

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIOGO RIKIO MIYAZAKI

**MEDIDOR BASEADO EM SENSORES CAPACITIVOS INTERDIGITAIS PARA
DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS**

CURITIBA
2018

DIOGO RIKIO MIYAZAKI

**MEDIDOR BASEADO EM SENSORES CAPACITIVOS INTERDIGITAIS PARA
DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Dartora

CURITIBA
2018

TERMO DE APROVAÇÃO

DIOGO RIKIO MIYAZAKI

MEDIDOR BASEADO EM SENSORES CAPACITIVOS INTERDIGITAIS PARA DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. César Augusto Dartora
Orientador - Departamento de Engenharia Elétrica UFPR

Prof. Dr. Ewaldo Luiz de Mattos Mehl
Avaliador 1 - Departamento de Engenharia Elétrica UFPR

Prof. Dr. Oscar da Costa Gouveia Filho
Avaliador 2 - Departamento de Engenharia Elétrica UFPR

Curitiba, 5 de dezembro de 2018

RESUMO

Sensores capacitivos são largamente na instrumentação eletrônica e processo de controle. Seu maior ponto está no fato dele estar correlacionado a constante de permissividade elétrica dos materiais, e assim podendo detectar o tipo de material sendo analisado pelo sensor capacitivo. Neste trabalho propõe usar um sensor capacitivo para realizar a leitura do percentual de etanol misturado na gasolina tipo C e percentual de água no etanol, com o propósito de combater fraudes nas bombas de combustíveis e postos distribuidores. Para isso foi implementado um sensor interdigitado e um sistema de leitura de impedância baseado no lock-in, usando um micro controlador MSP430G2553. O destaque do projeto vai para o lock-in, pois o sistema pode ser implementado em diversas aplicações de instrumentação.

Palavras Chaves: Combustível, Sensores capacitivos, Lock-in

ABSTRACT

Capacitive sensors are largely used in instrumentation electronics and on control processes. Their main advantage lies on the fact that they are correlated to the material's electrical permittivity, and, thus, they can detect which material is being analyzed. This work proposes the use of a capacitive sensor to measure the responses from samples of ethanol, gasoline type C and water in its different mixed proportions, with the purpose of combating fraud in fuel stations. Thus, an interdigital capacitive sensor was implemented along with its impedance measuring system based on a microcontrolled *lock-in* amplifier with MSP430G2553. The Project's main highlight goes to the *lock-in* amplifier, because the system can be implemented on a wide range of applications on electronic instrumentation.

Keywords: Fuel, Capacitive Sensors, Lock-in

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Capacitor interdigital	13
Figura 2 - Gráfico efeito A1 e A2	13
Figura 3– Sistema Físico e sua conexão com o Lock-In.	17
Figura 4- Diagrama Simplificado de um LIA	18
Figura 5 - Exemplo de amostragem para o Lock-In proposto.....	18
Figura 6 - Foto micro controlador MSP430G2553.....	21
Figura 7 Resistor de escala na configuração de divisor de tensão	22
Figura 8 – Esquemático (acima) e placa fabricada (abaixo) para o sensor capacitivo proposto.	24
Figura 9 – Retirada de amostra de 30ml do polímero (à esquerda), aplicação sobre o sensor (à direita), ferramenta utilizada para aplicação do polímero (ao centro), sensor em processo de cura, aquecimento (abaixo).....	25
Figura 10 – Diagrama do Sistema	26
Figura 11– Band-pass filter design.....	27
Figura 12 - Resposta na frequência para a tensão de saída do filtro.	27
Figura 13 – Procedimentos de calibração (A) Curto circuito. (B) Circuito aberto .	28
Figura 14 - Fluxograma da rotina principal	29
Figura 15- Fluxograma da rotina de calibração	30
Figura 16 - Fluxograma da rotina de interrupção do Timer	31
Figura 17 - Realização das misturas de gasolina com etanol usando a proveta de 100ml , Becker e um funil	38
Figura 18- Resultado final das misturas, armazenadas em recipientes de vidro com tampa de rosqueamento.....	38
Figura 19 - Grafico da reta linearizada da tabale 6	40
Figura 20 - Grafico da reta linearizada da tabale 7	41
Figura 21 - Gráfico da reta linearizada da tabela 9	43
Figura 22 - Gráfico da reta linearizada da tabela 10	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de leitura entre o <i>Lock-In</i> e o <i>LCR Meter Agilent 4263B</i>	33
Tabela 2 - Tabela de erros relativos do lock-in e LCR	34
Tabela 3 - Valores de impedância medidos dos capacitores	34
Tabela 4 - Valores de impedância dos resistores.....	34
Tabela 5 - Misturas de Gasolina e Etanol a para ser medidas	37
Tabela 6 - Leitura da impedância do sensor capacitivo das misturas de Gasolina tipo C e Etanol Hidratado (EHC) usando o <i>LCR Meter Agilent 4263B</i>	39
Tabela 7 - Leitura da impedância do sensor capacitivo das misturas de Gasolina tipo C e Etanol Hidratado (EHC) usando o <i>Lock-In</i>	40
Tabela 8 - Misturas de Etanol Hidratado e água destilada a para ser medidas...	42
Tabela 9 - Leitura da impedância do sensor capacitivo das misturas de Etanol Hidratado (EHC) e água destilada usando o <i>LCR Meter Agilent 4263B</i>	43
Tabela 10 - Leitura da impedância do sensor capacitivo das misturas de Etanol Hidratado (EHC) e água destilada usando o <i>Lock-In</i>	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS.....	10
1.1.1	Objetivos Específicos.....	10
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
1.3	PÚBLICO ALVO.....	11
1.4	DIFERENCIAL DO PROJETO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	SENSORES CAPACITIVOS	12
2.2	COMBUSTÍVEIS AUTOMOTIVOS.....	14
2.2.1	Gasolina Tipo A e C.....	14
2.2.2	Etanol	15
2.3	AMPLIFICADOR LOCK-IN.....	16
2.3.1	Amplificador <i>Lock-In</i> digital de subtração	18
2.4	MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA	19
2.4.1.1	Medida de Amplitude	20
2.5	MICROCONTROLADOR MSP430G2553	20
2.5.1	Conversores A/D.....	21
2.5.2	Temporizadores e Contadores de Uso Geral	21
2.5.3	Resistores de Escala	22
2.5.4	Portas de entrada e saída digitais.....	23
3	DESENVOLVIMENTO	24
3.1	PROCEDIMENTO DE CONFECÇÃO DOS SENSORES INTERDIGITADOS ..	24
3.2	SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	26
3.2.1	<i>Hardware</i>	26
3.2.2	<i>Firmware</i>	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	LEITURA DE COMPONENTES DISCRETOS USANDO O <i>LOCK-IN</i>	33
4.2	MEDIDAS COM GASOLINA	35
4.2.1	Medindo o teor alcoólico usando NBR 13992	35
4.2.2	Misturando Gasolina tipo C com Etanol Hidratado	37
4.2.3	Medição da impedância da gasolina.	39
4.2.4	Discussão dos resultados	41
4.3	MEDIDAS COM ETANOL.....	41
4.3.1	Misturando Etanol Hidratado com Água destilada.....	42

4.3.2	Medição da impedância do Etanol Hidratado.....	42
4.3.3	Discussão dos resultados.....	44
5	CONCLUSÃO.....	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais consumidores são vítimas de combustíveis adulterados e fraudes em postos de abastecimentos, ocasionando danos na parte mecânica dos veículos, levando a falhas mecânicas e causando acidentes no trânsito, além de custos adicionais com reparos.

Atualmente, existem diversas técnicas utilizadas para detectar e/ou separar substâncias e outros elementos de misturas e soluções. Dentre elas destacam-se processos químicos, físicos e elétricos. De forma a avaliar a eficácia do método de medição de impedâncias por sensor interdigital capacitivo para detecção de líquidos, propõe-se um protótipo micro controlado de medição baseado em *lock-in*.

O sistema citado visa trazer uma confiabilidade a mais para consumidores, dando uma ferramenta útil e de baixo custo para estes verificarem se o combustível que estão comprando é seguro ou adulterado.

1.1 OBJETIVOS

O projeto consiste em desenvolver um sistema que seja capaz de medir a impedância, logo a capacitância, de um sensor capacitivo imerso em uma solução sobre teste, no caso combustíveis automotivos, e com esse resultado determinar se o combustível em questão está nas especificações da ANP.

1.1.1 Objetivos Específicos

Aqui temos uma descrição em etapas do processo de execução do objetivo geral:

- a) Estudar e desenvolver sensores capacitivos;
- b) Estudar as propriedades elétricas dos combustíveis;
- c) Estudar e desenvolver o sistema de medição de impedância;
- d) Validar os resultados com a teoria.

1.2 JUSTIFICATIVA

Vários métodos de combate a fraudes são aplicados, porém poucos são acessíveis aos consumidores finais. O projeto visa criar um sistema que o consumidor possa utilizar de maneira fácil. Além de criar um sistema de leitura para sensores capacitivos, ou seja, pode ser aplicado em outros sistemas.

1.3 PÚBLICO ALVO

O trabalho tem como principal público alunos de cursos de engenharia elétrica, por conta do desenvolvimento do sistema de leitura de impedância, consumidores e motoristas, que podem usar o sistema para determinar se o combustível que compram é de confiança, montadoras pois podem implementar sistemas de detecção nos automóveis e ANP e INMETRO para usar no combate às fraudes das distribuidoras de combustíveis.

1.4 DIFERENCIAL DO PROJETO

O projeto tem como seu diferencial a abordagem de usar a leitura da capacitância como meio de detectar fraudes em misturas de gasolina. Outro ponto é o uso do sistema do *lock-in* de subtração, que permite ler a impedância com menos recursos e de forma mais barata.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão abordados os principais fundamentos teóricos para a compreensão deste trabalho, tais como sensores capacitivos, combustíveis automotivos, amplificador *Lock-in* e microcontrolador MSP430 escolhido.

2.1 SENSORES CAPACITIVOS

Sensores capacitivos apresentam boa resolução e mantém boa estabilidade em ambientes hostis. Esse tipo de sensor é cada vez mais usado por equipamentos industriais e laboratoriais, incluindo *dimmers* para lâmpadas, *enconders* de rotação, micrometros, sensores de umidade, pressão, etc. (BAXTER, 1997).

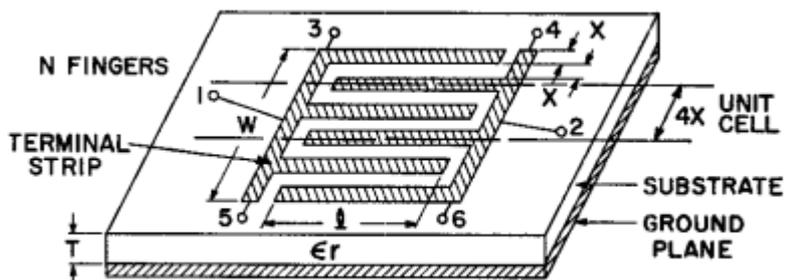
A geometria dos capacitores é o ponto mais estudado na construção destes. Um capacitor simples é o de placas paralelas cuja sua equação é dada por:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r * \frac{A}{d} \quad (2.1.1)$$

Sendo ϵ_0 a permissividade elétrica do vácuo, ϵ_r permissividade relativa do dielétrico, A área das placas e d distância entre elas. Porém construir placas paralelas se torna um problema por conta da distância entre os eletrodos. Uma maneira de contornar é usar capacitores de placas coplanares. São estruturas onde os eletrodos estão no mesmo plano.

Assim como nas placas paralelas a geometria dessas placas influencia bastante sua sensibilidade. Um modelo muito usado é de geometria interdigital. A figura 1 ilustra o capacitor interdigital:

Figura 1 - Capacitor interdital



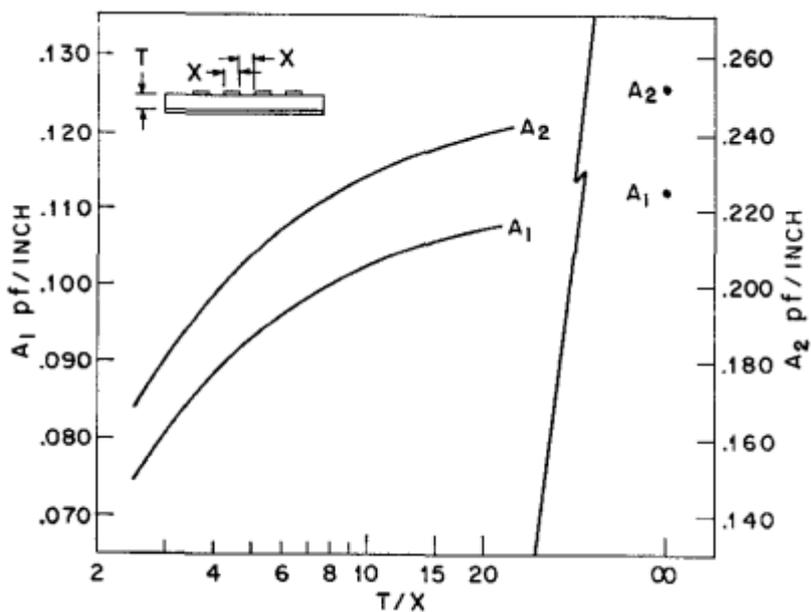
Fonte: Alley (1970)

Sendo W a largura do capacitor, T a altura da placa, l a largura do *finger*, N número de *fingers* e X o largura do espaço entre gaps. A vantagem de usar essa geometria é que erros de construção são mínimos comparados ao de placas paralelas. A equação a seguir:

$$C = \frac{\epsilon_r + 1}{W} * l * [(N - 3) * A1 + A2]$$

(2.1.2)

C é dado por pF/unidade de comprimento e $A1$ e $A2$ funções de T/X como mostra o gráfico da figura 2:

Figura 2 - Gráfico efeito $A1$ e $A2$ 

Fonte: Alley (1970)

Outra grande vantagem em relação aos capacitores de placas paralelas, é os de placas coplanares a onda não só propaga dentro do diédrico da placa, mas também viaja pelo matéria dielétrica em cima dos eletrodos, tornando-o um ótimo sensor de diversos materiais.

2.2 COMBUSTÍVEIS AUTOMOTIVOS

Os principais combustíveis usados na indústria automotiva são as gasolinas tipo A e C, Etanol e Diesel. Estes combustíveis são regulados pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis).

2.2.1 Gasolina Tipo A e C

A gasolina é um combustível de origem fóssil obtido pelo refino de petróleo refinado. É formado por conjunto de moléculas de hidrocarbonetos de iso-octanos, hidrocarbonetos de carbonos que podem variar entre 4 a 12 por molécula, benzenos, moléculas aromáticas e enxofre. Existe dos tipos de gasolinas a tipo A e C. Essas duas são descritas na resolução ANP Nº40, de 25.10.2013, sendo a gasolina tipo A produto direto das refinarias e a tipo C uma mistura do tipo A com etanol anidro.

A mistura de Etanol Anidro com gasolina tipo A é feita para reduzir os poluentes, melhorar a octanagem e tornar a gasolina mais acessível e barata para o consumidor final. O nível tolerado desta mistura é determinado pela Portaria Nº75, de 5 de março de 2015, do ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, na qual estabelece os níveis de percentual a serem usados, de 27% de etanol anidro na gasolina comum e 25% na gasolina tipo Premium.

Gasolinas que ultrapassa esses níveis de tolerância de etanol são consideradas irregulares. Entre as fraudes que envolvem adulterar a gasolina, uma delas é a adição de etanol. Essa adição é feita pois o etanol é mais barato e difícil de se detectar pelos consumidores. Esta fraude não só causa prejuízos financeiros pois o etanol tem menor teor energético por litro, mas também danos ao motor do veículo já que se mistura o etanol hidratado, que possui água em sua composição.

Entre os métodos de detectar esta fraude especificados pela ANP, são as ABNT NBR 13992 e ASTM D5501, na qual se usa separação de fase e

Cromatografia gasosa. Neste trabalho se propõe usar a medida de capacitância da amostra através de um sensor capacitivo.

A Norma Brasileira NBR 13992 é o ensaio mais usado no Brasil. O procedimento da norma é usar uma solução salina para separar etanol e gasolina. A solução é composta de água destilada e sal, na proporção de 10% em g/volume. Após a separação, calcula-se o volume da solução de aquosa usando a equação a seguir da norma:

$$AEAC = [(A - 50) * 2] + 1 \quad (2.2.1)$$

Este procedimento é de fácil acesso por conta do combate às fraudes dos combustíveis, um problema agravante no Brasil. Outro método usado é de realizar ensaios em espectroscopia em pulsos em frequência na escala de terahertz, descrito pelo artigo de Arik, Altan e Esenturk (2014).

Segundo este artigo a constante relativa dielétrica da gasolina é igual a 2. Com a adição de etanol, como este possui uma constante de permissividade de entorno de 24, a solução adultera fica mais a capacitiva.

2.2.2 Etanol

O Etanol é combustível de origem da fermentação de açúcares, principalmente cana-de-açúcar e milho, formado por moléculas de hidroxilas. A resolução ANP N°19, de 15.04.2015, separa o etanol em dois tipos, Anidro e Hidratado. Etanol Hidratado combustível (EHC) é o etanol com água em sua mistura, originada pelo processo de fermentação e o Etanol anidro combustível (EAC) é obtido desidratando o EHC e é usado para realizar para misturar com a gasolina tipo A. ANP estipula que o EHC contenha até 4,9% de água.

A fraude mais comum é o uso de água encanada para aumentar o volume de EAC vendido nas bombas. Somente com o aumento do volume de água na mistura, já causa danos no motor e diminuição do valor energético e perdas de potência do motor. Como a água não é destilada, outros contaminantes podem entrar no motor e pode danifica-lo ainda mais.

A constante de permissividade elétrica do etanol segundo Shirke, Chaudhari, More e Patil (2000) é em torno de 25.08 a uma temperatura de 298K.

Valor importante a se estabelecer, pois quanto mais água a mistura contém, constante de valor em torno de 74, tornado o combustível fraudado mais capacitivo.

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) utiliza como método descrito pelo relatório final de N° 002/2010 de Comparação interlaboratorial de condutividade eletrolítica em etanol combustível, utilizar a medida de condutância para determinar se a amostra está nos parâmetros estabelecidos pela ANP do etanol ter no máximo $300\mu S/m$ de condutividade.

Outros métodos são o da secagem, onde se evapora o líquido de menor temperatura de ebulição, no caso etanol com temperatura de $78,37\text{ }^{\circ}\text{C}$., e mede o volume final para determinar quanto foi evaporado.

Um método usado pelo INMETRO é o uso de densímetro termocompensado, descrita na norma N° NIE-DIMEL-093. O método consiste em medir a temperatura e a massa específica de diferentes amostras armazenadas em provetas de 500ml, nas temperaturas ambiente, 15°C e 35°C . O teor alcoólico é determinado usando uma tabela fornecida pela norma, usando a temperatura e massa específica.

2.3 AMPLIFICADOR LOCK-IN

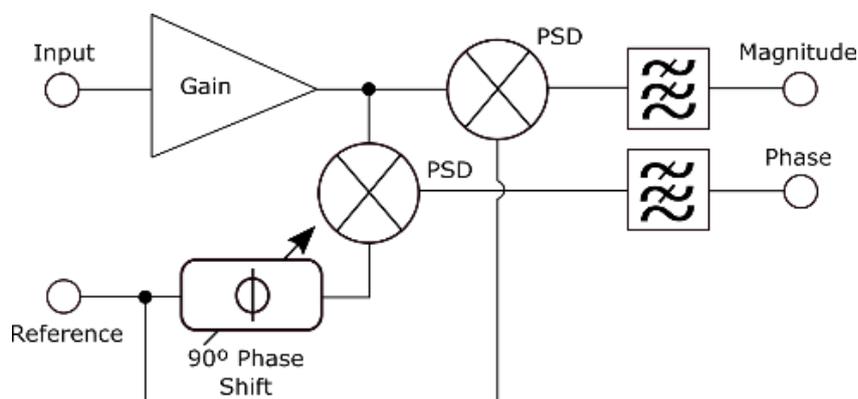
O amplificador *Lock-In* (LIA) é uma técnica de instrumentação usada em laboratórios para uma vasta variedade de propósitos, devido a sua capacidade de medir em uma única frequência sinais com muito ruído. É baseado em um detector sensível à fase (PSD) e deve ser configurado para operar em uma frequência.

Atualmente, um LIA desempenha mais funções tais como: instrumento medidor de fase, uma unidade medidora de ruído, um analisador de espectro entre outras funções. Particularmente nos laboratórios de física, o LIA é um dos instrumentos mais valiosos e úteis já que o mesmo faz parte de diferentes sistemas experimentais os quais permitem identificar transições de fases em sólidos cristalinos e outros sistemas físicos.

Especificamente, o LIA permite separar e estudar sinais em fase e quadratura em diferentes experimentos, fornecendo valiosas informações sobre diferentes grandezas físicas as quais estão associadas com as componentes (fase e quadratura) dos sinais medidos.

O modelo de LIA clássico foi proposto por Remillard et al. (1993) e se comporta como um filtro passa banda seguido de um medidor de tensão que retifica o sinal obtendo uma saída DC (Detector de pico sensível à fase (PSD)). O funcionamento do LIA está baseado no diagrama em blocos da figura 1.

Figura 3– Sistema Físico e sua conexão com o Lock-In.



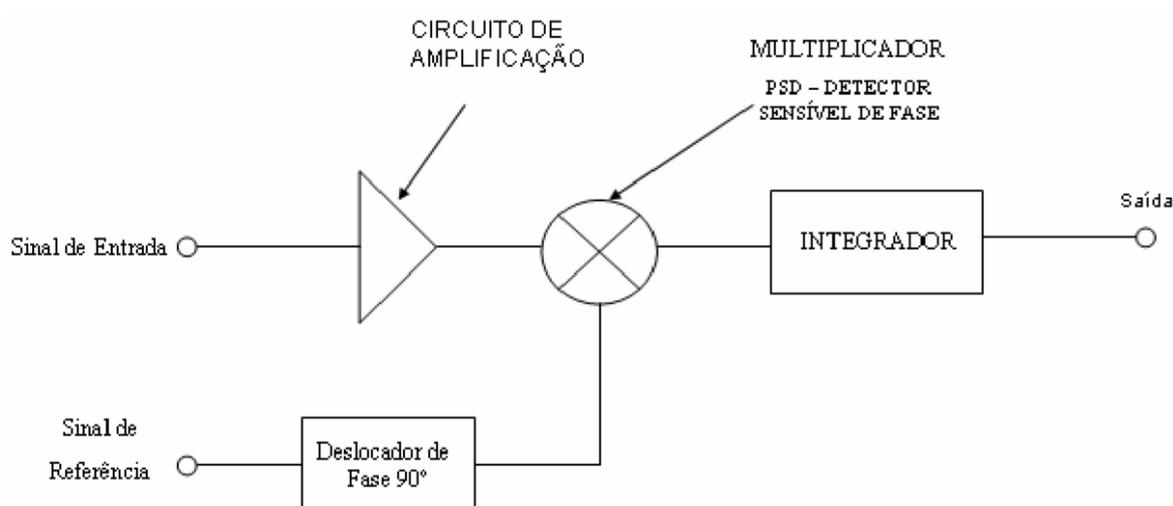
Fonte: Miyazaki et al. (2018).

Conforme Albuquerque et al. (2008), esse instrumento está dividido nas seguintes partes:

- Entradas do sinal medido e do sinal de referência;
- PSD.

O LIA possui duas entradas, uma chamada de referência que pode ser gerada pelo próprio sistema ou recebe uma referência externa e uma entrada que é usada para injetar o sinal que deverá ser analisado. A figura abaixo mostra a estrutura básica do LIA:

Figura 4- Diagrama Simplificado de um LIA



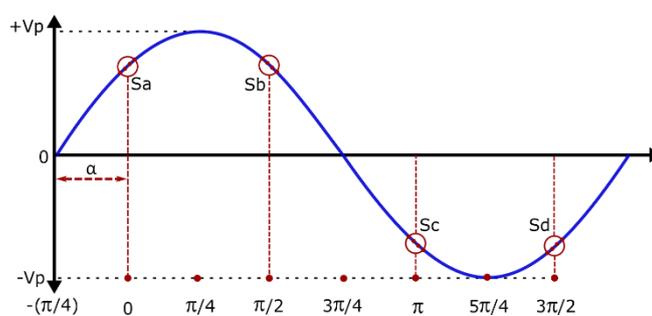
Fonte: Albuquerque et al. (2008).

2.3.1 Amplificador *Lock-In* digital de subtração.

Este trabalho descreve a implementação de um sistema operando com um LIA digital nos limites da frequência de Nyquist como forma de diminuir custos e o uso de recursos, mantendo a performance comparável à de sistemas tradicionais.

Como apresentado na figura 3, o resultado em fase é obtido ao amostrar o sinal de entrada nas fases de 90° e 270° e computando sua diferença. O resultado em quadratura é obtido através de amostragem da do sinal de entrada nas fases 0° e 180° novamente, computando sua diferença.

Figura 5 - Exemplo de amostragem para o Lock-In proposto.



Fonte: Nardi et al. (2017).

As amostras do sinal da figura 3, são descritos da seguinte forma:

$$S = Vp * \sin(\alpha) \quad (2.3.7)$$

Sendo α a defasagem do sinal das amostras em relação ao sinal de referência. Usando a técnica de subtração de amostras com diferença de 180° de defasagem, obtém-se os sinais de em quadratura e em fase:

$$Q = Sa - Sc = Vp * [\sin(\alpha) - \sin(\alpha + \pi)] \quad (2.3.8)$$

$$Q = Sa - Sc = 2 * Vp * \sin(\alpha) \quad (2.3.9)$$

$$P = Sb - Sd = Vp * \left[\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\alpha + \frac{3 * \pi}{2}\right) \right] \quad (2.3.10)$$

$$P = 2 * Vp * \cos(\alpha) \quad (2.3.11)$$

2.4 MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA

O método usado para medir a impedância usando o LIA é usar tensão sobre a corrente. Esta técnica consiste em medir a diferença de tensão do sensor e dividir pela corrente elétrica através de um estímulo na entrada, que pode ser um sinal de tensão ou corrente. A equação seguinte exemplifica o método:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.4.1)$$

Sendo V a diferença de tensão complexa e I a corrente elétrica complexa. A impedância medida Z , por ser um valor complexo, este possui uma parte real relativo ao efeito ôhmico e uma parte imaginária relativo ao efeito capacitivo ou indutivo que causa uma defasagem ao sinal de entrada.

Neste projeto se usa como estímulo um sinal senoidal, que é gerado por um módulo de gerador de funções. Esse sinal é usado na técnica do LIA para obter a medição de impedância do sensor capacitivo.

2.4.1.1 Medida de Amplitude

A medida de amplitude é responsável por retornar a amplitude do sinal senoidal sobre o sensor e a medida de fase a defasagem na tensão sobre o sensor em relação ao da entrada. Ele é representado pela equação a seguir:

$$V_{cap} = A * \sin(2 * \pi * w_0 * t + \theta) \quad (2.4.2)$$

Sendo A amplitude do sinal medida em volts e θ a defasagem. No *Lock-In* de subtração as medidas de Amplitude pelo modulo obtido através dos sinais de em quadratura e em fase e a fase através do arco tangente do sinal de em quadratura sobre do em fase. As equações a seguir exemplificam como o LIA obtém as medidas:

$$A = \sqrt{Q^2 + P^2} \quad (2.4.3)$$

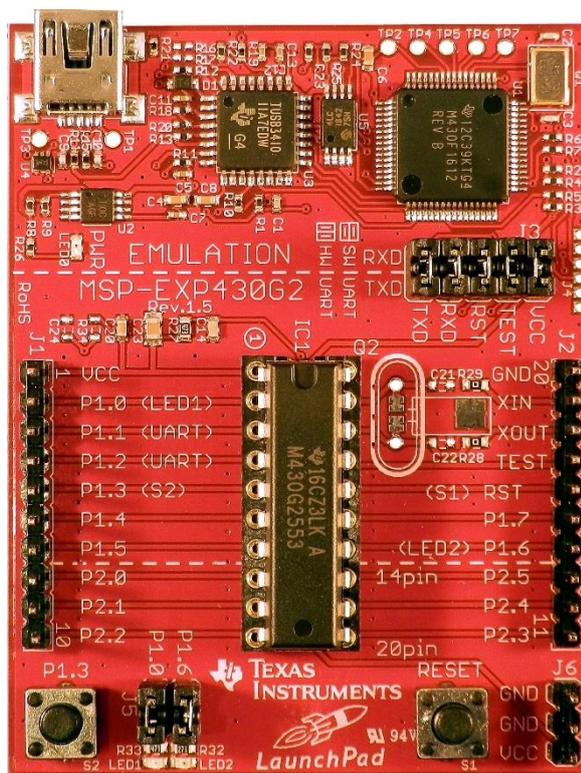
$$\theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (2.4.4)$$

2.5 MICROCONTROLADOR MSP430G2553

Foi escolhido o micro controlador TIVA C para desenvolver este projeto. Este micro controlador usa MSP430G2553, com uma arquitetura RISC de 16bits, possui uma frequência de clock de 16MHz e memória flash de 16kB e 512B de RAM.

O MSP430 contém diversos periféricos que auxiliam de eliminar diversos circuitos externos e embarca o projeto o máximo possível.

Figura 6 - Foto micro controlador MSP430G2553



Fonte: Texas Instrument(2018)

2.5.1 Conversores A/D

O conversor A/D é um sistema na qual converte um sinal analógico para um número discreto digital. O MSP430G2553 usa um A/D de 10bits, obtendo 1024 valores numéricos de resolução após a conversão. Segundo o seu *datasheet*, o conversor possui 8 entradas analógicas multiplexadas e um conversor com uma frequência de amostragem máxima de 200ksps, capaz de amostrar sinais de até 100kHz.

O A/D é usado para ler o sinal da impedância sobre teste, e é ativado pelos temporizadores do msp430.

2.5.2 Temporizadores e Contadores de Uso Geral

Os temporizadores e contadores são periféricos usados para contara tempo, gerar sinais de disparo para outros periféricos, sinais PWM e interrupções. Funcionam com um sinal de *clock* digital, com frequência ajustável, e usam esse

sinal para dividir sua frequência e obter um sinal com tempo estipulado pelo programador.

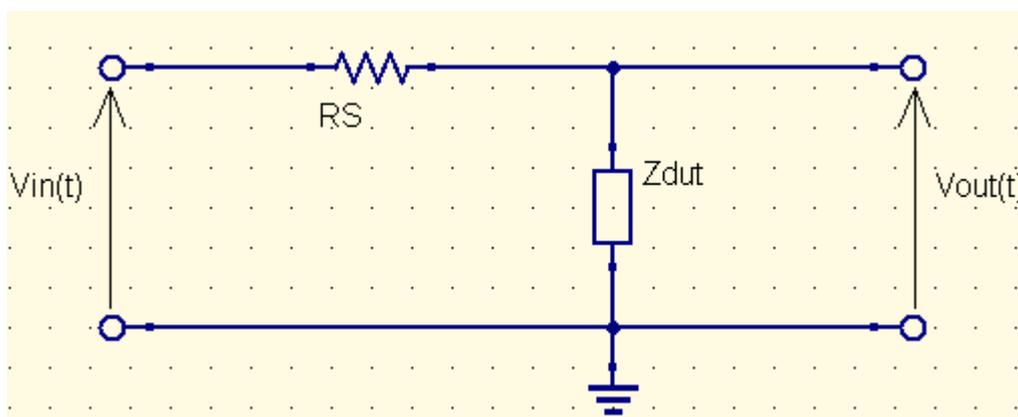
São usados para gerar o sinal de PWM usado como sinal de entrada da impedância a ser medida, além de sincronizar as medidas do lock-in defasadas de 90°.

2.5.3 Resistores de Escala

O resistor de escala é o componente responsável pelo ajuste da escala de leitura do LIA e realizar a leitura da corrente. Tanto a impedância do sensor quanto o valor do resistor de escala devem ser compatíveis, ou seja, devem ter valores próximos um em relação ao outro.

A configuração usada para o resistor de escala foi o divisor de tensão, conforme descrito com mais detalhes nos próximos capítulos. A figura 5 ilustra a influência do resistor de escala no divisor resistivo:

Figura 7 Resistor de escala na configuração de divisor de tensão



Fonte: Circuito desenhado no QUCS(2018)

Sendo RS o resistor de escala e Z_{dut} a impedância a ser medida. A equação (2.5.1) calcula a tensão de saída do divisor:

$$V_{out}(t) = V_{in} * \frac{Z_{dut}}{Z_{dut} + RS}$$

(2.5.1)

2.5.4 Portas de entrada e saída digitais

As portas digitais são controladas por diversos periféricos de 8bits, que controlam diversos aspectos, como por exemplo direção, resistores de *pull-up*, valor da saída digital, leitura da entrada digital.

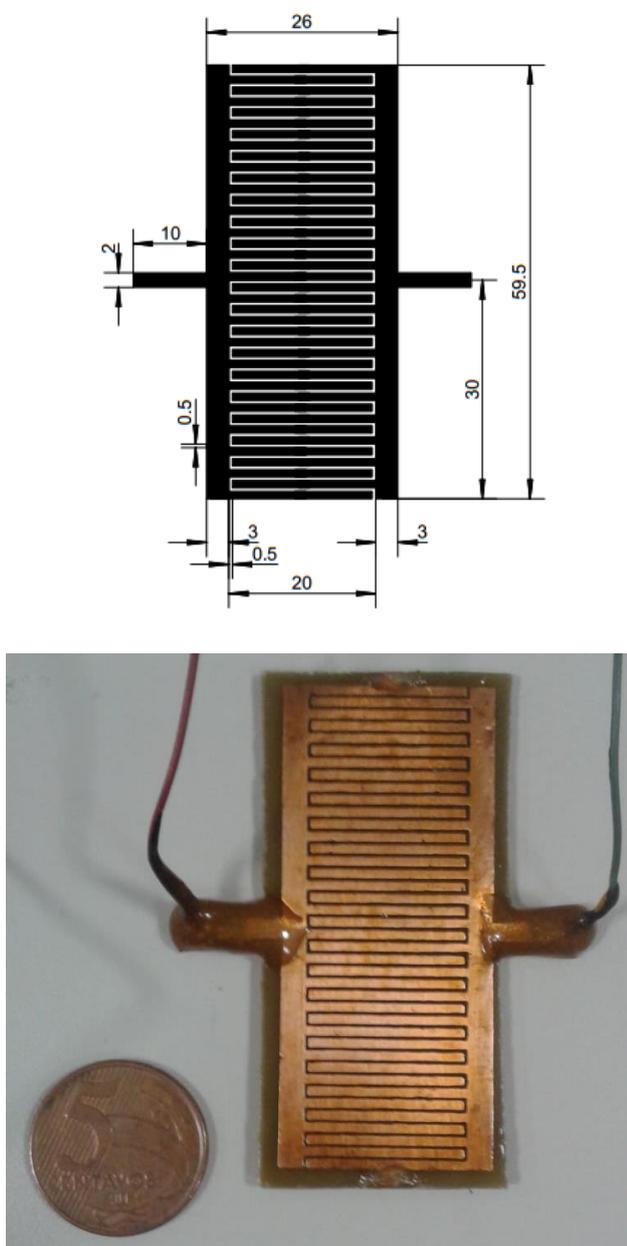
Neste projeto será usado para acionar a calibração de circuito aberto e de curto-circuito do lock-in.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 PROCEDIMENTO DE CONFECÇÃO DOS SENSORES INTERDIGITADOS

Os sensores interdigitados foram projetados usando o *software* de desenho de *layout* de circuito em placas PCB (*printable circuit board*). O seguinte sensor capacitivo foi projetado nas figuras a seguir:

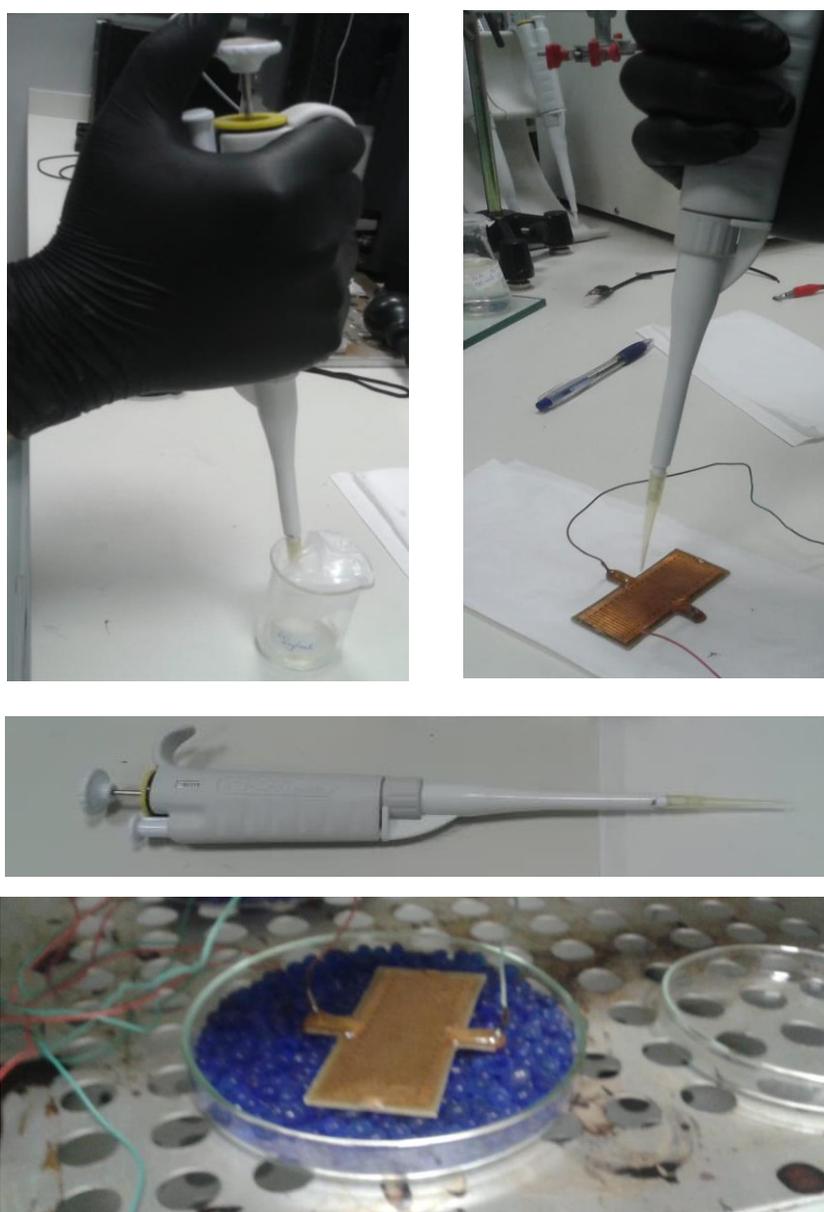
Figura 8 – Esquemático (acima) e placa fabricada (abaixo) para o sensor capacitivo proposto.



Fonte: O autor (2018).

O sensor possui largura de 20mm, 20 *fingers* e espaço de cada trilha de 0.5mm. Após feito o projeto no EAGLE, usa-se o processo de transferência térmica e perclorato de ferro para corroer. Após a corrosão foi aplicada uma camada de PVA, acetado de polivinila, um polímero sintético que reage pouco a gasolina, mas é solúvel em água. Esse polímero foi aplicado usando casting de uma solução de 30ml conforme procedimento apresentado pelo autor nas fotos da figura 7.

Figura 9 – Retirada de amostra de 30ml do polímero (à esquerda), aplicação sobre o sensor (à direita), ferramenta utilizada para aplicação do polímero (ao centro), sensor em processo de cura, aquecimento (abaixo).



Fonte: O autor (2018).

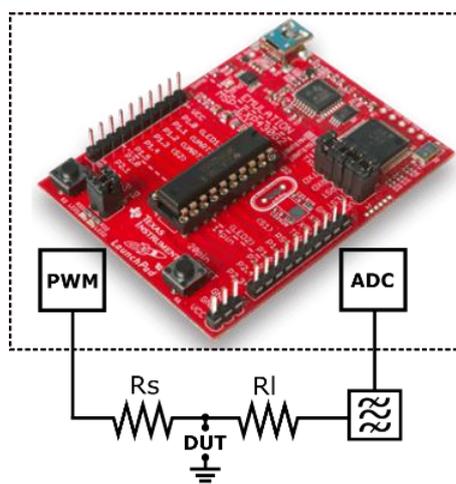
3.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO

3.2.1 Hardware

A fim de alcançar os objetivos deste trabalho, foram preparadas simulações para encontrar os componentes otimizados ao filtro proposto. Tendo isso em vista, o microcontrolador MSP430G2553 foi o dispositivo de baixo custo e consumo escolhido.

O LIA proposto consiste de um microcontrolador e um filtro passa banda. O microcontrolador possui um conversor analógico digital (ADC) de 10bits, mas com taxa de amostragem limitada (200ksps). A figura 8 apresenta a placa de desenvolvimento padrão do microcontrolador e suas conexões com os componentes do diagrama logo abaixo.

Figura 10 – Diagrama do Sistema

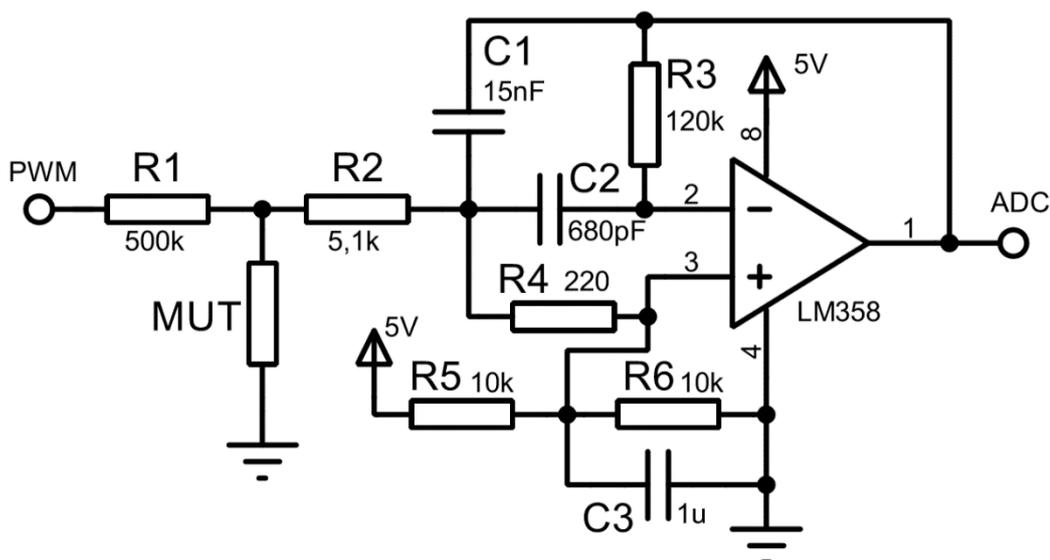


Fonte: Miyasaki et al. (2018).

Um PWM gera a frequência de referência através de uma onda quadrada usada para modular a amplitude do sinal de entrada. Então, o ADC captura as amostras do sinal de entrada de forma sincronizada com a frequência do PWM. De maneira a obter somente a frequência fundamental da onda quadrada do PWM, um filtro passa banda de segunda ordem foi projetada antes do ADC. Os resultados são então processados e enviados ao computador via Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART).

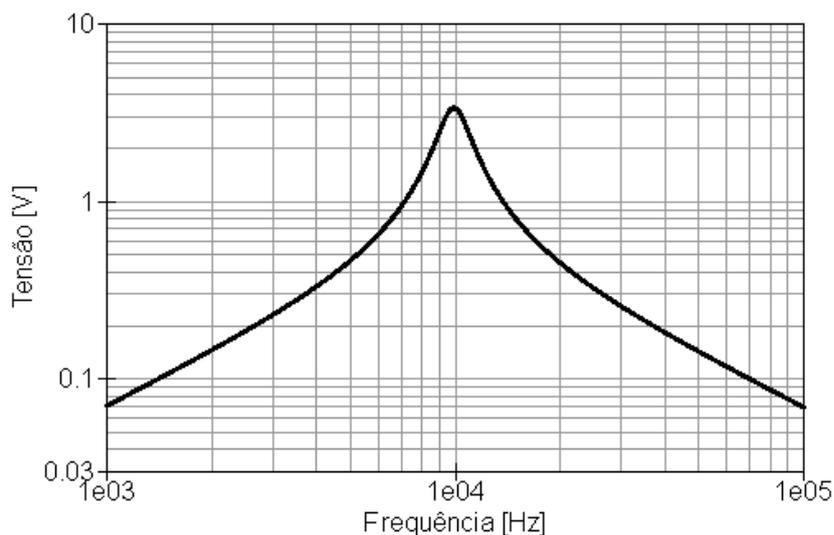
Para o projeto do filtro, a frequência escolhida foi de 10kHz com fator de qualidade de 5. O circuito resultante para o diagrama ligado à placa é apresentado na figura 9 e a resposta do filtro na frequência está apresentada no gráfico da figura 10, resultante da simulação de circuitos realizada no *software* QUCS.

Figura 11– Band-pass filter design



Fonte: O autor (2018).

Figura 12 - Resposta na frequência para a tensão de saída do filtro.



Fonte: O autor (2018).

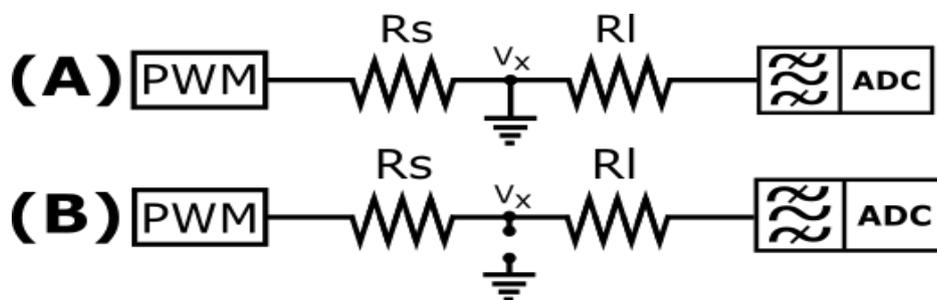
O principal objetivo do circuito é obter a impedância do material sob teste (*Material Under Test* - MUT), que no caso deste trabalho é o sensor capacitivo. No

estágio de alimentação, o sinal PWM é aplicado ao MUT através da resistência conhecida, R1, responsável por limitar a corrente provida pelo microcontrolador. O resistor R2 é fixado e representa a resistência de entrada do filtro. O MUT é posicionado entre R1 e R2 e o ponto de terra.

O circuito mede a tensão sobre a impedância desconhecida (MUT). O LIA proposto possui duas saídas, uma em fase e outra em quadratura permitindo o cálculo das componentes real e imaginária e suas relativas propriedades reativas.

Antes de medir impedância, uma rotina de calibração deve ser chamada para obter as leituras de tensão para os eventos de curto circuito e circuito aberto, como apresentado nos diagramas da figura 11A e 11B, respectivamente.

Figura 13 – Procedimentos de calibração (A) Curto circuito. (B) Circuito aberto



Fonte: Miyazaki et al. (2018)

Assim, a impedância desconhecida é conectada e V_x medido. Da análise básica de circuito e com o uso das calibrações descritas, a impedância desconhecida é calculada conforme equação abaixo.

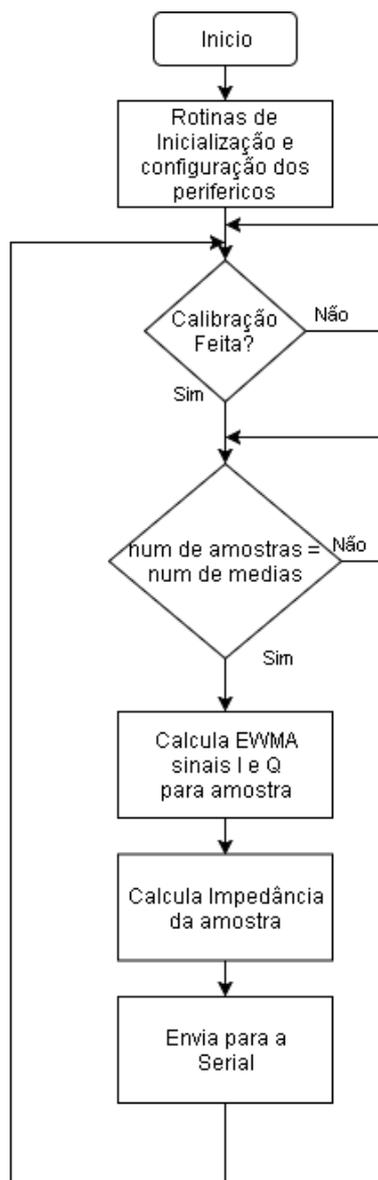
$$Z_x = \frac{R_l \cdot R_s (V_{Rx} - V_{Rx=0})}{R_l + R_s (V_{Rx=\infty} - V_{Rx})} \quad (3.2.1)$$

Onde R_l , R_s , V_{Rx} , $V_{Rx=0}$, $V_{Rx=\infty}$ são, respectivamente,: Resistência de entrada do filtro (R2), resistência de entrada da fonte de sinal do PWM (R1), tensão sobre a impedância desconhecida (V_x), tensão medida no evento de curto circuito e, por fim, tensão medida no evento de circuito aberto. Todos os cálculos são feitos considerando a teoria de números complexos.

3.2.2 Firmware

O sistema de medição foi projetado usando o MSP430G2553, com auxílio de uma IDE (*Integrated Development Environment*). Foi usado a IDE do IAR systems. As rotinas do *firmware* foram separadas em 3 fluxogramas. O primeiro fluxograma é ilustrado pela figura 12 a seguir:

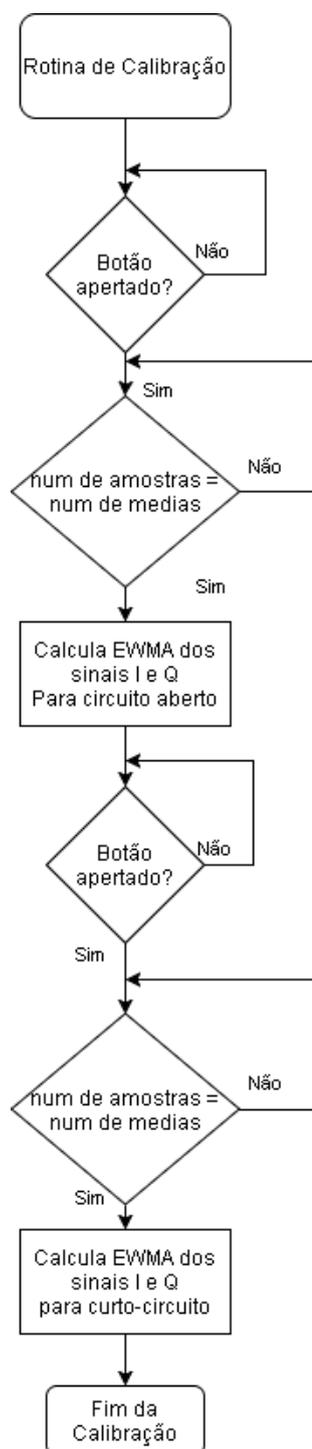
Figura 14 - Fluxograma da rotina principal



Fonte: O Autor (2018)

A rotina principal inicializa todas as variáveis, configura os periféricos e aciona as interrupções. Após este passo ela aguarda a rotina de calibração terminar para poder realizar a leitura da impedância. A figura 13 ilustra o fluxograma da rotina de calibração:

Figura 15- Fluxograma da rotina de calibração

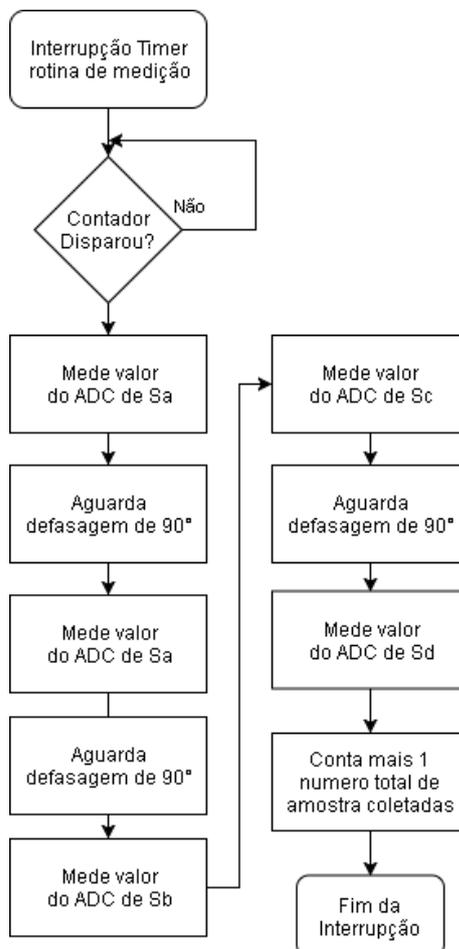


Fonte: O Autor (2018)

Na rotina de calibração, o sistema aguarda o usuário aperta um botão para indicar para o sistema que a calibração está pronta para começar para o circuito aberto. Após confirmação, o sistema aguarda até o número de amostra ser igual ao estipulado para realizar o cálculo das medias. O número de medias é de 64.

Paralelamente a essas duas rotinas, o sistema utiliza-se da interrupção do timer que gera o sinal PWM para realizar as medidas das amostras. Essa interrupção é ilustrada pelo fluxograma da figura 14:

Figura 16 - Fluxograma da rotina de interrupção do Timer



Fonte: O Autor (2018)

A rotina acima aguarda o contador disparar a interrupção para começar o processo de medida. A primeira medida é valor de Sa, na qual o sistema aciona o A/D para realizar a captura e conversão do sinal para digital e armazena o valor medido. Após a medida o sistema espera dar a defasagem de 90° e repete o processo de leitura. Quando o sistema mede a última amostra, ele incrementa em 1 o contador de número de amostra para que a rotinas principais e calibração realizem a confirmação das 64 medias estipuladas.

Após confirmação do valor contado e estipulados serem iguais então o sistema calcula o valor das medias moveis ponderadas para os sinais em fase e para o em quadratura, na condição de circuito aberto.

O sistema aguarda o usuário preparar o sistema para a calibração de curto-circuito, quando apertado o botão de confirmação, o sistema repete o processo do fluxograma da figura 15 de aquisição das amostras até calcular a média móvel ponderada para os sinais em fase e para o em quadratura, na condição de curto-circuito.

Com termino da rotina de calibração da figura 14, o sistema já pode realizar a leitura da impedância do sensor. O sistema aguarda as medidas serem feitas da rotina de interrupção e após termino calcula o valor da impedância do sensor e envia esse dado para a porta serial. O sistema volta até a verificação da calibração e repete o processo de leitura. Caso o usuário queria refazer a calibração, basta apertar o botão de confirmação que o sistema irá recalibrar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os principais resultados encontrados na análise do sensor capacitivo e do *Lock-In* e a discussões dos resultados.

4.1 LEITURA DE COMPONENTES DISCRETOS USANDO O *LOCK-IN*

Foram realizadas leituras de componentes discretos, como resistores e capacitores, para verificar a eficaz do *Lock-In* realizar a leitura dos valores destes. Foi usado como comparação o LCR *Meter Agilent 4263B*. As tabelas 3, 4 e 5 trazem os valores de comparação entre o *Lock-In* e o LCR meter:

Tabela 1 - Valores de leitura entre o *Lock-In* e o LCR *Meter Agilent 4263B*

Nominal [pF]	Capacitância	
	<i>Lock-In</i> [pF]	LCR [pF]
4.700	5.350	5.310
5.600	6.460	6.133
15.000	15.700	15.330
39.000	38.820	38.474
68.000	68.530	67.776
220.000	222.620	216.470
270.000	265.800	257.850
330.000	322.430	312.450
390.000	359.620	346.500
470.000	452.590	436.840
560.000	538.510	518.800

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 2 - Tabela de erros relativos do lock-in e LCR

Capacitância Nominal(pF)	Erro Relativo Lock-in	Erro Relativo LCR
4.700	-12%	-11%
5.600	-13%	-9%
15.000	-4%	-2%
39.000	0%	1%
68.000	-1%	0%
220.000	-1%	2%
270.000	2%	5%
330.000	2%	6%
390.000	8%	13%
470.000	4%	8%
560.000	4%	8%

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 3 - Valores de impedância medidos dos capacitores

Impedância dos capacitores a 10kHz			
<i>Lock-In</i>		LCR	
Modulo (k Ω)	Fase ($^{\circ}$)	Modulo (k Ω)	Fase ($^{\circ}$)
3038.179	-87.650	3004.800	-89.920
2516.389	-87.320	2594.500	-89.740
1032.181	-88.410	1037.700	-89.850
417.193	-88.730	413.660	-89.810
236.531	-88.640	234.840	-89.830
73.011	-87.720	73.259	-89.690
61.348	-87.580	61.645	-89.530
50.472	-87.390	50.975	-89.420
45.227	-88.340	45.762	-89.490
35.956	-87.390	36.478	-89.490
30.248	-87.140	30.460	-89.120

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 4 - Valores de impedância dos resistores

Impedância dos resistores				
Resistores Nominal (k Ω)	<i>Lock-In</i>		LCR	
	Modulo (k Ω)	Fase ($^{\circ}$)	Modulo (k Ω)	Fase ($^{\circ}$)
100.00	84.81	0.00	100.06	-0.02
150.00	135.18	0.03	149.68	-0.26
270.00	256.92	0.16	267.35	-0.35

330.00	318.39	0.15	325.87	-0.55
470.00	465.98	0.19	468.30	-0.58
650.00	658.23	-0.02	662.70	-1.30
820.00	822.76	-0.27	827.75	-1.53
1000.00	977.54	-1.89	987.21	-1.47
1500.00	1503.29	-1.18	1502.00	-2.70
2200.00	2078.18	-13.16	2200.10	-4.00

Fonte: - O Autor (2018)

Tabela 4 - Tabela de erros relativos do lock-in e LCR

Resistencia Nominal(k Ω)	Erro Relativo Lock-in	Erro Relativo LCR
100.00	18%	0%
150.00	11%	0%
270.00	5%	1%
330.00	4%	1%
470.00	1%	0%
650.00	-1%	-2%
820.00	0%	-1%
1000.00	2%	1%
1500.00	0%	0%
2200.00	6%	0%

Fonte: O Autor (2018)

Analisando as tabelas 2 e 4, pode-se verificar que o lock-in apresentou um erro relativo abaixo de 6% para maioria dos componentes, porem determinados valores o erro alcança a casa dos 10%. Isso acontece por conta dos resistor de escala que deve ser compatível com impedância que irá ser medida.

4.2 MEDIDAS COM GASOLINA

As medidas de foram feitas no Laboratório de Inovação Tecnológica em Sensores (LITS). O laboratório forneceu diversos instrumentos de medida de volume, como Becker, provetas graduadas, água destilada e etc. Além de ser equipado com uma capela com exator, de extrema importância para evitar a criação de atmosferas explosivas.

4.2.1 Medindo o teor alcoólico usando NBR 13992

A Norma Brasileira de número 13992 descreve o experimento para determinar o teor alcoólico da gasolina automotiva. Para a realização do

experimento foi usado uma solução salina de 100ml de água destilada misturada com 10g de sal, obtendo uma solução de 10% p/v. Insira-se 50ml de gasolina em uma proveta graduada de 100ml e completa-se o restante dos 100ml com a solução salina. Espera-se um tempo de 10 a 20 minutos até as duas fases separaram. Após a separação, mede-se o volume aquoso. A figura 15 ilustra o resultado do experimento:

Figura 15 - Determinação do teor alcoólico usando a NBR 13992



Fonte: O Autor (2018)

O volume encontrado de solução aquoso foi de 63ml. Usa-se a equação (4.3.1) para o cálculo do teor alcoólico da gasolina.

$$AEAC = [(A - 50) * 2] + 1 \quad (4.3.1)$$

Sendo AEAC o volume de etanol, A o volume da solução aquosa. O valor calculado foi de 27ml, verificando que o combustível usado no projeto está nos padrões estipulados pela legislação brasileira.

4.2.2 Misturando Gasolina tipo C com Etanol Hidratado

Para medir diversas concentrações de etanol na gasolina, foram feitas misturas usando Gasolina tipo C e EHC. A tabela a seguir mostra quais percentuais foram escolhidos:

Tabela 5 - Misturas de Gsolina e Etanol a para ser medidias

% Gasolina	% Etanol	% Água	ϵ_r
73%	27%	0%	7.94
61%	38%	1%	10.90877
49%	50%	1%	13.87753
37%	61%	2%	16.8463
25%	72%	3%	19.81507
13%	84%	3%	22.78384
0%	96%	4%	25.97945

Fonte: O Autor(2018)

Como foi usado EHC ao invés de EAC, a mistura possui um teor hídrico originado do etanol. A primeira mistura e a última não precisam ser feitas, pois consistem simplesmente de gasolina do tipo C pura e Etanol Hidratado respectivamente. O ϵ_r da mistura é a média de cada dielétrico presente na mistura.

Foram usadas provetas graduadas, béquer, funil e vidros com tampa para fazer as misturas. Os resultados das misturas podem ser observados nas figuras 17 e 18 a seguir:

Figura 17 - Realização das misturas de gasolina com etanol usando a proveta de 100ml , Becker e um funil



Fonte: O Autor(2018)

Figura 18- Resultado final das misturas, armazenadas em recipientes de vidro com tampa de rosqueamento



Fonte: O Autor(2018)

Ao observar a figura 17, nota-se a coloração das misturas diminuindo quanto menos gasolina é presente na mistura. Como a gasolina e o etanol são líquidos incolores, adiciona-se corante na gasolina como forma de diferenciar

diferentes tipos de combustíveis. É um método que pode ser usado para determinar se houve fraude com a intensidade da cor.

Porém é pouco confiável, pois não existe um nível de cor amarela exigido, somente de que deve ser segundo ANP de incolor até amarelado.

4.2.3 Medição da impedância da gasolina.

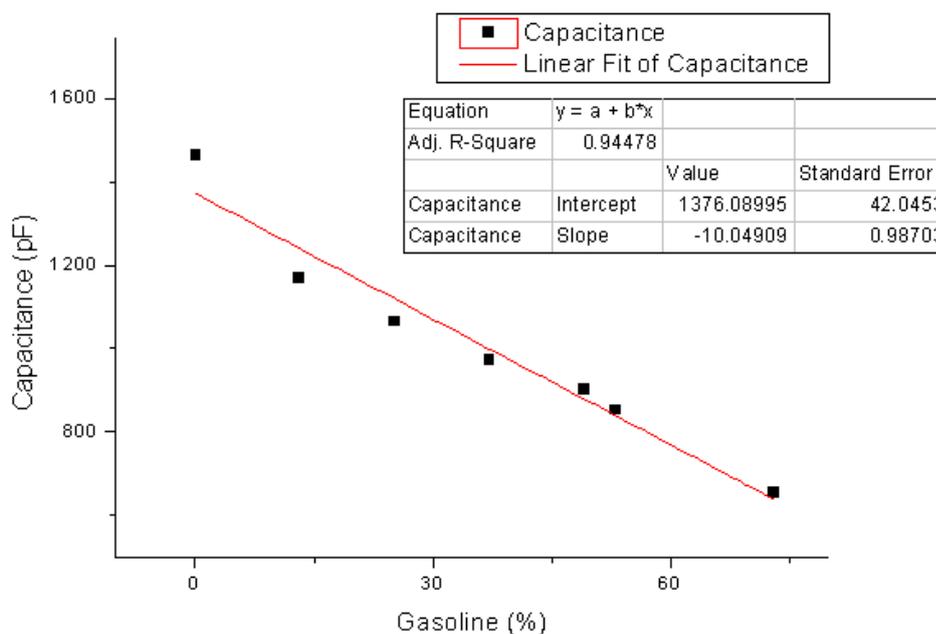
Insira-se o sensor dentro dos recipientes das misturas. É recomendado sempre agitar os recipientes, pois pode ocorrer a separação entre a gasolina e o etanol se permanecerem parados por um longo tempo. Realiza-se as medidas das soluções usando o LCR meter e o *Lock-In* e apresentados os resultados nas tabelas 6 e 7 e os gráficos das retas linearizadas nas figuras 19 e 20:

Tabela 6 - Leitura da impedância do sensor capacitivo das misturas de Gasolina tipo C e Etanol Hidratado (EHC) usando o LCR *Meter Agilent* 4263B.

% Gasolina	% Etanol	% Água	Impedância(k Ω)	Fase	Capacitância(pF)
73%	27%	0%	278.50	-59.94	660.2786
61%	38%	1%	195.04	-71.87	858.6408
49%	50%	1%	181.03	-76.00	906.0777
37%	61%	2%	173.69	-69.38	979.0364
25%	72%	3%	161.12	-67.30	1070.746
13%	84%	3%	150.40	-64.20	1175.374
0%	96%	4%	134.72	-53.47	1470.204

Fonte: O Autor(2018)

Figura 19 - Grafico da reta linearizada da tabale 6



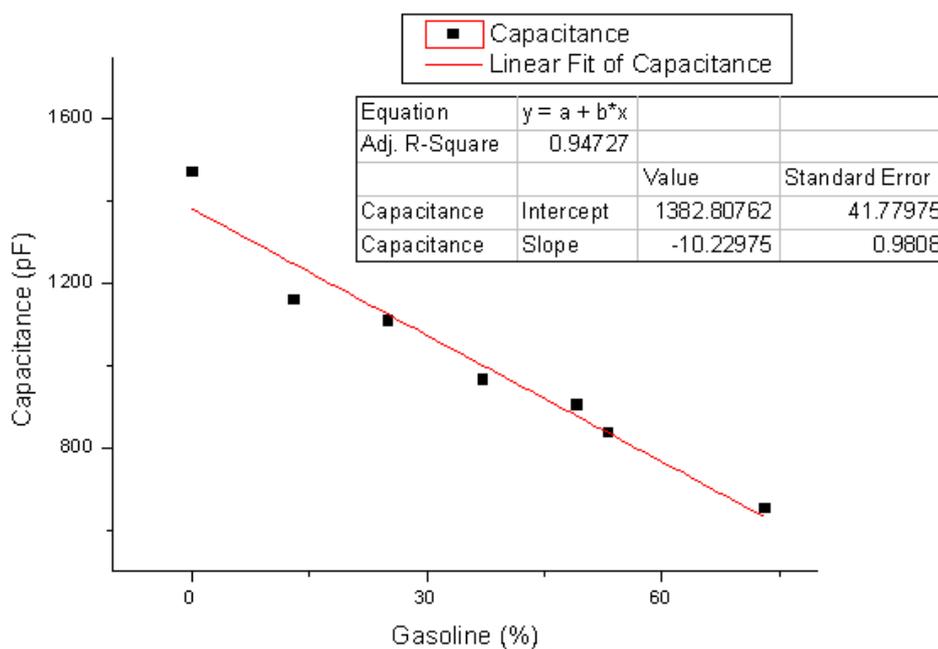
Fonte: O Autor (2018)

Tabela 7 - Leitura da impedância do sensor capacitivo das misturas de Gasolina tipo C e Etanol Hidratado (EHC) usando o *Lock-In*.

% Gasolina	% Etanol	% Água	Impedância(k Ω)	Fase	Capacitância(pF)
73%	27%	0%	285.46	-58.14	656.4371
61%	38%	1%	202.20	-69.30	841.4362
49%	50%	1%	187.30	-69.50	907.1826
37%	61%	2%	179.47	-66.10	969.977
25%	72%	3%	161.86	-62.20	1111.586
13%	84%	3%	157.10	-60.60	1162.838
0%	96%	4%	138.80	-51.13	1472.76

Fonte: O Autor (2018)

Figura 20 - Grafico da reta linearizada da tabele 7



Fonte: O Autor (2018)

4.2.4 Discussão dos resultados

Nos gráficos da figura 16 e 17, o primeiro comportamento a se notar é a mudança linear da capacitância ao misturar EHC na gasolina. O segundo a se notar é o desvio padrão obtido no ponto de interceptação da reta linear, ambos em torno de 40pF. Como a última amostra foi realizada usando somente EHC, outros elementos presentes na gasolina como enxofre e antidetonantes. Com a equação da reta, o coeficiente angular fornece um resultado satisfatório, com valor de $a = -10.05pF/\%$ para o LCR e $a = -10.02pF/\%$ para o lock-in, tornando o sistema sensível a mudanças de etanol na gasolina.

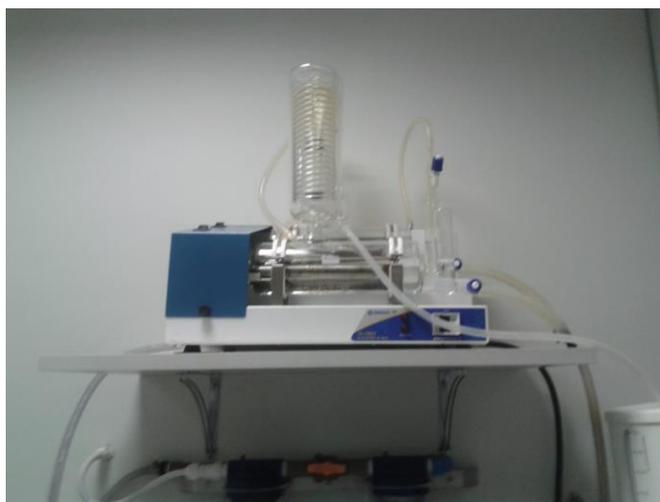
4.3 MEDIDAS COM ETANOL

As medidas de foram feitas no Laboratório de Inovação Tecnológica em Sensores (LITS). Assim como no caso da gasolina, foi usado a capela equipada com exaustor.

4.3.1 Misturando Etanol Hidratado com Água destilada

Foi usado para realizar as misturas, os mesmos equipamentos da anterior, usando a tabela 8 como referência para obter as diversas misturas de EHC e água destilada. A água destilada foi fornecida pelo LITS, usado o destilador instalado no laboratório.

Figura 18 - Destilador de Água



Fonte: LITS

Tabela 8 - Misturas de Etanol Hidratado e água destilada a para ser medidas

%Etanol	%Água	er
96%	4%	26
80%	20%	34
60%	40%	44
40%	60%	54
20%	80%	64
0%	100%	74

Fonte: O Autor (2018)

4.3.2 Medição da impedância do Etanol Hidratado.

Foi inserido o sensor nos recipientes preparados para as misturas de da tabela 9. O sensor usado foi o revestido de PDMS, já que o revestimento de PVA dissolveria na água. Realiza-se as medidas das soluções usando o LCR meter e o

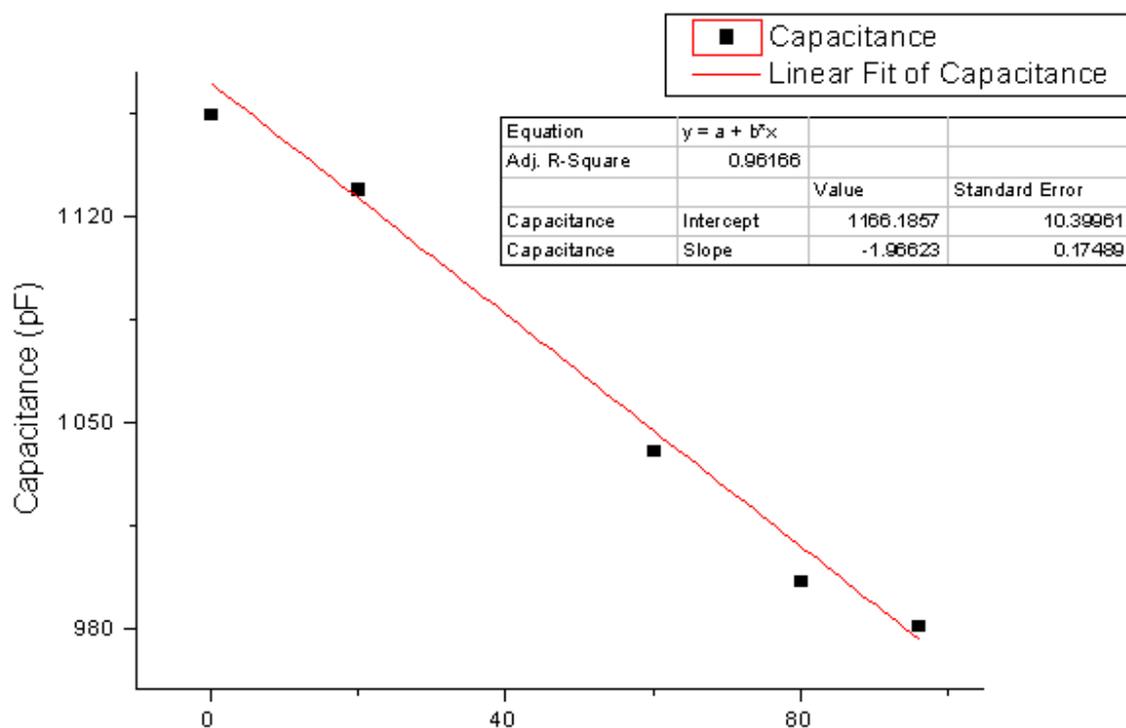
Lock-In e apresentados os resultados nas tabelas 9 e 10 e os gráficos das retas linearizadas nas figuras 21 e 22:

Tabela 9 - Leitura da impedância do sensor capacitivo das misturas de Etanol Hidratado (EHC) e água destilada usando o LCR Meter Agilent 4263B.

%Etanol	%Água	Impedância(kΩ)	Fase	Capacitância(pF)
96%	4%	162.6	-85.52	981.8124586
80%	20%	160.3	-84.71	997.103647
60%	40%	154.5	-81.61	1041.272978
40%	60%	146.9	-77.57	1109.42905
20%	80%	144.7	-76.75	1129.976763
0%	100%	140.000	-79.68	1155.51428

Fonte: O Autor (2018)

Figura 21 - Gráfico da reta linearizada da tabela 9



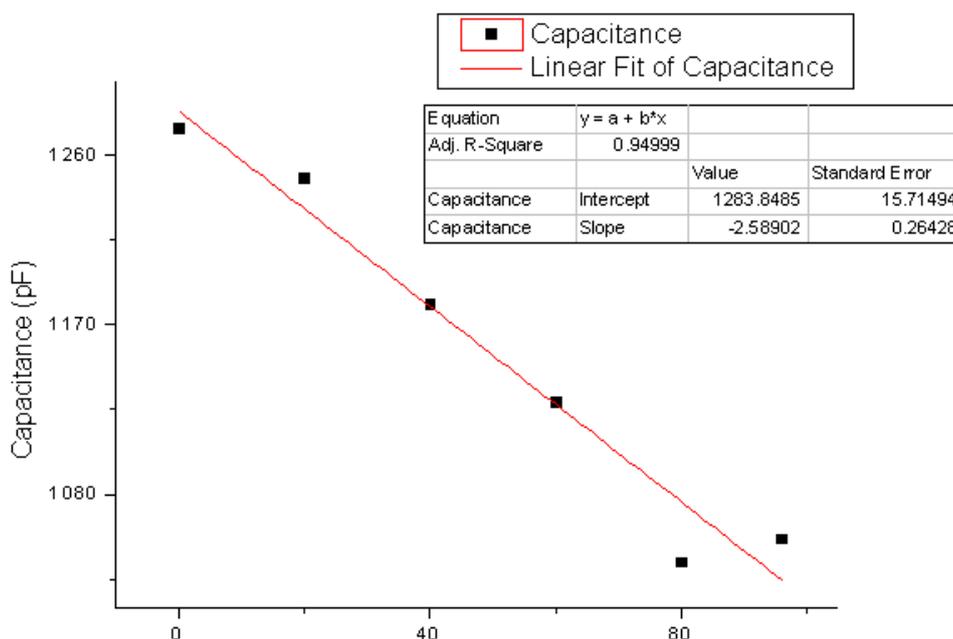
Fonte: O Auto (2018)

Tabela 10 - Leitura da impedância do sensor capacitivo das misturas de Etanol Hidratado (EHC) e água destilada usando o *Lock-In*.

%Etanol	%Água	Impedância(k Ω)	Fase	Capacitância(pF)
96%	4%	151	-85.52	1057.236462
80%	20%	153	-84.71	1044.677873
60%	40%	142.4	-81.61	1129.751932
40%	60%	137.9	-77.57	1181.835587
20%	80%	131	-76.75	1248.149906
0%	100%	127.8	-77.60	1275.088758

Fonte: O Autor (2018)

Figura 22 - Gráfico da reta linearizada da tabela 10



Fonte: O Autor (2018)

4.3.3 Discussão dos resultados

Nos gráficos da figura 19 e 20, obteve-se a mesma resposta linear da gasolina, porém o coeficiente angular da reta linearizada ficou $a = -1.97pF/\%$ para o LCR e $a = -2.59pF/\%$. Nesta condição o sistema operaria em um ponto crítico, tornando a confiabilidade do sistema baixa. O motivo deste resultado é o fato do lock-in estar operando em 1kHz. No caso da gasolina, não há uma variação da constante de permissividade elétrica. Porém segundo Hassion e Cole (1953) o etanol tem uma permissividade complexa, tornando não ideal para análise em frequências mais altas.

5 CONCLUSÃO

O sistema de detecção de fraudes ainda está incompleto, por apresentar uma resposta insatisfatória para o etanol. Uma análise mais detalhada variando a frequência deve ser feita para determinar a resposta do sensor imerso no etanol, usando um VNA (*vector Network Analyzer*). Além de uma análise na temperatura e agitação cinético usando um termômetro e agitador magnético para determinar a variação da capacitância em função da temperatura e agitação.

Para o caso da gasolina, os dados obtidos demonstram uma viabilidade para o uso de sensores capacitivos na análise da composição do combustível. Um estudo de outras propriedades, por exemplo a octanagem da gasolina usando a capacitância.

O lock-in de subtração provou-se uma ferramenta viável de leitura de impedâncias, como mostram as tabelas de erros relativos. Como proposta para trabalhos futuros, implementar um sistema de fundo de escala, ou seja, ajustar automaticamente o resistor de escala para se adequar a impedância a ser medida.

E por último uma análise mais detalhada das camadas de isolamento, realizando um estudo da duração das camadas com diferentes polímeros, propriedades elétricas e respostas a soluções bastante corrosivas e solventes. O PVA ainda não é o isolante ideal, pois como o Etanol possui um percentual de água, a camada se dissolve lentamente durante as medidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível ANP disponível em <http://legislacao.anp.gov.br/> acesso: nov. 2018.

ALBUQUERQUE, M. P.; RESENDE, L. C.; GONZALE, J.L.; NUNES, R. A. A.; BOCHNER, M. (2008). **O Amplificador Lock-In**. Coordenação de Atividades Técnicas, CAT. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, CBPF.

Alley, G. D. (1970). **Interdigital Capacitors and Their Application to Lumped-Element Microwave Integrated Circuits**. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 18(12), 1028–1033. doi:10.1109/tmtt.1970.1127407

ANGKAWISITPAN, N.; MANASRI, T. **Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor**. Measurement Science Review, v. 12, n. 1, p. 8-13, 2012.

ARIK, E; ALTAN, H.; ESENTURK, O. (2014). **Dielectric properties of ethanol and gasoline mixtures by terahertz spectroscopy and an effective method for determination of ethanol content of gasoline**. The Journal of Physical Chemistry A. Volume 118, edição 17.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13992 - Gasolina automotiva - Determinação do teor de álcool etílico anidro combustível (AEAC) Rio de Janeiro, 1997.

BAXTER, Larry K. (1997). **Capacitive Sensor Basics**. *Capacitive Sensors: Design and Applications*, IEEE, pp.

CHETPATTANANONDH, Kanadit et al. A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 209, p. 175-182, 2014.

GUAN, L. et al. Determination of octane numbers for clean gasoline using dielectric spectroscopy. *Fuel*, v. 88, n. 8, p. 1453-1459, 2009.

HASSION, F. X.; COLE, RH1955. Dielectric properties of liquid ethanol and 2-propanol. *The Journal of Chemical Physics*, v. 23, n. 10, p. 1756-1761, 1955.

IGREJA, Rui; DIAS, C. J. Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 112, n. 2-3, p. 291-301, 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL INMETRO - RELATÓRIO FINAL – Nº 002/2010 “Comparação interlaboratorial de condutividade eletrolítica em etanol combustível” disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/pdf/rf-etanol-comb.pdf> acesso em: nov. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL INMETRO NORMA Nº NIE-DIMEL-093 Procedimento para verificação de densímetro termocompensado Rio de Janeiro Junho, 2007.

KIRK, D. W. Conductivity of gasoline-ethanol-water mixtures. *Fuel*, v. 62, n. 12, p. 1512-1513, 1983.

MAMISHEV, Alexander V. et al. Interdigital sensors and transducers. *Proceedings of the IEEE*, v. 92, n. 5, p. 808-845, 2004.

MARKEVICIUS, V. et al. The soil moisture content determination using interdigital sensor. *Elektronika ir Elektrotechnika*, v. 18, n. 10, p. 25-28, 2012.

MIYAZAKI, D. R.; RIBEIRO, E. P.; BONFIM, M. J. C.; FERRAZ, R. S.; FONSECA, R. S. (2018). Microcontroller-based lock-in amplifier: A comparative study. *Chip in the Pampa, SFORUM – Universidade Federal de Pelotas – GACI*.

Paul A. Remillard, Littleton, Mass.; Michael C. Amorelli, Danville, N.H. (1993). U.S. Patent No. 5,210,484. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

RUKAVINA, Aleksandra Vuković. Non-invasive liquid recognition based on interdigital capacitor. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 228, p. 145-150, 2015.

RUKAVINA, Aleksandra Vuković. Hand-held unit for liquid-type recognition, based on interdigital capacitor. *Measurement*, v. 51, p. 289-296, 2014.

SHIRKE, R.M.; CHAUDHARI, A.; MORE, N. M.; PATIL, P.B. (2000). **Dielectric measurement on Methyl Acetate-Alcohol mixtures at 288, 298, 308 and 318 K using the Time Domain Technique.**

TIAN, Lu et al. Optical property and spectroscopy studies on the selected lubricating oil in the terahertz range. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, v. 52, n. 12, p. 1938-1943, 2009.