torna-se mais enrijecido, fazendo com que sua remoção seja dificultada. A Figura 1 ilustra uma tubulação quase totalmente interrompida por parafina.



Figura 1 – Parafina depositada na parede interna de oleoduto
Fonte: STATOIL (2011)

O gel que já está depositado nos oleodutos atua como isolante térmico. Quanto maior a espessura do depósito, maior o isolamento térmico, o que diminui a taxa de deposição. Mas, mesmo quando a deposição cessar, continua existindo um gradiente térmico, que faz com que o conteúdo de parafinas continue a aumentar (KAMINSKI, 1999).

2.2.2 Fatores Importantes na Formação dos Depósitos de Parafinas

Muitos fatores influenciam na formação de depósitos de parafinas, como os gradientes de temperatura e pressão, assim como a composição das parafinas, as propriedades da tubulação e as condições de operação. Os mais importantes fatores estão citados abaixo.

a) Temperatura

A temperatura é o fator mais determinante para a deposição de parafinas em oleodutos, pois se esta permanecer, durante o escoamento, acima da TIAC, não ocorre precipitação (BOMBA, 1986). Segundo Sadeghazad *et al.* (2000), a medida que a temperatura da solução vai diminuindo, a solubilidade das parafinas também tende a diminuir. Tendo em vista que a temperatura do fluido cai abaixo da temperatura de cristalização das parafinas, elas tendem a migrar para o estado sólido, separando-se assim, da fase líquida (BOMBA, 1986). Passada a etapa de separação da fase líquida e sólida, inicia-se uma aglomeração e um crescimento dos cristais e posterior adesão destas massas formadas ao oleoduto e até aos equipamentos utilizados nos processos (BALDOTTO, 2004).

De acordo com experimentos de Hamouda e Davidsen (1995), sob condições de fluxo de calor nulo, não ocorre deposição, deixando claro que a temperatura é um fator importantíssimo quando tratamos do acúmulo de parafinas em oleodutos. E por fim, Creeck *et al.* (1999) concordaram que quanto maior o gradiente de temperatura entre o óleo e a parede do tubo, maior será a taxa de precipitação.

b) Pressão

Para Bomba (1986), quando há uma diminuição na pressão acontece um fenômeno de liberação das porções voláteis do óleo cru (metano, etano, propano e butano). Essas frações podem atuar como solvente natural das parafinas e, quando tais frações são volatizadas, há um aumento na tendência das parafinas precipitarem e se depositarem, por dois motivos: a temperatura é reduzida - devido à rápida expansão dos gases - e a solubilidade das parafinas no óleo também é reduzida, pois os solventes que ali estavam foram volatizados e liberados da solução.

c) Condição de Operação

Misra (1995), afirma que a formação de depósitos de parafinas depende do regime de fluxo considerado. Para o primeiro caso, fluxo laminar, a taxa de deposição de parafinas aumenta com a vazão. À medida que o fluxo passa ao segundo caso, turbulento, a deposição diminui, pois a corrente de fluxo pode promover suficiente força de cisalhamento, que acaba por remover as partículas de parafinas que se depositaram; dessa forma, a deposição em fluxo turbulento é menor do que em fluxo laminar.

2.2.3 Métodos Preventivos

Tendo em vista o grande problema que a deposição de parafinas traz, com o passar do tempo foram desenvolvidos alguns métodos para tentar inibir ou reduzir a formação de depósitos de parafinas, assim como para remover tais sedimentos.

Na literatura podem ser encontrados vários métodos preventivos e corretivos para controlar a deposição de parafinas, dentre os quais se destacam o uso de métodos químicos, o emprego de reações termoquímicas, a remoção mecânica e recobrimento das tubulações; ou a combinação destes. O método adequado dependerá das condições de campo. O método mecânico inclui o uso de *pigs*, que consiste basicamente na remoção mecânica (método corretivo), mas essa técnica possui as suas restrições em utilizações em águas profundas.

Métodos térmicos incluem o isolamento térmico para prevenir a deposição e aquecimento das linhas de fluxo para a remoção por “amolecimento” das parafinas. Métodos químicos incluem inibidores de parafinas, dispersantes e solventes. Inibidores de parafinas são usados para prevenir a deposição e, dispersantes e solventes são geralmente usados para a remoção dos depósitos existentes (SARACENO, 2007).

2.3 INVESTIGAÇÃO DA DEPOSIÇÃO DE PARAFINA

Experimentos para medir a deposição de parafinas em dutos foram desenvolvidos no trabalho de Mendes *et al.* (1997), nos quais uma análise matemática foi realizada, cujo resultado inclui a espessura da camada de parafinas depositadas em função do tempo e da posição ao longo do duto. Esse trabalho mostrou a viabilidade do estudo do fenômeno em escala de laboratório, cujos resultados podem ser aplicados e estudados com maiores detalhes em escalas maiores. Os resultados experimentais e numéricos de Mendes *et al.* (1997) apresentam certa concordância qualitativa com a literatura, entretanto, quantitativamente há diferenças notáveis. Apesar dessas diferenças, o comportamento do modelo teórico e do escoamento observado aponta para um mecanismo de deposição com seu início provocado pela aderência dos primeiros cristais de parafinas em pontos da superfície, a partir dos quais procede-se a aglutinação de massa sólida adicional.

A simulação numérica de Velasquez *et al.* (2005) contempla um tratamento matemático mais complexo, entretanto, não reproduz fielmente o perfil da camada depositada de parafinas. Outro resultado observado é a variação do gradiente de pressão com o tempo, uma vez que a contínua deposição de parafinas obstrui o duto, reduzindo a seção de fluxo, provocando uma dissipação de energia mecânica progressivamente maior, até a completa obstrução da seção. Brown *et al.* (1993) desenvolveram um estudo experimental e um modelo computacional para prever as taxas de deposição de parafinas, os efeitos de longa permanência de depósitos na tubulação, e o potencial de deposição de parafinas no início da operação (*start-up*) de uma tubulação submarina. O estudo foi realizado em um aparato semelhante ao de Mendes *et al.* (1997), porém em escala de campo maior. Medidas realizadas por técnicas viscosimétricas com a ajuda de um microscópio revelaram uma temperatura de precipitação de parafina próxima de 28 °C para o óleo empregado. Verificou-se que, para um duto limpo, a taxa de deposição é alta no início, devido à alta diferença de temperatura entre o óleo e o ambiente externo, levando ao crescimento rápido do depósito. Tal acúmulo de parafinas fornece, então, um isolamento térmico, que altera dinamicamente as condições do balanço térmico.

Para melhor entendimento desses experimentos e, portanto, poderem-se desenvolver modelos teóricos mais detalhados, é necessária uma base de dados experimentais sobre a deposição de parafina. Desse modo, técnicas de medição que sejam capazes de monitorar e quantificar os depósitos sólidos são importantes no avanço do entendimento do comportamento destes. Além de importantes para o entendimento dos fenômenos envolvidos nos depósitos sólidos, novas técnicas de medição também são necessárias em aplicações industriais, por exemplo, para monitoramento e controle de processos. Porém em um ambiente industrial, estas técnicas essencialmente devem ser simples, de baixo custo, robustas e não intrusivas.

2.3.1 Técnicas de Medição de Depósitos Sólidos

Quantificar o efeito da deposição de cera, em especial as parafinas, nas paredes dos dutos é de grande importância para minimizar os riscos na produção e no deslocamento de óleo. Conforme descrito anteriormente, os fenômenos que provocam a interrupção do fluxo no interior dos dutos são assuntos estudados por vários autores. Essas pesquisas buscam aperfeiçoar técnicas, visando o melhor monitoramento dos depósitos sólidos.

Entre as diversas técnicas desenvolvidas, especificamente, para detectar a formação de depósitos no interior do escoamento tem-se uma técnica com o uso de pulsos de pressão (GUDMUNDSSON; DURGUT; CELIUS; KORSAN, 2001), na qual, a detecção de depósitos sólidos nos dutos é obtida a partir de cálculos da variação de pressão, em função do tempo, provocados por impulsos de pressão que percorrem o tubo.

Experimentos em escoamentos monofásicos para detecção de parafinas foram desenvolvidos no método *cold finger* (DOS SANTOS; FERNANDES; GIULIETTI, 2004) e na técnica de radiografia (EDALATI; RASTKHAH; KARMANI; SEIEDI; MOVAFEGHI, 2006). O primeiro consiste em experimentos feitos com o aquecimento das amostras de petróleo em diferentes temperaturas em contato com uma superfície fria de temperatura pré estabelecida. Desse modo, obtém-se a temperatura crítica, parâmetro resultante em função da sobressaturação das parafinas em solução de

petróleo, na qual a influência da diferença de temperatura no sistema foi o fator responsável pelo resultado. Na segunda técnica, desenvolve-se um método para medição da espessura da parede, inspeção de corrosão e grau de depósitos em dutos. Dessa maneira, é possível avaliar o grau de perdas no escoamento por estes fatores, e viabilizar o escoamento de acordo com a vida útil destes dutos.

Uma técnica de instrumentação não intrusiva e que permita uma inspeção imediata que pode produzir informação detalhada sobre o interior do tubo pode ser verificado utilizando o ultrassom (ZAMAN; BJOMDALEN; ISLAM, 2004).

De acordo com a aplicação industrial, cada uma dessas técnicas pode oferecer um resultado melhor que a outra. As técnicas de ultrassom são não intrusivas, apresentam baixo custo e são mais simples se comparadas com técnicas como a radiografia. Apesar de seu alto custo, a radiografia, por sua vez, apresenta melhor precisão e permite a reconstrução da imagem do escoamento.

O uso da tecnologia com pulsos de pressão consegue informações precisas sobre os depósitos sólidos, como suas dimensões, ao longo do duto. Entretanto, ela apresenta limitação no alcance para a detecção de parafinas, pois não atinge um correto monitoramento a distâncias acima de 12 metros (GUDMUNDSSON; DURGUT; CELIUS; KORSAN, 2001). Além disso, na sua instalação, esta técnica pode interferir de forma significativa na diminuição do fluxo dos escoamentos, uma vez que necessita de grande número de válvulas, comprometendo assim a viabilidade de sua utilização.

Sensores capacitivos são bastante utilizados para detecção de fração de vazio (quantidade gás) em misturas gás-líquido e podem ser usados para prever a razão da concentração em misturas de duas fases, desde que elas tenham diferentes permissividades elétricas (CROWE, 2006). Os eletrodos do transdutor agem como um detector de capacitância, sendo esta proporcional às mudanças da permissividade da mistura. Sendo assim, a capacitância entre os eletrodos varia de acordo com a razão de volume das substâncias envolvidas, e de sua distribuição dentro do duto. Em virtude de sua simplicidade, baixo custo e curto tempo de resposta, optou-se para este projeto pelas técnicas baseadas em medida de capacitância.

2.4 MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA EM FLUIDOS

A medição de Impedância é um método comumente usado para a caracterização de circuitos, componentes, material ou solução (DA SILVA, 2008). Os princípios de caracterização estão no fato de que os elementos constituintes das diferentes fases apresentam condutividades e permissividades elétricas diferentes.

Na caracterização de misturas podem-se representar as fases dos fluidos constituintes na seção do duto medido através de suas respectivas condutâncias e capacitâncias. Com isso tem-se que a solução de um escoamento na faixa de frequência de até algumas dezenas de Mega-Hertz pode ser representada através de um circuito composto por um resistor (representando a condutância do fluido) e um capacitor (representando a capacitância do fluido), dispostos paralelamente (DA SILVA, 2008). A Figura 2 representa o modelo elétrico de um fluido em escoamento.

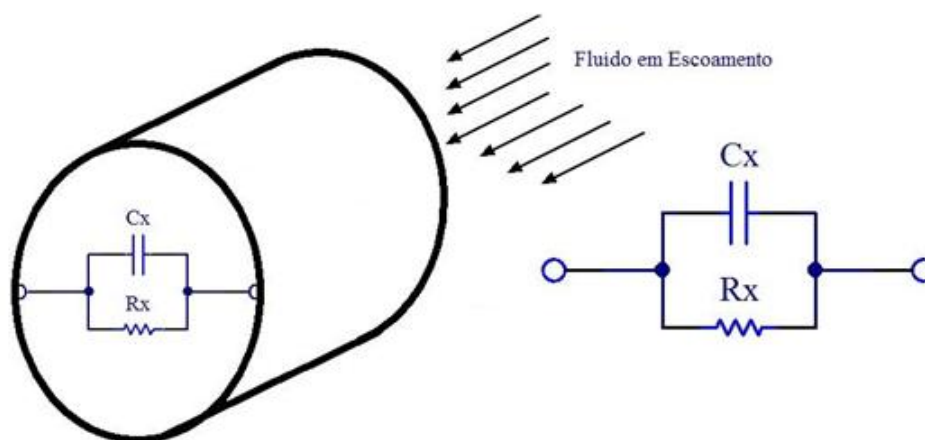


Figura 2 - Representação do modelo elétrico para um fluido em escoamento
Fonte: Autoria própria

Esta representação sugere que o fluido apresenta uma condutividade, representada pelo resistor R_x , e uma permissividade, representada pelo capacitor C_x . Tais parâmetros, a componente resistiva e a componente capacitiva, podem ser vistos como uma impedância elétrica complexa, onde todas as características destas componentes serão consideradas. Conclui-se que as propriedades elétricas do fluido (condutividade e permissividade) podem

ser determinadas através da medição de impedância elétrica do fluido em uma seção transversal do duto pelo qual flui.

2.4.1 Condutividade e Permissividade

Define-se resistência elétrica como a capacidade de os materiais resistirem ao fluxo de corrente elétrica, caracterizada pela relação entre a área de seção transversal ao fluxo (A), comprimento do material resistivo (L) e a constante resistividade (ρ):

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1)$$

na qual a resistência é dada em Ohms (Ω), a constante resistividade ρ em Ohms.metro ($\Omega.m$), o comprimento L em metro (m) e a área da seção transversal em m^2 . Ressalta-se que a resistividade é um valor constante e único para cada elemento, de forma que cada um possui sua própria característica de resistência ao fluxo de corrente elétrica. Utiliza-se o termo condutor para elementos com baixa resistividade, isolante para elementos com alta resistividade e semi-condutor para médias resistividades.

A condutância é a capacidade de um elemento conduzir corrente elétrica, caracterizando uma reciprocidade direta ao conceito de resistência elétrica. A grandeza condutância é representada usualmente pela letra G , e possui como unidade no Sistema Internacional (SI) o *Siemens* (S). Conclui-se que a condutância é matematicamente inversa à resistência elétrica, conforme a seguinte relação:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U} \quad (2)$$

sendo U a tensão aplicada ao elemento, em Volts (V), R a resistência elétrica, em Ohms (Ω).

Apresentados os princípios que regem a caracterização da grandeza resistência elétrica, tem-se também a capacitância como parâmetro necessário e essencial para o específico método de caracterização de fluidos.

Define-se capacitor como um elemento passivo projetado para armazenar energia em seu campo elétrico. É constituído por duas placas condutoras separadas por um dielétrico. Aplicada uma diferença de potencial às placas condutoras isoladas estruturalmente entre si cria-se um campo elétrico, onde é depositada uma carga “ q ” positiva em uma placa e uma carga negativa “ $-q$ ” na outra, caracterizando assim um armazenamento de carga elétrica (ALEXANDER; SADIKU, 2003). A Figura 3 exemplifica os princípios de um capacitor de placas planas paralelas:

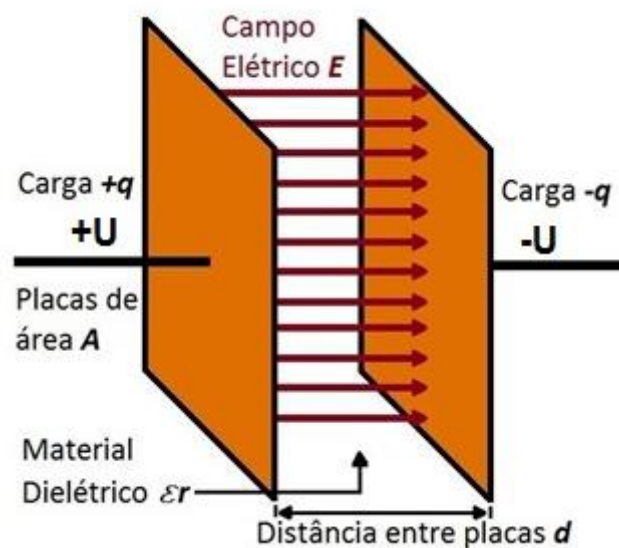


Figura 3 – Representação de um capacitor de placas planas paralelas
Fonte: Autoria própria

Define-se capacitância como a razão da carga elétrica armazenada em uma placa do capacitor pela diferença de tensão existente entre as duas placas. Tem-se então a capacitância como a capacidade de armazenamento de carga elétrica, como uma constante de proporcionalidade entre a carga elétrica armazenada e a tensão aplicada:

$$C = \frac{q}{U}, \quad (3)$$

na qual q é a quantidade de carga elétrica armazenada, em Coulombs (C), U a tensão aplicada às placas condutoras, em Volts (V), e C a capacitância, em farads (F). Mesmo sendo uma relação da tensão aplicada e da carga

armazenada, a constante capacitância não depende de tais grandezas. Esta constante é função dos aspectos construtivos e propriedades elétricas dos materiais que caracterizam o elemento capacitivo, sendo estes três fatores (ALEXANDER; SADIKU, 2003):

- Área da superfície das placas: a capacitância é tanto maior quanto maior for a área das placas onde está sendo aplicado o campo elétrico;
- Espaçamento entre as placas: quanto menor a distância entre as placas, maior a capacitância;
- Permissividade elétrica do material: quanto maior a permissividade, maior a capacitância.

Tem-se então a relação entre os três fatores que determinam a capacitância, para capacitores com placas paralelas:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}, \quad (4)$$

sendo C a capacitância em farads (F), ε_0 a permissividade eletrostática do vácuo ou espaço livre, ε_r a constante dielétrica ou permissividade relativa do isolante utilizado, A a área em m^2 e d a distância entre as placas condutoras, em m.

O conceito de permissividade elétrica está intimamente ligado à grandeza capacitância. Caracteriza-se por ser a capacidade de um material dielétrico polarizar-se quando sob a ação de um campo elétrico. A permissividade do vácuo, representada por ε_0 , é obtida através do seguinte quociente:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2 \times \mu_0} = 8.854 \times 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right], \quad (5)$$

na qual c é a velocidade da luz no vácuo e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo. No vazio do espaço livre de qualquer matéria, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ (DA SILVA, 2008).

Cada material tem sua própria permissividade elétrica, denominada permissividade absoluta. Porém, usualmente é representada pela denominada permissividade relativa ou constante dielétrica, sendo todos os valores de constante dielétrica (ou permissividade relativa) relacionados à permissividade do vácuo. A permissividade relativa é dada por:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (6)$$

sendo ϵ a permissividade absoluta e ϵ_0 a permissividade do vácuo. Observa-se por este quociente que a grandeza permissividade relativa é adimensional, uma vez que a permissividade absoluta do material e a permissividade do vácuo têm como unidade F/m (*farad/metro*).

No Quadro 2 são apresentadas algumas substâncias e seus respectivos valores de permissividade relativa:

Substância	Permissividade Relativa (ϵ_r)
Ar	1,00
Óleo cru	2,19
Ceras de Parafina	2,22
Éter Dietílico	4,24
2-Propanol	20,00
Etanol	24,00
Etileno-Glicol	37,00
Água Deionizada	78,00

Quadro 2 – Permissividade relativa para substâncias selecionadas líquidas a 25°C
Fonte: Adaptado de DA SILVA (2008, p. 41) e de Csikós *et al.* (1982, p. 139)

2.4.2 Impedância Elétrica

O conceito de impedância elétrica caracteriza-se por ser a compilação de todas as propriedades elétricas de um determinado elemento, relevando tanto sua natureza resistiva, quanto capacitiva e indutiva.

Matematicamente, a grandeza Impedância é relação da tensão aplicada a uma carga de comportamento não estacionário e da corrente que pela carga flui. Em um circuito de corrente alternada senoidal, é aplicada uma tensão $u(t) = U \cos(\omega t + \theta v)$ a uma frequência angular $\omega = 2\pi f$ a um material ou circuito, resultando em uma corrente elétrica medida $i(t) = I \cos(\omega t + \theta I)$. Pela notação complexa tem-se a tensão complexa $\dot{U} = U \exp(j\theta v)$ e a corrente

complexa $\dot{I} = I \exp(j\theta I)$, onde $j = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária. Pela Lei de Ohm tem-se então a impedância resultante dada em Ohms:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U \exp(j\theta u)}{I \exp(j\theta I)} = \frac{U}{I} \exp(j(\theta u - \theta I)) = Z \exp(j\theta Z) \quad (7)$$

Logo para a caracterização da impedância de um fluido faz-se necessária a determinação de dois parâmetros: magnitude (Z) e ângulo de fase (θZ) ou parte real e imaginária dos sinais de tensão ou corrente. Obtêm-se tais parâmetros através de estímulos elétricos aplicados a um eletrodo e analisando os sinais de resposta em um eletrodo receptor, tendo como substância entre os eletrodos o fluido objeto de estudo.

2.4.3 Circuito de Medição de Impedância Elétrica

Utilizado eficazmente em muitos circuitos de medição de impedância, o circuito comumente nomeado ponte de auto-equilíbrio (*auto-balancing bridge*), amplificador de transimpedância ou conversor corrente-tensão tem como princípio estrutural um amplificador operacional com alta impedância de entrada e baixa impedância de saída. A configuração ideal deste circuito é apresentada na Figura 4:

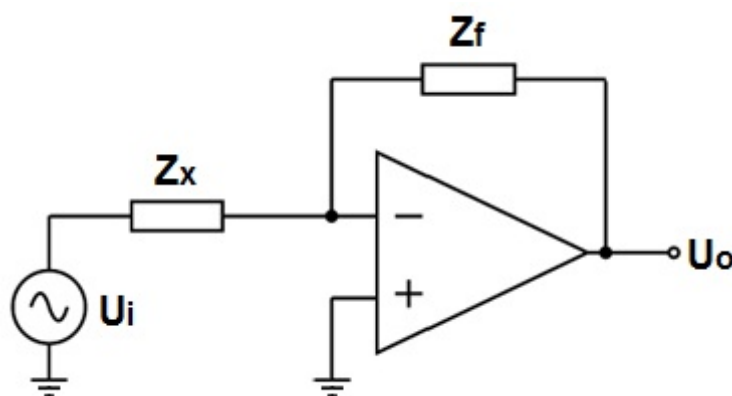


Figura 4 – Configuração básica para o circuito ponte de auto-equilíbrio
Fonte: Adaptado de DA SILVA (2008, p. 47)

Tem-se \dot{U}_i como a tensão de excitação do circuito, \dot{Z}_x a impedância desconhecida do material, \dot{Z}_f a impedância de realimentação e \dot{U}_o a tensão de

saída. A entrada não-inversora do amplificador operacional é mantida em potencial zero, sendo assim denominada terra virtual (*virtual ground*). Desta maneira a corrente elétrica que flui sobre Z_f equilibra com a corrente que flui sobre Z_x pela ação do amplificador operacional, o qual aumenta a sua tensão de saída (U_o) para compensar a corrente sobre Z_f (DA SILVA, 2008).

A impedância Z_x é determinada através da relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada, resultando em uma constante denominada ganho (AV):

$$AV = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{Z_f}{Z_x} \quad (8)$$

Observa-se a partir de tal relação que é possível se obter a impedância desconhecida Z_x fazendo a medição da tensão de saída U_o , uma vez conhecidos a impedância Z_f e a tensão de excitação U_i .

Em circuitos amplificadores de transimpedância, tais impedâncias são comumente representadas por uma resistência e uma capacitância dispostos paralelamente. Além disso, tem-se também capacitâncias parasitas C_{s1} e C_{s2} provenientes dos cabos e conexões. Não há influência de tais capacitâncias parasitas sobre o circuito de medição, com a condição de que estejam referenciadas no mesmo potencial.

O circuito de medição de impedância é representado na Figura 5 com suas características:

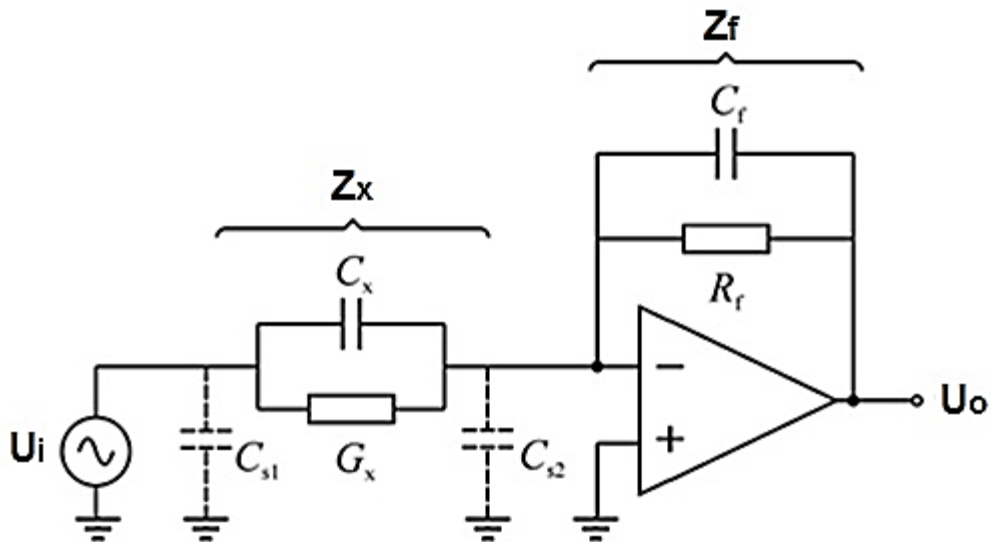


Figura 5 – Representação do circuito ponte de auto-equilíbrio
 Fonte: Adaptado de DA SILVA (2008, p. 47)

Considerando tais características de circuito tem-se:

$$AV = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{(G_x + j\omega C_x)}{(G_f + j\omega C_f)}, \quad (9)$$

sendo a frequência angular $\omega = 2\pi f$ e f a frequência do sinal de excitação. G_x e C_x representam respectivamente a condutância e a capacitância próprias do material em medição, e G_f e C_f respectivamente a condutância e a capacitância referências para a medição.

Da Silva (2008) apresenta uma análise do ganho em função da frequência para valores típicos de componentes, sendo $C_f = 10$ pF e $G_f = 10$ μ S (100 k Ω), e C_x e G_x (R_x) indicados na Figura 6:

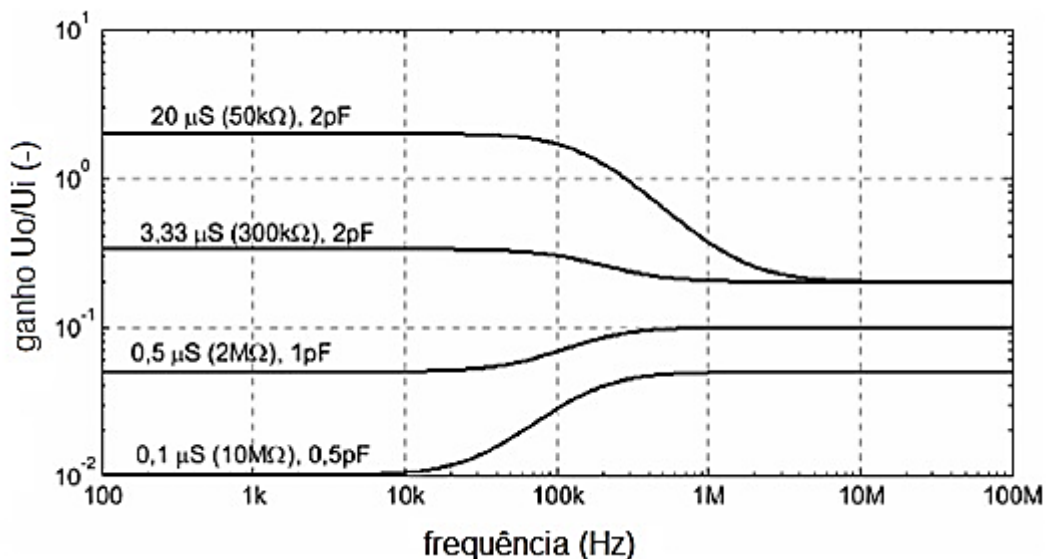


Figura 6 – Resposta em frequência do circuito ponte de auto-equilíbrio
Fonte: Adaptado de DA SILVA (2008, p. 48)

A magnitude de cada platô é dada pelo quociente G_x/G_f e C_x/C_f , obtidos através do limite da Equação 11 para $f \rightarrow 0$ e $f \rightarrow \infty$.

Para um amplificador operacional não-ideal aplicado ao circuito ponte de auto-equilíbrio, tem-se uma resposta em frequência. Inicialmente há uma limitação de resposta para altas frequências por parte do amplificador operacional, ou seja, largura de banda finita. A Figura 7 ilustra a simplificação da resposta em frequência do circuito de ponte de auto-equilíbrio para um amplificador operacional não-ideal:

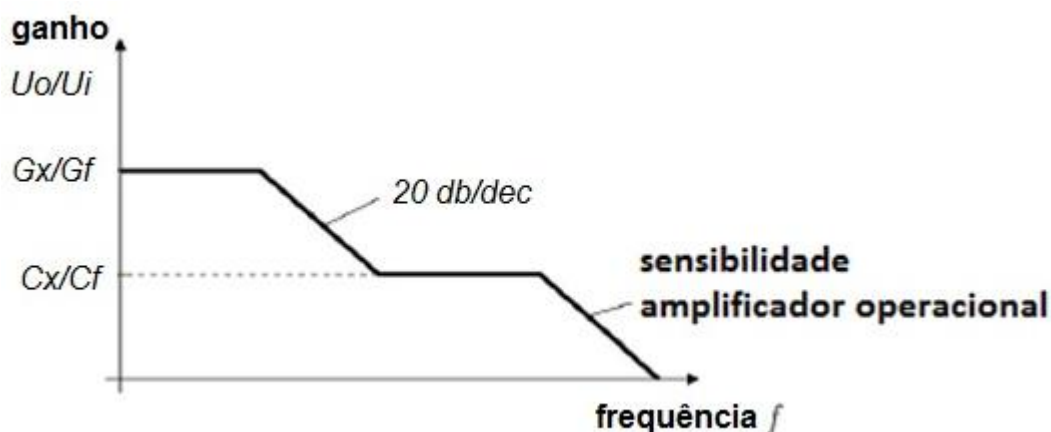


Figura 7 – Resposta simplificada em frequência de um amplificador operacional não-ideal
Fonte: Adaptado de DA SILVA (2008, p. 49)

A frequência de operação e as características do amplificador utilizado são de extrema relevância para um desempenho correto do circuito, bem como o adequado dimensionamento dos parâmetros de realimentação Gf e Cf .

Em muitas aplicações apenas um parâmetro está presente em quantidade significativa, ou seja, a variação da quantidade de material com impedância desconhecida causa uma variação significativa somente na condutância Gx ou somente na capacitância Cx . Deste modo o circuito de ponte de auto-equilíbrio pode então ser dimensionado como resistência ou capacitância dominante, como parâmetro de realimentação do amplificador operacional.

3 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do sistema de monitoramento *online* do acúmulo de parafina nas paredes de oleodutos dividiu-se em descrição do sistema, desenvolvimento do sensor capacitivo, desenvolvimento de *hardware*, desenvolvimento de *firmware* e, por fim, desenvolvimento de *software*. As partes constituintes do sistema são detalhadamente descritas a seguir.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Essencialmente o sistema tem como objetivo a aquisição da variação de capacitância de uma determinada substância em análise em relação à outra substância definida como referência. Para isso, desenvolveu-se um sensor capacitivo onde é inserida a substância para análise. Um circuito eletrônico desenvolvido gera um sinal de excitação, conduzido ao eletrodo de transmissão do sensor capacitivo. Tal sinal tem então sua amplitude e fase alterados, de acordo com as características elétricas das substâncias presentes no sensor. O sinal resposta às propriedades do fluido presente no sensor é conduzido através de um circuito eletrônico de medição ao circuito microcontrolador, gerenciando e controlando todo sistema em uma malha fechada de controle através de um código *firmware* desenvolvido em linguagem C. O microcontrolador, definido para esta aplicação como sendo da série PIC, fabricado pela *Microchip Technology Inc.*, comunica através de um protocolo serial RS232 com um *software* desenvolvido em linguagem C# para a interface gráfica do usuário com o sistema como um todo (Figura 8).

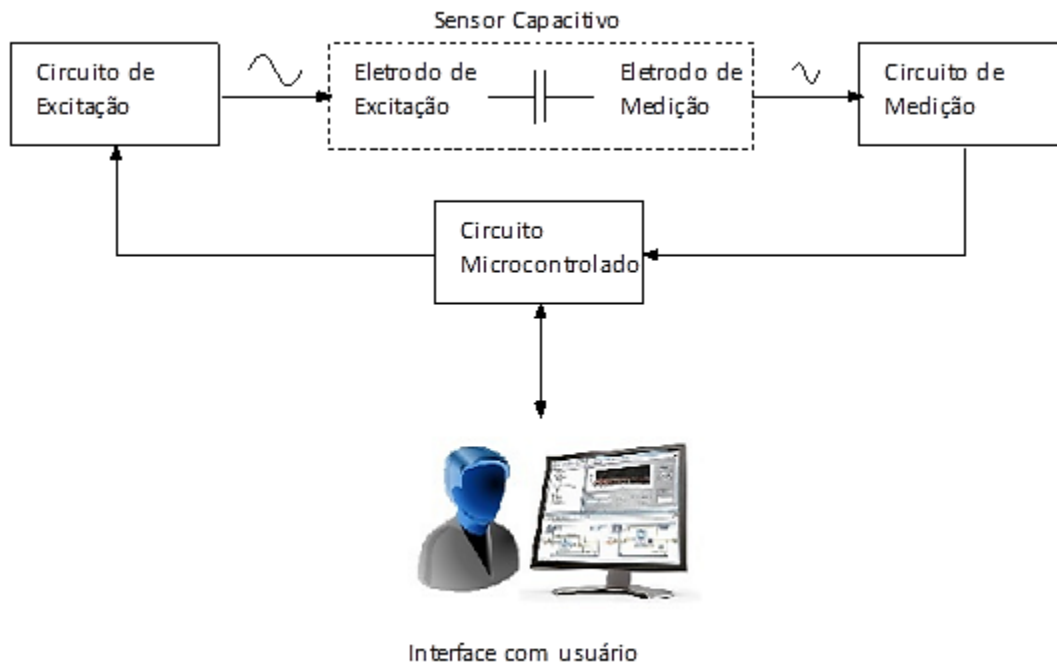


Figura 8 – Representação em diagrama de blocos
Fonte: Autoria própria

3.2 SENSOR CAPACITIVO

Desenvolveu-se um sensor capacitivo para a realização de experimentos com o sistema completo. O sensor consiste em uma placa de circuito impresso em dupla face, onde no *layer* superior contém dois eletrodos coplanares e retangulares dispostos paralelamente, enquanto que no *layer* inferior tem-se um plano de terra, criando uma blindagem eletromagnética para os eletrodos. Os eletrodos são retângulos iguais, com comprimento de 40 mm e largura de 20 mm, com distância entre eles de 3 mm, conforme Figura 9. A conexão de entrada e saída do sensor é feita através de cabos coaxiais de 1 m de comprimento e impedância de $230\text{ m}\Omega$, com o propósito de imunização à interferências eletromagnéticas provenientes do ambiente eletromagnético no qual o sensor estará inserido.

Para conter a substância a ser analisada, uma cuba, constituída de um material acrílico, foi colocada na área de medição (Figura 9). Tal cuba possui uma base quadrada de lado de 50 mm e altura de 80mm, definindo um volume total de 200 mL.

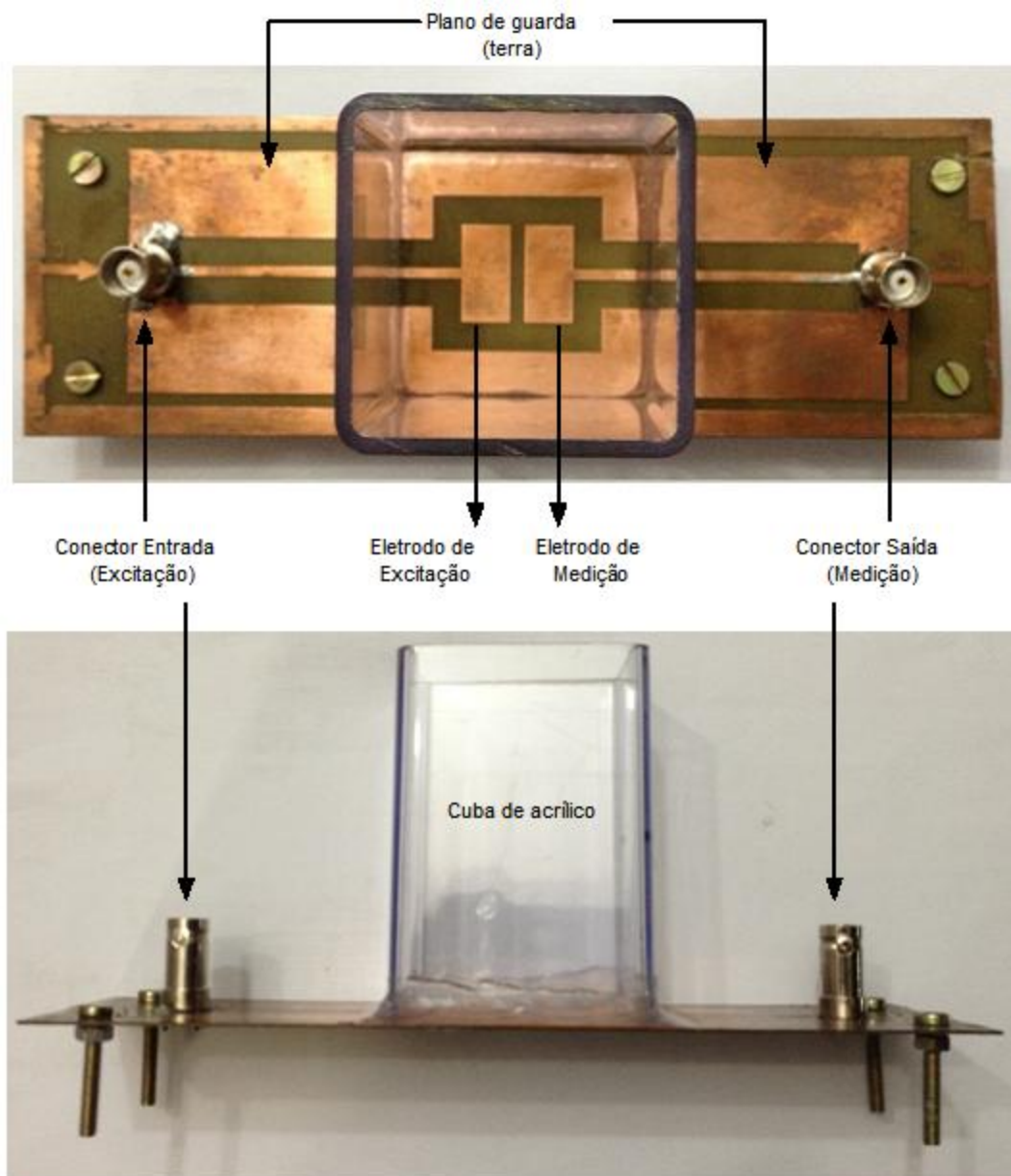


Figura 9 – Sensor capacitivo desenvolvido
Fonte: Autoria própria

A eletrônica responsável em operar o sensor aplica uma tensão senoidal no eletrodo transmissor. Essa excitação faz com que o potencial elétrico seja concentrado ao longo do eletrodo ativo, permitindo medir a corrente de deslocamento que flui para o eletrodo receptor.

O plano de terra criado no *top layer* é disposto na placa de circuito impresso conforme Figura 9, de modo a induzir a convergência do campo elétrico para a região entre o eletrodo de excitação e recepção. Em conjunto com tais eletrodos, o plano de terra no *bottom layer* (*layer inferior*) cria uma

blindagem eletromagnética, tornando o circuito menos susceptível às interferências eletromagnéticas provenientes de fontes externas e garantindo uma medição mais estável.

3.2.1 Modelo Analítico para Sensores Capacitivos Coplanares

Considerando dois eletrodos coplanares dispostos paralelamente, separados por uma distância de *gap* igual a $2a$, envolvidos por um meio dielétrico uniforme com permissividade relativa média de ϵ_r , mantidos com uma diferença de potencial constante. Os eletrodos possuem dimensões iguais, com largura w e comprimento l . De acordo com Chen *et al.* (2004), a capacitância para a topologia apresentada é dada pela seguinte relação:

$$C = \frac{2\epsilon_r\epsilon_0 l}{\pi} \ln \left[\left(1 + \frac{w}{a}\right) + \sqrt{\left(1 + \frac{w}{a}\right)^2 - 1} \right] \quad (10)$$

Para o caso do sensor capacitivo desenvolvido, tem-se um *gap* (espaçamento entre eletrodos) de 3 mm ($a=1,5$ mm), eletrodos de comprimento de 40 mm ($l=40$ mm) e largura de 20 mm ($w=20$ mm), conforme representado na Figura 10.

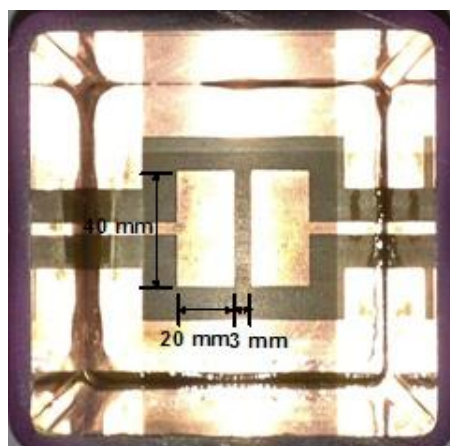


Figura 10 – Capacitor coplanar desenvolvido
Fonte: Autoria própria

Com esses dados, tem-se os seguintes valores de capacitância para cada substância apresentados no Quadro 3:

Substância	Permissividade Relativa (ϵ_r)	Capacitância (pF)
Ar	1,00	0,53
Óleo Cru	2,19	1,15
Ceras de Parafina	2,22	1,17
Éter Dietílico	4,24	2,23
2-Propanol	20,00	10,53
Etanol	24,00	12,64
Etileno-Glicol	37,00	19,48
Água Deionizada	78,00	41,06

Quadro 3 – Valores de capacitância no sensor capacitivo

Fonte: Adaptado de DA SILVA (2008, p. 41) e de Csikós *et al.* (1982, p. 139)

A extensão da detecção do sensor capacitivo limita-se a uma profundidade de penetração máxima campo, determinada pela variável T , enunciada por Chen *et al.* (2004) na seguinte relação:

$$T = a \sinh \left[\cosh^{-1} \left(1 + \frac{w}{a} \right) \right] = a \sqrt{\left(1 + \frac{w}{a} \right)^2 - 1} \quad (11)$$

O comprimento da penetração máxima de campo corresponde então ao deslocamento máximo vertical da linha de campo que emana da aresta exterior do par de eletrodos. Para o caso do sensor capacitivo desenvolvido, tem-se T com um valor de aproximadamente 21,45 mm, ou seja, é no volume limitado por esta altura que o sensor é sensível a variações de capacitâncias. Isso não representa um problema para os testes, pois sempre haverá 100 mL da substância em análise, definindo uma altura de preenchimento do sensor de 40 mm, superando os 21,45 mm de penetração máxima de campo calculada.

É importante ressaltar que o sensor capacitivo foi construído especificamente para os testes com o sistema desenvolvido. Geometrias alternativas podem ser desenvolvidas para cada caso de estudo de aplicação.

3.3 HARDWARE

Define-se como o *hardware* a união do circuito de excitação, circuito de medição e o circuito microcontrolado. Cada parte destas possui um circuito eletrônico específico e funções específicas dentro do sistema como um todo. A

Figura 11 ilustra o diagrama geral do *hardware*, com os circuitos constituintes em evidência.

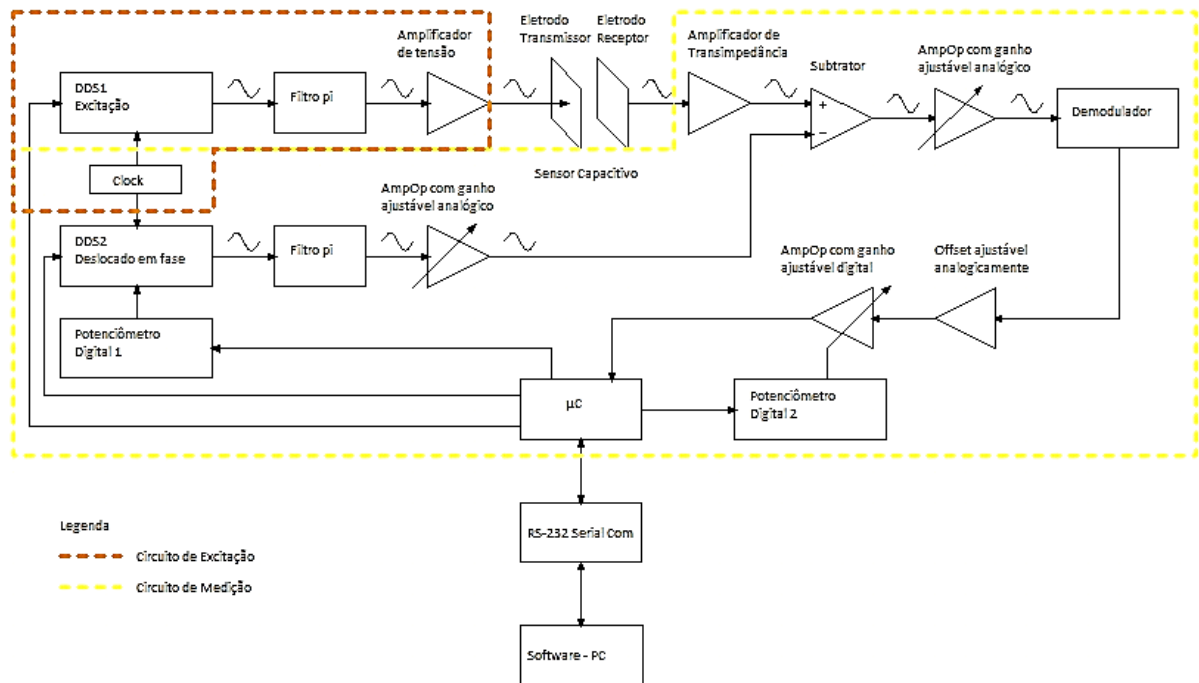


Figura 11 – Visão geral diagrama em blocos do *hardware*
Fonte: Autoria própria

3.3.1 Circuito de Excitação

a) DDS

O sinal de excitação aplicado ao eletrodo do sensor capacitivo consiste de um sinal senoidal de tensão com amplitude e frequência conhecida. Para gerar tal sinal utilizou-se um circuito integrado denominado sintetizador digital, comercialmente conhecido como DDS (*Direct Digital Synthesizer*).

Como DDS foi utilizado o circuito integrado AD9835, fabricado pela *Analog Devices*. Através do circuito microcontrolador, o qual será melhor detalhado na seção 3.3.3, é possível definir a frequência e fase do sinal de saída do DDS.

A referência de *clock* para gerar o sinal de saída é determinada por uma unidade osciladora, de 25 MHz, caracterizando assim a frequência limite para o sinal de saída do DDS.

b) Filtro passa-baixa

Com a intenção de se eliminar harmônicos que são geradas pelas frequências múltiplas do oscilador, inseriu-se nas saídas dos DDS um filtro passa-baixa de terceira ordem, na topologia de circuito conhecida como filtro pi. Tal filtro foi dimensionado com o auxílio da ferramenta de desenvolvimento *RFSim99* de modo a se obter uma frequência de corte de 5 MHz (Figura 12). O resistor de 300 Ohm, representado na figura por R4, é recomendado pelo fabricante do DDS como resistor de carga.

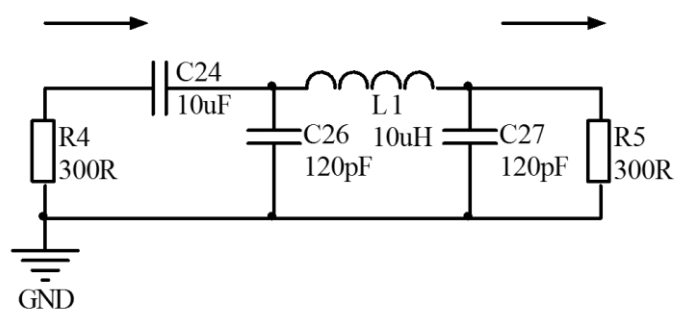


Figura 12 - Filtro passa-baixa implementado
Fonte: Autoria própria

c) Pré-Amplificação

Após ser filtrado com baixa impedância de saída, o sinal de tensão senoidal passa por um circuito de amplificador de tensão, e, por fim, inserido no eletrodo de excitação do sensor capacitivo. O circuito amplificador possui um ganho de 13 vezes, e é utilizado para o casamento de impedância com o sensor capacitivo. O amplificador selecionado para esta aplicação, devido à grande faixa de frequência de operação, foi o OPA830, fabricado pela *Texas Instruments*.

3.3.2 Circuito de Medição

O circuito de medição caracteriza-se por realizar a condução do sinal de resposta do sensor capacitivo até o microcontrolador, envolvendo dois sub-circuitos: subtrator/referência e demodulador (Figura 14). A essência do

princípio de medição da capacitância está no fato de haver um circuito integrado amplificador de transimpedância logo na saída do eletrodo receptor. Como já apresentado na seção 2.4.3, um amplificador de transimpedância funciona como um conversor de corrente em tensão, ou seja, a tensão de saída do amplificador é elevada proporcionalmente à corrente que flui pela entrada não-inversora. Com isso, tem-se uma tensão de saída do amplificador de transimpedância proporcional ao sinal de corrente que flui pelo sensor capacitivo, caracterizado como o sinal resposta à substância presente no sensor, conforme a Figura 13.

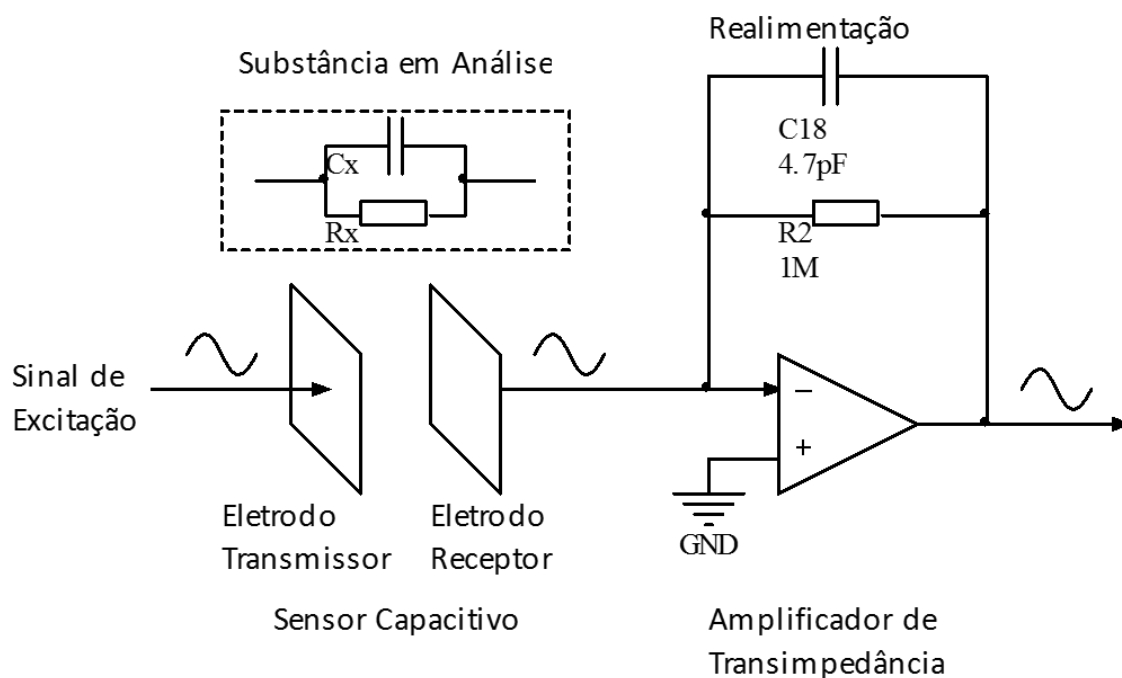


Figura 13 – Representação do princípio de medição
Fonte: Autoria própria

As propriedades elétricas da substância em análise estão representadas na ilustração acima pelo circuito formado pelo capacitor C_x e pelo resistor R_x , representando respectivamente a capacitância e a resistência intrínsecas à substância presente no sensor capacitivo.

Considerando os requisitos de desenvolvimento do projeto, escolheu-se como amplificador de transimpedância o amplificador operacional OPA656, fabricado pela *Texas Instruments*, por apresentar uma largura de banda em ganho unitário de 500 MHz, corrente de *bias* de 2 pA e um *offset* de 0,25 mV.

Para a realimentação do amplificador de transimpedância utilizou-se um resistor de 1 MOhm em paralelo a um capacitor de 4,7 pF, valores esses selecionados de acordo com as propriedades elétricas estimadas das substâncias que se deseja analisar.

Apresenta-se na Figura 14 o circuito de medição e suas respectivas partes constituintes:

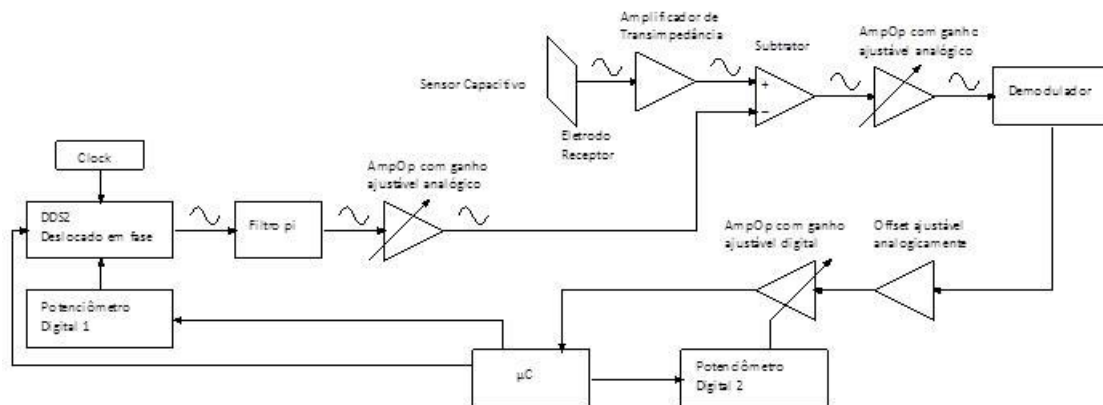


Figura 14 – Circuito de Medição
Fonte: A autoria própria

a) Circuito Subtrator e Referência

Com a intenção de criar a possibilidade de se zerar o sinal de resposta para um determinado estado do sensor capacitivo, ou seja, para uma determinada substância, tem-se no circuito um segundo DDS. Através do microcontrolador, define-se para o sinal de saída do DDS2 a frequência e um deslocamento em fase em relação ao DDS1, bem como define-se também através de um potenciômetro digital (representado por potenciômetro digital 2), a amplitude do sinal senoidal de saída do DDS2. Para isso, o sinal do DDS2 é somado em um amplificador operacional, configurado na topologia subtrator, com o sinal de resposta do amplificador de transimpedância. Isso possibilitará definir uma determinada substância como o zero do sistema de medição, ou seja, através de um balanceamento obtido através do DDS2 pelo ganho de amplitude e fase variáveis zera-se a resposta de saída do circuito de medição. Esta característica do sistema permite que se obtenha uma medição da variação da capacitância no sensor, tendo como “zero” uma determinada substância.

Como amplificador subtrator utilizou-se o OPA830, também utilizado em outras partes do circuito.

O potenciômetro digital utilizado para controle da amplitude do sinal de saída do DDS2 é o MCP41050, fabricado pela *Microchip*. Ele possui uma resistência variável com máximo valor de 50 kOhm em 8 bits. Esta resistência é controlada via protocolo SPI pelo microcontrolador, protocolo de comunicação que será melhor explicado na seção 3.4.1 b.

b) Circuito Demodulador

O sinal de saída do circuito subtrator é conduzido a um amplificador de tensão para garantir um nível de tensão aceitável na entrada do demodulador. O circuito demodulador detecta a envoltória do sinal, tornando-no em um sinal DC que será enviado ao microcontrolador após estágios de ganho de tensão para garantir a faixa de leitura. O componente demodulador utilizado é o LTC5507, fabricado pela *Linear Technology*.

O sinal resposta à conversão no demodulador, agora de natureza contínua, passa então por um amplificador configurado numa topologia desenvolvida para ajustar o *offset* do sinal. Por fim, o sinal resposta passa por um amplificador operacional (TL071CD, manufaturado por diversos fabricantes, como por exemplo *ST Microelectronics*) com ganho ajustável definido através de um potenciômetro digital MCP41050 (fabricado pela *Microchip Technology Inc.*), com 50 kOhm. O sinal é então conduzido a uma porta do microcontrolador configurada como um conversor AD (analógico-digital). O microcontrolador então realiza a leitura dos valores de tensão nesta porta ao longo do tempo, registra e manipula tais dados para o devido gerenciamento do sistema.

3.3.3 Circuito Microcontrolador

O microcontrolador é responsável pelo acionamento e controle do circuito de excitação, pelo controle do circuito de resposta do sensor capacitivo à excitação, e ainda pela comunicação com um *software* desenvolvido especificamente para o projeto. Convergindo para um nível mais específico, o

microcontrolador configura os dois DDS e os dois potenciômetros digitais, bem como é responsável pela aquisição do sinal e envio para a interface com o *software*.

O microcontrolador configura os DDS para gerar os sinais senoidais de excitação e referência. Para os amplificadores de tensão que necessitem de um controle via *software* são dispostos de potenciômetros digitais. Os potenciômetros digitais estão interligados à interface SPI do microcontrolador.

A comunicação com o computador foi desenvolvida por meio de uma interface RS-232, configurada para operar no modo assíncrono, com oito bits de dados e sem bit de paridade. Um circuito integrado MAX232 foi utilizado para que a saída do microcontrolador pudesse ser conectada à porta serial do computador. A taxa de transmissão escolhida foi de 9600 baud devido à limitação da maioria das portas seriais dos computadores não suportarem taxas maiores.

A comunicação serial tem algumas limitações. Além de ser considerada de baixa velocidade para os padrões atuais, o protocolo utilizado só consegue transmitir e receber um *byte* por vez. Dessa maneira, a programação do *software* e *firmware* teve que ser estruturada de acordo com essa limitação.

Por apenas possibilitar a interface entre os diferentes módulos, a capacidade de processamento não foi considerada um fator limitante de escolha, uma vez que não é função do microcontrolador o processamento das informações que serão lidas. Em virtude de atender aos requisitos do sistema proposto, do baixo custo e o fácil acesso de compra, optou-se pelo uso de um microcontrolador da família PIC18, mais especificamente o PIC18F2320.

Conforme as recomendações de uso do conversor analógico-digital presentes no *datasheet* (MICROCHIP TECHNOLOGY INC. PIC18F2320, 2003), configurou-se o microcontrolador de forma que a soma dos tempos de amostragem e de conversão resultasse em 36 μ s, o que possibilitaria uma taxa de amostragem máxima de 27,78 kHz. Porém, a taxa de amostragem ficou limitada pela velocidade de transmissão da interface serial. Considerando o fato de que cada medida amostrada pelo sistema é codificada em dois *bytes*, e que a resolução do conversor analógico digital é de dez bits, assume-se então que não poderão ser amostrados mais do que 5760 valores por segundo,

devido à velocidade máxima de transmissão via RS-232 limitada em 11,52 kbytes/s.

3.3.4 Hardware Desenvolvido

Com base nos princípios da teoria do *design* de placas de circuito impresso (*placement*, análise de *clearances* e *routing*), desenvolveu-se a placa e prototipagem do circuito impresso do *hardware*, visando o correto funcionamento do circuito, bem como uma menor susceptibilidade à interferências eletromagnéticas inerentes ao meio e aos próprios componentes eletrônicos presentes no circuito.

O *layout* foi desenvolvido de modo a ter os circuitos constituintes separados em regiões definidas, de modo a tornar a placa muito mais organizada em termos de funções de cada circuito. A Figura 15 apresenta a placa de circuito impresso montada e os respectivos blocos representados.

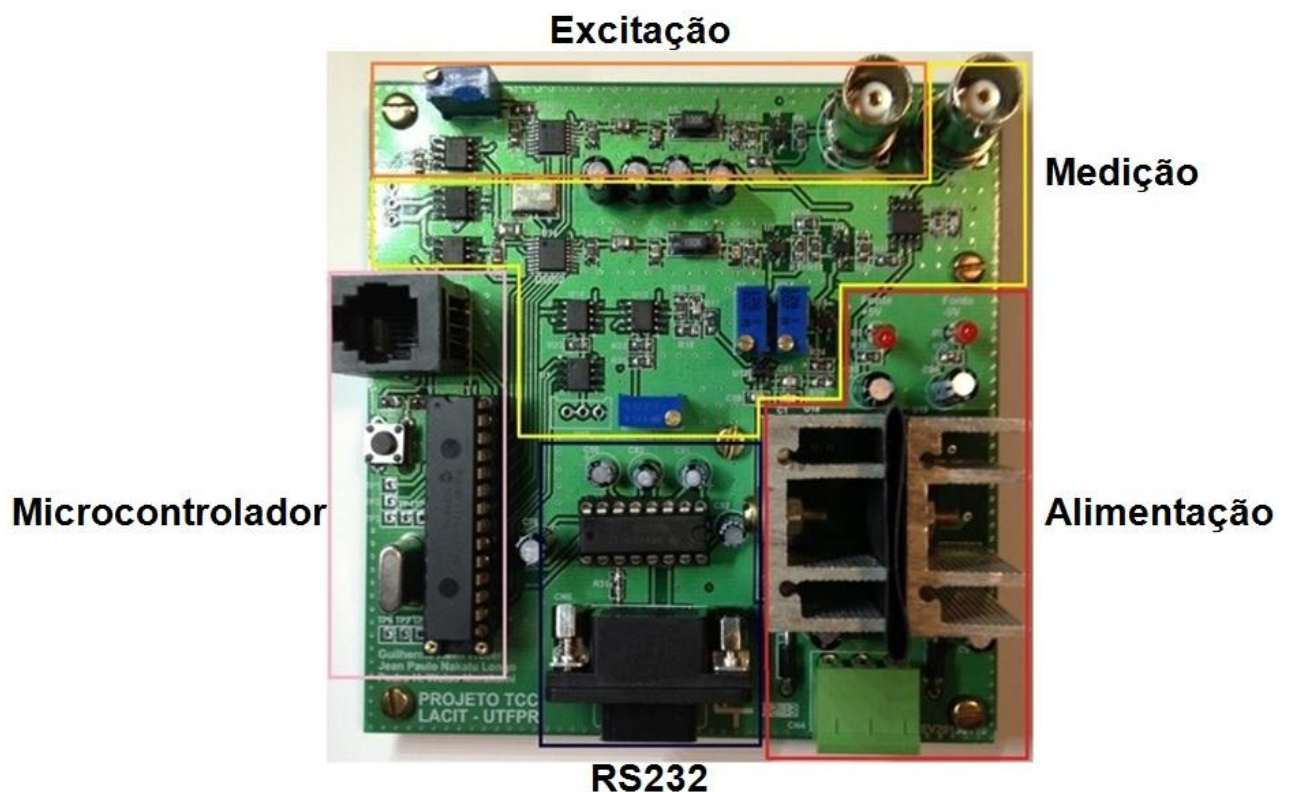


Figura 15 – Placa de circuito impresso montada
Fonte: Autoria própria

3.4 FIRMWARE

O *firmware* consiste em um conjunto de instruções operacionais programadas diretamente no *hardware*.

A linguagem de desenvolvimento foi o C. O motivo da escolha está ligado à popularidade dessa linguagem de programação, e por portar uma arquitetura para as quais muitos compiladores são compatíveis a este tipo de linguagem de programação. O programa foi implementado por meio do ambiente do MPLAB da *Microchip* com o auxílio do compilador CCS.

Na sequência é detalhado o funcionamento do código registrado no microcontrolador. Além disso, são descritas as características de configuração dos periféricos e os protocolos de comunicação utilizados.

3.4.1 Configuração dos Periféricos

Protocolos de comunicação caracterizam-se por um conjunto de regras e procedimentos padrões que assinalam o formato, a sincronização, a sequência e, ainda, a detecção de erros e falhas na comunicação de pacotes, ou seja, na transmissão de informações dos dados em análise.

Neste trabalho utilizou-se a interface SPI para configuração dos potenciômetros digitais, a comunicação RS-232 para interligar o *firmware* com o *software*, e um protocolo serial para gravação dos geradores senoidais.

a) Gravação do DDS

O sintetizador digital recebe um dado de 16 *bits* a cada ciclo de *clock*. Três pinos são utilizados para carregar as palavras de 16 *bits* aos DDS: SCLK, SDATA e FSYNC, conforme *datasheet* AD9835.

Quando o pino do FSYNC estiver em nível lógico baixo, a lógica interna é informada de que a palavra pode ser carregada para o dispositivo. O SCLK define o ciclo para o envio de dados e o SDATA é responsável por transmitir os *bits* de dados.

Estes dados de 16 *bits* são enviados quando o usuário definir, pelo *software*, a configuração dos dois sintetizadores digitais. O sintetizador dispõe

de dois registradores de 32 *bits* cada, para determinar as frequências nas quais se deseja operar, estas variando de 0 até 25 MHz, e de quatro registradores de 12 *bits* para operar a fase do sinal gerado. Uma vez configurados os geradores senoidais, é habilitada a função de sincronismo. Sendo esta responsável por gerar um atraso na atualização da frequência de saída sempre que os registradores internos são alterados.

b) Protocolo SPI

Por esta interface foi feita à configuração de dois potenciômetros digitais de mesmas especificações, estes conectados ao microcontrolador. O protocolo SPI compõe-se de sinais de dados, sincronismo e habilitação. Para este caso específico, devido a comunicação portar-se de modo unilateral, ou seja, em apenas um sentido, o sinal de recepção não foi utilizado. A frequência de *clock* escolhida foi de 8 MHz.

c) Interface RS-232

Por meio desta interface é possível ter acesso as funcionalidades implementadas no microcontrolador. São utilizados comandos de oito *bits* que devem ser enviados por esta conexão.

Em todos os casos de comando para seleção da tarefa a ser executada, devem ser enviadas sequências de *bytes* contendo alguns parâmetros específicos de cada funcionalidade. Para verificação de que as operações das funcionalidades do PIC se concretizaram, um *byte* fixo é enviado pelo computador. Desse modo, no caso do não recebimento deste *byte* fixo, ocorre uma falha de comunicação e a operação não acontece.

Foi utilizado o transceptor serial universal síncrono e assíncrono do PIC para realizar a comunicação do microcontrolador com o computador, sendo a configuração de operação no modo assíncrono. A taxa de operação foi de 9600 baud.

3.4.2 Diagrama de Estados

Na Figura 16 verifica-se o diagrama de estados que detalha resumidamente o funcionamento do *firmware* compilado, com suas funcionalidades.

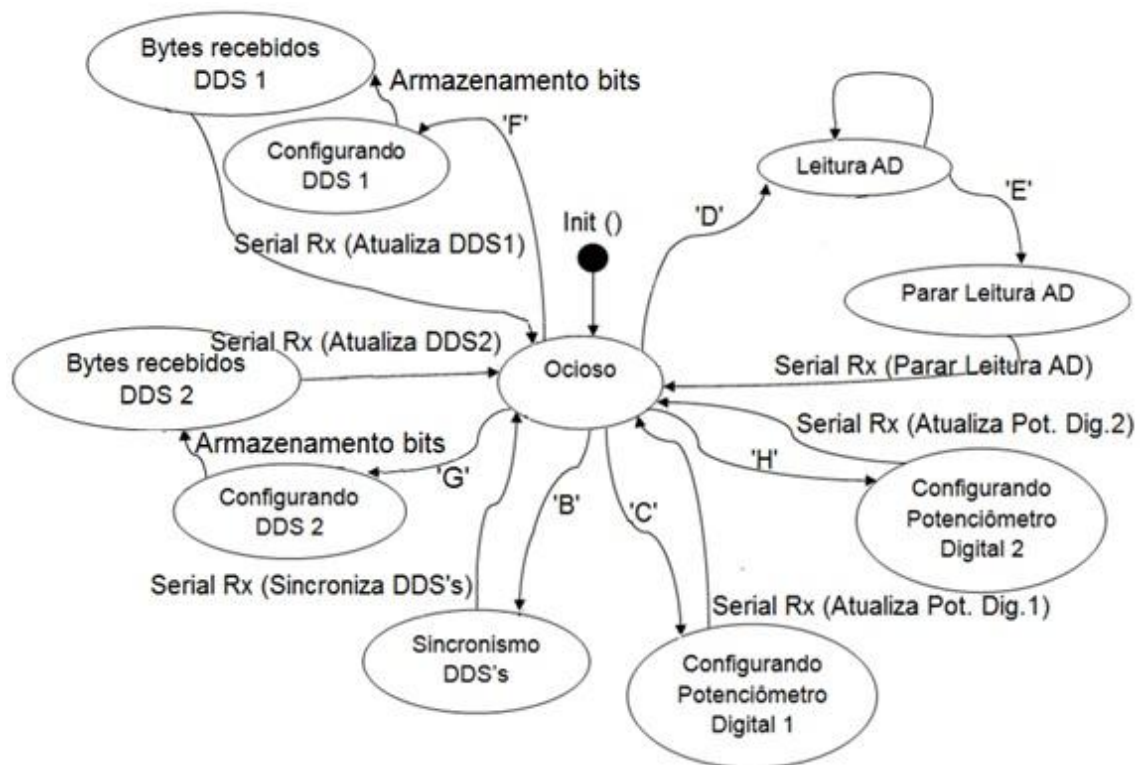


Figura 16 – Diagrama de estados do *firmware*
 Fonte: Autoria própria

Para obter acesso a cada funcionalidade do *firmware*, envia-se um *byte* específico de cada funcionalidade. Por exemplo, o envio pelo protocolo de comunicação RS-232 dos *bytes* 'F', 'G' e 'B', habilitam as funções de configuração e sincronismo dos geradores senoidais. Os *bytes* 'C' e 'H' habilitam a configuração dos respectivos potenciômetros digitais. Para leitura do conversor AD é necessário o recebimento via serial do *byte* 'D', sendo esta função finalizada com o envio do *byte* 'E'. O evento "Serial Rx" é ativado com o recebimento de um *byte* pela porta serial, ou seja, "Serial Rx" indica uma recepção normal sem erro.

3.5 SOFTWARE

O *Visual Studio*, da *Microsoft* é um pacote de programas para desenvolvimento de *software* especialmente dedicado ao *.NET Framework* e às linguagens Visual Basic (VB), C, C++, C# (C Sharp) e J# (J Sharp). Também é um grande produto de desenvolvimento na área web, usando a plataforma do ASP.NET. Uma das linguagens mais utilizadas é o C#, que foi a escolhida para o desenvolvimento do *software* do nosso trabalho, utilizando a versão 2010 do Visual Studio.

Para o código foi necessário o emprego de *threads* e *delegates*. As *threads* foram necessárias, pois são uma forma de um processo dividir a si mesmo em duas ou mais tarefas que podem ser executadas de forma paralela. Já os *delegates* são semelhantes aos ponteiros de função. Com eles o código torna-se mais flexível.

Basicamente, o *software* é a interface que o usuário tem com o sistema. Nele é possível, de forma simples, enviar comandos ao microcontrolador de acordo com um protocolo interno que foi criado. Nele foram definidas algumas letras ou códigos em hexadecimal para evitar problemas na comunicação. O programa executa tarefas apenas se for comandado pelo usuário, sendo assim orientado a evento.

O *software* possui diversas funcionalidades que podem ser observadas na Figura 17.

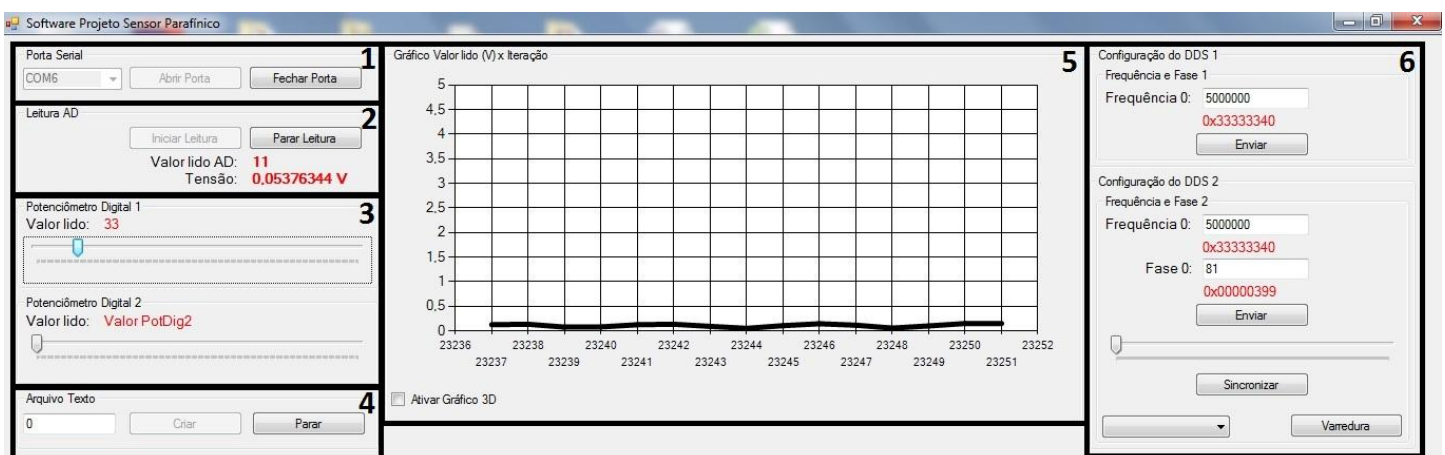


Figura 17 - Software operando
Fonte: Autoria própria

Nessa figura, o número 1 representa a parte de comunicação via RS-232, na qual o *software* estabelece a comunicação com o microcontrolador. O número 2 representa a leitura do AD, onde é possível ter uma visualização do valor que o programa está recebendo. O "Valor Lido AD" vai de 0 até 1023 bits, e a "Tensão" pode oscilar de 0 até 5 V. O número 3 envolve o controle dos dois potenciômetros digitais. O primeiro deles controla a amplitude de onda do DDS2, e o segundo é basicamente um amplificador com ganho controlável, para que seja possível modificar a tensão de saída do circuito. Como última funcionalidade do lado esquerdo da Figura 17, o número 4 ilustra a criação de arquivo texto. Por padrão tal arquivo é gerado em formato ".csv", para que possa ser aberto rapidamente em editores de planilhas eletrônicas. Porém, os dados nele salvo podem ser visualizados em qualquer editor de texto.

Na parte central do *software*, no número 5, observa-se o gráfico "Valor lido X Iteração". Nele o usuário tem uma visão dinâmica dos valores que estão sendo adquiridos pelo conversor AD.

Por fim, o número 6 ilustra a parte de programação e sincronismo dos DDS. Nela é possível enviar ao microcontrolador as informações de frequências e fase desejadas. Após o envio de tais dados, o usuário deve fazer o sincronismo das ondas, para que seja possível executar os ajustes necessários para que o sistema possa operar da forma esperada.

Uma visão mais detalhada sobre o funcionamento e operação do *software* está no Apêndice B.

4 TESTES E EXPERIMENTOS

Foram realizados experimentos no laboratório de ciências térmicas (LACIT), localizado na sede centro da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – *Campus* Curitiba.

4.1 EXPERIMENTOS PRELIMINARES PARA VALIDAÇÃO DO CIRCUITO AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDÂNCIA

Com o embasamento teórico apresentado na seção 2.4.3, verificaram-se experimentalmente os princípios de funcionamento de um circuito de medição de impedância elétrica ponte de auto-equilíbrio. Na Figura 18 está representado o circuito utilizado e seus respectivos parâmetros:

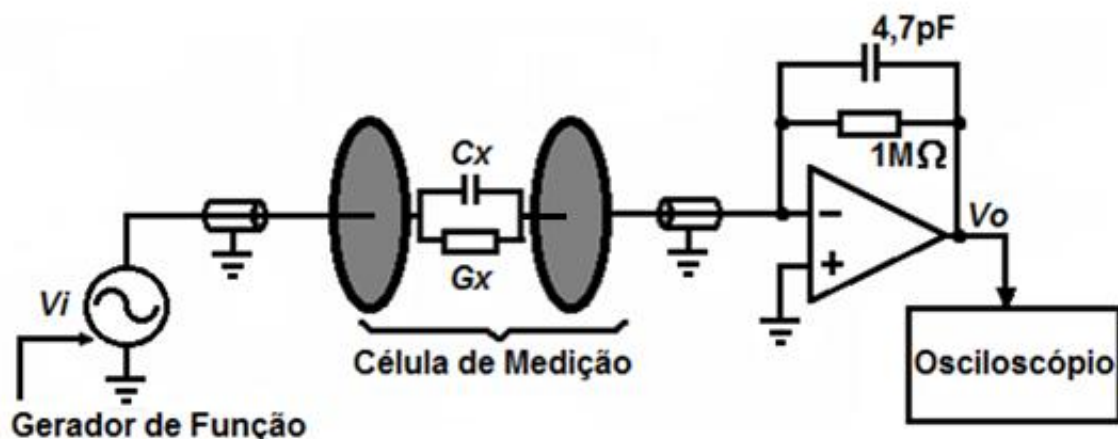


Figura 18 – Configuração básica para o circuito ponte de auto-equilíbrio
Fonte: Autoria própria

Para a excitação do circuito utilizou-se um gerador de função 33250A Agilent Technologies, configurado para varrer no espectro de frequência um sinal de tensão senoidal com amplitude constante de 10 Vpp, iniciando em uma frequência de 1 kHz e terminando em 80 MHz, num intervalo de tempo de 0,5 s. As conexões entre o gerador de função, a célula de medição e o amplificador de transimpedância foram todas realizadas com cabos coaxiais, com a finalidade de criar uma blindagem eletromagnética para o sinal que por nele flui, reduzindo assim os ruídos causados por interferência de ondas eletromagnéticas externas e indesejadas.

A célula de medição foi desenvolvida a partir de duas placas circunferenciais com duas faces de eletrodo, permitindo a conexão ao eletrodo interno dirigido à medição da impedância elétrica do fluido em análise e também uma blindagem eletromagnética direta para a célula a partir do eletrodo externo, reduzindo a incidência de sinais eletromagnéticos externos. A Figura 19 apresenta fotografias da célula de medição desenvolvida:

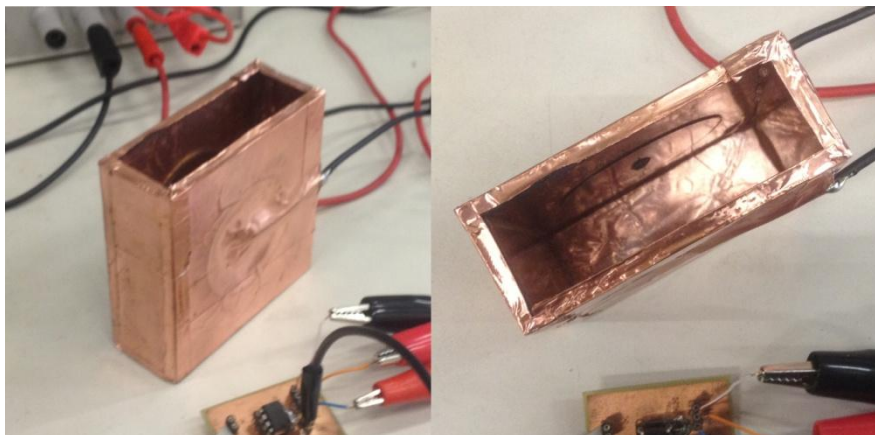


Figura 19 – Célula de medição desenvolvida
Fonte: Autoria própria

Dentro de célula de medição há um espaço dirigido para a inserção do fluido a ser analisada a impedância elétrica, representada na Figura pela condutância G_x e pela capacitância C_x .

Como amplificador operacional, optou-se por utilizar o componente OPA656, desenvolvido pela *Texas Instruments*, por ser adequado a medições de alta-impedância e alta-frequência, uma vez que possui uma entrada FET (entrada isolada através de um canal FET - *Field Effect Transistor*) e largura de banda de ganho de 230 MHz. Como parâmetros referenciais para a medição utilizou-se um resistor de 1 M Ω e um capacitor de 4,7 pF. Esses valores foram selecionados devido à faixa de resistência e de capacitância apresentada pela substância que se deseja analisar, apresentando a melhor resposta de caracterização.

A tensão de saída U_o do amplificador operacional foi monitorada através de um osciloscópio, configurado para registrar o sinal de tensão senoidal com detecção de pico e filtragem passa-baixa, fazendo com que tal onda tenha seus valores registrados com base somente na envoltória do sinal senoidal.

A Figura 20 apresenta a bancada de testes utilizada para a realização dos experimentos de medição de impedância elétrica de fluidos:

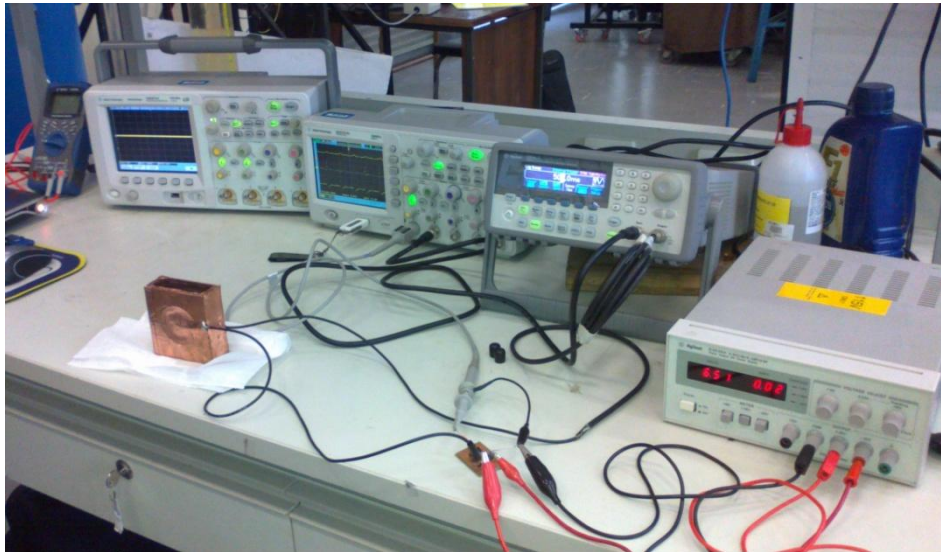


Figura 20 – Bancada utilizada para experimentos
Fonte: Autoria própria

Foram analisadas as respostas do sinal de tensão no espectro de frequência descrito anteriormente para quatro fluidos com diferentes propriedades condutivas e de permissividade estática, sendo tais fluidos o ar (célula de medição vazia), a água, o álcool isopropílico e o óleo de base sintética 15W40 F1 Master Plus. Os parâmetros de condutância e capacitância estão diretamente relacionados à condutividade elétrica e a permissividade do fluido em análise. Cada substância pode ser facilmente distinguida de outra, tanto através do platô verificado em baixas frequências, onde as características condutivas do fluido são predominantes, quanto do platô verificado em altas frequências, onde as características capacitivas são predominantes. Os resultados de ganho mensurados para cada fluido nas condições de análise apresentadas estão representados na Figura 21.

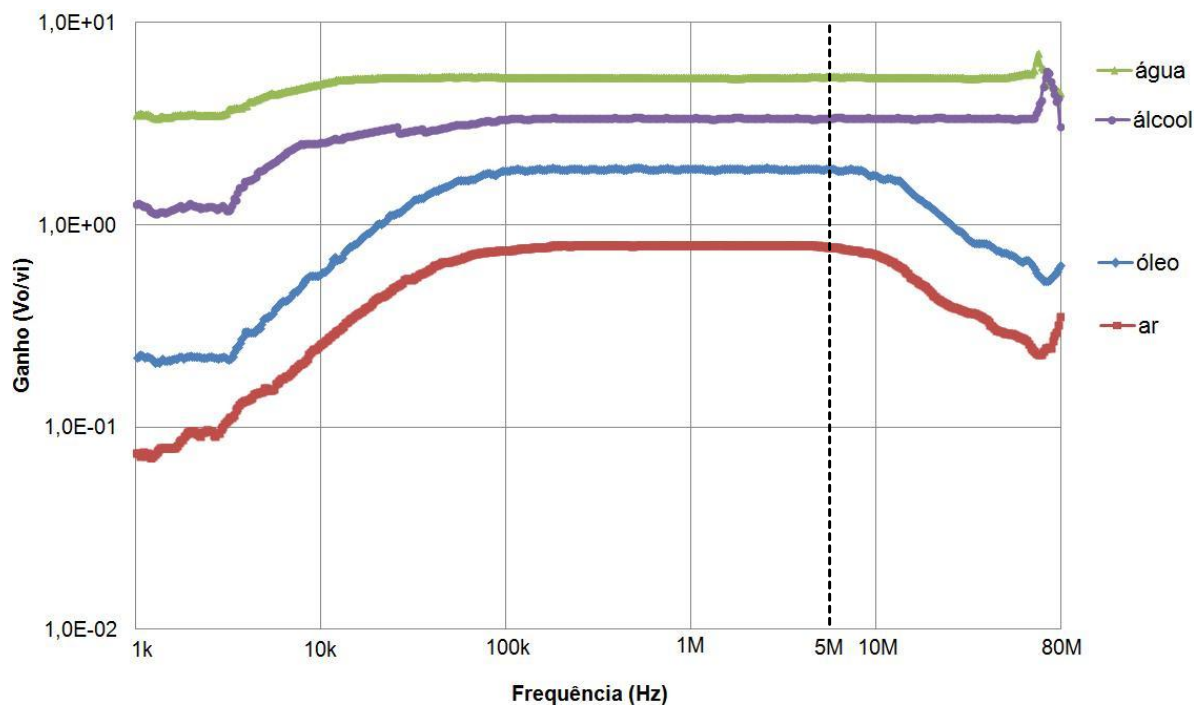


Figura 161 – Ganhos obtidos nas medições das substâncias
Fonte: Autorial Própria

Os ganhos apresentados para frequências inferiores a 100 kHz evidenciam a resposta às características de resistividade das substâncias em análise. Considerando que tais substâncias são testadas em um sensor de natureza predominantemente capacitiva, tem-se então uma resposta com ganho reduzido para baixas frequências.

Os ganhos apresentados para frequências superiores a 10 MHz obtidos nas medições das diferentes substâncias evidenciam as características de funcionamento do amplificador de transimpedância utilizado. Tal componente tem sua operação em nível funcional ótimo somente em uma faixa de frequência específica, limitada a valores inferiores a 10 MHz, conforme *datasheet* fornecido pelo próprio fabricante do OPA656, a *Texas Instruments*.

Observa-se através da análise dos ganhos obtidos uma estabilidade dos valores na faixa de frequências entre 100 kHz e aproximadamente 10 MHz. Considerando isto e o fato de que para frequências mais altas predomina a componente capacitiva da substância em análise, definiu-se então 5 MHz como sendo frequência ideal para análises em sensores capacitivos. Na Figura 21 tem-se em evidência a estabilidade de ganho em 5 MHz para os testes com as substâncias analisadas.

4.2 TESTES DE DESEMPENHO DO SISTEMA

4.2.1 Balanceamento do Sistema

A calibração do sistema desenvolvido é essencial para se obter resultados satisfatórios, pois a variação de capacitância sempre precisa de um valor de referência. Dessa maneira, deve-se executar os passos na ordem em que serão descritos a seguir. Inicialmente coloca-se 100 mL da substância desejada para zero dentro da cuba do sensor capacitivo. Com os cabos coaxiais devidamente conectados no *hardware* e no sensor capacitivo, pode-se iniciar os ajustes pelo *software*.

Os ajustes de calibração no *software* envolvem zerar a saída do circuito de medição, ou seja, definir que para tal substância presente no sensor a resposta do circuito será igual a zero. Para facilitar a aquisição dos sinais necessários à calibração, serão indicados os respectivos pinos dos componentes relevantes a este processo, conforme Apêndice A. Com o auxílio de um osciloscópio, adquire-se o sinal de saída do amplificador de transimpedância (pino 6 – U3 – OPA656), o sinal de saída do amplificador inserido no circuito de DDS2 (pino 1 – U7 0 OPA830) e o sinal de saída do amplificador subtrator (pino 1 – U4 – OPA830). No *software* altera-se a amplitude do sinal proveniente do DDS2 (através do potenciômetro digital 1) até se igualar à amplitude do sinal de resposta do amplificador de transimpedância. Altera-se então a fase do mesmo sinal de modo a se obter a menor tensão possível na saída do subtrator. Depois disso, regula-se o *offset* do sinal reposta do circuito demodulador através do *trimpot* R25, de modo a se obter uma tensão positiva mais próxima de zero na saída do amplificador presente no circuito de *offset* (pino 6 – U13 – TL071CD). Por fim, verifica-se a tensão resposta do circuito de medição (pino 6 – U14 – TL071CD). Essa tensão é então a resposta do sistema para a substância zero definida, concluindo a calibração.

4.2.2 Tempo de Resposta ao Degrau

O tempo de resposta ao degrau é determinado pelo circuito de medição, descrito anteriormente na seção 3.3.2. Para avaliar este tempo foi aplicada no sensor capacitivo uma onda senoidal, com frequência de 5 MHz modulada por uma onda quadrada com frequência de 500 Hz, e feita a medição na saída do circuito demodulador (descrito na seção 3.3.2 b). As formas de ondas podem ser vistas na Figura 22. Em resposta a essa excitação, obteve-se o tempo de resposta de 570 μ s.

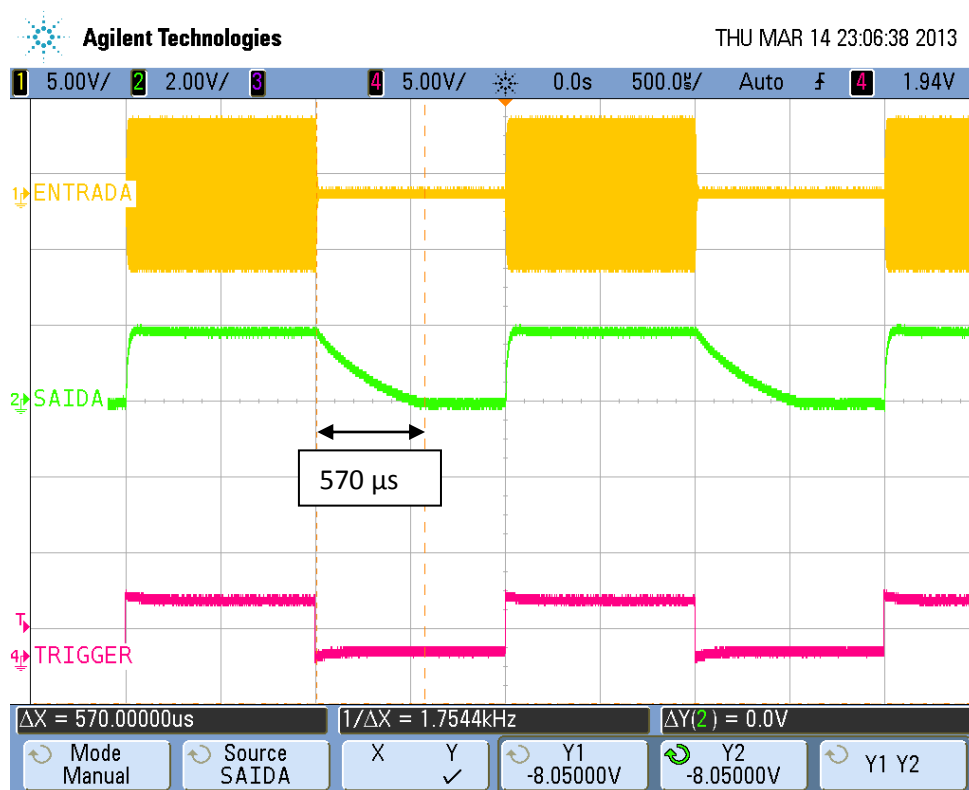


Figura 22 – Tempo de resposta modulada por 500 Hz
Fonte: Autoria Própria

4.2.3 Linearidade

O conceito de linearidade está ligado à constância na proporcionalidade entre o valor de entrada e o valor de saída de um sistema. Para verificar a linearidade do sistema desenvolvido, selecionaram-se dez capacitores comerciais com valores definidos para simular o sensor capacitivo. Pelo fato de os capacitores comerciais apresentarem tolerâncias em relação aos seus

valores, cada capacitor teve seu valor conferido através de uma ponte RLC Agilent E4980A, com a intenção de tornar o teste de linearidade muito mais analítico.

Para o teste de linearidade foi realizada uma bateria de 10 experimentos iguais, com o intuito de tirar uma média dos valores e minimizar o erro do teste.

Adquiriu-se os valores de capacitância medida, como também os valores de tensão de saída do sistema, e a média dos dados foi alocada nos quadros que seguem. O Quadro 4 apresenta os capacitores selecionados e seus respectivos valores medidos:

Valor Comercial (pF)	Valor Medido (pF)
1	1,30
4,7	4,67
6,8	6,76
10	9,71
15	14,28
18	16,90
27	26,59
33	31,23
39	37,75
47	44,90

Quadro 4 – Capacitores selecionados e respectivos valores reais
Fonte: Autoria própria

Esta faixa de valores selecionados deve-se à intenção de simular possíveis valores de capacitância gerados pelo sensor capacitivo. Os capacitores selecionados possuem um material dielétrico constituído de cerâmica, sendo comumente conhecidos como capacitores de disco cerâmico.

Devido ao fato de a resposta dos circuitos amplificadores ser limitada a uma tensão de 10 Vpp, uma vez que a alimentação destes amplificadores é de 5 V simétrica, tem-se a necessidade de calibração do circuito de *hardware* direcionada para cada teste. Ou seja, considerando que para cada valor de capacitância do elemento em análise pelo sistema, tem-se uma resposta. Se o valor de capacitância for elevado, então a resposta dos circuitos amplificadores presentes no *hardware* é elevada proporcionalmente. Se a resposta for elevada de tal maneira que ultrapasse os 10 Vpp, tem-se então uma saturação de sinal, caracterizando uma aquisição indevida do sistema.

A saturação de resposta do circuito levou à divisão dos testes de linearidade em duas faixas de capacitância, sendo a primeira composta pelos capacitores com valores entre 1 pF e 10 pF, e a segunda com valores entre 15 pF e 47 pF.

a) Linearidade com faixa entre 1 pF e 10 pF

Excitou-se o sensor capacitivo com uma tensão senoidal de 3 Vpp e frequência de 5 MHz. Definiu-se como zero do sistema o teste com o capacitor de 1 pF (1,3 pF medido). Para isso, com este capacitor simulando o sensor, ajustou-se a amplitude e fase do sinal de tensão de saída do DDS2 até se obter um valor de tensão igual ao valor de tensão do sinal resposta do sensor capacitivo. Como resposta final obteve-se uma tensão de 90 mV, caracterizada como a resposta referência do sistema para os testes de linearidade com os capacitores de valores entre 1 pF e 10 pF. No Quadro 5 são apresentados os valores de tensão resposta para os outros capacitores testados:

Valor Comercial (pF)	Valor Medido (pF)	Tensão resposta (V)	Desvio Padrão
1	1,30	0,09	0,00
4,7	4,67	1,10	0,14
6,8	6,76	1,75	0,07
10	9,71	2,45	0,10

Quadro 5 – Resposta para capacitores entre 1 pF e 10 pF
Fonte: Autoria própria

b) Linearidade com faixa entre 15 pF e 47 pF

Utilizando os mesmos métodos de calibração em relação aos testes de linearidade para a faixa mais baixa, excitou-se o sensor capacitivo com uma tensão senoidal de 1,5 Vpp e frequência de 5 MHz. Definiu-se como referência do sistema o teste com o capacitor de 15 pF (14,28 pF real). Para isso, com este capacitor simulando o sensor, ajustou-se a amplitude e fase do sinal de tensão de saída do DDS2 até se obter um valor de tensão igual ao valor de tensão do sinal resposta do sensor capacitivo. Como resposta final obteve-se uma tensão de 250 mV, caracterizada como a resposta referência do sistema para os testes de linearidade com os capacitores de valores entre 15 pF e 47

pF. No Quadro 6 são apresentados os valores de tensão resposta para os outros capacitores testados:

Valor Comercial (pF)	Valor Medido (pF)	Tensão resposta (V)	Desvio Padrão
15	14,28	0,25	0,07
18	16,90	0,62	0,08
27	26,59	1,15	0,07
33	31,23	1,68	0,08
39	37,75	2,20	0,10
47	44,90	2,58	0,08

Quadro 6 – Resposta para capacitores entre 15 pF e 47 pF
Fonte: Autoria própria

c) Resultados de Linearidade

As relações entre o valor de capacitância e o valor de tensão de resposta do circuito para os testes de linearidade desenvolvidos são apresentadas na Figura 23. A resposta do sistema apresentou-se linear, tanto para os testes com a faixa de valores entre 1 pF e 10 pF (tendência de linearidade com coeficiente igual a 0,9893) quanto para a faixa de valores entre 15 pF e 47 pF (tendência de linearidade com coeficiente igual a 0,991):

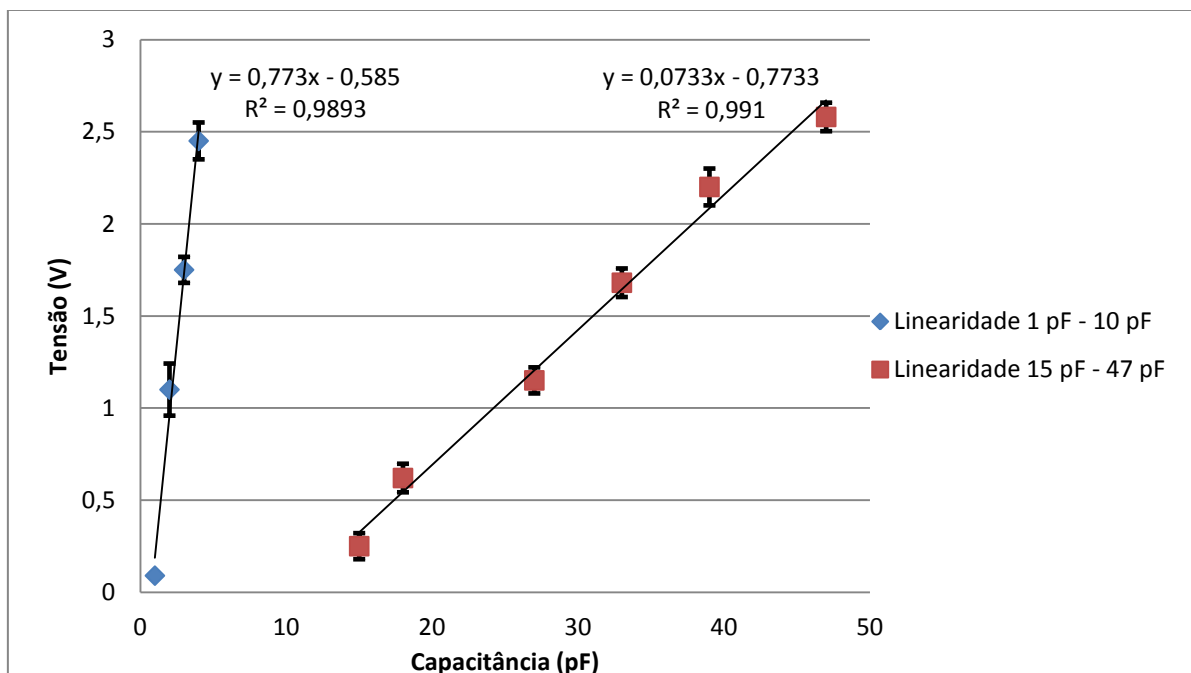


Figura 23 – Resposta de linearidade para capacitores definidos
Fonte: Autoria própria

4.2.4 Teste com Diferentes Substâncias

Para a realização de tal experimento, foi realizada uma nova calibração na qual a referência foi definida com o sensor a vazio, ou seja, com ar. Foram escolhidas substâncias com dielétricos diferentes, estas colocadas em contato com o sensor, e realizados os monitoramentos. Ilustra-se na Figura 24 o sensor com gasolina, cuja permissividade relativa é próxima de 2,20.



Figura 24 – Medição com gasolina
Fonte: Autoria Própria

Deste modo foram realizados testes repetitivos com as substâncias para diminuir incertezas de medição. Ao analisar os resultados, observa-se que o ar é a substância que possui a menor permissividade relativa e, portanto, teve a menor tensão de saída como resposta do sistema. Dessa maneira, os valores de tensão vão aumentando conforme troca-se a substância em análise. Com permissividades maiores, como a do éter e do isopropanol, fica mais evidente a variação de tensão com a qual o sistema responde às diferentes substâncias. O Quadro 7 contém os valores de tensão obtidos no experimento e também os valores das permissividades relativas das substâncias.

Substância	Tensão (V)	Permissividade Relativa (ϵ_r)
Ar	0,36	1,00
Óleo	0,37	2,19
Vaselina	0,41	2,20
Gasolina	0,42	2,20
Éter	0,68	4,24
Isopropanol	1,90	20,20

Quadro 7 – Diferentes substâncias

Fonte: Adaptado de DA SILVA (2008, p. 41) e de Csikós *et al.* (1982, p. 139)

Na Figura 25 é possível observar de forma mais clara os resultados obtidos. São apresentados os resultados da média de valores aquisitados em três repetições para este teste. As medidas possuem uma tendência linear, assegurando assim a acurácia do sistema.

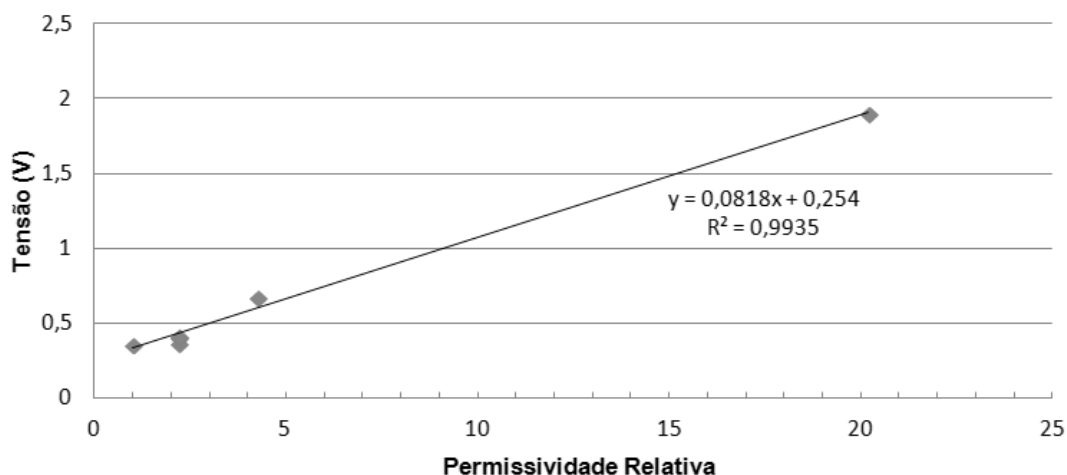


Figura 25 - Diferentes substâncias

Fonte: Autoria Própria

4.3 MISTURA ÁGUA-ISOPROPANOL

Após a calibração do sistema tendo o isopropanol como zero, foram feitas as análises da mistura de isopropanol e água.

As medições foram feitas mudando a mistura de fluidos dentro da cuba acrílica, aumentando de 0 até 100% a concentração de água, com relação ao isopropanol. Dessa maneira foi realizada uma bateria de 10 testes, registrando-se os valores de tensão de resposta do circuito de medição. A partir destes valores, calculou-se a média para as diferentes concentrações, conforme o Quadro 8. A partir destas médias foi possível gerar a Figura 26.

MISTURA ISOPROPANOL E ÁGUA EXPERIMENTO			
Isopropanol (%)	Água (%)	Tensão de saída (V)	Desvio padrão
100	0	0,38	0,13
90	10	0,64	0,00
80	20	0,86	0,10
70	30	1,12	0,00
60	40	1,36	0,00
50	50	1,66	0,10
40	60	1,88	0,13
30	70	2,14	0,10
20	80	2,24	0,00
10	90	2,56	0,00
0	100	2,88	0,00

Quadro 8 – Valores da mistura de isopropanol e água
Fonte: Autoria Própria

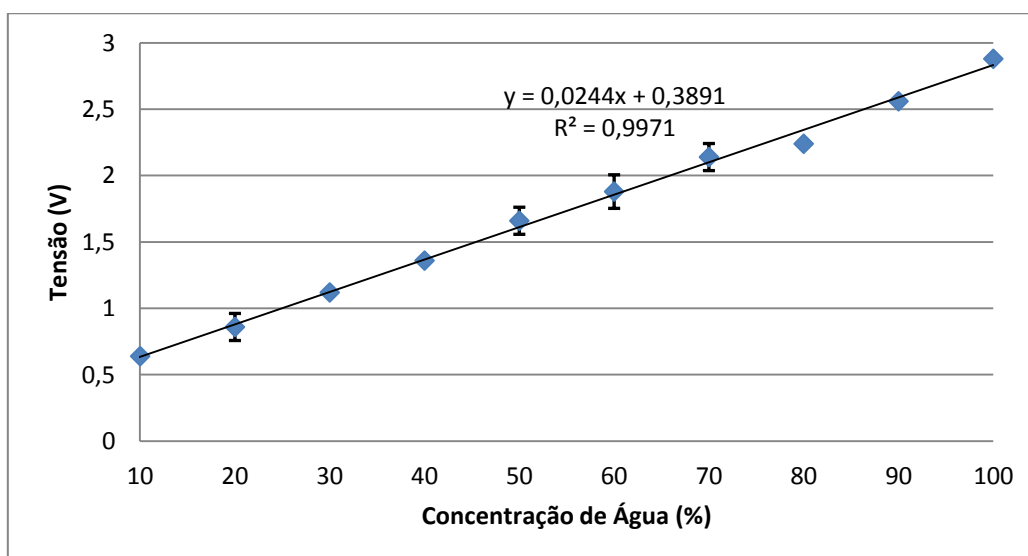


Figura 26 – Mistura de isopropanol e água
Fonte: Autoria Própria

Na Figura 26 vê-se que a permissividade relativa da mistura se comportou linearmente em relação à concentração de isopropanol (tendência de linearidade com coeficiente igual a 0,9971).

4.4 SOLIDIFICAÇÃO DA PARAFINA

Para o teste prático com a parafina utilizou-se uma vela comercial. Esta foi aquecida conforme pode ser verificado na Figura 27.



Figura 27 – Fusão da parafina
Fonte: Autoria Própria

Após sua fusão completa, com temperatura próxima de 62 °C (VAZ, 2003), inseriu-se a parafina no interior do sensor capacitivo, conforme a Figura 28. Após ter sido feita a calibração do *hardware* neste estado, analisou-se, portanto, a variação que ocorre durante o processo de solidificação da parafina. Com o auxílio de um termômetro registrou-se no início do experimento uma temperatura de 70 °C e no final de toda a transição de estado físico notou-se uma temperatura próxima de 20 °C. Não foi possível medir a temperatura durante todo o processo de solidificação, pois os termômetros disponíveis eram ou de natureza intrusiva ou somente permitiam a medição da temperatura superficial da substância. O processo de solidificação pode ser visualizado na sequência de imagens da Figura 29.

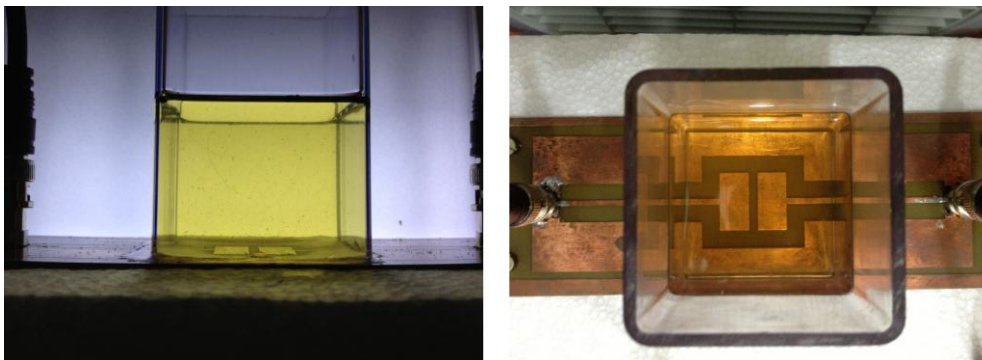


Figura 28 - Parafina líquida recém despejada no sensor
Fonte: Autoria Própria

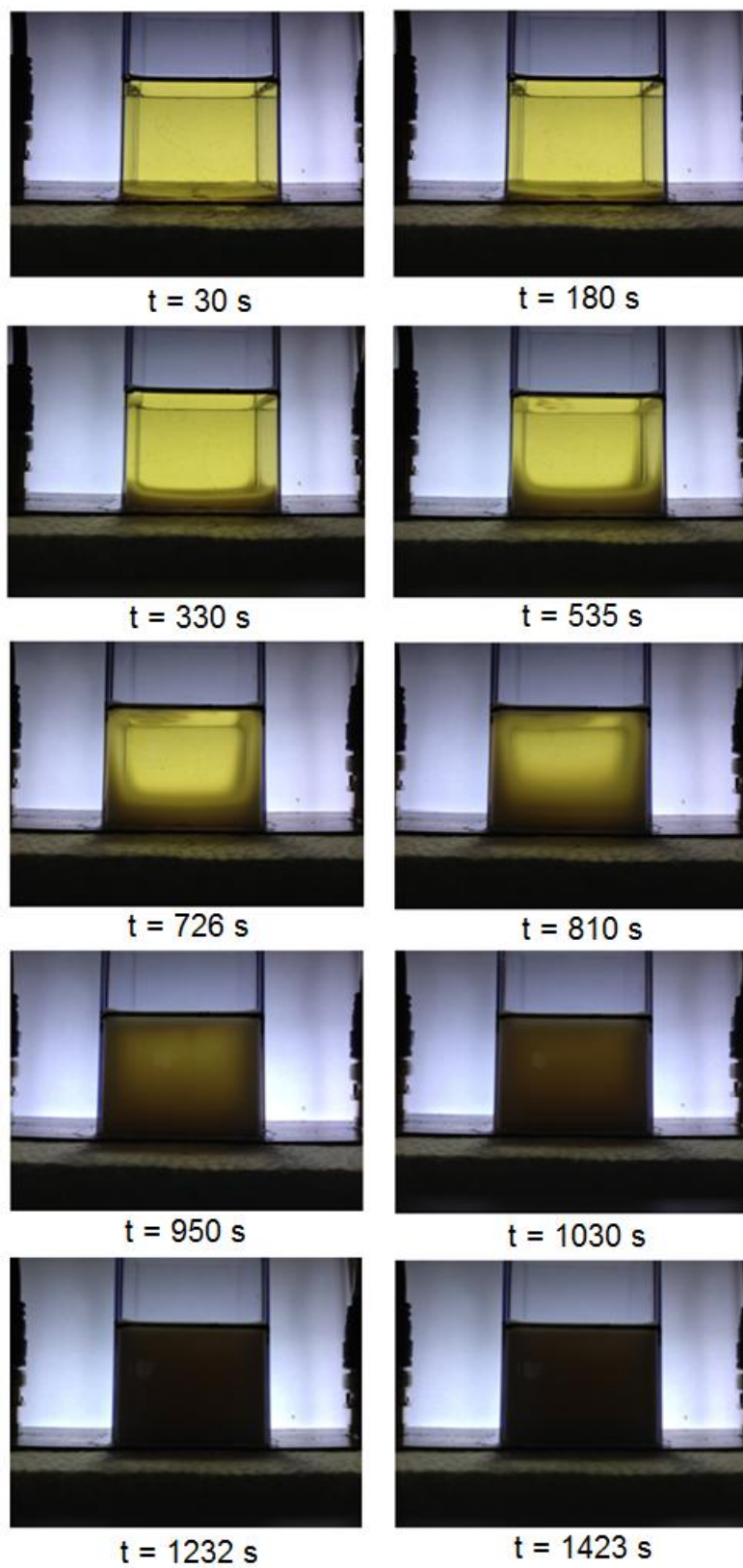


Figura 29 – Solidificação da parafina
Fonte: Autoria Própria

A validação das medições possui um tempo maior em relação aos experimentos anteriores, uma vez que se demora cerca de 2 a 3 horas para completar o procedimento de solidificação da parafina. Uma das funcionalidades do *software*, descrito no apêndice B f), possibilita a geração de um arquivo texto. Os valores de aquisição do sinal de resposta pelo conversor analógico digital (AD) do microcontrolador foram registrados neste arquivo, possibilitando assim, analisar a variação ocorrida na transição de estados físicos da parafina. Verifica-se na Figura 30 a curva resultante dos valores gravados no arquivo.

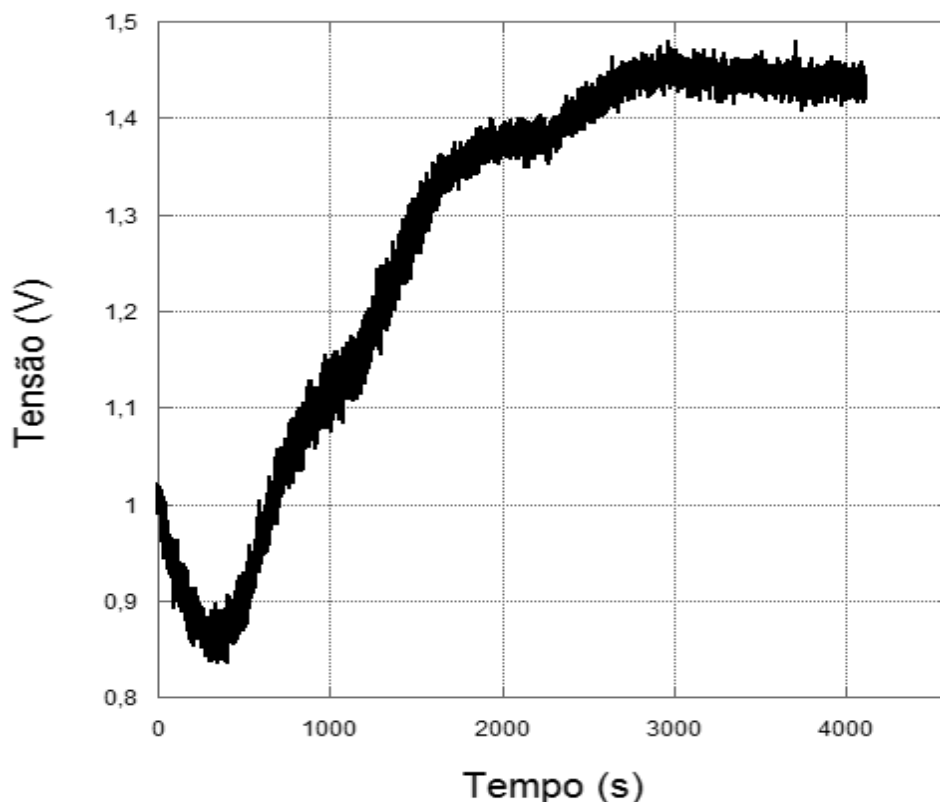


Figura 30 – Aquisição da medição da parafina: Tensão de saída (V) X Tempo (s)
Fonte: Aatoria Própria

A fim de investigar o decaimento inicial apresentado na Figura 30 realizou-se um experimento, no qual se inseriu no sensor capacitivo um volume de 100 mL de água numa temperatura de 80 °C e os dados foram monitorados até chegar à temperatura ambiente. Analisando a resposta (Figura 31) observa-se um comportamento parecido com o ocorrido na leitura com a parafina.

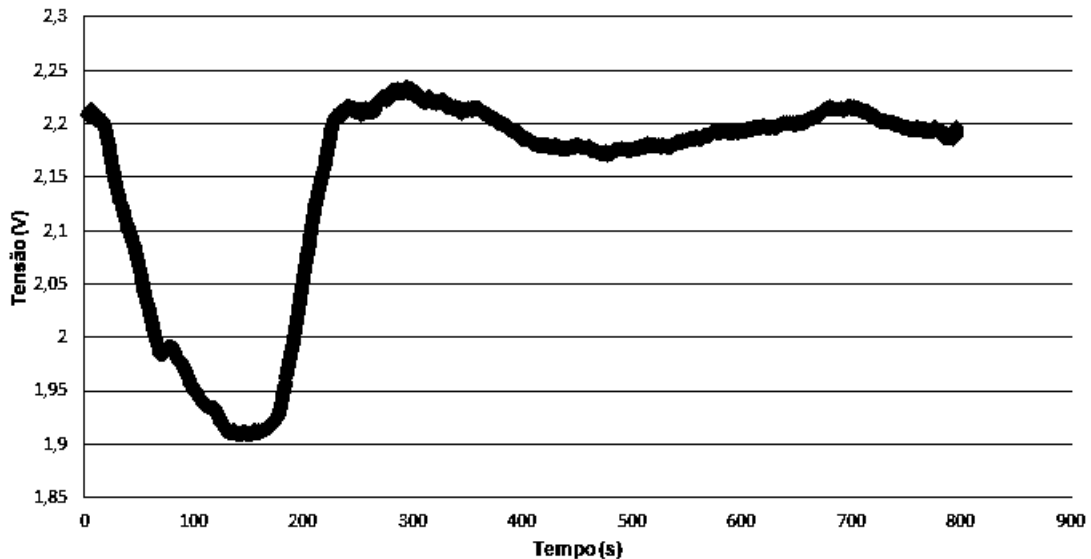


Figura 31 – Resultados de teste de dilatação térmica do sensor
 Fonte: Autoria própria

Esse resultado pode estar relacionado à variação da permissividade do meio em função da temperatura (Figura 32), conforme descrito por Catenacio (2002) especificamente para a água como material dielétrico.

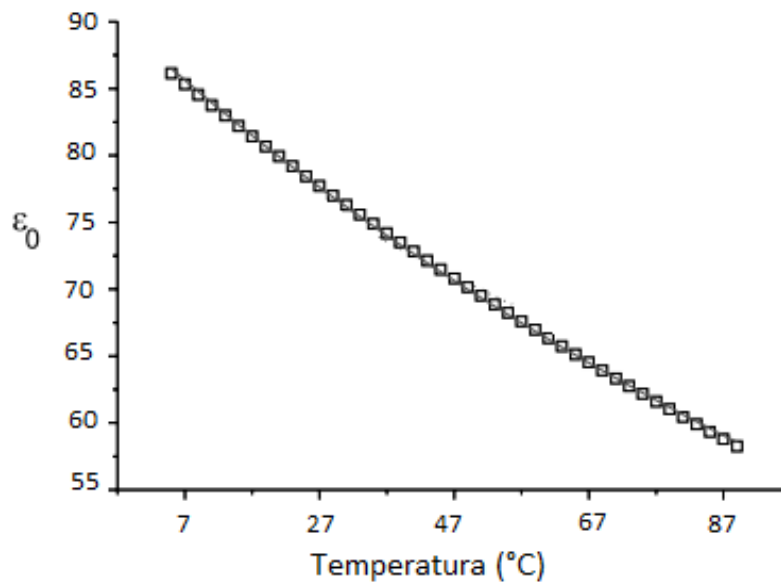


Figura 32 – Variação da permissividade relativa em função da temperatura
 Fonte: Adaptado de CATENACIO (2002)

Outra hipótese é devido à dilatação dos eletrodos do sensor capacitivo devido à variação da temperatura, o que influencia diretamente na medição, sendo necessárias maiores investigações.

5 CONCLUSÃO

No cenário da indústria petrolífera, um grande problema enfrentado é a deposição de parafinas no interior de equipamentos e tubulações. Neste contexto o transporte do óleo bruto pode ser prejudicado, pois o diâmetro útil das tubulações é reduzido devido ao acúmulo das parafinas nas paredes internas do duto, fazendo com que, por exemplo, sistemas de bombeamento possam operar em condições de sobrecarga.

Dessa forma, neste trabalho foi desenvolvido um sistema para monitoramento da deposição de parafina nas tubulações através de sensores capacitivos. Esta técnica foi escolhida por caracterizar-se como uma técnica de baixo custo e de natureza não intrusiva. Desta forma, pode-se monitorar o acúmulo de parafinas depositadas nos tubos e também aplicar o sistema em estudos de possíveis soluções, prevenções e técnicas corretivas em ambiente controlado.

A técnica de medição escolhida para a monitoramento da impedância de fluidos foi o circuito amplificador de transimpedância, no qual a amplitude do sinal de saída é proporcional a impedância do fluido em investigação. O circuito desenvolvido é capaz de medir com precisão as variações da capacitância na faixa de Picofarads. Assim, este circuito é capaz de monitorar a variação da capacitância entre uma substância referência e outra que se deseja comparar.

Com todo o embasamento teórico e a verificação experimental dos princípios de medição de capacitância, foram desenvolvidos *hardware*, *firmware* e *software* dedicado, bem como um sensor capacitivo coplanar para a operação completa do sistema de medição de deposição de parafinas em oleodutos. Foram realizados testes de caracterização metrológica do sistema para a validação das funcionalidades propostas no projeto. Para se verificar o desempenho foram realizados testes de tempo de resposta do sistema, linearidade e medição com diferentes substâncias. Os resultados evidenciam uma boa linearidade entre permissividade relativa da substância e tensão de saída e um tempo de resposta relativamente baixo em relação às premissas da saturação da solução, uma vez que o tempo de solidificação da parafina é relativamente alto. Para testes práticos, testou-se inicialmente uma mistura de água e isopropanol em diversas concentrações como substância para análise

no sensor capacitivo. Por fim, testou-se a parafina como substância em análise, tendo como início dos testes a parafina aquecida em estado líquido até a completa solidificação da substância, simulando a deposição da parafina em oleodutos. Através dos resultados obtidos observou-se uma elevação da tensão de resposta do circuito proporcional ao processo de solidificação da parafina. Portanto, confirma-se a sensibilidade de resposta do sistema desenvolvido à solidificação da parafina, porém exigindo maiores investigações para completo entendimento de todas as variáveis envolvidas no processo.

Com base nas medições realizadas, verifica-se o correto funcionamento do sistema, o qual pode ser empregado para testes diversos com o intuito de investigação do fenômeno, buscando-se o fornecimento de uma base de dados experimentais que pode auxiliar na compreensão dos processos envolvidos no depósito da parafina. Estes dados, por sua vez, que seriam importantes para orientar programas de manutenção e o projeto de novas linhas, além de possibilitar o desenvolvimento de modelos para uma predição mais precisa da deposição de parafinas, o que é crucial para o projeto eficiente de linhas submarinas.

Para futuros trabalhos de pesquisa e desenvolvimento com este sistema, propõe-se o desenvolvimento de um sensor com uma configuração apropriada para uso em atividades de campo na indústria petrolífera, estudos mais aprofundados para a explicação do fenômeno observado durante o início do processo de solidificação da parafina, bem como novas investigações e simulações com o sistema desenvolvido.

REFERÊNCIAS

ALBOUDWARE, H.; SVRCEK, W. Y.; KANTZAS, A.; YARRANTON, H. W. **A pipe-loop apparatus to investigate asphaltene deposition** *Petrol. Sci. Technol.*, 2004.

ALEXANDER, Charles K; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. Trad: Gustavo Guimarães Parma. – Porto Alegre: Bookman, 2003.

BALDOTTO, Hudsonil Altoé. **Avaliação da temperatura de início de aparecimento dos cristais (TIAC) e composição do primeiro cristal no fenômeno de precipitação parafínica em petróleos – Método simplificado**. Dissertação de MSc., Centro de Ciência e Tecnologia, UENF, 2004.

BOMBA, J. G. **Offshore Pipeline Transport of Waxy Crude Oils**, *Paper SPE14622*, 1986.

BROWN, T. S.; NIESEN, V. G.; ERICKSON, D. D. **Measurement and Prediction of the Kinetics of Paraffin Deposition**, 68th Annual Tech Conf & Exhib of the SPE, Houston, Oct, 1993.

BURGER, E. D.; PERKINS, T. K.; STRIEGLER, J. H. **Studies of wax deposition in the Trans Alaska pipeline**, *Journal of Petroleum Technology*, v. 33, n. 6, pp. 1075 - 1086, 1981.

CATENACCIO, A.; DARUICH, Y.; MAGALLANES, C.; **Temperature dependence of the permittivity of water**, *Chemical Physics Letters*, Volume 367, Issues 5–6, 10 January 2003, Pages 669-671.

CHEN, Jian Z.; DARHUBER, Anton A.; TROIAN, Sandra M.; WAGNER, Sigurd. **Capacitive sensing of droplets for microfluidic devices based on thermocapillary actuation**. Princeton: Princeton University, 2004. 8p. Paper.

CREEK, J. L., et al, **Wax Deposition in Single Phase Flow**, *Fluid Phase Equilibria* v.158 – 160, pp. 801 – 811, 1999.

CROWE, C. T. **Multiphase Flow Handbook**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.

CSIKÓS, R.; FREUND, M.; KESZTHELYI, S.; MÓZES, G. Y. **Paraffin products, properties, technologies and applications**. Budapest, Hungria: Elsevier, 1982.

DA SILVA, M. J. **Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging**. 2008. 170p. Tese (Doutorado) - Dresden: Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität Dresden, 2008.

DOS SANTOS, J. DA S. T.; FERNANDES, A. C.; GIULIETTI, M. **Study of paraffin deposit formation using the cold finger methodology for Brazilian crude oils** *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2004.

DOTTO, Marta Elisa Rosso. **Estudo dos estágios iniciais de formação de depósitos de parafinas em oleodutos**, Relatório de Pós Doutorado, PEMM/COPPE/UFRJ, 2003.

EDALATI, K.; RASTKHAH, N.; KARMANI, A.; SEIEDI, M.; MOVAFEGHI, A. **The use of radiography for thickness measurement and corrosion monitoring in pipes** *Int. J. Press. Vessels Pip.*, 2006.

GUDMUNDSSON, J. S.; DURGUT, I.; CELIUS, H. K.; KORSAN, K. **Detection and monitoring of deposits in multiphase flow pipelines using pressure pulse technology** *12th Int. Oil Field Chemistry Symp.* (Geilo, Norway), 2001.

KAMINSKI, R. D. **Several Short Excursions into Wax Deposition Modeling** *Proceedings AIChE Annual Meeting*, Houston, USA, 1999.

MENDES, P. R. S.; BRAGA, S. L.; RIBEIRO, F. S. **Obstruction of pipelines due to paraffin deposition during the flow of crude oils**, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.40, n 18, p. 4319-4328, 1997.

MISRA, S.; et al. **Paraffin Problems in Crude Oil Production and Transportation: a Review**, *SPE Production & Facilities*, v.10, n.1, pp. 50-54, 1995.

SADEGHAZAD, A.; et al. **The Prediction of Cloud Point Temperature: In Wax Deposition**, *Paper SPE 64519*, 2000.

SARACENO. **Estudo do fenômeno de parafinação a partir de um óleo cru** [Rio de Janeiro] 2007, XIV, 79 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc Engenharia Metalurgia e de Materiais, 2007). Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

STATOIL – **WaxControl**. Disponível em:

<http://www.ipt.ntnu.no/~jsg/undervisning/prosessering/gjester/LysarkAske2011.pdf>

Acesso em: Março/2013.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

VAZ, J. C. B. **Cristalização de Parafinas, Formação de Organogéis e Escoamento em Oleodutos**, 2003.

VELASQUEZ, M. I. R., **Avaliação do Mecanismo de Difusão Molecular para a Modelagem da Deposição de Parafina em Dutos de Petróleo**, Diss. de Mestrado, Engenharia Mecânica, or. Nieckele, A.O., co-or. Azevedo, L.F.A., DEM, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.

ZAMAN, M.; BJORNDALLEN, N.; ISLAM, M. R. **Detection of precipitation in pipelines Petrol**. Sci. Technol., 2004.

APÊNDICE A – CIRCUITO ESQUEMÁTICO DO *HARDWARE*

Sensor Parafínico - 1
Trabalho de Conclusão de Curso 2 -

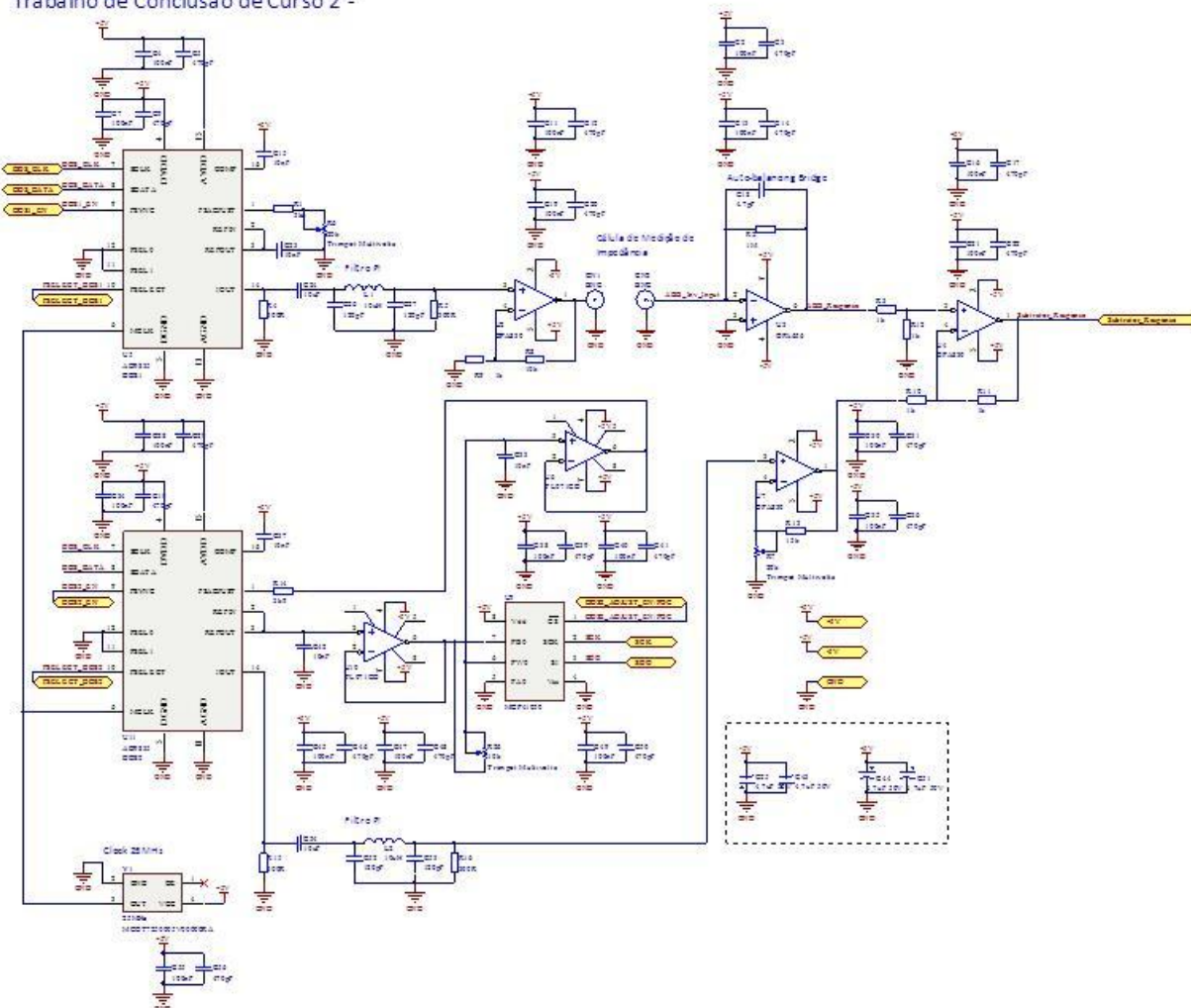


Figura A 1 - Circuito esquemático do *hardware* parte 1
Fonte: Autoria Própria

Sensor Parafínico - 2

Trabalho de Conclusão de Curso 2 - UTFPR

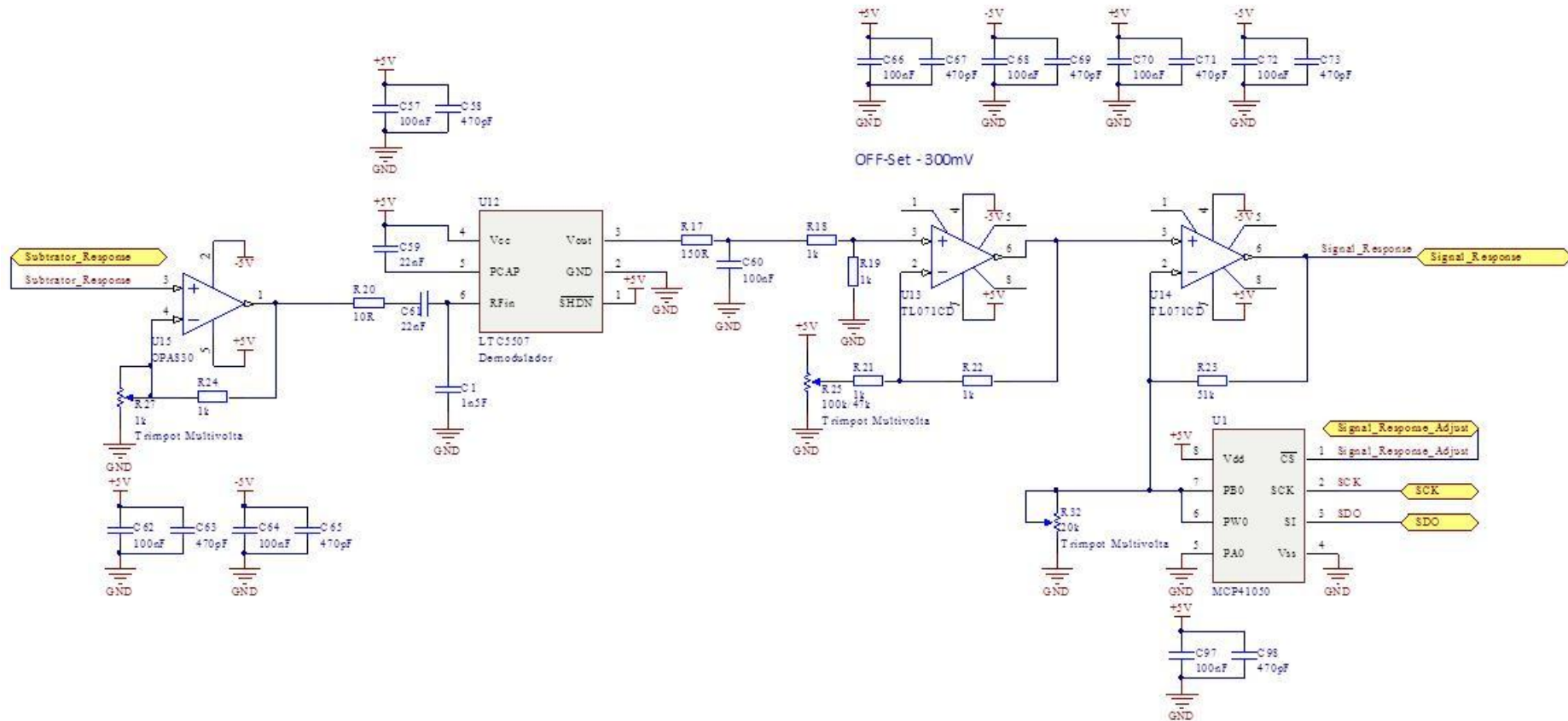


Figura A 2 - Circuito esquemático do *hardware* parte 2
Fonte: Autoria Própria

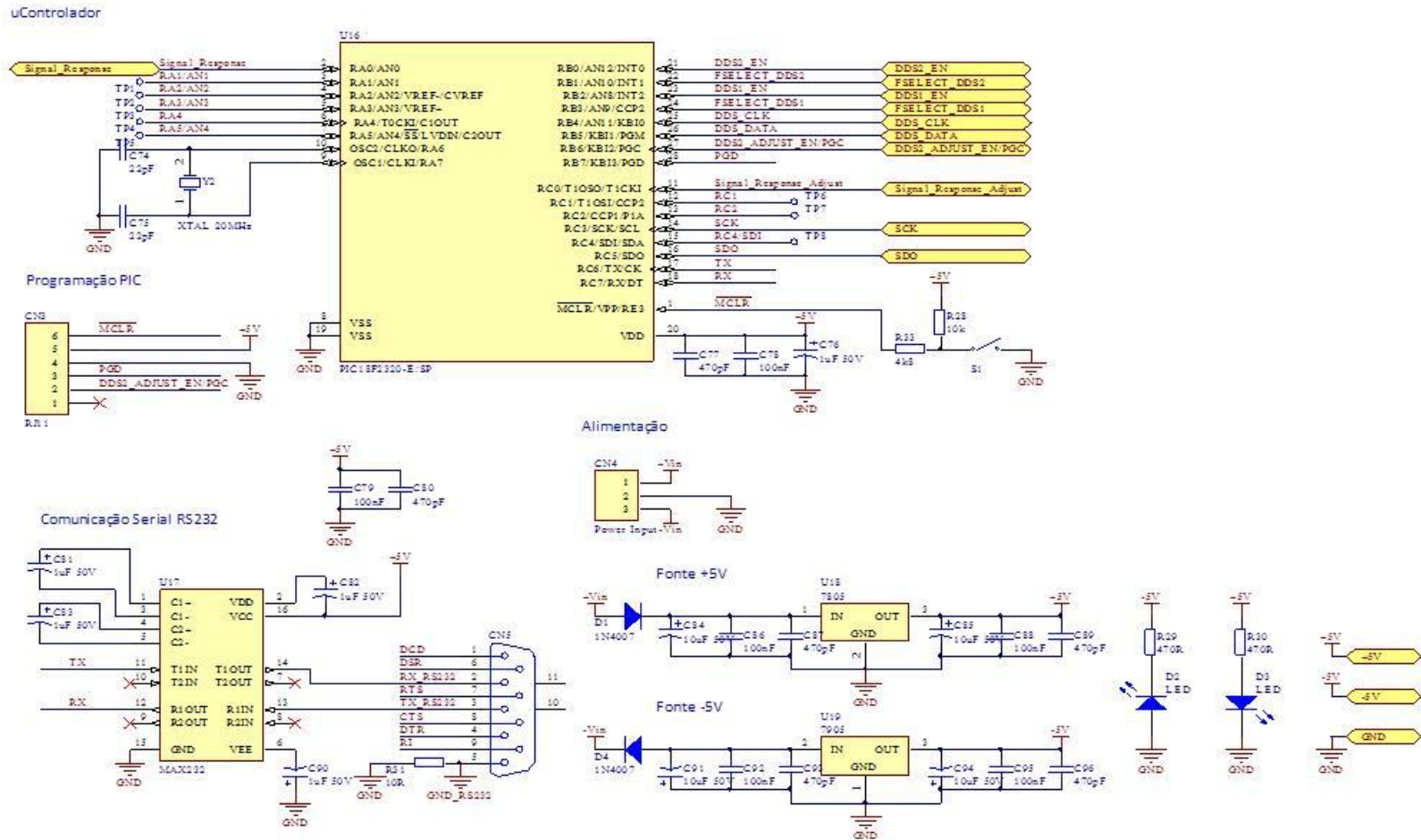


Figura A 3 - Circuito esquemático do hardware parte 3
Fonte: Autoria Própria

APÊNCICE B - FUNCIONAMENTO E OPERAÇÃO DO SOFTWARE

a) Configuração da comunicação via RS-232

Para que o *software* possa operar, é necessário que uma porta serial esteja conectada ao *hardware*. Utilizou-se um conversor USB-Serial para estabelecer a comunicação via RS-232. O *software* seleciona uma porta serial do computador que esteja conectada através da *ComboBox* e inicia a transmissão de dados. A Figura B 1 ilustra a comunicação serial antes de ser iniciada e a Figura B 2 após.

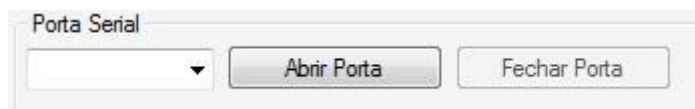


Figura B 1 - Abertura da porta serial
Fonte: Autoria Própria



Figura B 2 - Porta serial aberta
Fonte: Autoria Própria

b) Leitura do valor do AD

Após a abertura da porta serial, os botões das outras funcionalidades são habilitados e pode-se começar a mostrar os valores do conversor AD (0 a 1023 bits) e de tensão (0 até 5 V) com o botão Iniciar Leitura, conforme Figura B 3.

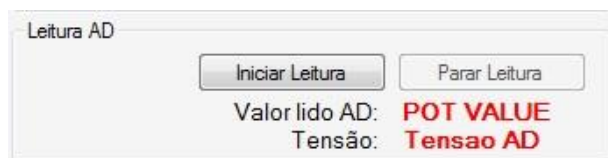


Figura B 3 - Leitura do valor do AD
Fonte: Autoria Própria

Na Figura B 4 pode-se observar como os valores são mostrados pelo *software* ao usuário.

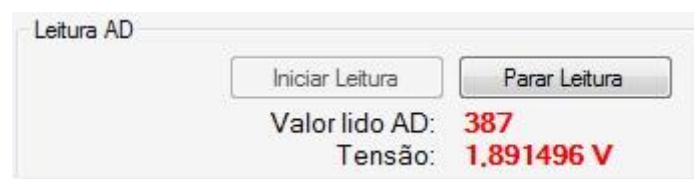


Figura B 4 - Exemplo de leitura do valor do AD
Fonte: Autoria Própria

Para exemplificar melhor o funcionamento do *software*, quando o usuário quer iniciar a leitura do valor de tensão e do AD, ao clicar no botão "Iniciar Leitura", o *software* envia, após um "0xA5", a letra "d". Dessa maneira, quando o *firmware* se depara com o "0xA5", ele irá aguardar o próximo comando; sendo esse a letra "d", ele iniciará sua rotina para fazer a leitura dos valores solicitados pelo usuário. Assim que essa tarefa for executada, ele volta a esperar outro "0xA5" para uma nova execução e assim por diante.

Clicando no botão "Parar Leitura", a observação das medidas é interrompida.

c) Gráfico

Concomitantemente ao início e término dessas leituras, o gráfico é acionado ou desativado. Através dele é possível ver o comportamento em tempo real da curva Valor lido em função da Iteração. Com a *CheckBox* que fica anexa ao gráfico pode-se habilitar uma visualização em 3D. É possível ter uma noção do gráfico observando a Figura B 5, e do gráfico em 3D na Figura B 6. O eixo Y do gráfico é fixo, com valores de 0 até 5 V. Já o eixo X, que tem uma escala de tempo é dinâmico. O usuário consegue observar 15 iterações na tela, e a cada nova iteração o gráfico é atualizado, fazendo com que a iteração mais antiga seja removida.

Gráfico Valor lido (V) x Iteração

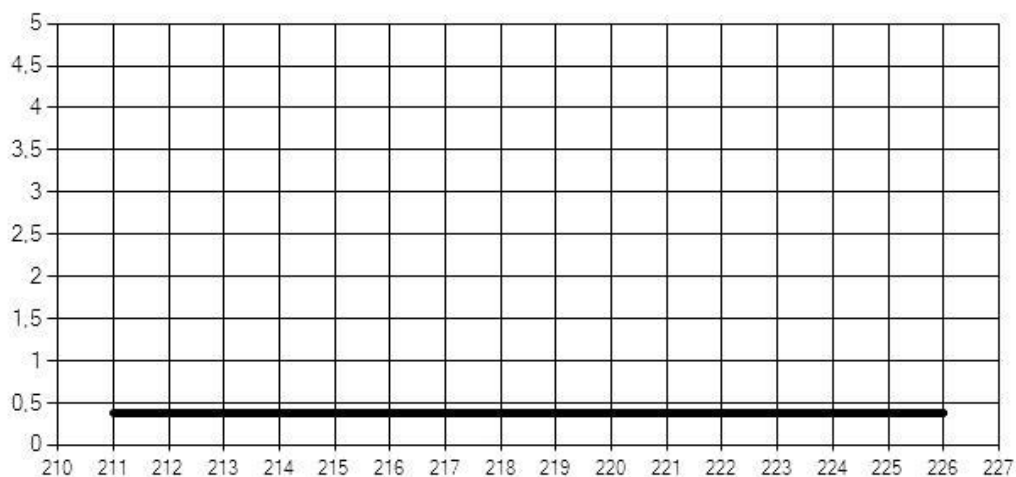

 Ativar Gráfico 3D

Figura B 5 - Gráfico
Fonte: Autoria Própria

Gráfico Valor lido (V) x Iteração

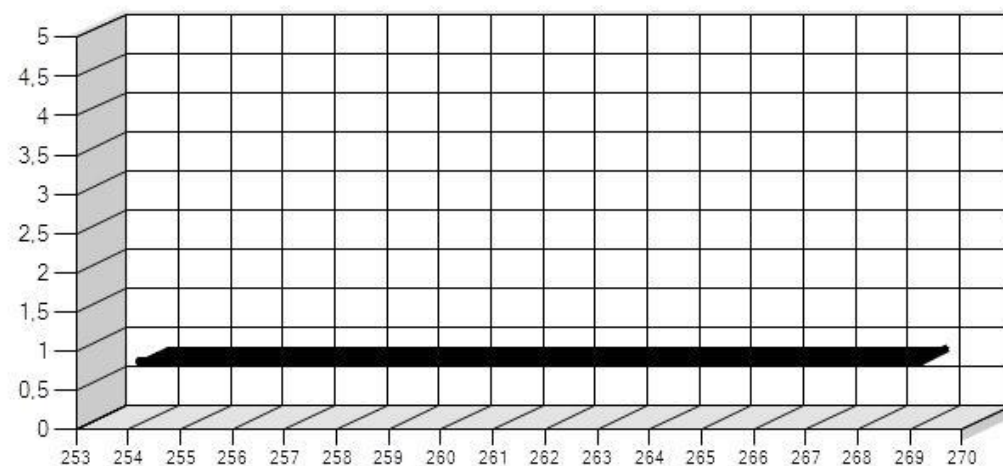

 Ativar Gráfico 3D

Figura B 6 - Gráfico 3D
Fonte: Autoria Própria

d) Potenciômetros Digitais

Com a mesma funcionalidade de potenciômetros analógicos, os digitais possuem uma resistência elétrica variável, que pode ser ajustada via *firmware*.

Tal ajuste pode ser feito por uma barra de rolagem horizontal que possui 256 divisões (*TrackBar*). Essa barra faz o envio do comando ao microcontrolador e altera a amplitude de onda do DDS2 ou o valor da tensão

de saída, no potenciômetro digital 1 ou 2, respectivamente. Tendo essas funções em operação, é possível observar no gráfico (Valor lido (V) X Iteração) em tempo real as modificações efetuadas pelo segundo potenciômetro. Pode-se observar na Figura B 7 essa funcionalidade. A interface para os dois potenciômetros é igual.



Figura B 7 - Potenciômetro digital
Fonte: Aatoria Própria

No *label* "Valor PotDig1" o *software* mostra ao usuário em qual valor o potenciômetro está configurado (de 0 a 255 bits).

e) DDS

Essa funcionalidade permite que o usuário digite o valor de frequência e fase desejada e clique no botão para enviar as informações ao PIC. Nessa opção, o que o *software* faz é converter esses valores para base hexadecimal, dividi-los em 4 *bytes* e enviar pela serial ao *firmware*, que repassa as informações ao DDS. É preciso digitar o valor de frequência (Hz) e, apenas para o DDS2, também o valor de fase (em graus); e então enviar as informações ao microcontrolador. Com tais dados digitados nas respectivas *TextBox*, faz-se o sincronismo deles para que o sistema fique apto à operação. Em vermelho, o *software* mostra ao usuário os valores convertidos para a base hexadecimal. Tais valores são enviados ao *firmware*, para que ele programe os DDS. Na Figura B 8 podemos observar as funcionalidades de programação e sincronismo dos DDS.

The image shows a software interface with two main sections for configuring DDS 1 and DDS 2. The top section, titled 'Configuração do DDS 1', is currently disabled, with its 'Enviar' button greyed out. The bottom section, titled 'Configuração do DDS 2', is active. It contains two input fields: 'Frequência 0:' with the value '5000000' and 'Fase 0:' with the value '0'. Below each input field is a red text label: 'Frequência 0' and '0x33333340' for the frequency, and 'Fase 0' and '0x00000000' for the phase. A blue 'Enviar' button is positioned below the phase input. Below the DDS 2 section is a horizontal slider, a 'Sincronizar' button, a dropdown menu, and a 'Varredura' button.

Figura B 8 - Programação do DDS 2
Fonte: Autoria Própria

Como pode ser observado, a primeira configuração que deve ser feita é a do DDS 2, pois ele é o único que contém valores de fase. Feito o envio dos valores de frequência e fase dele, o *software* habilita o envio da frequência do DDS 1.

Configuração do DDS 1
Frequência e Fase 1
Frequência 0: 5000000
0x33333340
Enviar

Configuração do DDS 2
Frequência e Fase 2
Frequência 0: 5000000
0x33333340
Fase 0: 0
0x00000000
Enviar

Sincronizar

Varredura

Figura B 9 - Sincronismo e Varredura
Fonte: Autoria Própria

Por fim, são habilitados os botões "Sincronizar" e "Varredura", conforme observa-se na Figura B

O primeiro faz com que a fase da onda passe de 0° para 360° , com um passo que pode ser escolhido pelo usuário na *ComboBox* anexa ao botão; e o segundo sincroniza os sinais.

Na Figura B e Figura B podemos observar as ondas dos dois DDS em fase e defasadas de 180° , respectivamente.

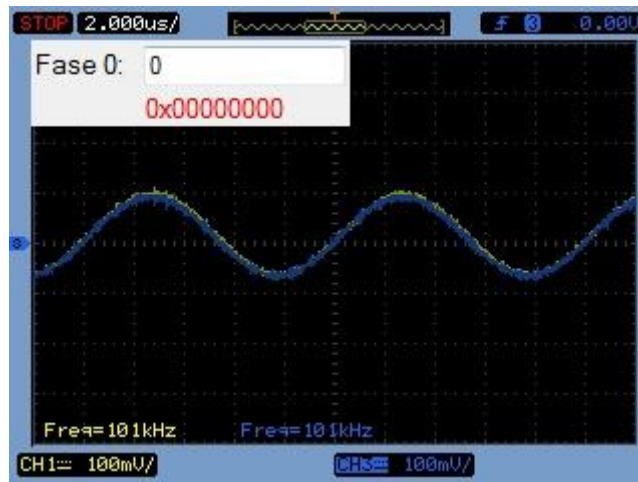


Figura B 10 - Ondas em fase
Fonte: Autoria Própria

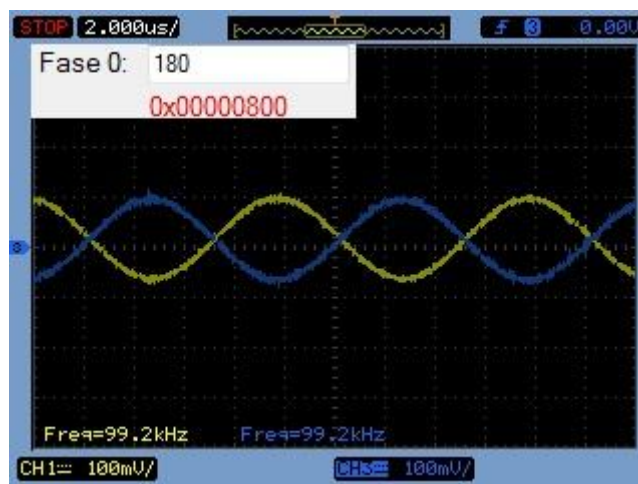


Figura B 11 - Ondas defasadas
Fonte: Autoria Própria

f) Log de medições

A última funcionalidade não ligada diretamente aos DDS é a criação do arquivo texto. Após o envio dos valores de frequência e fase dos DDS, pode-se criar o arquivo com estrutura ".csv". É necessário esse envio de valores primeiro, pois o arquivo texto salva essas informações para que quando o arquivo for aberto, o usuário saiba exatamente que medidas foram aquelas e em quais situações elas foram adquiridas. Junto com esses dados, o arquivo gerado contém informações de quantas iterações foram gravadas, qual o tempo de cada iteração (s) e o valor de tensão (V) naquele momento. Para gerar o arquivo, o usuário pode selecionar quantas iterações quer que sejam salvas através da *TextBox* ou deixá-la com o valor "0", fazendo com que o

arquivo grave até que o usuário clique no botão Parar. O *software* coloca automaticamente a data e horário da criação do arquivo, tanto no nome como no cabeçalho, para facilitar futuras leituras do arquivo. A Figura B exemplifica a funcionalidade de criação de arquivo texto com 10 iterações.



Figura B 12 - Geração do arquivo texto
Fonte: Autoria Própria

Nomeando o arquivo texto, que por padrão chama-se “Log”, selecionando onde será salvo - o *software* seleciona automaticamente a área de trabalho - e clicando no botão “Salvar”, assim que a Leitura AD for iniciada o arquivo começa a ser gravado. Na Figura B é possível observar o ambiente de criação do arquivo.

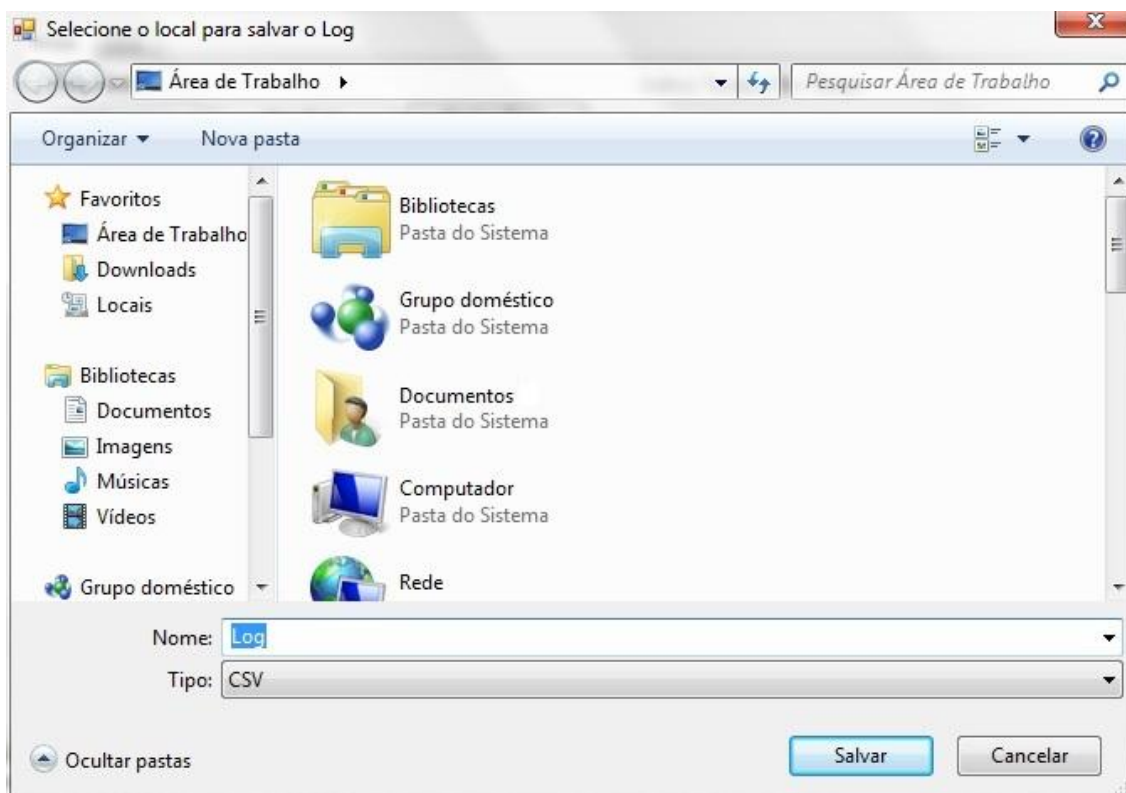
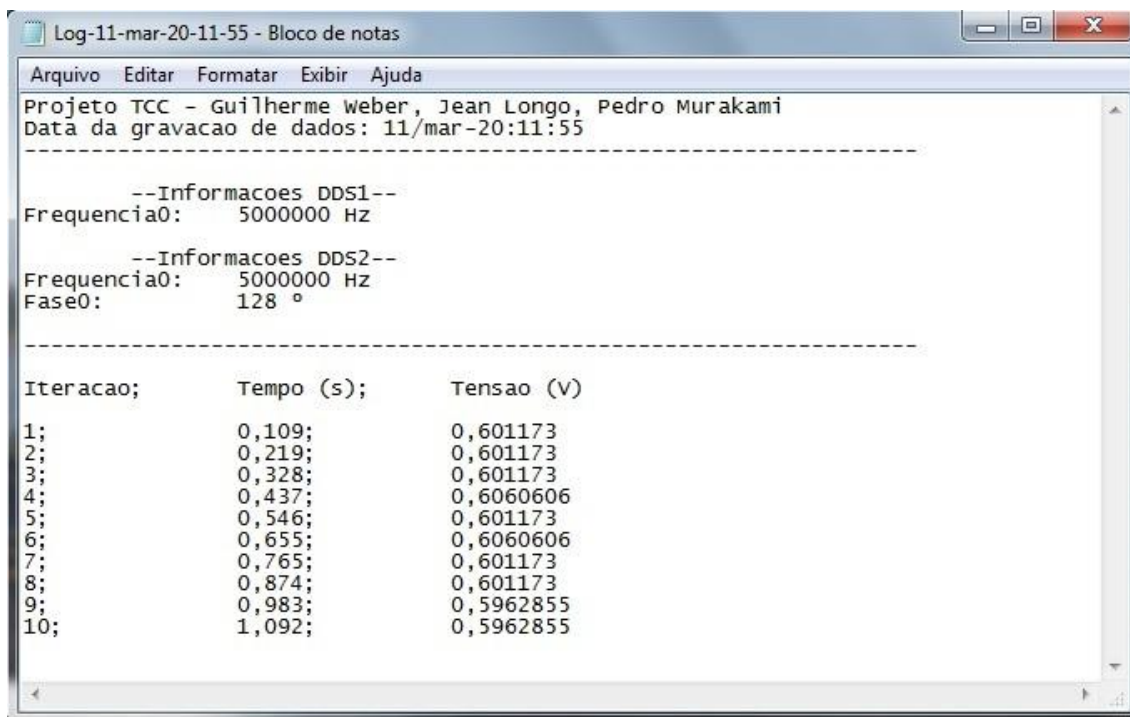


Figura B 13 - Ambiente de gravação do arquivo texto
Fonte: Autoria Própria

Os arquivos podem ser abertos em qualquer editor de texto, o que muitas vezes facilita a visualização. Sua estrutura no formato ".csv" permite

uma abertura direta em uma planilha eletrônica. Um exemplo de arquivo gerado é observado na Figura B .



The screenshot shows a Notepad window titled "Log-11-mar-20-11-55 - Bloco de notas". The menu bar includes "Arquivo", "Editar", "Formatar", "Exibir", and "Ajuda". The text content is as follows:

```
Projeto TCC - Guilherme weber, Jean Longo, Pedro Murakami
Data da gravacao de dados: 11/mar-20:11:55
-----
--Informacoes DDS1--
Frequencia0: 5000000 Hz
--Informacoes DDS2--
Frequencia0: 5000000 Hz
Fase0: 128 °
-----

Iteracao;      Tempo (s);      Tensao (V)
1;            0,109;          0,601173
2;            0,219;          0,601173
3;            0,328;          0,601173
4;            0,437;          0,6060606
5;            0,546;          0,601173
6;            0,655;          0,6060606
7;            0,765;          0,601173
8;            0,874;          0,601173
9;            0,983;          0,5962855
10;           1,092;          0,5962855
```

Figura B 14 - Arquivo de log das medidas gerado pelo software
Fonte: Autoria Própria