

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LEANDRO PAITER

**SENSOR PARA ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-
QUÍMICAS DE ÓLEO DE SOJA POR MEIO DA CONSTANTE
DIELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2015

LEANDRO PAITER

**SENSOR PARA ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE
ÓLEO DE SOJA POR MEIO DA CONSTANTE DIELÉTRICA**

Trabalho de Dissertação apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, do Departamento de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Galvão
Co-orientador: Prof. Dr. Sergio Luiz Stevan Junior

PONTA GROSSA

2015

P149 Paiter, Leandro

Sensor para análise das características físico-químicas de óleo de soja por meio da constante dielétrica. / Leandro Paiter. – Ponta Grossa, 2015.

87 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Galvão

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

1. Óleos vegetais. 2. Detectores. 3. Dielétricos. 4. Engenharia elétrica. I. Galvão, José Ricardo. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III. Título.

CDD 621.38



TERMO DE APROVAÇÃO

SENSOR PARA ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE ÓLEO DE SOJA POR MEIO DA CONSTANTE DIELÉTRICA

por

LEANDRO PAITER

Esta Dissertação foi apresentada em 27 de março de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. O(a) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dr. José Ricardo Galvão
Prof.(a) Orientador(a)

Dr. Sergio Luiz Stevan Junior
Prof.(a) Co-orientador(a)

Dra. Rosane Falate

Dr. Eduardo Sidinei Chaves

Dr. Hugo Valadares Siqueira

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha família, pelos momentos de ausência.

RESUMO

Paiteir, Leandro. **Sensor para Análise das Características Físico-Químicas de Óleo de Soja por Meio da Constante Dielétrica**. 2015. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

Este trabalho propõe a utilização de um sensor capacitivo para a determinação da constante dielétrica, para caracterizar amostras de óleo vegetal antes e após o processo de fritura. Nos ensaios, a fritura foi simulada pelo aquecimento do óleo submetido a ciclos de aquecimento e resfriamento. A partir das medidas da constante dielétrica do óleo foi feita a correlação desta grandeza com o resultado das análises físico-químicas. Para determinar a constante dielétrica das amostras, foram construídos dois sensores: o sensor I permite analisar a capacitância das amostras até a temperatura máxima de 120 °C e o sensor II permite análises de até, no máximo, 250 °C. A principal diferença entre os sensores I e II está na temperatura de trabalho dos materiais empregados na sua construção. Os resultados obtidos mostram que, no ciclo de aquecimento, a constante dielétrica das amostras aumentou seu valor inicial e, no resfriamento, a curva de diminuição da constante dielétrica foi diferente daquela obtida no aquecimento. Após cada ciclo completo de aquecimento e resfriamento, o valor da constante dielétrica sofreu aumento, indicando uma alteração permanente nas propriedades físico-químicas das amostras. A verificação da alteração permanente foi confirmada pela análise físico-químicas das amostras (índice de acidez, índice de iodo, índice de refração e viscosidade) e a correlação obtida com a constante dielétrica. Para isso foi coletado 10 ml de cada amostra analisada. Os resultados obtidos sugerem que a medição da constante dielétrica pode ser um método rápido e com menores custos para caracterizar óleos vegetais alimentares submetidos a variações de temperatura entre 20 e 250 °C como, por exemplo, quando utilizados em frituras. A aplicação desta análise simples poderá ser útil na avaliação da destinação/reciclagem do óleo vegetal residual de processos de fritura.

Palavras-chave: Óleo Vegetal. Sensor. Capacitância. Constante Dielétrica.

ABSTRACT

Paiter, Leandro. **Sensor for Analysis of Physical and Chemical Characteristics of Soybean Oil by Means of Dielectric Constant**. 2015. 87 p. Working Master Course Completion in Electrical Engineering - Federal Technological University of Paraná, Ponta Grossa/PR - Brazil, 2015.

This paper proposes the use of a capacitive sensor for determining the dielectric constant to characterize vegetable oil samples before and after the frying process. In tests, the fry was simulated by heating oil subjected to heating and cooling cycles. From measuring the dielectric constant of the oil was made the correlation of this magnitude with the result of physical and chemical analysis. To determine the dielectric constant of the samples, two probes were constructed: a sensor I can analyze the capacitance of the samples until the maximum temperature of 120 ° C and the sensor analyzes II allows up to a maximum of 250 ° C. The difference between the sensors I and II is in the working temperature of the materials used in its construction. The results show that in the heating cycle, the dielectric constant of the sample and its initial value increased in the cooling curve of the decrease of the dielectric constant is different from that obtained on heating. After each complete cycle of heating and cooling, the dielectric constant value was increased, indicating a permanent change in the physicochemical properties of the samples. The verification of the permanent change was confirmed by physicochemical analysis of samples (acid value, iodine value, refractive index and viscosity) and the correlation obtained in the dielectric constant. To this was collected 10 ml of each sample analyzed. The results suggest that the dielectric constant measuring method can be rapid and economically to characterize edible vegetable oils subjected to temperature variations between 20 and 250 ° C, for example, when used for frying. The application of this simple analysis can be useful in assessing the allocation / recycling of waste vegetable oil frying processes.

Keywords: Vegetable Oil. Sensor. Capacitance. Dielectric Constant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Capacitância Placas Finitas e Paralelas.	24
Figura 02 - Ilustração de um Sensor Capacitivo de Placas Paralelas, onde (A) indica uma possível variação da distância entre as placas; (B) indica uma possível variação da superfície comum entre as placas; e (C) a alteração do elemento dielétrico entre as placas.	26
Figura 03 - Circuito RC.....	28
Figura 04 - Simulação Circuito RC com Capacitância em 1 nF.....	29
Figura 05 - Simulação Circuito RC com Capacitância em 10 nF.....	29
Figura 06 - Circuito de medição do sensor capacitivo, simulado com PSIM®	30
Figura 07 - Valores da tensão de saída para simulação com o Psim® do circuito mostrado na Figura () com C1 = 1nF.	31
Figura 08 - Valores da tensão de saída para simulação com o Psim® do circuito mostrado na Figura () com C1 = 10nF.	32
Figura 09 - Circuito de Leitura sensores capacitivos com CI LM555 em sua configuração de oscilador astável.	33
Figura 10 - Diagrama de blocos interno de um CI LM555.....	34
Figura 11 - Imagem do Arduino UNO.....	37
Figura 12 - Placa do Circuito de Aquisição Projetada com a Ferramenta Eagle ®. ...	39
Figura 13 - Imagem da placa do Circuito de Aquisição de dados do sensor.....	39
Figura 14 - Circuito de Medição do Termopar	40
Figura 15 - Esboço do protótipo do sensor desenvolvido: (A) Visão lateral; (B) vista lateral de uma das placas (vista superior); e (C) visão alargada do espaçador de placas (raio r_2) e furo central (raio r_1).	43
Figura 16 - Circuito equivalente do Sensor Capacitivo.....	44
Figura 17 - Esboço do protótipo do sensor II, na figura não são mostradas as placas de latão utilizadas no protótipo do sensor. (A) Sensor Vertical; (B) Sensor Horizontal; (C) Isolantes do Sensor.....	48
Figura 18 - (A) Imagem do protótipo do sensor II; (B) Imagem do arranjo utilizado para estabelecer a associação em paralelo no sensor II.	49
Figura 19 - Imagem do protótipo do Sensor II semidesmontado.....	50
Figura 20 - Circuito de Medição do Temopar para Amplificação da Tensão de Saída	51
Figura 21– Processo Automatizado de Medição de Capacitância, Temperatura Ambiente e do Óleo Vegetal Para os Primeiros 15 Segundos.	52
Figura 22 – Dados Ajustados para Armazenamento: Capacitância [nF]; Temperatura Ambiente [°C]; Temperatura Óleo Vegetal [°C].	53
Figura 23 - Sensor Capacitivo I sendo mergulhado no óleo vegetal	56
Figura 24 - Imagem do sensor II mergulhado no interior do recipiente contendo uma amostra de óleo.....	58
Figura 25 - Imagem dos frascos contendo amostras de óleo virgem e coletas após os nove primeiros ciclos de aquecimento e resfriamento (posicionados da esquerda para a direita).	59

Figura 26 - Constante dielétrica relativa em função da temperatura para ciclos de aquecimento e resfriamento da amostra de óleo de soja. (A) Primeiro Ciclo; (B) Segundo Ciclo; (C) Terceiro Ciclo; (D) Quarto Ciclo.	64
Figura 27 - - Curvas de aquecimento durante os quatro ciclos mostrados	65
Figura 28 - Ajuste dos pontos experimentais apresentados na figura 26. As equações de ajuste são apresentadas na tabela 06.	66
Figura 29 - Ensaio com o sensor II aquecimento em forno sem o óleo inserido entre as placas.	67
Figura 30 - Constante Dielétrica em função da temperatura (20 °C a 250 °C) para dezoito ciclos de aquecimento	68
Figura 31 - Constante Dielétrica para os dezoito ciclos de aquecimentos com zoom.	69
Figura 32 - Constante Dielétrica à 20°C, obtidas para cada um dos dezoito ciclos de aquecimentos e resfriamento.	70
Figura 33 - Constante Dielétrica do óleo virgem em função do tempo, mantendo a temperatura constante em 180°C.....	71
Figura 34 - Constante Dielétrica para óleo de pastelaria e restaurante, comparado com o óleo virgem.	72
Figura 35 - Constante Dielétrica de diferentes óleos utilizados em frituras comparados com óleo virgem.	72
Figura 36 - Índice de acidez à 20°C, os valores foram obtidos para cada um dos dezoito aquecimentos. A curva pontilhada representa o ajuste polinomial de segunda ordem para os valores obtidos experimentalmente.....	73
Figura 37 - Índice de refração à 20°C, os valores foram obtidos para cada um dos dezoito aquecimentos.	74
Figura 38 - Índice de iodo à 20°C, os valores foram obtidos para cada um dos dezoito aquecimentos	75
Figura 39 - Viscosidade à 23°C, obtidos para cada um dos dezoito aquecimentos. .	75
Figura 40 - Sobreposição das curvas de tendência dos índices de refração, acidez, iodo, constante dielétrica e valores da viscosidade das amostras analisadas.	76
Figura 41 - Sobreposição índice de refração, acidez, iodo, viscosidade e constante dielétrica.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Constante dielétrica para alguns materiais.....	21
Tabela 02 - Materiais utilizados e temperaturas máximas recomendadas de trabalho.....	39
Tabela 03 – Constante Dielétrica dos Materiais Empregados Sensor	40
Tabela 04 – Constante Dielétrica dos Materiais Empregados Sensor	50
Tabela 05 – Resultados do ajuste polinomial para as curvas de aquecimento mostradas na Figura 29.....	63
Tabela 06 – Resultados do ajuste polinomial para as curvas de aquecimento mostradas na Figura 39.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Ohm
\vec{a}_z	Versor do Eixo da Coordenada Z.
X_c	Reatância Capacitiva.
ϵ_0	Permissividade Dielétrica do Vácuo.
ϵ_r	Permissividade Dielétrica Relativa.
A	Ampere
C	Capacitância
C_1	Capacitância Variável do Circuito RC
C_1, C_3, C_5, C_7, C_9 e C_{11}	Capacitâncias Fixas do Sensor
C_2, C_4, C_6, C_8 e C_{10}	Capacitâncias Variáveis do Sensor
d_1	Espessura Placa do Sensor
d_2	Distância entre Placas do Sensor
F	Frequência
I_a	Corrente no Capacitor
Q	Carga elétrica
r_1	Raio dos Furos nas Placas do Sensor
r_2	Raio dos Isolantes entre as Placas do Sensor
R_A	Resistência do Resistor A
R_B	Resistência do Resistor B
T_H	Tempo do Pulso em Nível Lógico Alto
T_L	Tempo do Pulso em Nível Lógico Baixo
V	Tensão
V_{AB}	Diferença de Tensão entre A e B
V_{in}	Tensão de Entrada

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

AD	Analógico / Digital
ANP	Agência Nacional de Petróleo.
Ca	Coeficiente de Ajuste
Ca	Coeficiente de Ajuste
CF	Capacitância Fixa
C _t	Ciclo de Trabalho
CV	Capacitância Variável
DC	Tensão Contínua
D _{dp}	Diferença de Potencial
D _{dp}	Diferença de Potencial
LED	Light Emitter Diode
PCB	Printed Circuit Board
PSIM	Power Electronic Simulation Software
RC	Resistivo Capacitivo
ULA	Unidade Lógica Aritmética
USB	Universal Serial Bus

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	19
1.1.1 Objetivo Geral.....	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	20
1.1.3 Justificativa	20
2 SENSORES CAPACITIVOS	22
2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR.....	22
2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SENSORES CAPACITIVOS	25
2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO CAPACITIVA.....	27
2.3.1 Tempo de Carga e Descarga - Circuito RC	27
2.3.2 Circuito Oscilador.....	32
2.4 MICROCONTROLADOR	34
2.4.1 Interrupções	35
2.4.2 Comunicação Serial.....	35
2.4.3 Conversor Analógico-Digital	36
2.5 ARDUINO	36
2.6 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 SENSOR - I.....	42
3.1.1 Construção do Sensor	42
3.1.2 Sistema de Medição do Sensor	44
3.1.3 Caracterização Teórica do Sensor.....	44
3.2 SENSOR - II.....	47
3.2.1 Construção do Sensor	47
3.2.2 Circuitos de Medição Do Sensor.....	50
3.2.2.1 Circuito Oscilador.....	50
3.2.2.2 Medição de Temperatura	50
3.2.2.3 Medição e Coleta de Dados com Arduino.....	51
3.2.3 Cálculos do Sensor - II.....	53
3.3 METODOLOGIA E EXPERIMENTOS.....	55
3.3.1 Ensaio Com o Sensor I	55
3.3.2 Ensaio Com o Sensor II	57
3.3.3 Ensaio Físico-Químicos	60
3.3.3.1 Determinação de acidez em óleo vegetal	60
3.3.3.2 Determinação do Índice de Refração.....	61
3.3.3.3 Determinação do Índice de Iodo	61
3.3.3.4 Determinação da Viscosidade.....	62

3.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	63
3.4.1 Resultados Experimentais – Sensor I.....	63
3.4.2 Resultados Experimentais – Sensor II.....	66
3.4.3 Análise dos Resultados	78
4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	81
5 REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Os óleos comestíveis podem ser derivados da gordura animal (óleo de peixe, sebo da gordura de bovinos ou de suínos) ou então a partir de sementes (soja, milho, girassol, canola, algodão, amendoim). Óleos obtidos a partir de sementes de plantas são conhecidos como óleos vegetais e apresentam vantagens de não conter colesterol e não apresentar gordura saturada. (MARQUES, 2009, p. 1) (YANG, 2005, p. 2).

Insolúveis em água, óleos e gorduras são substâncias formadas em sua maior parte por triglicerídeos, compostos por três moléculas de ácidos graxos ligados ao glicerol, produtos resultantes da esterificação entre o glicerol e ácidos graxos. Na fase sólida, essas substâncias são conhecidas como gordura e na fase líquida são chamadas de óleos. Além de triacilgliceróis, os óleos apresentam vários componentes em menor proporção, como mono e diglicerídeos; ácidos graxos livres; tocoferol; proteínas; esteróis e vitaminas (UNII, 2013, p. 1) (Li, 2012, p.1).

O tipo de ácido graxo oferecido na dieta pode influenciar no aumento de gordura no tecido adiposo, ganho de peso corporal e, conseqüentemente, no desenvolvimento de doenças crônicas não transmissíveis. Em geral, os ácidos graxos saturados tendem a elevar o colesterol sanguíneo em todas as frações de lipoproteínas (JORGE, 2011, p. 2).

Normalmente as pessoas têm uma percepção de que gordura é prejudicial à saúde e que o seu consumo contribui para o aumento de peso e para o desenvolvimento de doenças. Por essa razão, geralmente a ingestão desse nutriente é evitada. Contudo, os ácidos graxos mono e poli-insaturados presentes na gordura vegetal são importantes para a prevenção de doenças. A própria manutenção do organismo humano depende de uma alimentação balanceada com relação à quantidade e tipo de ácidos graxos, alguns produzidos pelo próprio corpo e outros que dependem da ingestão do alimento (óleo vegetal), como os ácidos graxos poliinsaturados ômega 3 e ômega 6. (MARQUES, 2009, p. 2).

Durante a utilização de óleos e gorduras, três fatores contribuem para alterações estruturais e deterioração do produto: (i) a umidade, proveniente dos

alimentos que provoca alterações hidrolíticas; (ii) o oxigênio do ar que resulta em alterações oxidativas; e (iii) a elevada temperatura que induz alterações térmicas como quebra e rearranjo de ligações intermoleculares (MENDONÇA, 2008, p. 1).

Quando utilizado em frituras o óleo vegetal sofre diversas alterações físicas, químicas e nutricionais. Essas alterações decorrem da elevada temperatura durante o processo de fritura, onde são liberadas toxinas como acroleína e peróxidos, ambos nocivos à saúde humana (MENDONÇA, 2008, p. 1) (WITSCHINSKI, 2012, p. 1) (FERNANDES, 2010, p. 2). O aquecimento prolongado do óleo vegetal resulta na polimerização da molécula de triacilgliceróis e como consequências, ocorrem aumentos na viscosidade e no índice de acidez (SANTOS, 2009 p. 8). O processo de deterioração dos óleos provoca ainda aumento dos dienos e trienos conjugados e aumento no número de ligações insaturadas, resultando na elevação no índice de ácido tiobarbitúrico e índice de refração (SANTOS, 2009, p. 8).

Compostos polares são também gerados durante a utilização de óleos vegetais no processo de fritura. Os compostos polares apresentam polaridade maior que os triacilgliceróis e resultam em alterações oxidativas e hidrolíticas (DEL RÉ, 2006, p. 11). A reutilização do óleo de fritura aumenta a concentração de compostos polares. A ingestão desses compostos provoca irritações ao trato gastrointestinal, diarreia e pode causar até a redução no crescimento (URIARTE, 2010, p. 1). O efeito da ingestão contínua e prolongada de compostos com maior toxicidade formados durante a fritura (monômeros cíclicos e hidrocarbonetos poliaromáticos) pode, em alguns casos, resultar na morte de animais em laboratórios (MARQUES, 2009, p. 1). Estudos realizados com cobaias alimentadas com óleos ou gorduras exaustivamente processadas em fritura mostram que estes animais apresentam alterações metabólicas. Essas alterações resultaram na perda de peso, supressão do crescimento, diminuição no tamanho de órgãos internos (fígado e rins), diminuição da taxa de dessaturação dos ácidos graxos linoleico e α -linoléico, redução na fertilidade e aumento da taxa de colesterol no fígado (URIARTE, 2010, p. 1).

Alimentos submetidos à fritura em óleos reutilizados podem apresentar um excesso de gordura e a formação de ranço a partir da quebra da ligação

éster. Como resultados são gerados lipídios hidrolizados que provocam alterações no paladar e na textura do alimento. O consumo elevado de alimentos preparados em óleos reutilizados resulta em possíveis danos a saúde (pré-disposição à arteriosclerose, ação mutagênica ou carcinogênica). Os danos ocorrem devido à elevada toxicidade dos produtos formados durante o processo de fritura, que são absorvidos pelo organismo humano durante a ingestão de alimentos obtidos por esse processo (JORGE, 2005, p. 2).

O Brasil produz nove bilhões de litros de óleos vegetais por ano. Apenas 2,5% do óleo descartado é reciclado, ou seja, separado, coletado, filtrado e reinserido na cadeia produtiva. Mais de 200 milhões de litros de óleos residuais são descartados em rios e lagos comprometendo o meio ambiente (BARBOSA, 2014, p. 1).

Entretanto, óleos residuais de fritura podem ser utilizados como matéria-prima para a obtenção de sabão, tintas, biodiesel entre outras aplicações. A qualidade do óleo residual de fritura é o fator determinante na escolha da sua destinação (YANG, 2005, p. 1). Ou seja, a viabilidade do processo de reciclagem depende do estado da matéria-prima. Relacionado a isso, por exemplo, para fabricação de biodiesel a Agência Nacional do Petróleo - ANP determina alguns limiares para os parâmetros físico-químicos do produto final. Contudo, para atingir os limiares do biodiesel, os óleos residuais de frituras utilizados como matéria prima devem atender determinados parâmetros que permitem avaliar o método de obtenção de biodiesel a ser utilizado e se o mesmo é viável em função do custo empregado na produção (Resolução ANP nº45, de 25.8.2014, p. 6).

O estado de conservação do óleo vegetal, seja virgem ou proveniente de reutilização, está intimamente relacionado com a qualidade da matéria-prima, com o grau de pureza do óleo, com o processamento, com as condições de armazenamento e com o modo de utilização que este foi submetido (GROSSI, 2014, p. 1) (PEREIRA, 2008, p. 1). A qualidade do óleo residual de fritura pode ser avaliada por meio da análise de quatro propriedades: índices de acidez, índice de refração, índice de iodo e viscosidade. A partir do resultado dessa análise é possível determinar: o grau de insaturação, a densidade, a quantidade de ácidos graxos livres e a viscosidade do óleo residual (TUORILA, 2009, p. 2).

O índice de iodo representa o número de gramas de iodo absorvido a cada 100g de gordura ou óleo. O índice indica o grau de insaturação das gorduras extraídas com éter ou, ainda, o grau de insaturação dos ácidos graxos presentes na gordura. O iodo pode ser quantitativamente introduzido nas duplas ligações dos ácidos graxos insaturados e triglicerídeos. Assim, quanto maior a insaturação de um ácido graxo, maior será a sua capacidade de absorção de iodo e, conseqüentemente, maior também será o seu índice (PEREIRA, 2008, p. 1) (GILA, 2012, p. 1).

O índice de refração de um meio é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio. Essa grandeza está relacionada diretamente com a densidade do meio, visto que quanto maior a densidade, menor será a velocidade de propagação da luz devido às colisões dos fótons com as partículas do meio. Variações no índice de refração das amostras de óleo vegetal antes e após o aquecimento podem revelar alterações na densidade destas amostras. Essas alterações resultam principalmente do processo de polimerização que ocorre no óleo vegetal utilizado em frituras (SANTOS, 2009, p. 10).

O índice de acidez é decorrente da hidrólise enzimática. Esse índice revela o estado de conservação do óleo vegetal, já a rancidez, vem sempre acompanhada pela formação de ácidos graxos livres. Por isso, a acidez está relacionada com a natureza, qualidade, grau de pureza, processamento e, principalmente, com as condições de armazenamento do óleo vegetal (SPOHNER, 2012, p. 1) (SANTOS, 2013, p. 1) (URIARTE, 2010, p. 2).

A viscosidade representa a resistência ao escoamento de um fluido. No caso do óleo vegetal, o valor da viscosidade cresce com o aumento no comprimento das cadeias dos ácidos graxos e dos triglicerídeos e decresce com o aumento na insaturação. (MORETTO, 1998, p. 3). Assim como ocorre em outros líquidos, nos óleos, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura, havendo uma relação linear entre o logaritmo da viscosidade e o da temperatura. Ao estudar a viscosidade do óleo durante o processo de fritura, verifica-se que a viscosidade decresce consideravelmente com o aumento da temperatura. Contudo, quando o óleo aquecido retorna a temperatura ambiente, a viscosidade aumenta em relação ao seu estado original antes do aquecimento (MORETTO, 1998, p. 3).

A Instrução Normativa MAPA 49/2006 – DOU 26/12/2006, define para óleos de soja Tipo 1, que foram analisados nos experimentos, os parâmetros de qualidade como apresentado na Tabela 01.

Tabela 01 – Parâmetros de qualidade para óleo de soja.

Parâmetro	Índice
Índice de Acidez	0,20
Índice de Refração	1,466 a 1,47
Índice de Iodo	124 a 139

Fonte: (MAPA 49/2006 – DOU 26/12/2006, p. 6)

Em geral, para determinar a qualidade da amostra de óleo residual a partir dos resultados das análises físico-químicas, é necessário coletar amostras do óleo e enviá-las para laboratórios em grandes centros (geralmente distantes dos pontos de coleta). Isso resulta em custos de transporte somados aos elevados custos com as análises químicas. O presente trabalho propõe um estudo para correlacionar características físico-químicas (viscosidade, índice de acidez, índice de refração e índice de iodo) de amostras de óleo de soja residual de fritura com as medidas da constante dielétrica destas amostras, de modo a estabelecer uma única grandeza que possa descrevê-las. Para isso, foram desenvolvidos dois sensores capacitivos com diferentes características de construção, com o objetivo de quantificar o nível de deterioração do óleo vegetal comestível quando submetido a repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento pela determinação da constante dielétrica. Os sensores foram projetados para avaliar a dependência da constante dielétrica desse óleo em função da aplicação de calor, para que então pudesse ser correlacionada esta grandeza com os resultados dos ensaios físico-químicos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar alterações nas propriedades físico-químicas de amostras de óleo vegetal submetidas a ciclos de aquecimento e resfriamento e correlacionar

as propriedades físico-químicas medidas com as variações na constante dielétrica das amostras em função da temperatura.

1.1.2 Objetivos Específicos

Projetar e construir um sensor capacitivo de modo que seja possível obter a constante dielétrica das amostras de óleo durante os ciclos de aquecimento e resfriamento;

Realizar análises físico-químicas (índice de acidez, índice de iodo, índice de refração e viscosidade) nas amostras coletadas do óleo de fritura;

Desenvolver um sistema de aquisição de dados para armazenar as medições efetuadas pelo sensor;

Correlacionar às propriedades físico-químicas das amostras estudadas com o valor da sua constante dielétrica.

1.1.3 Justificativa

O avanço do consumo de alimentos fritos e pré-fritos resulta no aumento da produção de resíduos de óleos e gorduras. Geralmente, de maneira incorreta, os resíduos são descartados diretamente no esgoto doméstico. Cada litro de óleo despejado no esgoto tem capacidade de poluir cerca de um milhão de litros de água e encarece o tratamento dos resíduos em até 45%. O resíduo de óleo que permanece nos rios pode criar uma barreira que dificulta a entrada de luz e a oxigenação da água, comprometendo assim, a base da cadeia alimentar aquática e contribuindo para a ocorrência de enchentes. Além disso, a decomposição do óleo de cozinha emite metano (gás inodoro, incolor e inflamável) na atmosfera. Ressalva-se que, o metano é um dos principais gases que causam o efeito estufa. (FERNANDES, 2008, p. 1).

O óleo residual de fritura pode ser utilizado na fabricação de tintas, sabão, dentre outras aplicações (VELOSO, 2012, p. 1). Contudo, diversos estudos comprovam que, o óleo residual de fritura utilizado para a produção do Biodiesel é de grande relevância devido aos benefícios ambientais que podem ser alcançados com a substituição parcial do Diesel derivado do petróleo

(VELOSO, 2012, p. 1). O biodiesel também pode ser obtido diretamente do óleo extraído de sementes. No entanto, a concorrência com outras culturas alimentares, o uso do solo, da água e o desmatamentos para expansão da produção de soja motivam a busca de fontes alternativas de matéria-prima para produção do Biodiesel.

A destinação para óleo vegetal residual de fritura depende da sua qualidade. Os gastos com a purificação do resíduo podem afetar a viabilidade do processo de reciclagem. Assim, são necessárias análises físico-químicas para avaliar a qualidade do resíduo. Essas análises envolvem tempo, laboratórios especializados e recursos financeiros. O presente trabalho apresenta uma alternativa para avaliar a qualidade de óleos residuais baseado na medição da sua constante dielétrica, o que permite uma análise com menor tempo de resposta e com um custo inferior ao conjunto de análises físico-químicas usualmente empregadas (TOMASZ, 2012, p. 2).

2 SENSORES CAPACITIVOS

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SENSOR

A medida da constante dielétrica de um determinado material pode ser efetuada quando o mesmo inserido entre as placas de um sensor capacitivo de placas paralelas. O processo pode ser realizado de três formas: pela variação da distância entre as placas do capacitor; pela alteração do meio dielétrico existente entre as placas do capacitor ou então pela variação na área de uma das placas do capacitor devido a movimentação da mesma. Nesta seção, serão tratadas somente as variações na capacitância devido a alterações nas propriedades do dielétrico mantido entre as placas do capacitor.

Para um meio dielétrico homogêneo, a equação 01, apresenta a definição mais abrangente de capacitância entre dois condutores quaisquer. (BOYLESTAD, 2004, p. 272).

$$C = \frac{Q}{V_0} \quad (01)$$

Onde: C é a capacitância, [F , Faraday]; Q representa o módulo da carga elétrica total de um condutor, [C , Coulomb]; V_0 é a diferença de potencial elétrica, [V , Volts].

A equação 01, não apresenta explicitamente a influência do meio dielétrico e a geometria do capacitor (área e a distância entre as placas) na capacitância. Contudo, a utilização da lei de Gauss, permite expressar a carga elétrica em função dessas variáveis. Aplicando a lei de Gauss numa das placas do capacitor, obtemos a equação 02.

$$Q = \int \vec{D} \cdot d\vec{A}, \quad (02)$$

onde: \vec{D} representa a densidade de fluxo elétrico, [$C m^{-2}$]; e dA é o elemento diferencial de área da superfície do condutor, [m^2].

A equação 03 expressa a densidade de fluxo elétrico em função da intensidade do campo elétrico e da permissividade do meio.

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (03)$$

Onde: ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo, $[C^2N^{-1}m^{-2}]$; e \vec{E} o vetor campo elétrico, $[N C^{-1}]$.

A permissividade do meio dielétrico (também chamada de constante dielétrica) é definida pela equação 04, que leva em conta a permissividade elétrica do vácuo (ε_0).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r, \quad (04)$$

Onde: ε é a permissividade elétrica do meio, $[C^2N^{-1}m^{-2}]$ e ε_r a permissividade elétrica relativa, adimensional.

A permissividade elétrica relativa, ε_r , é uma propriedade intrínseca do material dielétrico. O que permite, com base na medição dessa grandeza determinar o material que constitui o meio dielétrico entre as placas do capacitor.

Partindo da diferença de potencial elétrico entre dois pontos (V_{AB}), pode-se chegar à equação 05.

$$V_{AB} = - \int_B^A \vec{E} \cdot \vec{dL}, \quad (05)$$

Onde: \vec{dL} é o elemento de comprimento na direção e sentido do vetor campo elétrico \vec{E} . Substituindo as equações 03, 04 e 05 na equação 01, obtêm-se a equação 06.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \int_S \vec{E} \cdot \vec{dA}}{- \int_B^A \vec{E} \cdot \vec{dL}} \quad (06)$$

Analisando a equação 06, verifica-se que a capacitância pode ser determinada sem a necessidade de conhecer a diferença de potencial aplicada e a carga elétrica presente em qualquer um dos condutores. Para um sistema

onde os condutores são planos infinitos e paralelos, conforme ilustra a Figura 01 e 02, obtêm-se a equação 07. (BORIM, 2006, p. 3).

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot \vec{a}_z \quad (07)$$

Onde: σ é a densidade superficial de cargas, [$C m^{-2}$]; $e\vec{a}_z$ é o versor do eixo da coordenada z . Das equações 03 e 07, chega-se à equação 08.

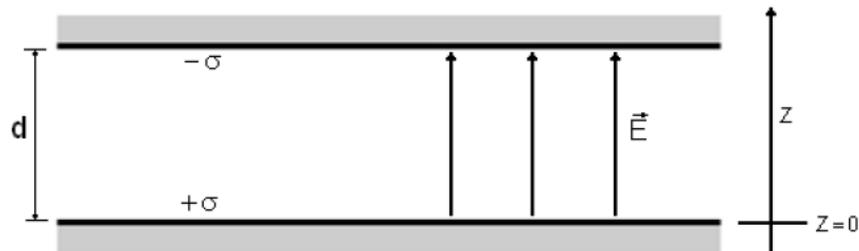


Figura 01 - Capacitância Placas Finitas e Paralelas.
Fonte: (BORIM, 2006, p. 4).

$$\vec{D} = \sigma \cdot \vec{a}_z \quad (08)$$

A diferença de potencial entre as placas do capacitor, V_o , pode então ser determinada através da equação 09.

$$V_o = \int \vec{E} \cdot d\vec{L} = \int_d^0 \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} \right) dz \quad (09)$$

Resolvendo a integral da equação 09, obtemos o resultado exposto na equação 10.

$$V_o = \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot d, \quad (10)$$

Onde: d a distância entre as placas, [m].

Na dedução das equações 7, 8, 9 e 10 as placas do capacitor foram consideradas infinitas. Consequentemente, a carga elétrica presente em cada uma delas também é infinita, resultado em uma capacitância infinita. Para resultados práticos, considera-se uma determinada região com área finita nas

placas utilizadas. Assim, a carga Q finita é determinada a partir da densidade de carga (σ) expressa pela equação 11.

$$Q = \sigma \cdot A, \quad (11)$$

Onde: Q é a quantidade de carga presente nas placas do capacitor, [C] e A representa a área finita da placa utilizada no capacitor, [m^2].

Finalmente, substituindo as equações 10 e 11 na equação 01, obtêm-se a equação 12.

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (12)$$

A precisão teórica descrita pela equação 12 apresenta concordância com os valores experimentais desde que as dimensões da placa sejam consideravelmente maiores que a distância entre elas. De acordo com a equação 12, quanto maior a permissividade elétrica do material dielétrico utilizado entre as placas maior será a capacitância. Consequentemente, menor será a ddp para armazenar uma quantidade fixa de cargas entre as placas do capacitor (KERCHNER, 1973, p. 87).

2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SENSORES CAPACITIVOS

A constante dielétrica de um material pode ser determinada com base na medida da sua capacitância por meio de um sensor capacitivo. O sensor capacitivo é muito semelhante a um capacitor. Na configuração mais simples, um capacitor consiste em duas placas de área A , paralelas e separadas por uma distância d . O espaço entre as placas pode ser preenchido por ar. O princípio de funcionamento do sensor está relacionado com o campo elétrico E que é estabelecido na região entre suas placas quando o sensor é acoplado a uma diferença de potencial elétrico (ddp). A intensidade do campo elétrico na região entre as placas aumenta quando a mesma é preenchida por um material dielétrico (isolante elétrico).

Sensores capacitivos podem ser utilizados para medidas de massa (balanças), sensores de gás, sensores de pressão, etc. Em todos os casos, o

sensoriamento é obtido por meio da medição da capacitância entre as placas do sensor. O sensor capacitivo é um dispositivo versátil, visto que as alterações na grandeza física correlacionada com a sua capacitância podem ser baseadas em três variações: i) a distância de separação entre as placas, (Figura 2 (A)); ii) a área de sobreposição comum das placas (Figura 2 (B)); iii) a alteração do meio dielétrico, ϵ_r , entre as placas (Figura 2 (C)). A Figura 02 ilustra cada uma dessas variações de modo isolado para um capacitor de placas planas e paralelas. Na Figura 2, a grandeza d representa a distância de separação entre as placas, A é a área da superfície de cada placa de largura a e comprimento b , ϵ_0 é a constante dielétrica do ar e ϵ_r é a constante dielétrica de um segundo meio inserido parcialmente ou totalmente entre as placas do sensor capacitivo.

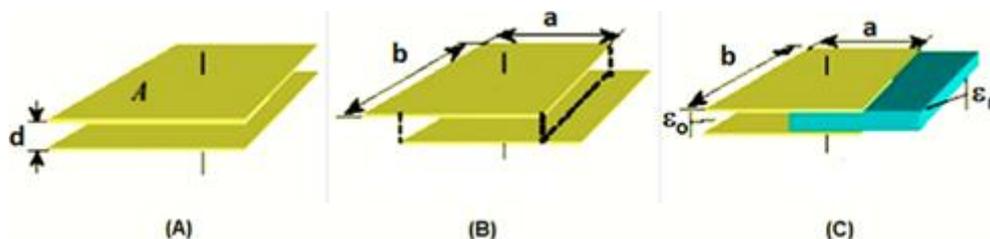


Figura 02 - Ilustração de um Sensor Capacitivo de Placas Paralelas, onde (A) indica uma possível variação da distância entre as placas; (B) indica uma possível variação da superfície comum entre as placas; e (C) a alteração do elemento dielétrico entre as placas.

Fonte: Autoria própria.

A capacitância está relacionada à capacidade de armazenar energia elétrica entre as placas de um capacitor quando estas são submetidas a uma diferença de potencial. Mantendo constante a área de sobreposição entre as placas e a distância de separação entre elas, o monitoramento da capacitância permite determinar o elemento dielétrico entre suas placas. Também é possível determinar o comportamento de um dielétrico quando sujeito a alterações de temperatura, pressão, umidade, etc. Nesse caso, as alterações na capacitância estariam relacionadas com a constante dielétrica do material. A Tabela 02 apresenta a constante dielétrica de alguns materiais.

Tabela 02 – Constante dielétrica para alguns materiais.

Material	Constante Dielétrica ϵ_r
Vácuo	1
Ar	1,0001
Água	78
Cerâmica	≥ 10
Vidro	4 a 10
Mica	6 a 8
Papel	2 a 5
Porcelana	4 a 8

Fonte: (VAN-VLACK, 2000, p. 176)

2.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO CAPACITIVA

Para realizar a medição dos dados de um sensor capacitivo podem-se utilizar circuitos de corrente alternada em conjunto com circuitos amplificadores (TOMASZ, 2012, p. 2). Nesta seção são explicados dois métodos para a medida da capacitância: pela medida de carga e descarga de um circuito RC e pela frequência gerada de um circuito astável com LM 555.

2.3.1 Tempo de Carga e Descarga - Circuito RC

O capacitor armazena energia eletrostática quando submetido a uma diferença de potencial elétrica (ddp) e descarrega esta energia quando a ddp é retirada e uma carga é ligada a este capacitor.

A Figura 03 apresenta um circuito RC com corrente alternada (fonte de alimentação DC com chaveamento, S_I) para a obtenção da capacitância pela medida da corrente e tensão no capacitor. Escolheu-se para V_{in} o valor de 1 V e para R_I uma resistência de 10 $k\Omega$. O capacitor C_I foi deixado variável, para confirmar a eficiência do circuito em determinar a capacitância C_I .

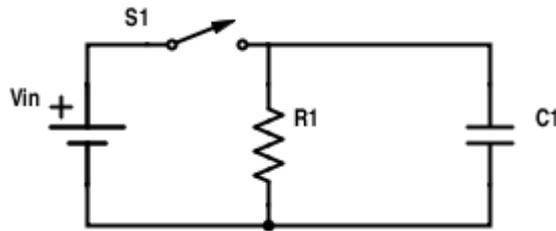


Figura 03 - Circuito RC
Fonte: Autoria própria.

A impedância capacitiva é dada pela equação 13:

$$Z_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{V_c}{I_c} \Rightarrow C = \frac{I_c}{2\pi f V_c} \quad (13)$$

Rearranjando a equação 13, obtemos a equação 14.

$$C = \frac{|I_c|}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot |V_c|} \quad (14)$$

Onde: C é a Capacitância, [F , Faraday]; I_c é o módulo da corrente no capacitor, [A , Ampere]; V_c é o módulo da tensão no capacitor, [V , Volts]; f representa a frequência de alimentação do circuito, [Hz , Hertz]. Onde para o primeiro experimento (Figura 04) o tempo de carga foi 0,494 ms e 0,502 ms para descarga; e para o segundo experimento (Figura 05) o tempo de carga/descarga ficou em 0,499 ms e 0,504 ms respectivamente. Na prática, os valores com pequenas oscilações de capacitância possuem pequenas variações de tensão, adicionando ainda o fato de os componentes empregados no circuito não serem ideais, há tendência de erros de leitura.

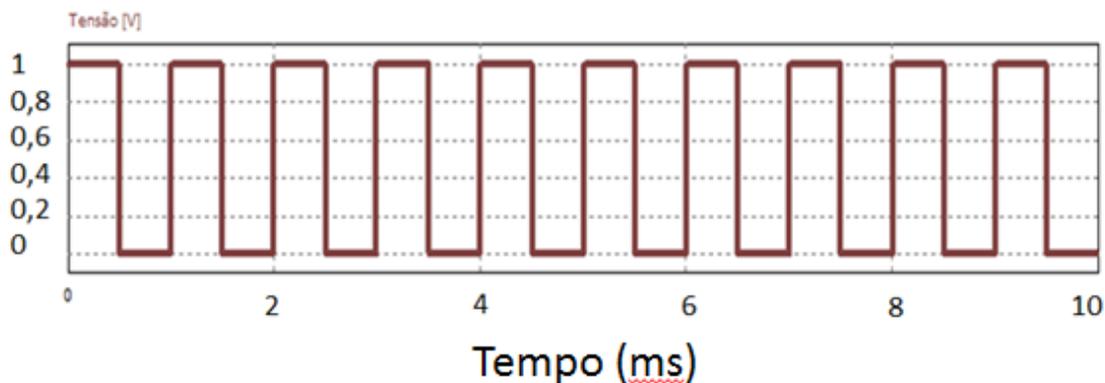


Figura 04 - Simulação Circuito RC com Capacitância em 1 nF.

Fonte: Autoria própria.

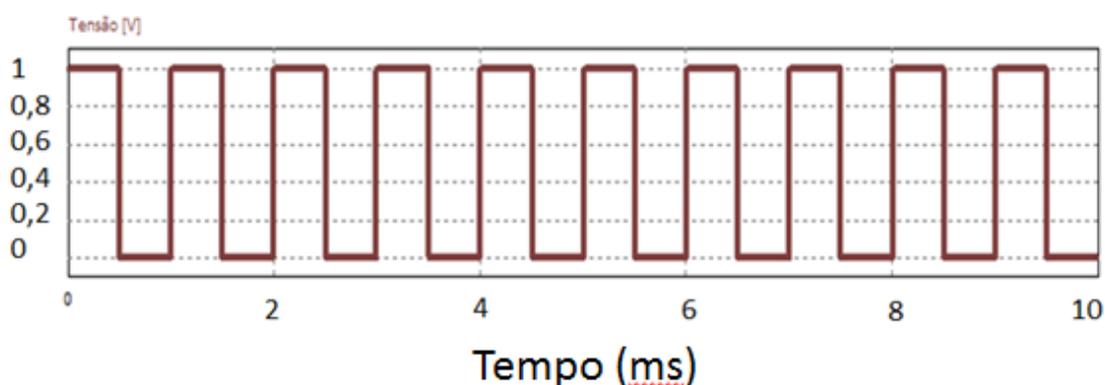


Figura 05 - Simulação Circuito RC com Capacitância em 10 nF.

Fonte: Autoria própria.

Outra forma de medição de capacitância é com o circuito RC, simulado com o PSIM® (software de simulação de circuito elétrico) e apresentado na Figura 06. Nesse caso, variações do valor da capacitância (C_1), ocasionam variações no nível de tensão contínua na saída do circuito. Capacitores oferecem resistência a passagem de uma corrente elétrica variável no tempo, e quando submetidos a uma tensão senoidal alternada, essa resistência dependerá da frequência angular. Dessa forma, pode-se medir a tensão, a corrente e a reatância do capacitor, que é a divisão da tensão medida pela corrente no mesmo, sendo possível então, através da equação 15, determinar o valor da capacitância do capacitor.

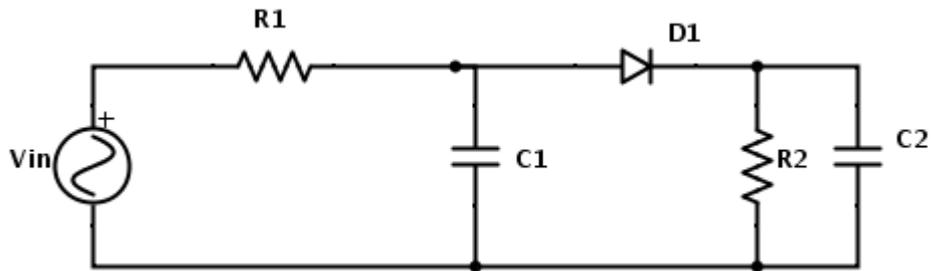


Figura 06 - Circuito de medição do sensor capacitivo, simulado com PSIM®
 Fonte: Autoria própria.

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (15)$$

Dessa forma, quando o valor da capacitância aumenta, faz com que o valor de X_c diminua, diminuindo o valor de tensão no sensor. O diodo retifica o sinal proveniente do sensor e o filtro RC elimina o efeito Ripple (ondulação) do sinal de saída, tornando-o contínuo e linear. A função do resistor (R_1) é controlar o tempo de carga do capacitor. Após uma constante de tempo RC, o capacitor carrega com 63,2% da tensão da fonte (V_{in}). Após um intervalo de tempo igual a cinco vezes RC, o capacitor está praticamente carregado com a tensão da fonte (99,3% de V_{in}). Após cinco vezes R.C, o capacitor estará praticamente descarregado, terá somente 0,7% da carga inicial. (BOYLESTAD, 2004, p. 274).

Os resultados de simulação com o Psim® estão expostos nas Figuras 07 e 08, para valores de capacitância de 1 nF e 10 nF, respectivamente. Na simulação, foram escolhidos: $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$ e $C_2 = 100 \mu\text{F}$. Para a análise da primeira simulação observa-se na Figura 07 um nível de tensão de 61 mV para um tempo de aproximadamente 10 ms.

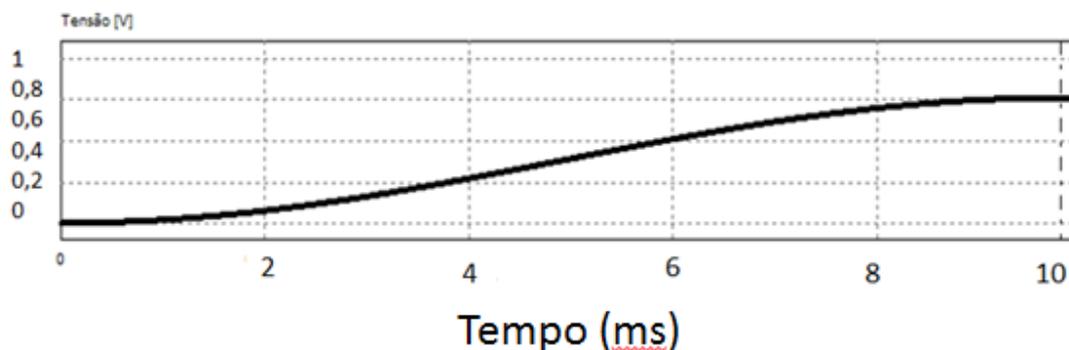


Figura 07 - Valores da tensão de saída para simulação com o Psim® do circuito mostrado na Figura (06) com $C_1 = 1\text{nF}$.

Fonte: Autoria própria.

Para a análise da simulação observa-se na Figura 08 um nível de tensão aproximado de 61 mV para um tempo aproximado de 10 ms. De forma comparativa, quanto maior a capacitância do capacitor, maior deveria ser o tempo necessário para carregá-lo. Na prática, para variações da capacitância em uma ordem de grandeza os valores de carga e descarga ficam muito próximos, o que dificulta analisar pequenas oscilações capacitivas.

Na prática, um sensor capacitivo pode ser inserido no local do capacitor especificado (C_1) nos circuitos das Figuras 03 e 06, e assim variações na capacitância do sensor podem ser monitoradas através da medição dos valores de tensão na saída dos mesmos. Devido às imperfeições existentes nos componentes eletrônicos empregados no circuito e possíveis erros de medição, pode-se não detectar as possíveis alterações no nível de tensão na saída, pois serão pequenas as variações no valor da capacitância do sensor e também se pode não conseguir realizar o acompanhamento do tempo de carga e descarga para pequenas variações, pois pode haver erros de leitura neste processo (TOMASZ, 2012, p. 2).

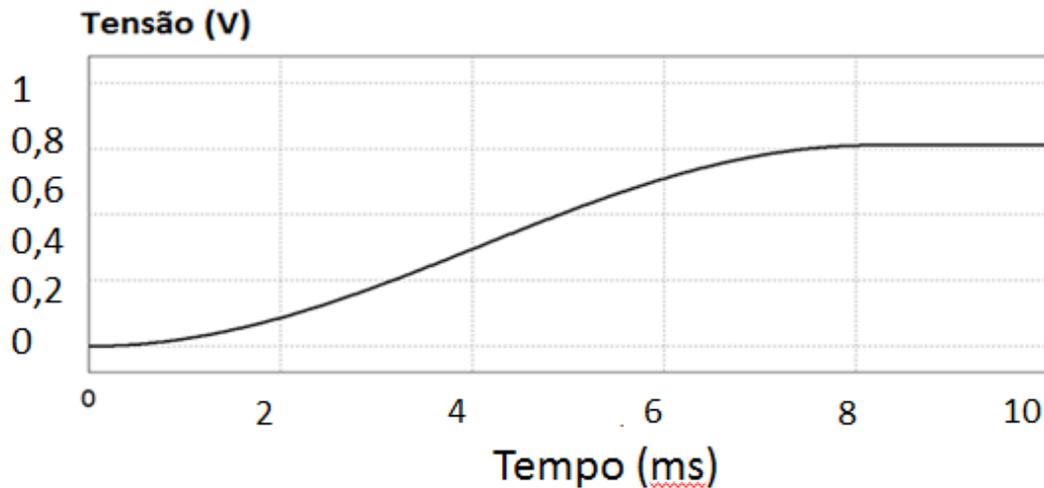


Figura 08 - Valores da tensão de saída para simulação com o Psim® do circuito mostrado na Figura (06) com $C_1 = 10\text{nF}$.

Fonte: Autoria própria.

2.3.2 Circuito Oscilador

Outra forma de fazer a leitura de um sensor capacitivo é por meio de um circuito integrado temporizador LM555 em sua configuração de oscilador astável. Nesse caso, a frequência da tensão de saída é determinada pelo valor da capacitância do sensor. (BOYLESTAD, 2004, p. 273).

Na Figura 09, C_1 está representando o sensor capacitivo. O pino 3 representa o local onde se deve medir o sinal de saída, de frequência variável. Mantendo as resistências (R_A e R_B) com valores fixos, e alterando apenas o valor da capacitância no sensor (C_1), a frequência de saída sofrerá alterações conforme prevê a equação 16 (TOMASZ, 2012, p. 2).

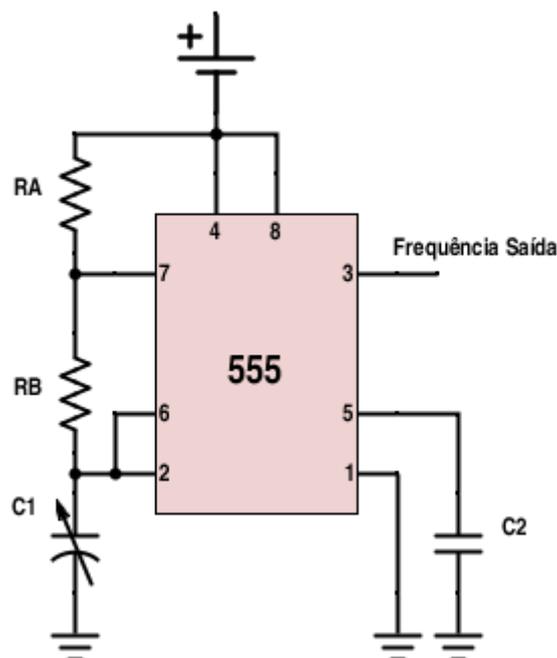


Figura 09 - Circuito de Leitura sensores capacitivos com CI LM555 em sua configuração de oscilador astável.

Fonte: Autoria própria.

$$f = \frac{1,44}{R_A + 2 \cdot R_B \cdot C_1} \quad (16)$$

Onde: f é a frequência de oscilação do sinal de saída, [Hz]; R_A e R_B são as resistências dos resistores A e B da Figura 09, [Ω]; e C_1 é a Capacitância do sensor, [F].

O ciclo de trabalho, C_t , em porcentagem, do sinal de saída é expresso pela equação 17 e descreve a fração de tempo em que o sistema está em um estado ativo (TOMASZ, 2012, p. 3).

$$C_t = 100 \cdot \left(\frac{R_A \cdot R_B}{R_A + 2 \cdot R_B} \right) \quad (17)$$

Qualquer alteração no valor da capacitância do sensor (C_1) altera a frequência de saída. Assim, pode-se determinar, de forma eficaz, a leitura para pequenas oscilações de medição pelo sensor capacitivo, pois na prática os resultados apresentaram resultados satisfatórios similares às simulações. Desta forma este circuito foi determinado para fazer a medição do sensor capacitivo.

O circuito integrado 555 é um circuito analógico-digital muito utilizado em projetos de osciladores, contadores digitais e circuitos temporizadores. (TOMASZ, 2012, p. 3). Na Figura 10 observa-se o diagrama de blocos do circuito integrado LM 555 onde se constata uma combinação de comparadores lineares e *flip-flops* digitais, sendo uma conexão em série com três resistores, R_1 , R_2 e R_3 , que determinam os níveis de tensão de referência para os dois comparadores. A saída desses comparadores habilita ou desabilita a unidade de *flip-flop*, cuja saída é aplicada a um estágio do amplificador de saída e também a um transistor cujo coletor tem a função de descarregar o capacitor de temporização. (BOYLESTAD, 2004, p. 274).

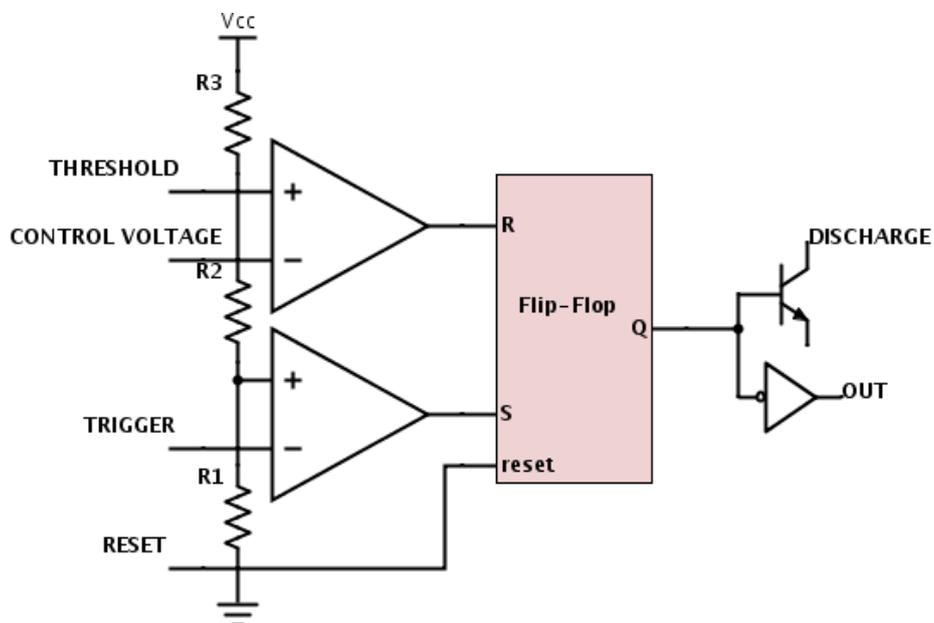


Figura 10 - Diagrama de blocos interno de um CI LM555
 Fonte: (BOYLESTAD, 2004, p. 274).

2.4 MICROCONTROLADOR

O sinal de saída do circuito oscilador proposto necessita ser interpretado (para obter a frequência gerada e após, determinar a capacitância) e armazenado de forma eficaz, por um sistema automatizado. Para esse processo é utilizado um microcontrolador.

Um microcontrolador pode ser definido com um componente eletrônico, que pode ser utilizado no processo de controles lógicos. Pode atuar por exemplo em controle em mostradores de segmentos (displays), sensores diversos, e muitas outras aplicações (SOUZA, 2009, p. 43).

Microcontroladores são empregados em controladores lógicos por executarem ações que estão armazenadas no mesmo, dependendo dos periféricos de entrada e, ou saída. A sua capacidade para executar estes processos está associada a Unidade Lógica Aritmética (ULA), onde todas as operações lógicas e matemáticas são executadas. Um microcontrolador possui em sua estrutura, memória de programa, memória de dados, portas de entrada e saída, temporizadores, contadores, comunicação serial, periféricos para modulações por largura de pulso, conversores analógicos-digitais, dentre outras ferramentas (SOUZA, 2009, p. 46).

2.4.1 Interrupções

A interrupção serve para interromper algo, neste caso parar um processo no microcontrolador. Dessa forma, quando uma interrupção acontece, o processo que está sendo executado no microcontrolador é paralisado e uma função específica, definida pelo programador, pode ser executada. Após o término dessa função, o programa interrompido continua do ponto onde houve a interrupção. (SOUZA, 2009, p. 45).

2.4.2 Comunicação Serial

Na comunicação do tipo serial, a transmissão dos dados é realizada transmitindo um bit de cada vez. Cada dígito binário permanece na linha de transmissão durante um tempo predefinido, designado período do dígito binário, para que possa ser lido. Este modo de comunicação, é muito utilizado para transmissões de dados, especialmente em longas distâncias. (SOUZA, 2009, p. 45).

2.4.3 Conversor Analógico-Digital

O conversor analógico-digital normalmente está inserido nos microcontroladores atuais. Conectar um sensor digital em um microcontrolador é uma tarefa fácil. Entretanto, a maioria dos sensores apresenta respostas analógicas. Dessa forma é necessário obter um modo de transformar eletronicamente um sinal analógico em quantidades digitais (binários), e vice-versa. Uma maneira de se fazer isso é com a utilização do conversor analógico-digital, que recebe um sinal analógico, como tensão ou corrente, e fornece a saída um número binário correspondente. (KUPHALDT, 2014, p. 4).

2.5 ARDUINO

O processo de aquisição de dados por um circuito automatizado atualmente representa possibilidade de aplicação de técnicas de análise estatística em metodologias experimentais pela ampla quantidade de dados que pode ser coletada. A discussão dos resultados obtidos, comparados com os previstos nos modelos teóricos, permite efetuar os ajustes a fim de validá-los em um novo ciclo de testes dentro do processo, face aos resultados práticos obtidos. (CAVALCANTE, 2011, p. 3).

O microcontrolador Arduino, que pode ser utilizado para leitura do sensor, é construído sobre uma plataforma para prototipagem eletrônica baseada em softwares e hardwares livres. Ele consiste em uma placa de circuito, conforme apresentado na Figura 11, com um microcontrolador AVR produzido pela Atmel®, que permite a interação entre o ambiente e o computador de uma forma simples. É programado através da comunicação serial (normalmente uma porta USB) e sua linguagem de programação está baseada nos conceitos da linguagem C e C++.



Figura 11 - Imagem do Arduino UNO
 FONTE: (SOUZA, 2009, p. 46).

O Arduino UNO dispõe de tensões de 3,3 V com corrente máxima de 50 mA, fornece tensão de 5 V para alimentação, e circuitos externos e também pinos de referência ou terra. Possui pinos de entrada e saídas digitais (14 pinos), assim como pinos de entradas e saídas analógicas. Esses pinos operam até 5 V, onde cada pino pode fornecer ou receber uma corrente máxima de 40 mA. A comunicação serial, os pinos são ligados ao microcontrolador responsável pela comunicação USB com o PC; possui 6 entradas, onde cada uma tem a resolução de 10 bits. Por padrão a referência do conversor AD está ligada internamente a 5V, ou seja, quando a entrada estiver com 5V o valor da conversão analógica digital será 1023. As características listadas satisfazem as necessidades do sistema de medição proposto, sendo, portanto, este componente o escolhido para realizar a leitura dos dados do sensor capacitivo. (SOUZA, 2009, p. 46).

2.6 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS

Para a leitura dos dados do sensor capacitivo, foi realizado a construção do circuito apresentando na Figura 09, onde se utilizou o circuito integrado LM555 em sua configuração de oscilador astável. A interpretação da frequência do sinal de saída do LM555 foi realizada com o Arduino.

Uma forma de trabalhar com o circuito integrado LM555 é operando-o como um multivibrador astável ou circuito de *clock*, conforme esquemático apresentado na Figura 09.

Para esse tipo de operação, o circuito irá gerar uma onda quadrada e periódica, a partir da carga e descarga do capacitor. Para determinar a duração dos tempos em nível alto lógico (T_H) e em nível baixo lógico (T_L), utilizam-se as equações 17 e 18 (BOYLESTAD, 2004, p. 274).

$$T_L = 0,693. R_B. C, \quad (17)$$

onde: T_L é o tempo total em nível lógico baixo em um período, em segundos; R_B é a resistência do resistor B (apresentado na Figura 09), em Ω ; e C representa a capacitância do sensor (capacitor), em *Faraday*.

$$T_H = 0,693. C. (R_A + R_B) \quad (18)$$

Onde, T_H representa o tempo total em estado de nível lógico alto, em segundos; R_A é a resistência do resistor A (apresentado na Figura 09), em Ω e R_B foi descrito anteriormente.

Somando as equações 17 e 18, temos a equação 19, que determina o período (T , medido em segundos) do circuito oscilador como a soma dos intervalos de tempo lógico em alto e baixo (T_H e T_L , respectivamente).

$$T = \text{período} = T_L + T_H \quad (19)$$

A frequência do sinal de saída do oscilador é obtida pelo inverso do período (equação 19) ou, conforme os valores das resistências e do capacitor (R_A , R_B e C) empregado no circuito, de acordo com a equação 20 (BOYLESTAD, 2004, p. 274).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1,44}{(R_A + 2. R_B). C_1} \quad (20)$$

Onde: f representa a frequência de oscilação do sinal de saída do circuito integrado, medida em *Hz*.

O tempo dos níveis lógicos altos e baixos do sinal periódico foram definidos de acordo com as equações 16 e 17, sendo de 1,94 μs para cada

tempo, deixando aproximadamente 50 % do tempo em alto e 50 % em baixo, considerando o valor da capacitância medido de forma experimental de 0,41 nF com uma ponte RLC antes de ser construído o circuito de medição.

Através da ferramenta Eagle® foi realizado o esquemático do sistema de leitura, Figura 12, e o projeto da placa de circuito impresso. As equações de ajustes dos sensores de temperatura e a equação que determina o valor da capacitância foram inseridas dentro da programação do microcontrolador para apresentação dos resultados.

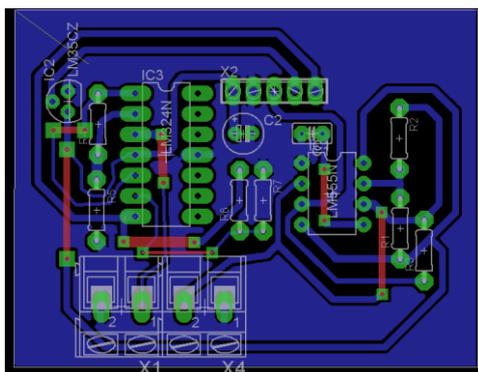


Figura 12 - Placa do Circuito de Aquisição Projetada com a Ferramenta Eagle®.
Fonte: Autoria própria.

Após os ensaios com as ferramentas de simulação (Eagle®, Psim®) foi montada a placa projetada na Figura 12, cujo resultado está apresentado na Figura 13.

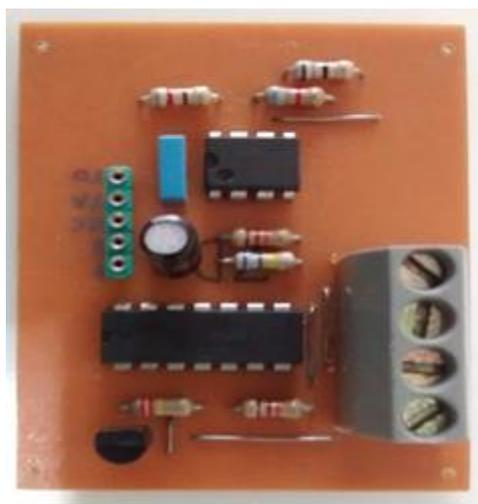


Figura 13 - Imagem da placa do Circuito de Aquisição de dados do sensor.
Fonte: Autoria própria.

Para a medição da temperatura do óleo vegetal até 250°C, foi trabalhado com o termopar que é um tipo comum de sensor de temperatura que se baseia no efeito termoelétrico ou efeito de Seebeck. O termopar é constituído por dois materiais de metais diferentes ou ligas com composições diferentes, unidos por uma solda (chamada junção de medição). A variação do sinal lido (ddp) em função da temperatura, que constitui a chamada tabela de leitura do termopar, é essencial para a sua utilização. A tabela com as medições pode ser elaborada a partir de calibrações, geralmente efetuadas nos pontos de fusão ou ebulição de substâncias puras. Diferentes tipos de termopares, fabricados com metais ou ligas diferentes, correspondem a diferentes tabelas de leitura. A medição de temperatura usando termopares é feita usando circuitos abertos com duas junções, sendo uma delas, a junção de referência, mantida a uma temperatura constante (geralmente imersa em fusão de água, hélio líquido ou nitrogênio líquido). E a outra, junção de medição, inserida na região onde se deseja medir a temperatura, conforme ilustra a Figura 14. (MOREIRA, 2002, p. 2).

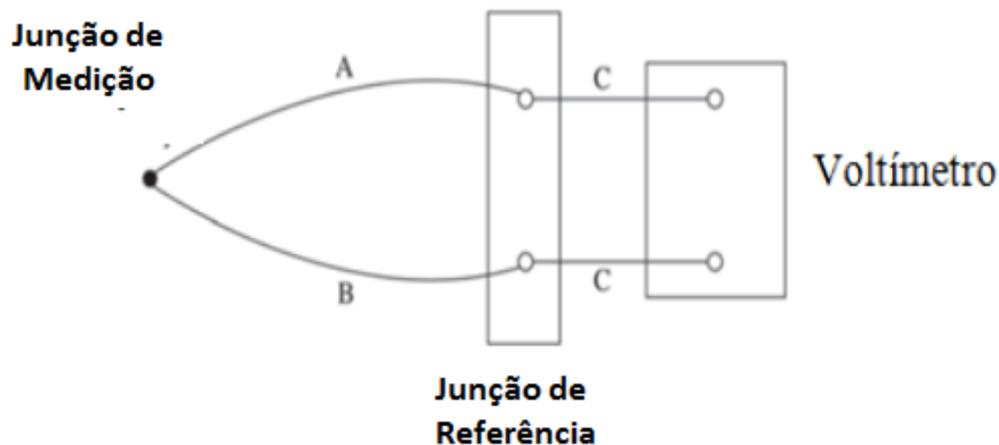


Figura 14 - Circuito de Medição do Termopar

Fonte: (MOREIRA, 2002, p. 3).

Durante os ensaios, para controlar a temperatura do óleo de soja, cujo valor varia da temperatura ambiente até 250°C, utilizou-se um termopar do tipo K. A tensão gerada é da ordem de milivolts (mV). Além disso, a junção tem uma pequena impedância de fonte e um coeficiente de temperatura de 50 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. A faixa de temperatura que pode ser lida por um termopar é bastante

ampla, -270°C a $+2500^{\circ}\text{C}$ e depende fortemente do par metálico que forma a junção. As sondas termopar do tipo K (Cromel/Alumel ou níquel cromo/níquel alumínio) são as mais usadas para as medições de temperatura (-200 a 1200°C) [ASTM D-4451990].

Para a leitura de temperatura ambiente, foi utilizado o LM 35, que é um sensor de precisão, apresenta uma saída de tensão linear relativa à temperatura em que ele se encontrar no momento em que for alimentado por uma tensão de 4-20Vdc e GND, tendo em sua saída um sinal de 10mV para cada Grau Celsius de temperatura. O LM35 não necessita de qualquer calibração externa ou “trimming” para fornecer com exatidão, valores temperatura com variações de $\frac{1}{4}^{\circ}\text{C}$ ou até mesmo $\frac{3}{4}^{\circ}\text{C}$ dentro da faixa de temperatura de -55°C à 150°C . Este sensor de temperatura é de fácil leitura de seus dados por um microcontrolador (MOREIRA, 2002, p. 2).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar o estado físico-químico do óleo residual de fritura através da sua constante dielétrica foram construídos dois sensores capacitivos de placas paralelas. O primeiro sensor foi construído a partir de materiais simples (placas de circuito impresso dupla face), sendo capaz de operar até a temperatura de 120°C . Esse primeiro sensor permitiu uma análise dos efeitos da temperatura em óleos durante o seu aquecimento. Com base nos resultados preliminares, surgiu a necessidade de utilizar um sensor mais robusto, principalmente no que diz respeito a temperatura de trabalho. Assim, um segundo sensor foi construído a partir de materiais mais resistentes à temperatura. O segundo sensor pode ser utilizado até a temperatura máxima de medição de 250°C , permitindo as análises da variação constante dielétrica do óleo vegetal: (i) durante a simulação do processo de fritura, que ocorre em aproximadamente 180°C , e (ii) na região entre a temperatura de fritura e o ponto de fumaça da

amostra¹ (ponto crítico do óleo). No caso do óleo de soja, a temperatura para o ponto de fumaça ocorre a aproximadamente 240 °C (MARQUES, 2009, p. 1).

3.1 SENSOR - I

3.1.1 Construção do Sensor

O sensor capacitivo I foi construído a partir de um conjunto de placas de fibra de vidro revestidas em ambas as faces com uma camada de cobre. Essas placas são comumente utilizadas na confecção de circuitos impressos (PCB). A Figura 15 apresenta um esboço do sensor I, cuja construção utiliza seis placas associadas em paralelo. A associação em paralelo permite aumentar os valores de capacitância registrados pelo sensor, possibilitando uma melhor adaptação às escalas do equipamento de medição utilizado na leitura dos dados do sensor (multímetro, marca Icel, modelo ICEL-MD 6100, escala de medição de até 20 nF, resolução de 10 pF, para uma exatidão de \pm (2,5%), com uma frequência de testes em 150 Hz.).

Conforme mostra a Figura 15, pode-se observar que as capacitâncias C1, C3, C5, C7, C9 e C11 são originadas das placas do material de circuito impresso e são praticamente constantes durante as análises. Já as capacitâncias C2, C4, C6, C8 e C10 sofrem alterações em função do meio dielétrico entre as placas do sensor. Dessa forma, é possível interpretar o sensor como uma combinação de duas associações de capacitores, uma com dielétrico fixo (*PCB Printed Circuit Board*– Placa de Circuito Impresso) de Fibra de Vidro, e outra com dielétrico variável (meio em que o sensor está mergulhado).

As placas utilizadas na construção do sensor apresentam uma área superficial de 63,0 cm² (7,0 cm x 9,0 cm) e espessura de 1,60 mm, associadas em paralelo e separadas por isoladores de acrílico com espessura de 1,80 mm. As placas foram fixadas entre si por quatro parafusos metálicos, ajustados à temperatura ambiente. Os furos nas placas possuem um raio (r_1) de 6,00 mm e

¹ O ponto de fumaça é uma temperatura característica que marca o surgimento de compostos tóxicos no óleo. A temperatura inicial para a ocorrência desse varia acordo com cada tipo de óleo, tipicamente entre 120°C a 240°C.

os isoladores de acrílico possuem um raio (r_2) de 10,00 mm (figuras 15 (B) e 15 (C)).

Cada um dos furos nas placas possui um área de 0,000113 m², totalizando uma área de 0,000452 m² em cada placa. O isolante de acrílico possui uma área de 0,000315 m², resultando em uma área de 0,00126 m² a cada quatro isolantes. Como pode ser visto na Figura 15 (A), a área de medida das placas é constituída pela área com capacitância fixa (C1, C3, C5, C7, C9, C11) que apresentam área efetiva de 0,00585 m² que resulta da diferença entre a área total da placa (0,00630 m²) e a área dos furos para os parafusos (0,000452 m²). Da mesma forma, a área do sensor que efetivamente está sujeita as alterações de capacitância em função do meio dielétrico é constituída pelos capacitores C2, C4, C6, C8 e C10, cuja superfície efetiva tem área total de 0,00504 m², resultado da diferença entre a área de cada placa (0,00630 m²) e a área dos quatro isolantes utilizados (0,000126 m²) entre as placas do sensor.

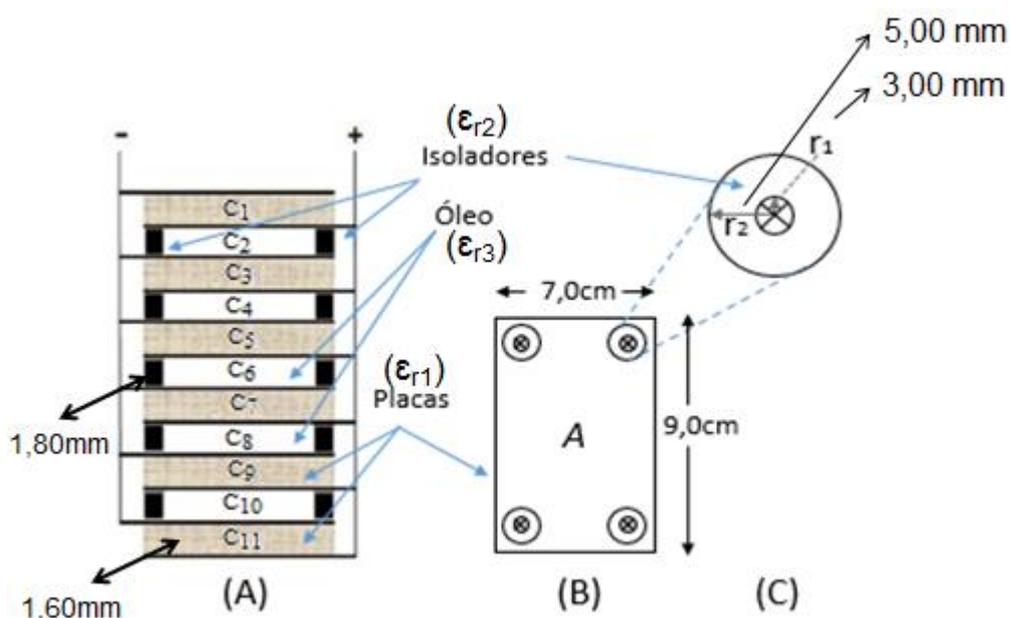


Figura 15 - Esboço do protótipo do sensor desenvolvido: (A) Visão lateral; (B) vista lateral de uma das placas (vista superior); e (C) visão alargada do espaçador de placas (raio r_2) e furo central (raio r_1).

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 03 apresenta a temperatura máxima de trabalho de cada um dos materiais empregados na construção do sensor I. Em função desses

valores, a temperatura máxima de trabalho do protótipo ficou limitada em 120°C.

Tabela 03 - Materiais utilizados na construção do sensor I e suas respectivas temperaturas máximas de trabalho

Material	Temperatura Máxima de Trabalho (°C)
Termo Retrátil (<i>isolamento dos parafusos</i>)	125
Acrílico (<i>isolamento entre as placas</i>)	123
Placa de fibra de vidro	130

Fonte: Vick; Raychem Products; Indac.

3.1.2 Sistema de Medição do Sensor

Conforme já mencionado na seção 3.1.1, as leituras do Sensor I foram realizadas por meio de um multímetro modelo ICEL-MD 6100, que possui as características escala de medição de até 20 nF, com resolução de 10 pF, para uma exatidão de $\pm (2,5\%)$, com uma frequência de testes em 150 Hz. A Figura 16 apresenta um diagrama de medição do sensor de forma simplificada, onde CF corresponde a capacitância gerada da PCB de Fibra de Vidro e CV representa a capacitância da região dependente do dielétrico do meio, que pode, com isto, determinar o tipo do dielétrico utilizado, ou as dependências físicas do mesmo.

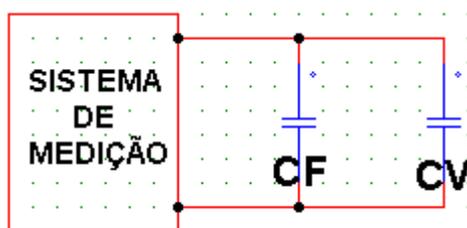


Figura 16 - Circuito equivalente do Sensor Capacitivo.

Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Caracterização Teórica do Sensor

O cálculo teórico do valor da capacitância apresentada pelo Sensor I poderia ser realizado através da equação 12. Contudo, os desvios nas medidas da área das placas e na distância entre as mesmas afetam o resultado dessa

previsão. Além desse fato, variações nas dimensões devido ao calor também devem ser consideradas devido ao fato de que, durante os ensaios a amostra de óleo vegetal terá sua temperatura variada de aproximadamente 20 °C até a temperatura de 120 °C. Portanto, os efeitos da dilatação térmica nos materiais empregado na construção do sensor (as placas de fibra de vidro, os isolantes de acrílico, e os parafusos de ferro) devem ser incluídos. Nos cálculos teóricos foram utilizados os valores da constante dielétrica dos materiais empregados na construção do sensor e a constante dielétrica do óleo de soja à temperatura ambiente (23°C). Os valores são apresentados na Tabela 04.

Tabela 04 – Constante Dielétrica do óleo vegetal e dos Materiais Empregados na construção do Sensor I

Material	Constante Dielétrica ϵ_r
Óleo de soja	3.5
Acrílico (<i>isolamento entre as placas</i>)	2.0001
Placa de fibra de vidro	2.5

Fonte: (VAN-VLACK, 2000, p. 173)

Assim, a equação 12 deve ser reescrita para considerar os efeitos térmicos e demais características da construção do sensor I. A associação capacitiva (CF1) resultante das seis placas de fibra de vidro de área retangular A , espessura d_1 e constante dielétrica dependente da temperatura $\epsilon_{r1}(T)$, pode ser representada pela equação 21, onde são subtraídas as áreas (πr_1^2) devido aos quatro furos de raio r_1 em cada uma das placas e $dA(T)$ representa a variação superficial da área das placas. A distância de separação entre as placas, d_1 é igual a 1,80 mm e a variação nessa distância em função da variação na temperatura foi desconsiderada nos cálculos, de modo que d_1 foi considerado constante na equação 21.

$$CF_1(T) = 6 \cdot \left[\epsilon_{r1}(T) \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{(A - 4 \cdot \pi \cdot r_1^2 + dA(T))}{d_1} \right], \quad (21)$$

A equação 22 descreve a segunda parcela da capacitância fixa (CF2), a qual delimita a área das placas que são preenchidas pelos isoladores de raio r_2 como elementos separadores e espessura d_2 , adicionada da dilatação térmica linear dos parafusos fixadores $dL(T)$ e da constante dielétrica

dependente com a temperatura $\varepsilon_{r2}(T)$. Assim, CF_2 é devida a quatro anéis de áreas $\pi(r_2^2 - r_1^2)$, que por sua vez estão presentes entre cinco placas do sensor.

$$CF_2(T) = 5 \cdot \left[4 \cdot \left[\varepsilon_{r2}(T) \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{(\pi \cdot (r_2^2 - r_1^2))}{d_2 + dL(T)} \right] \right] \quad (22)$$

A última parcela representa a capacitância variável do sensor (CV), composta pelos cinco capacitores de índices pares apresentados na Figura 15(A). A área efetiva de cada um desses capacitores é a área total da placa subtraída a área dos quatro isolantes. Assim, é possível escrever a equação 23 que descreve a capacitância $CV(T)$ proporcional ao comportamento do elemento dielétrico dependente da temperatura $\varepsilon_{r3}(T)$.

$$CV(T) = 5 \cdot \left[\varepsilon_{r3}(T) \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{(A - 4 \cdot \pi \cdot r_2^2 + dA(T))}{d_2 + dL(T)} \right] \quad (23)$$

A partir das equações 21, 22 e 23, a capacitância total do sensor pode ser representada pela equação 24, que leva em consideração a associação em paralelo da parcela das capacitâncias fixas ($CF_1(T)$ e $CF_2(T)$) e variável (sensor $CV(T)$), todas em função da temperatura, portanto sendo um somatório das mesmas.

$$C(T) = CV(T) + CF_1(T) + CF_2(T) \quad (24)$$

Considerando as dimensões do sensor I: Área A (7,0 cm x 9,0 cm), os raios $r_1 = 3,00$ mm e $r_2 = 5,00$ mm, as constantes dielétricas da placa de fibra de vidro de espessura de 1,6 mm ($\varepsilon_{r1} = 2,5$) e dos isoladores de espessura de 1,8 mm ($\varepsilon_{r2} = 2,0$), e supondo que este sensor contenha como dielétrico variável o óleo de soja a temperatura ambiente (23°C), cuja constante dielétrica relativa é igual a 3,5, obtém-se o valor da capacitância de 1,04 nF.

O resultado experimental obtido pelo sensor I quando o mesmo está totalmente imerso no óleo de soja mostra uma capacitância de 2,41 nF, o que implicaria em um valor de ε_{r3} igual a 12,8. O valor obtido para ε_{r3} é muito

superior ao valor estimado de 3,5. Essa diferença, possivelmente ocorre devido a imprecisões construtivas e pode ser compensado por um coeficiente de ajuste (Ca) concentrado na parcela relativa ao dielétrico óleo, uma vez que posteriormente este sensor servirá para medidas relativas.

Assim para o óleo vegetal, o coeficiente de ajuste (Ca) é igual a 3,66, valor obtido sem considerar a dilatação térmica do sensor. É importante mencionar que o coeficiente de ajuste apenas aproxima o valor da constante dielétrica do meio entre as placas do capacitor do valor teórico a uma dada temperatura. O uso do coeficiente de ajuste não elimina a possibilidade de erro sistemático nas medições realizadas com o sensor desenvolvido. Com isso, pode-se reescrever a equação 24 acrescentando Ca e isolando a variável ϵ_{r3} (material dielétrico entre as placas analisado) cujo valor se deseja encontrar, conforme mostra a equação 25.

$$\epsilon_{r3}(T) = \frac{C(T) - [CF_1(T) + CF_2(T)]}{5 \cdot \left[\epsilon_0 \cdot \frac{(A - 4\pi \cdot R_1^2 + dA(T))}{d_2 + dL(T)} \right] \cdot Ca} \quad (25)$$

A equação 25 permite uma relação entre a constante dielétrica do material em função da temperatura do dielétrico (óleo vegetal) e os valores da capacitância para diferentes temperaturas medidas pelo sensor I

3.2 SENSOR - II

3.2.1 Construção do Sensor

O sensor II foi construído a partir de oito placas de zinco com 1,00 mm de espessura associadas em paralelo. Com o objetivo de impedir que as placas de zinco tivessem contato físico com o fundo do recipiente utilizado para simular o processo de fritura, duas placas de latão com área de 165,00 cm² (15 cm x 11 cm) e espessura de 5,00 mm e contendo uma camada de mica em ambas as faces foram utilizadas nas extremidades da associação em paralelo (essas placas de latão foram isoladas eletricamente das placas de zinco). A associação entre as placas foi realizada por meio de parafusos de ferro e

isolantes de teflon. As placas de zinco utilizadas possuem uma área de $112,00 \text{ cm}^2$ ($11,20 \text{ cm} \times 10,00 \text{ cm}$). O espaçamento entre essas placas foi fixado por isoladores de teflon na forma de discos com $10,0 \text{ mm}$ de raio (r_2) e $2,00 \text{ mm}$ de espessura. Os quatro parafusos metálicos utilizados também foram envolvidos com um tubo de teflon. Cada furo nas placas possui $6,00 \text{ mm}$ de raio (r_1) e os isoladores possuem $10,00 \text{ mm}$ de raio.

Com base nas dimensões citadas acima, cada um dos furos nas placas de zinco do sensor apresenta uma área de $1,13 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$, totalizando uma área de $4,52 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$ para os quatro furos existentes em cada placa. Cada isolante de teflon possui uma área de $3,15 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$, totalizando $12,60 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$ de área para quatro isolantes. Assim, a área efetiva de medida das placas de zinco é igual a $97,40 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$, o que resulta da subtração da área total de cada placa ($112,00 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$) da área dos isoladores ($12,60 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$).

A Figura 17 apresenta um esboço do protótipo do sensor II. Nessa figura não são apresentadas as placas de latão utilizadas para o isolamento entre as placas de medição do sensor e o fundo do recipiente utilizado nas análises.

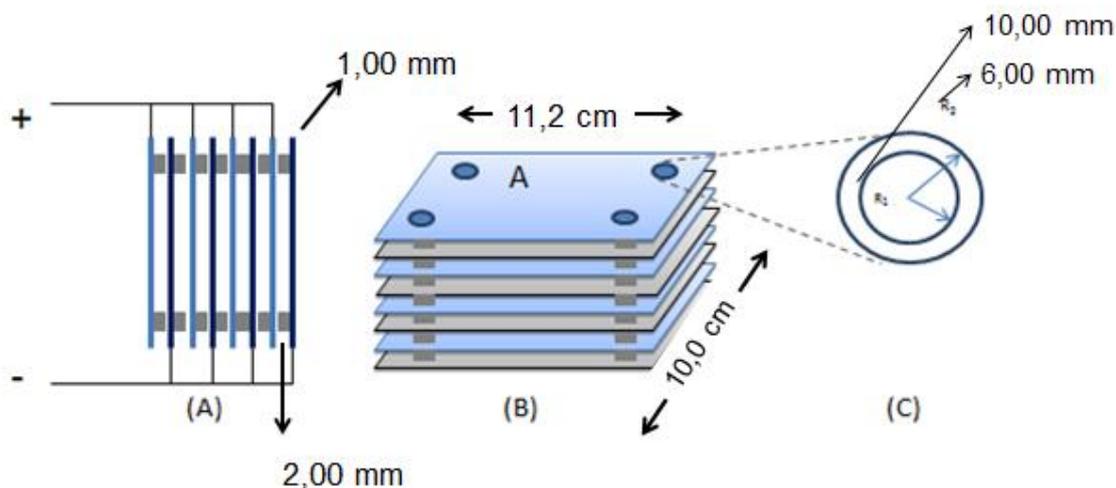


Figura 17 - Esboço do protótipo do sensor II, na figura não são mostradas as placas de latão utilizadas no protótipo do sensor. (A) Vista do perfil do sensor; (B) Vista 3 D do sensor; (C) visão ampliada de um dos furos na placa do Sensor

Fonte: Autoria própria.

A Figura 18 apresenta uma imagem do sensor II construído. Na Figura 18 (A) observa-se que foram utilizadas oito placas de zinco, duas placas de latão para formar a base do sensor e não deixar encostar as placas de zinco no

fundo do recipiente, e discos de teflon, que promovem o isolamento entre as placas de zinco do sensor.

A Figura 18 (B) apresenta o arranjo utilizado para estabelecer o contato elétrico entre as placas de zinco. Cada conjunto de placas foram ligadas positiva e negativa respectivamente sendo então o sensor II composto por quatro capacitores associados.

Uma imagem do sensor semidesmontado é apresentada na Figura 19. Para a aquisição dessa imagem, foram retiradas uma das placas de latão e um disco de teflon responsável pelo isolamento entre a placa de latão e a primeira placa da associação de capacitores do sensor (que também usou como isolante entre as placas discos de teflon). Nessa figura, ainda é possível verificar o encapsulamento do parafuso de ferro por meio de um tubo de teflon.

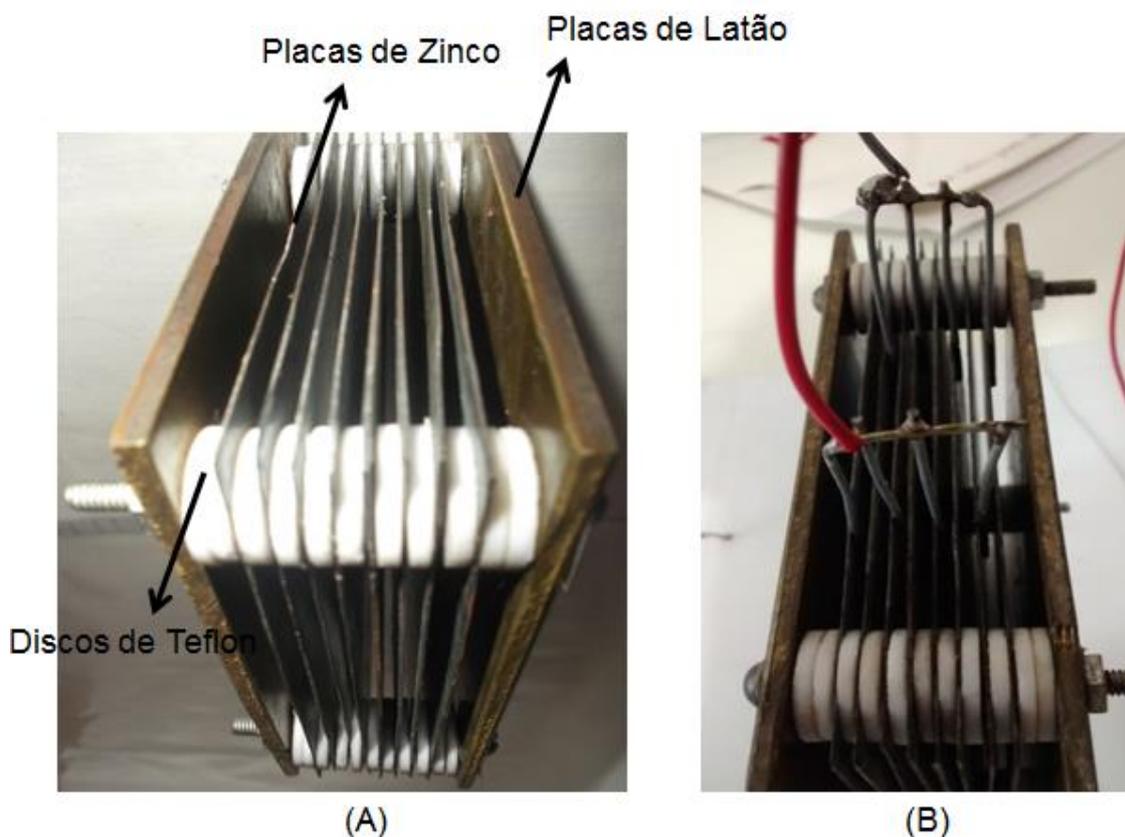


Figura 18 - (A) Imagem do protótipo do sensor II; (B) Imagem do arranjo utilizado para estabelecer a associação em paralelo no sensor II.

Fonte: Autoria própria.

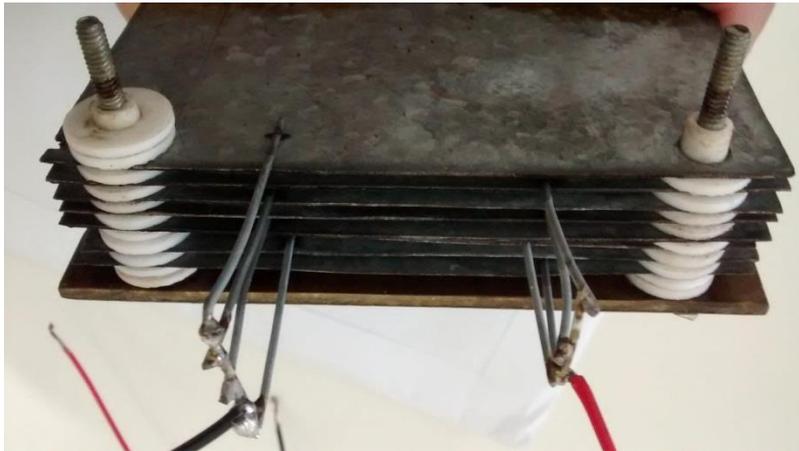


Figura 19 - Imagem do protótipo do Sensor II semidesmontado.
Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Circuitos de Medição Do Sensor

3.2.2.1 Circuito Oscilador

Um sensor capacitivo pode ser analisado através do circuito oscilador apresentado na seção 2.1.3 e, com C_1 sendo substituído pelo sensor capacitivo e, neste trabalho as variações na capacitância C_1 serão ocorridas em função das alterações sofridas pelo material dielétrico (óleos vegetais).

3.2.2.2 Medição de Temperatura

Por se basear na medição de uma diferença de tensão, um termopar apresenta facilidade de leitura e de monitoramento de temperatura. Nos experimentos realizados, a leitura do termopar foi realizada pelo circuito apresentado na Figura 20 e a leitura deste circuito foi realizada pelo Arduino. No caso, foram utilizados dois amplificadores operacionais em série a fim de melhorar o nível de tensão para a leitura do microcontrolador.

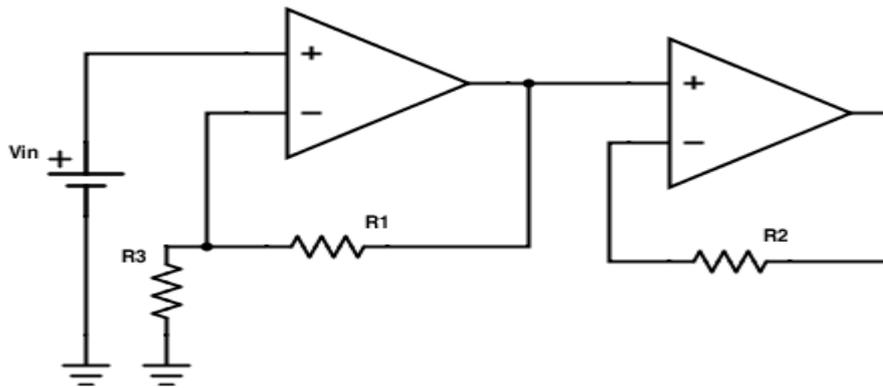


Figura 20 - Circuito de Medição do Termopar para Amplificação da Tensão de Saída
 Fonte: Autoria própria.

A calibração do Termopar utilizado nos experimentos foi realizada utilizando uma mistura de água e gelo triturado (0 °C) que posteriormente foi aquecida até atingir a temperatura de 90 °C, com agitação do líquido para manter a homogeneidade térmica da água. Durante a calibração, um termômetro de mercúrio foi utilizado para o monitoramento da temperatura. A temperatura ambiente durante a calibração do termopar foi de (18,0 ± 0,5) °C. A partir dos resultados da calibração do termopar, obtivemos a equação 26.

$$T = a.V_l + b \quad (26)$$

Onde: V_l representa a *ddp* nas extremidades do sensor termopar, [mV], T representa a temperatura, [°C]; as constantes são: $a = 0,92$ °C/mV e $b = 27,94$ °C.

3.2.2.3 Medição e Coleta de Dados com Arduino

A leitura das frequências do sinal de saída do circuito oscilador apresentado na Figura 09 foi realizada por meio de um microcontrolador. Dessa forma, foi possível coletar amplas quantidades de dados emitidos pelo sensor capacitivo, resultando em uma maior quantidade e qualidade de

informações. As medições de temperaturas também foram realizadas por esse microcontrolador.

A leitura da entrada analógica foi realizada através de uma função, que recebe como parâmetro a indicação de qual pino analógico a ser lido e retorna o valor digital que representa a tensão no pino. Como o conversor analógico-digital do Arduino possui uma resolução de 10 bits, o intervalo de tensão de referência, 5 V, será dividido em 1024 partes (10 bits de resolução) e o valor retornado pela função será o valor discreto mais próximo da tensão no pino. (KUPHALDT, 2014, p. 4).

A Figura 21 apresenta o sistema de coleta dos dados de capacitância. O sistema realizou medições a cada 1 s, armazenando os valores de capacitância do sensor (1ª coluna), temperatura ambiente (2ª coluna) e temperatura do óleo vegetal (3ª coluna). No código implementado já foram realizadas as conversões de valores: frequência para capacitância; valor de tensão para temperatura.

```
122, 203, 202
122, 201, 202
122, 202, 204
122, 202, 207
122, 204, 209
122, 203, 213
122, 201, 217
122, 200, 219
122, 204, 224
122, 206, 229
123, 203, 236
123, 204, 239
123, 205, 248
125, 202, 257
```

Figura 21– Processo Automatizado de Medição de Capacitância, Temperatura Ambiente e do Óleo Vegetal Para os Primeiros 15 Segundos.

Fonte: Autoria própria.

Os dados posteriormente foram tratados para ficarem com o formato adequado e ajustados, conforme apresenta sendo a Figura 22, onde a primeira coluna apresenta os valores da capacitância em nF, e a segunda e terceira coluna representam respectivamente a temperatura ambiente e a temperatura do óleo vegetal, ambas medidas em °C. Esses dados que eram recebidos do Arduino em um computador pessoal através da porta serial, foram formatados com a ferramenta Matlab®, e sempre que a terceira coluna alterava-se

(temperatura do óleo vegetal verificada pelo Termopar), o sistema gravava na Base de Dados (arquivo de texto, txt) as três variáveis: Capacitância, Temperatura Ambiente, Temperatura do Óleo Vegetal.

	1	2	3
1	1.2200	20	20
2	1.2300	20	23
3	1.2500	20	25
4			
5			

Figura 22 – Dados Ajustados para Armazenamento: Capacitância [nF]; Temperatura Ambiente [°C]; Temperatura Óleo Vegetal [°C].

Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Cálculos do Sensor - II

Os cálculos teóricos dos valores resultantes da capacitância apresentada pelo sensor poderiam ser realizados através da equação 12, se os materiais empregados na construção do sensor II não tivessem imperfeições e se não houvesse falta de precisão nas medidas ou falha na determinação das dilatações que o material apresentará no decorrer do processo de aquecimento. Dessa forma, haverá um distanciamento dos valores encontrados na teoria e os valores encontrados na prática. Os materiais empregados na construção do sensor II estão apresentados na Tabela 05.

Tabela 05 – Constante Dielétrica dos Materiais Empregados Sensor

Material	Constante Dielétrica ϵ_r
Óleo Vegetal	3.5
Teflon (<i>isolamento entre as placas</i>)	2.0001

Fonte: (VAN-VLACK, 2000, p. 174)

A equação 12 analisa o comportamento de um capacitor a uma determinada temperatura. Quando o sensor está inserido em um ambiente com grandes alterações nos valores de temperatura, a referida equação pode ser reescrita levando em consideração a dilatação térmica dos materiais empregados na construção do sensor.

A equação 27 apresenta a capacitância variável do sensor, considerando as sete áreas de medições entre as placas.

$$CV(T) = 7 \cdot \left[\varepsilon_{r1}(T) \cdot \varepsilon_0 \frac{(A - 4 \cdot \pi \cdot R_1^2 + dA(T))}{d + dL(T)} \right] \quad (27)$$

A equação 28 apresenta a parcela da capacitância fixa (isolantes) determinando a medição dos vinte e oito isolantes existentes entre as placas.

$$CF_2(T) = 7 \cdot \left[4 \cdot \left[\varepsilon_{r2}(T) \cdot \varepsilon_0 \frac{(\pi \cdot (R_2^2 - R_1^2))}{d + dL(T)} \right] \right] \quad (28)$$

Desta forma é apresentada a equação 29, que é o somatório das parcelas das capacitâncias fixas e variáveis do sensor.

$$C(T) = CV(T) + CF_2(T) \quad (29)$$

Onde os termos das equações 27 e 28 são, $dA(T)$ representa a dilatação da área das placas metálicas, $dL(T)$ representa a dilatação linear dos espaçadores isolantes entre as placas e dos parafusos fixadores, $\varepsilon_{r2}(T)$ é a constante dielétrica do material isolante (teflon) e, $\varepsilon_{r1}(T)$ é uma função adimensional que descreve o comportamento do dielétrico (óleo) em função da variação de temperatura, r_2 é o raio dos isolantes e r_1 é o raio do orifício nas placas, d é a distância de separação entre as placas, A é a área das placas, e $C(T)$ é a capacitância do sensor em função das alterações térmicas do dielétrico em questão.

Através da equação 29, foi calculado o valor da capacitância para o óleo (dielétrico), utilizando a constante de permissividade dielétrica (do vácuo) (ε_0), $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$, e uma constante dielétrica relativa (ε_r), dependente do material dielétrico que para o óleo vegetal é 3,5. O valor da capacitância com essas características com espaçamento entre as placas de 2,00 mm e demais parâmetros listados na seção 3.1.3, foi de 1,17 nF. A medida da capacitância na prática com o instrumento (multímetro, seção 3.1.3) foi de 1,08 nF, indicando que há uma diferença ocasionada pelas imperfeições apresentadas pelos materiais empregados na construção do sensor.

A partir da diferença apresentada entre o valor calculado e o experimental, pode-se determinar um coeficiente de ajuste (Ca), através da equação 30, assim determinando diferentes coeficientes para cada material dielétrico inserido entre as placas.

$$Ca = \frac{C - \left[(28) \varepsilon_{r2}(T) \cdot \varepsilon_0 \frac{(\pi \cdot (R_2^2 - R_1^2))}{d_2 + dL(T)} \right]}{7 \cdot \left[\varepsilon_0 \frac{(A - 4 \cdot \pi \cdot R_1^2 + dA(T))}{d_2 + dL(T)} \right] \cdot \varepsilon_{r1}(T)} \quad (30)$$

Esse coeficiente de ajuste (Ca) é interessante para posteriormente, ser multiplicado pela constante dielétrica relativa, sendo assim possível diminuir o erro da leitura do sensor pelas imperfeições existentes no material empregado em sua construção.

Através da equação 30 verifica-se que para o óleo vegetal o coeficiente de ajuste (Ca) é de 0,921 sem considerar nenhuma dilatação no material empregado.

Assim sendo, pode-se reescrever a equação 29 acrescentando o coeficiente de ajuste (Ca) na mesma e isolando a variável ε_{r1} (material dielétrico entre as placas analisado) que se deseja encontrar, resultando na equação 31.

$$\varepsilon_{r1}(T) = \frac{C - \left[(28) \varepsilon_{r2}(T) \cdot \varepsilon_0 \frac{(\pi \cdot (R_2^2 - R_1^2))}{d_2 + dL(T)} \right]}{7 \cdot \left[\varepsilon_0 \frac{(A - 4 \cdot \pi \cdot R_1^2 + dA(T))}{d_2 + dL(T)} \right] \cdot Ca} \quad (31)$$

3.3 METODOLOGIA E EXPERIMENTOS

3.3.1 Ensaio Com o Sensor I

Durante os ensaios realizados com o sensor I, as alterações no valor da capacitância das amostras de óleo foram registradas a partir da leitura do

sensor capacitivo I desenvolvido por meio de um multímetro digital Modelo ICEL MD-6130, conforme o esquema apresentado na Figura 16. Na Figura 23 é apresentada uma imagem do sensor I sendo inserido no recipiente que armazena o óleo vegetal. É importante mencionar que, durante os ensaios o sensor permanece totalmente imerso no óleo.

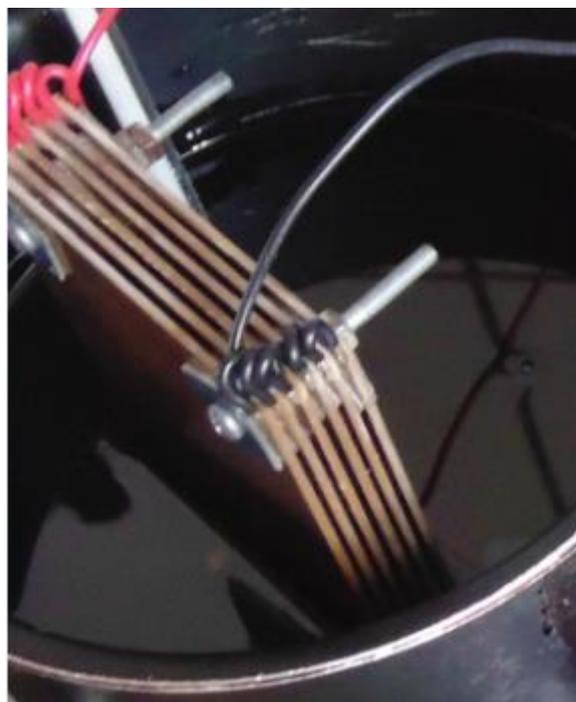


Figura 23 - Sensor Capacitivo I sendo mergulhado no óleo vegetal
Fonte: Autoria própria.

Nos experimentos, a temperatura do óleo foi monitorada a partir das leituras de um termômetro de Mercúrio (Hg), com faixa de medição entre -10°C a 310°C e divisão igual a 1°C . O termômetro foi inserido no óleo para monitorar sua temperatura e o multímetro foi utilizado para medir as alterações no valor da capacitância em função do aquecimento do óleo onde o sensor estava submerso. Os registros da capacitância em função da variação da temperatura foram realizados com intervalos de 5°C .

Nos ensaios, as amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 120°C . Ao atingir a temperatura de trabalho (120°C), o aquecimento foi interrompido e os valores de capacitância $C(T)$ foram registrados até o momento em que a temperatura da amostra retornasse a temperatura ambiente. Dessa forma, foram registrados os valores de capacitância em

função da temperatura (de 20°C a 120°C) em ciclos de aquecimento e resfriamento das amostras.

Para uma mesma amostra de óleo foram realizados quatro ensaios de aquecimento e resfriamento com um intervalo de 24 horas entre cada ensaio. Esse intervalo foi estabelecido de modo a manter aproximadamente as mesmas características (temperatura ambiente e umidade) no início do experimento. A partir dos resultados experimentais e com base na equação 24 é possível determinar as variações dielétricas durante os ensaios conforme as leituras do valor da capacitância, levando em consideração possíveis alterações no material empregado na construção do sensor. Ainda assim, os valores obtidos precisaram ser ajustados conforme o fator de ajuste apresentado na equação 25. As medidas foram realizadas três vezes com amostras novas de óleo vegetal, de mesmo lote e marca, a fim de realizar uma média das mesmas para corrigir possíveis erros de medição.

3.3.2 Ensaio Com o Sensor II

Nos ensaios realizados com o sensor II, as leituras do sensor capacitivo foram realizadas com um circuito oscilador e o Arduino. A Figura 24 apresenta uma imagem do sensor II quando o mesmo foi totalmente imerso no interior do recipiente contendo amostra de óleo.



Figura 24 - Imagem do sensor II mergulhado no interior do recipiente contendo uma amostra de óleo.

Fonte: Autoria própria.

Nos ensaios, a temperatura do óleo foi monitorada a partir das leituras de um sensor de termopar tipo K submerso no recipiente contendo óleo. A cada ciclo de aquecimento e resfriamento, a temperatura ambiente no início do ensaio foi medida por meio do LM 35. Os valores da frequência do oscilador, da temperatura de ambos os sensores (Termopar e LM 35) foram lidos por meio do Arduino. Os registros da capacitância em função da variação da temperatura foram realizados a cada 1 segundo, e nas tabelas de dados, foram armazenadas as informações a cada elevação de 1 °C.

Os ensaios com o segundo sensor, seguiram a mesma metodologia descrita para o sensor I. O sensor foi imerso em um recipiente contendo quatro litros de óleo vegetal. Posteriormente a amostra foi aquecida e as informações foram coletadas pelo sistema desenvolvido. Foram registrados a variações da capacitância durante o aquecimento do óleo de 20°C até 250°C (temperatura de trabalho dos isolantes do sensor). Após a amostra atingir essa temperatura, o aquecimento foi retirado e os valores de $C(T)$ foram registrados até o momento em que a temperatura da amostra retorna-se a temperatura ambiente. No ciclo aquecimento e resfriamento, todas as grandezas foram registradas de modo automatizado com o Arduino.

Os ensaios com o óleo vegetal foram realizados em uma amostra de óleo virgem, realizando o processo de aquecimento e resfriamento da mesma

por seguidas vezes dependendo da amostra em análise. Posteriormente o mesmo processo de aquecimento e resfriamento, foi realizado com amostras de óleos utilizados em frituras, o primeiro sendo em uma pastelaria e o segundo de um restaurante.

Utilizando a mesma amostra de óleo, foram realizadas dezoito coletas de dados, mantendo um intervalo de 24 horas entre cada coleta (intervalo determinado para que o início dos ensaios fossem repetidos aproximadamente nas mesmas condições de umidade e temperatura ambiente).

Ainda para cada ciclo completo de aquecimento e resfriamento, foram coletados aproximadamente 10 ml da amostra que foram utilizados posteriormente nas análises físico-químicas. A Figura 25 apresenta uma imagem dos frascos contendo volumes de amostras coletadas nos primeiros nove ciclos de aquecimento e resfriamento do óleo de soja juntamente com a amostra do óleo virgem.

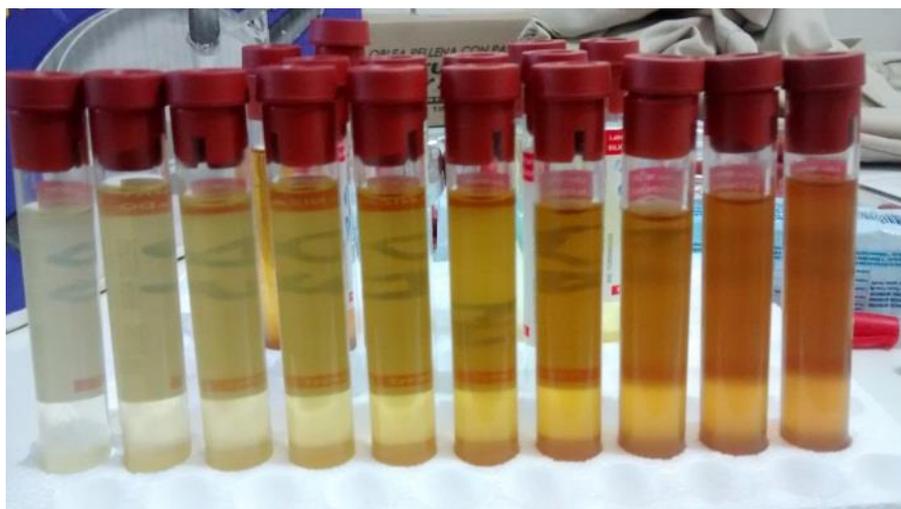


Figura 25 - Imagem dos frascos contendo amostras de óleo virgem e coletas após os nove primeiros ciclos de aquecimento e resfriamento (posicionados da esquerda para a direita).

Fonte: Autoria própria.

Além dos experimentos envolvendo ciclos de aquecimento e resfriamento da mesma amostra de óleo de soja, o segundo protótipo também foi utilizado para investigar a variação da capacitância durante um aquecimento constante e contínuo da amostra. O ensaio foi realizado com uma amostra do mesmo lote de óleo de soja virgem utilizado nos ciclos de aquecimento e

resfriamento. Utilizado uma fritadeira industrial, a amostra foi aquecida da temperatura ambiente até 180 °C. No ensaio, essa temperatura foi mantida constante por oito horas. Após esse tempo, o aquecimento foi interrompido e, decorridas aproximadamente seis horas, a temperatura da amostra retornou a temperatura ambiente. Durante todo o ensaio, os valores de temperatura e capacitância foram registrados a cada evolução de 1°C de temperatura do óleo.

Outro experimento foi analisar um óleo residual de um restaurante, o qual foi utilizado por aproximadamente 30 h, com períodos de três horas contínuas, sempre completando com óleo virgem quando necessário. Outro ensaio foi com o óleo residual de uma pastelaria, que foi utilizado durante 03 h consecutivas. Essas análises são importantes porque retratam efetivamente a qualidade do óleo residual encontrado para reciclagem. Assim, além de analisar esse óleo, pode-se relacionar o estado deste com óleos virgens submetidos à ciclos de estresse térmico, de modo a obter uma relação entre os estados finais em ambos os casos, e assim propor o estudo correlacionado com o estado real das amostras.

3.3.3 Ensaio Físico-Químicos

A análise da qualidade do óleo vegetal exposto a um processo de aquecimento envolve a determinação de uma série de índices químicos (FERNANDES, 2010, p. 1) (JORGE, 2005, p. 1).

Neste trabalho é proposto uma análise da qualidade do óleo vegetal avaliando índices de acidez, refração, viscosidade e iodo.

3.3.3.1 Determinação de acidez em óleo vegetal

Para a determinação do teor de acidez nas amostras de óleo vegetal realizou-se a análise em triplicata. Foram pesados aproximadamente 2 g de cada amostra de óleo de soja em um Erlenmeyer de 250 ml. Adicionou-se 25 ml de solução neutralizada de éter-álcool (2:1 v/v) à amostra e indicador fenolftaleína 1% (m/v).

As amostras foram tituladas com solução padrão de hidróxido de sódio 0,0100 mol/L, até a mudança de cor da solução, para um tom de rosa claro, indicando o ponto final da titulação e neutralização da solução. Desta forma, obtém-se o volume de hidróxido de sódio gasto para neutralizar a solução, e portanto o valor de acidez da amostra. O índice de acidez foi calculado de acordo com a equação 32.

$$\text{INDICE}_{\text{ACIDEZ}} = \frac{v \cdot f \cdot M \cdot 28,2}{m} \quad (32)$$

Onde: v é o volume da solução de hidróxido de sódio 0,1 mol/L;
 f é o fator de correção da solução de hidróxido de sódio 0,1 mol/L; e m a massa da amostra [g].

3.3.3.2 Determinação do Índice de Refração

Para a determinação do índice de refração utilizou-se o refratômetro de Abbe ligado ao banho termostatizado na temperatura de 40°C. Calibrou-se o equipamento conforme instruções do fabricante com água destilada.

Adicionou-se uma pequena quantidade da amostra no prisma inferior do aparelho com o auxílio de uma pipeta Pauster. Fechou-se o aparelho com a trava de segurança e esperou-se alguns instantes para a amostra entrar em equilíbrio térmico com o aparelho. Ajustaram-se os focos em busca da melhor leitura do valor de índice de refração. Ao final da análise de cada amostra, limpou-se os prismas com papel macio e álcool etílico.

3.3.3.3 Determinação do Índice de Iodo

Para a determinação do índice de iodo, analisaram-se as amostras em triplicata. Pesou-se aproximadamente 0,25g da amostra de óleo vegetal em um Erlenmeyer de 250 ml, e solubilizou-se com 10 ml de ciclohexano. Com uma pipeta volumétrica de 25 ml, adicionou-se a solução de Wijs à amostra solubilizada. Tampou-se o Erlenmeyer com plástico filme e agitou-se a solução,

posteriormente, deixou-se a solução em repouso, a temperatura ambiente, ao abrigo de luz por 30 minutos.

Após os 30 minutos, adicionou-se a amostra 10 ml de iodeto de potássio 15% (m/v) e 100 ml de água destilada deionizada. Titulou-se a amostra com solução de tiosulfato de sódio 0,086 mol/L até atingir-se um tom amarelo claro, então se adicionou aproximadamente 1 ml de solução indicadora de amido 1% (m/v) e continuou-se a titulação até o completo desaparecimento da cor azul.

Fez-se o teste de branco em duplicata, onde se adicionaram todos os reagentes, exceto a amostra de óleo, e então se realizou a titulação com tiosulfato de sódio.

Calculou-se o índice de iodo das amostras através da equação 33.

$$\text{INDICE}_{\text{IODO}} = \frac{(V_B - V_A) \cdot M \cdot 12,89}{N} \quad (33)$$

Onde: M é a molaridade da solução de tiosulfato de sódio; V_B o volume gasto na titulação do branco [ml]; V_A o volume gasto na titulação da amostra [ml]; e N o número de gramas da amostra [g].

3.3.3.4 Determinação da Viscosidade

A viscosidade foi medida utilizando um viscosímetro Cup-Ford. Primeiramente, com o aparelho limpo, escolhe-se e coloca-se o orifício adequado para a medida. Nivelam-se o aparelho com o auxílio de nível de bolha e dos dois reguladores situados nos pés do equipamento. Posteriormente fecha-se o orifício com o dedo, preenche-se o copo até o nível mais elevado. Após é retirado o excesso com uma placa plana de vidro e então deixasse escorrer o óleo e simultaneamente se faz contagem do tempo através de um cronômetro. Anota-se o tempo em segundos na primeira interrupção de fluxo de escoamento. O procedimento foi realizado em triplicata, limpando-se todos os componentes entre a coleta de cada amostra. A viscosidade é calculada pela equação definida no manual do equipamento para o orifício empregado no experimento, conforme apresentado na equação 34 (ALMEIDA, 2011, p. 1).

$$V = a * t - b \quad (34)$$

Onde: V representa a viscosidade [mm^2/s]; t é o tempo [s]; as constantes são: $a = 3,846 \text{ mm}^2/\text{s}^2$ e $b = 17,300 \text{ mm}^2/\text{s}$.

3.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.4.1 Resultados Experimentais – Sensor I

Os gráficos da Figura 26 mostram os valores da constante dielétrica em função da temperatura (leitura de capacitância entre 2,41 nF a 6,18 nF realizando três medições com uma mesma amostra de mesmo tipo e lote e realizado uma média) para cada um dos quatro ciclos de aquecimento e resfriamento das amostras de óleo se soja, curvas contínuas e curvas pontilhadas, respectivamente. É importante mencionar que cada ciclo foi realizado após um intervalo de 24 horas e com a mesma amostra de óleo de soja. Nessas quatro figuras, pode-se verificar que a constante dielétrica relativa sofre um aumento de aproximadamente 3 para aproximadamente 11 para a temperatura máxima de aquecimento das amostras. Nota-se ainda que durante o resfriamento das amostras a constante dielétrica descreve uma curva diferente daquela durante o aquecimento.

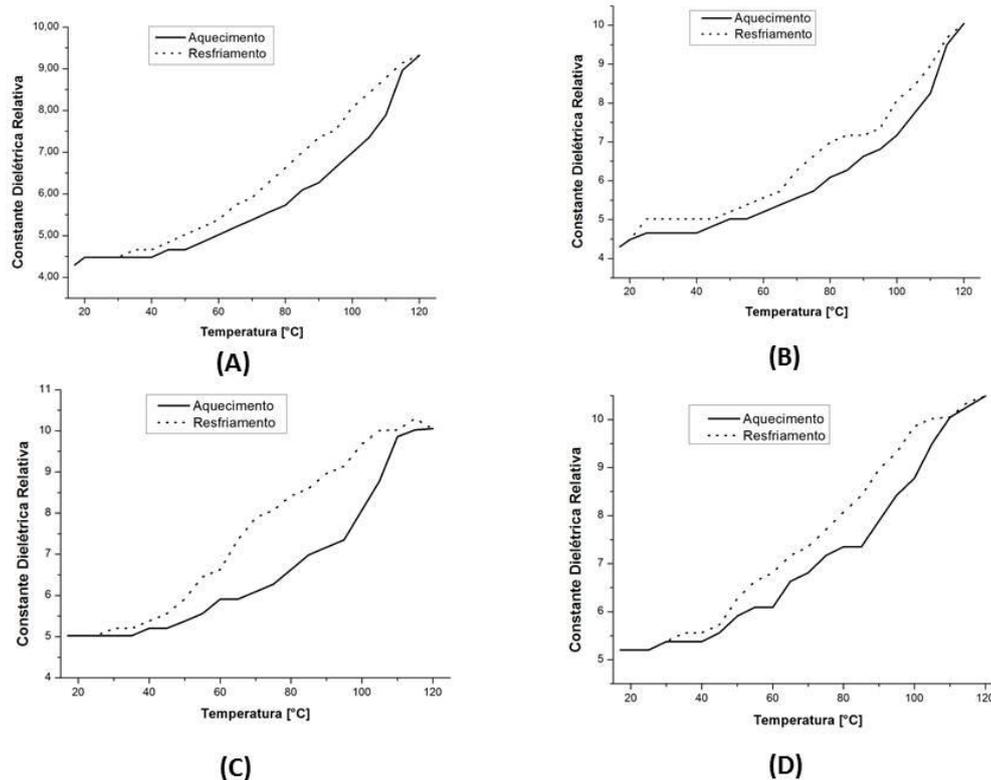


Figura 26 - Constante dielétrica relativa em função da temperatura para ciclos de aquecimento e resfriamento da amostra de óleo de soja. (A) Primeiro Ciclo; (B) Segundo Ciclo; (C) Terceiro Ciclo; (D) Quarto Ciclo.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 27 apresenta as curvas da constante dielétrica em função da temperatura para os quatro ciclos de aquecimento do óleo de soja. Verifica-se que ao final de cada aquecimento, a constante dielétrica da amostra sofre um ligeiro acréscimo. Essa variação pode indicar que, após o aquecimento da amostra a 120 °C ocorre uma alteração físico-química irreversível nas amostras.

Foram realizados testes de repetibilidade sem aquecer o óleo, ou seja, ao terminar o experimento e voltar a temperatura ambiente, foi verificado o valor da constante dielétrica. No dia seguinte antes de iniciar um novo aquecimento desta mesma amostra, foi observado o mesmo valor do dia anterior. Posteriormente a análise de todos os ciclos de uma determinada amostra, o sensor era removido do recipiente, lavado com água para remover qualquer tipo de impureza. Quando seco, verificou-se a medida da capacitância “a vazio” era a mesma, provando que o sensor não sofreu nenhuma deformação.

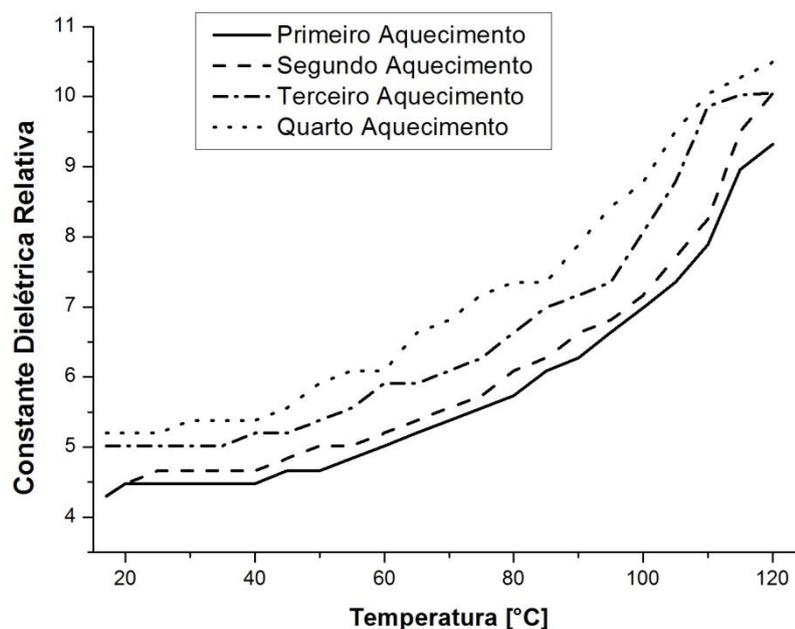


Figura 27 - - Curvas de aquecimento durante os quatro ciclos mostrados
 Fonte: Autoria própria.

As curvas de aquecimento mostradas na figura 27 foram ajustadas por uma função polinomial quadrática. Os coeficientes de ajuste para cada aquecimento são apresentados na Tabela 06 de forma comparativa para cada ciclo de aquecimento. Os resultados apresentados definem um valor para o coeficiente de primeira ordem que representa a dependência da constante dielétrica relativa em função da temperatura, o coeficiente indica que a constante dielétrica relativa está ligeiramente adiantada em função dos ciclos anteriores. O coeficiente de segunda ordem, que indica a inclinação da curva, apresenta conforme aumento da temperatura valores mais altos para a constante dielétrica relativa. Adicionalmente, o coeficiente de ordem zero, que indica o valor mínimo da constante dielétrica relativa, apresenta-se de forma crescente para cada etapa de aquecimento, indicando que há uma alteração físico-química definitiva na amostra analisada. Os resultados indicam uma tendência a degradação da amostra (WITSCHINSKI, 2012, p. 1).

Tabela 06 – Resultados do ajuste polinomial para as curvas de aquecimento mostradas na Figura 27.

Ciclo de Aquecimento	Função
1°	$Er(T) = 4,52484 - 0,04721 \cdot T + 7,08133 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$
2°	$Er(T) = 4,77836 - 0,05096 \cdot T + 7,64164 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$
3°	$Er(T) = 5,03305 - 0,04500 \cdot T + 7,22029 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$
4°	$Er(T) = 5,09636 - 0,03470 \cdot T + 6,63515 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$

A Figura 28 apresenta os pontos experimentais da Figura 26 e os ajustes polinomiais obtidos com estes pontos experimentais (funções apresentadas na tabela 06).

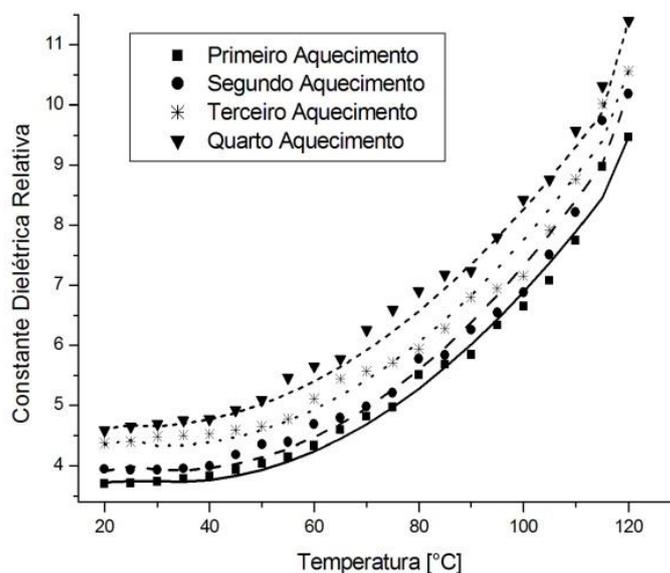


Figura 28 - Ajuste dos pontos experimentais apresentados na figura 27. As equações de ajuste são apresentadas na tabela 06.

Fonte: Autoria própria.

3.4.2 Resultados Experimentais – Sensor II

Em geral, a viscosidade de líquidos depende da temperatura e da sua composição, bem como o as condições de uso aplicado à amostra (BARBOSA, 2004). A viscosidade dos óleos vegetais diminui com o aumento da temperatura. Durante o aquecimento da amostra, à transferência de energia provoca o rompimento de ligações intermoleculares. Como consequência o

escoamento polimérico é facilitado, o que resulta na redução da viscosidade do óleo vegetal.

Para apresentar que o sensor não apresenta diferenças significativas no seu material durante o aquecimento, a Figura 29 apresenta o aquecimento em um forno com o sensor II a vazio, determinando em comparação com os dados da Figura 30, que o aumento do valor da capacitância é inferior a 0,5 %. A Figura 30 mostra os valores da constante dielétrica em função da temperatura de aquecimento das amostras de óleo de soja (leitura de capacitância entre 1,08 nF a 135 nF) para cada um dos dezoito ciclos de aquecimento e resfriamento. Nessa figura, pode-se verificar que a constante dielétrica relativa apresenta valores crescentes para cada ciclo de aquecimento, e este comportamento é determinado pela viscosidade que, com o aumento da temperatura, comporta-se de forma decrescente (ASTM D-4451990).

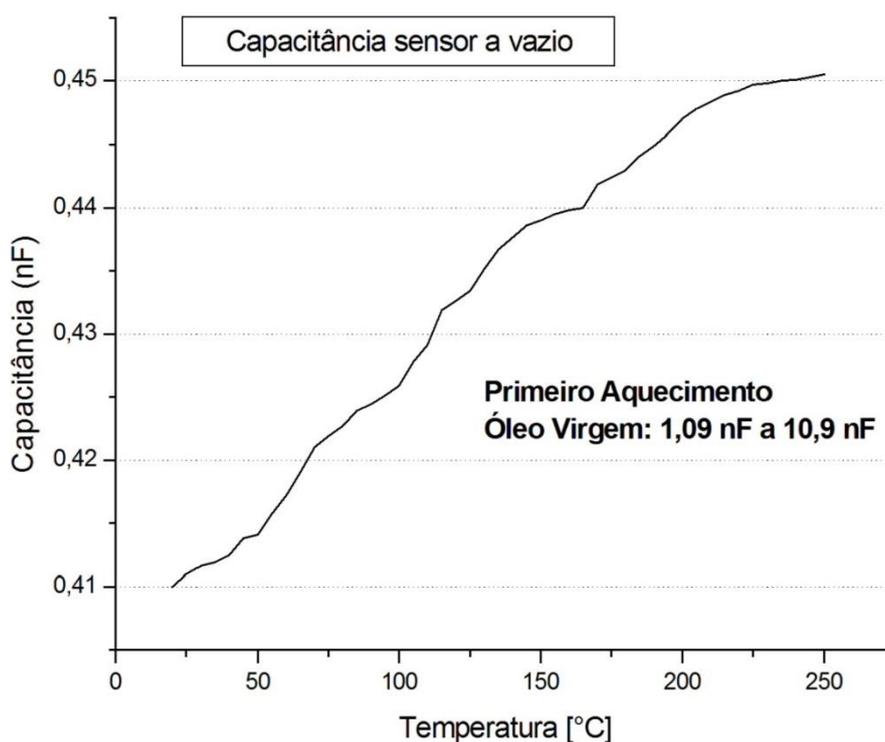


Figura 29 - Ensaio com o sensor II aquecimento em forno sem o óleo inserido entre as placas.

Fonte: Autoria própria.

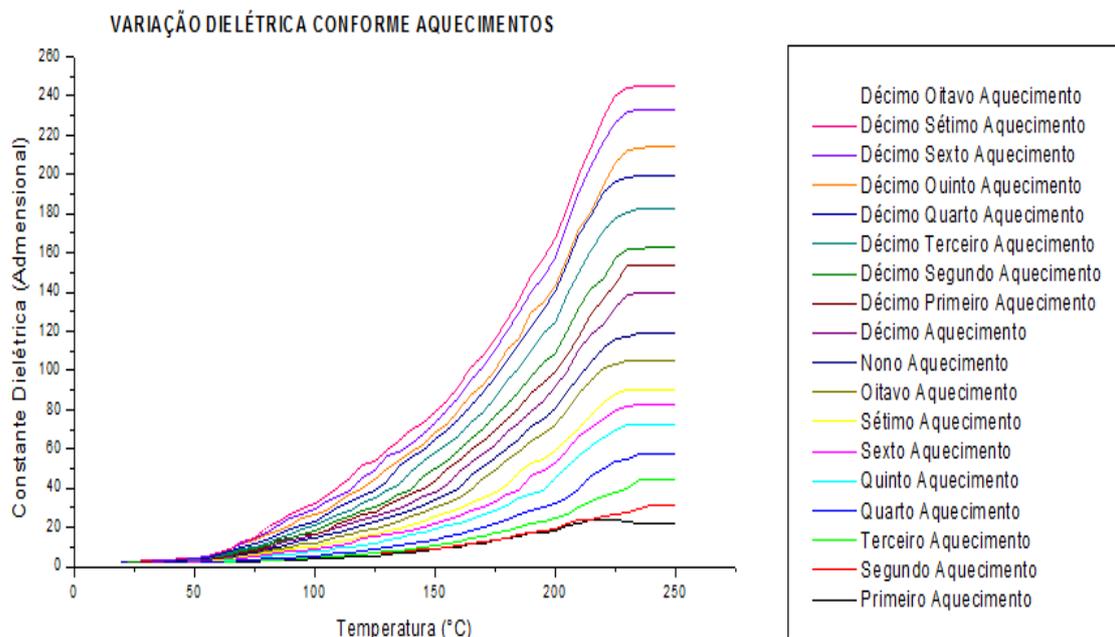


Figura 30 - Constante Dielétrica em função da temperatura (20 °C a 250 °C) para dezoito ciclos de aquecimento

Fonte: Autoria própria.

A Figura 31 apresenta uma imagem ampliada para melhor visualização da Figura 30, apresentando no início que a constante dielétrica aumentou com os aquecimentos à amostra.

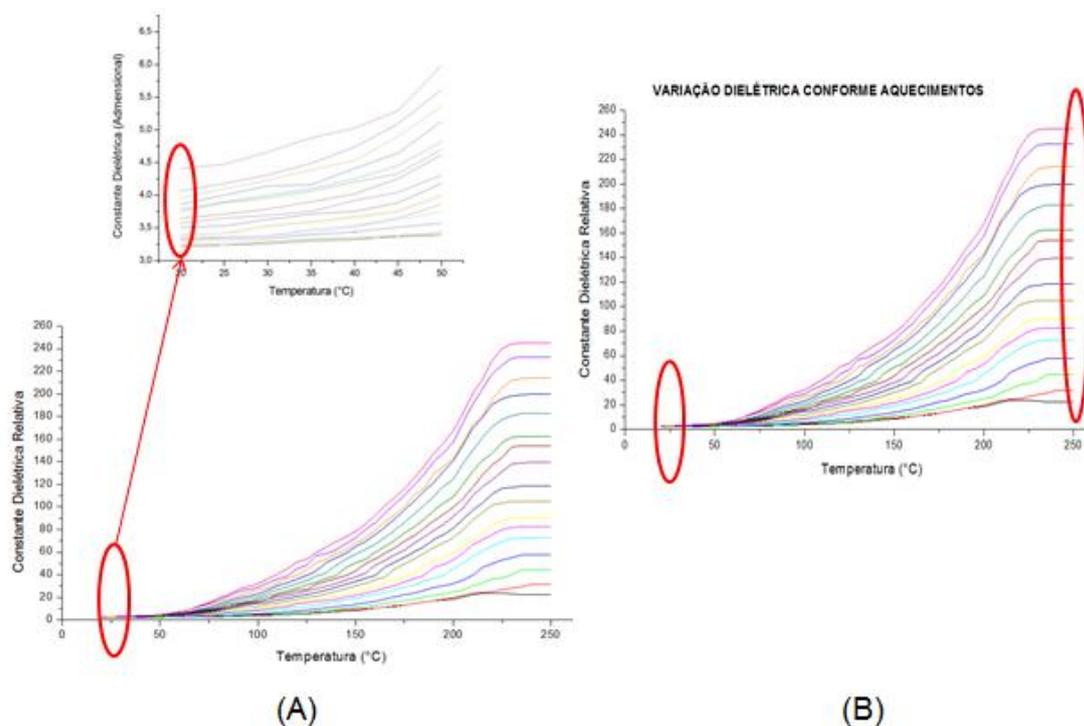


Figura 31 – (A) Constante dielétrica para os dezoito ciclos de aquecimentos e ampliação para região de temperatura ambiente. (B) Figura original que mostra as duas regiões analisadas de temperatura.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 32 apresenta a constante dielétrica à 20 °C no início de cada um dos 18 ciclos de aquecimento e resfriamento. Verifica-se que, ao final de cada ciclo, a constante dielétrica da amostra sofre um ligeiro acréscimo. Esse resultado pode indicar que, após o aquecimento e resfriamento da amostra (de 20 °C a 250 °C) ocorre uma alteração definitiva no valor da capacitância e, portanto, uma alteração físico-química irreversível na amostra de óleo, não considerando as contribuições dos metais que compõem o sensor.

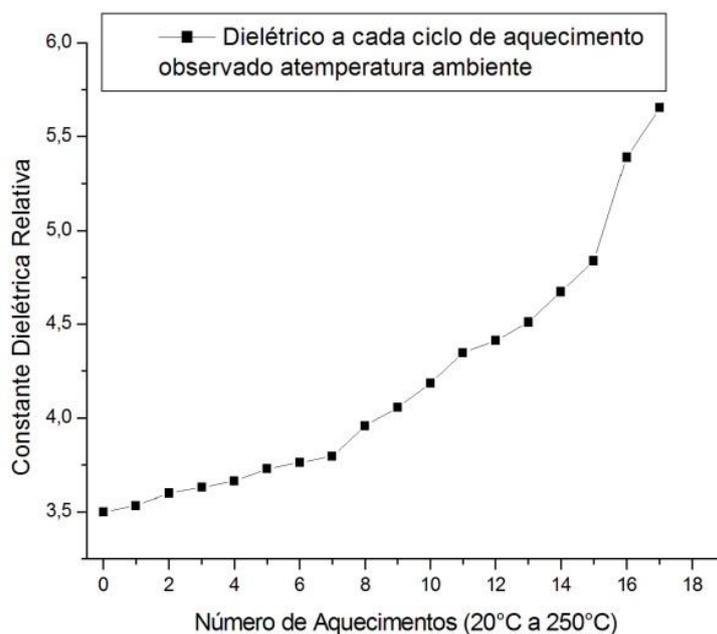


Figura 32 - Constante Dielétrica à 20°C, obtidas para cada um dos dezoito ciclos de aquecimentos e resfriamento.

Fonte: Autoria própria.

Os ensaios realizados com a fritadeira elétrica, expondo a amostra de óleo de soja virgem a temperatura constante de 180°C durante oito horas consecutivas com medição e coleta dos dados a cada 1 minuto, é apresentado na Figura 33, onde se observa que os valores dielétricos sofrem pequenas oscilações no decorrer do processo.

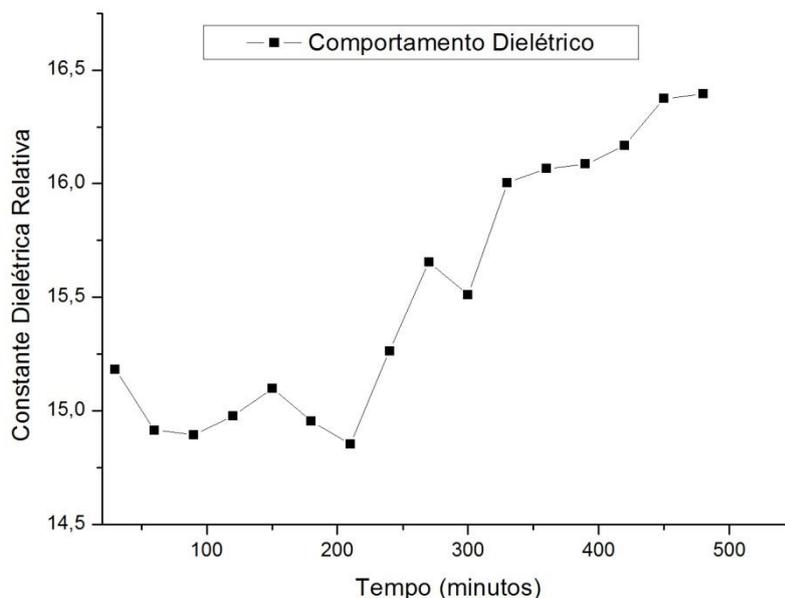


Figura 33 - Constante Dielétrica do óleo virgem em função do tempo, mantendo a temperatura constante em 180°C.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da análise do óleo residual de soja utilizado durante trinta horas em restaurante estão apresentados na Figura 34 (b). Na mesma figura, ainda é comparado o primeiro aquecimento apresentado na Figura 30 e os resultados de aquecimento de uma amostra de óleo residual utilizado em uma pastelaria durante três horas. As curvas mostram que, apesar de possuírem valores dielétricos diferentes, pois possuem diferentes níveis de alterações físico-químicas definitivas, a variação na constante dielétrica em função da temperatura segue a mesma tendência para as três amostras analisadas. É possível ainda afirmar que, quanto maior o nível de uso do óleo vegetal, e maior a temperatura que o mesmo é exposto, maior é sua constante dielétrica.

A Figura 35 apresenta os valores da constante dielétrica para aquecimentos de amostras de óleo residual utilizada em uma pastelaria e restaurante respectivamente. É comparado estes dados com o primeiro aquecimento ao óleo virgem.

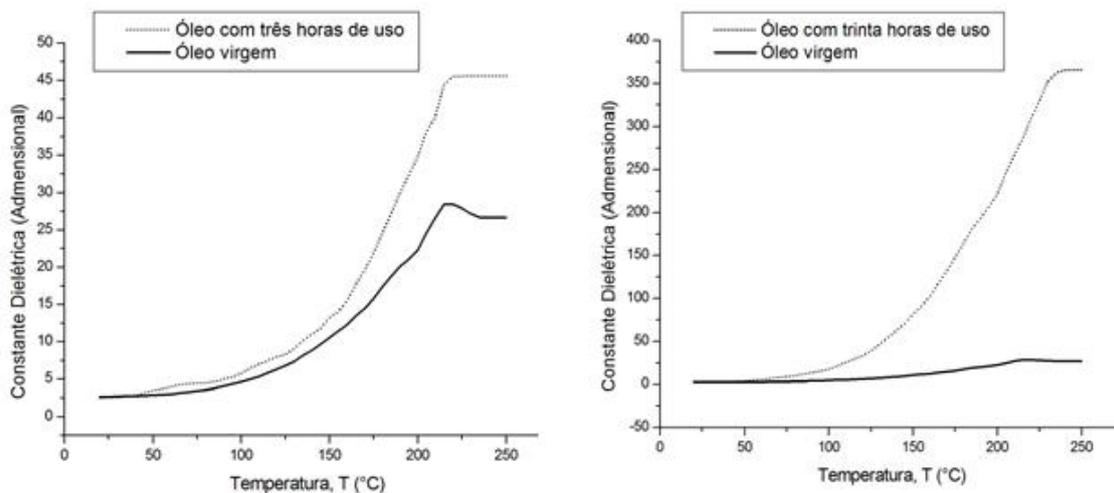


Figura 34 - Constante Dielétrica para óleo de pastelaria (a) e restaurante (b), comparado com o óleo virgem.

Fonte: Autoria própria.

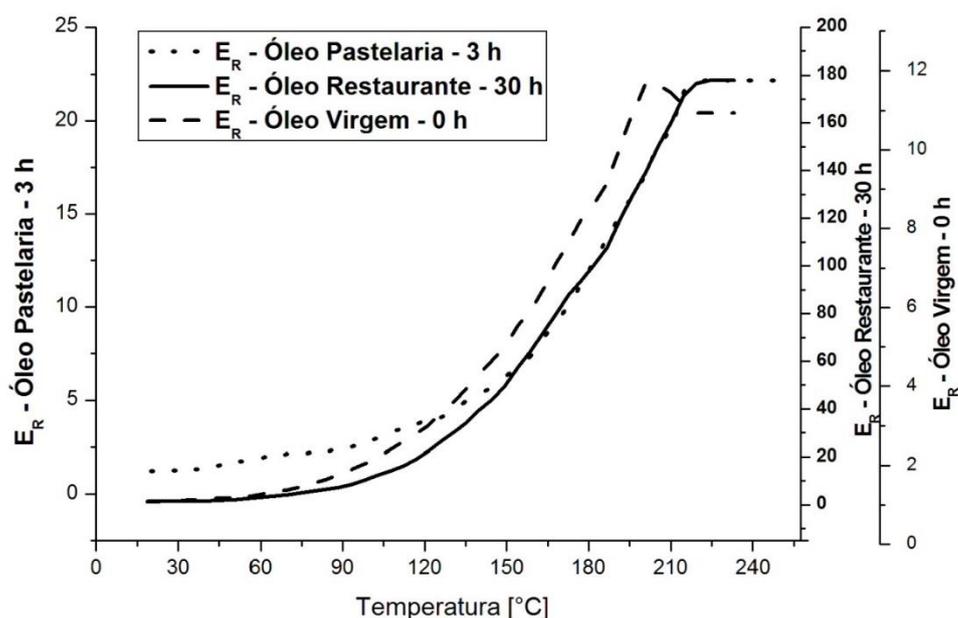


Figura 35 - Constante Dielétrica de diferentes óleos utilizados em frituras comparados com óleo virgem.

Fonte: Autoria própria.

O índice de acidez revela o estado de conservação de óleos e gorduras. Os parâmetros de qualidade indicados para aceitabilidade de óleos vegetais são os menores possíveis, uma vez que elevados valores de índices de acidez são indicativos de alterações pronunciadas, comprometendo a capacidade de

utilização dos mesmos, sejam para fins alimentícios ou carburantes (SUWARNO, 2008).

A Figura 36 mostra os resultados obtidos para o índice de acidez, os valores foram tomados a temperatura ambiente (20 °C) no início de cada ciclo de aquecimento, para as amostras analisadas na figura 32. A curva pontilhada na Figura 36 representa a curva obtida por meio do ajuste polinomial dos dados coletados nos experimentos. Este ajuste foi realizado para todas as análises físico-químicas para analisar a tendência de degradação das amostras.

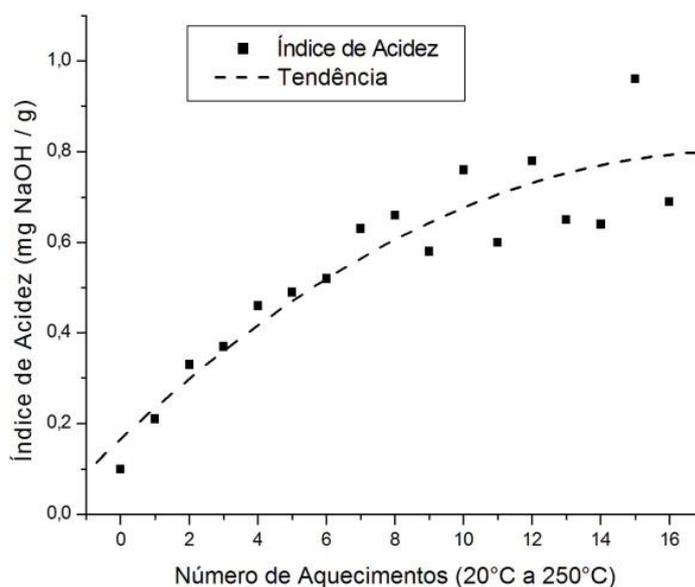


Figura 36 - Índice de acidez à 20°C, os valores foram obtidos para cada um dos dezoito aquecimentos. A curva pontilhada representa o ajuste polinomial de segunda ordem para os valores obtidos experimentalmente.

Fonte: Autoria própria.

Para as dezoito amostras de óleo de soja coletadas no início de cada ciclo, também foram analisadas os índices de refração e iodo, conforme procedimento descrito no item 3.3.3. Os resultados dessas medidas estão apresentados nas figuras 37 e 38, respectivamente. Na figura 37 e 38, a curva pontilhada representa uma linha de tendência das amostras devido ao processo de aquecimento das mesmas.

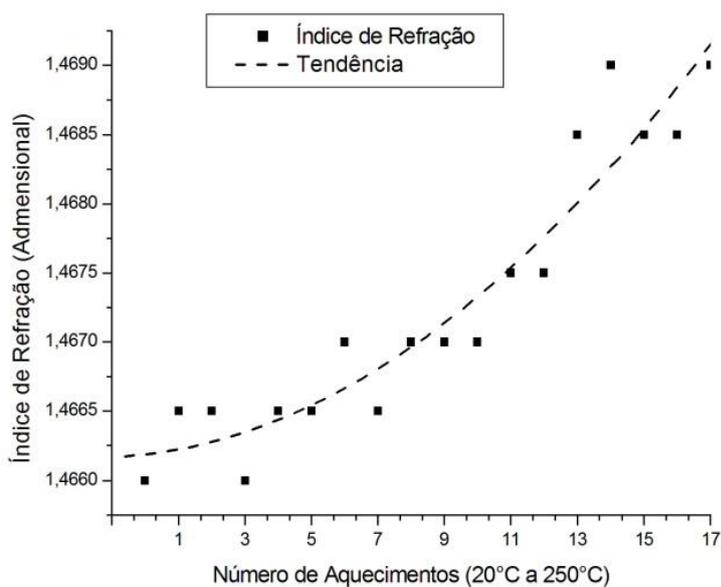


Figura 37 - Índice de refração à 20°C, os valores foram obtidos para cada um dos dezoito aquecimentos.

Fonte: Autoria própria.

O índice de iodo é um parâmetro usado para prever a presença de duplas ligações em um éster de ácido graxo. Quanto maior o valor encontrado para este índice, maior o grau de insaturação, servindo como indicativo de tendência à oxidação dos óleos vegetais. A tendência de redução do valor do índice de iodo para ciclo de aquecimento é devido a quebra da dupla ligação dos ácidos graxos insaturados (TOUDJA, 2014, p. 1).

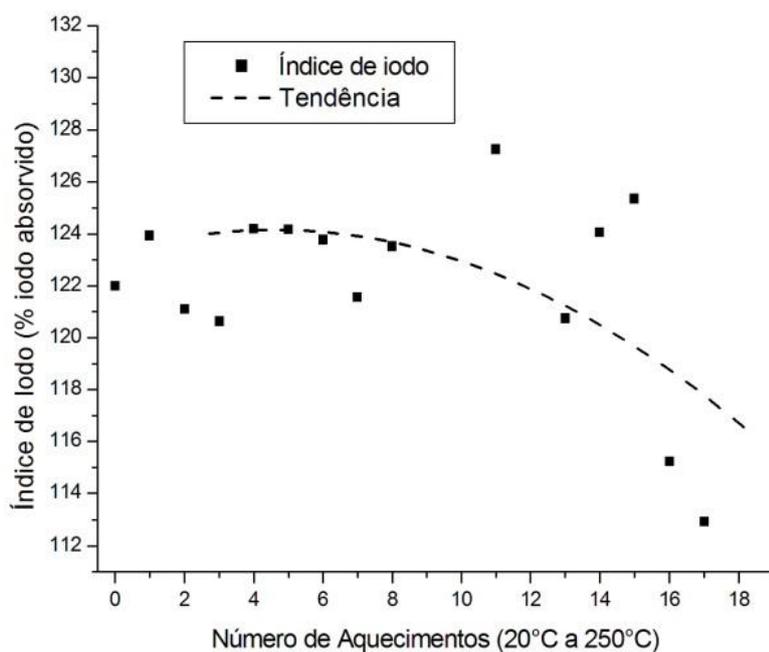


Figura 38 - Índice de iodo à 20°C, os valores foram obtidos para cada um dos dezoito aquecimentos

Fonte: Autoria própria.

Foram realizadas as análises de viscosidade do óleo vegetal, e as mesmas estão apresentadas na Figura 39, que mostra os resultados experimentais e a curva de tendência.

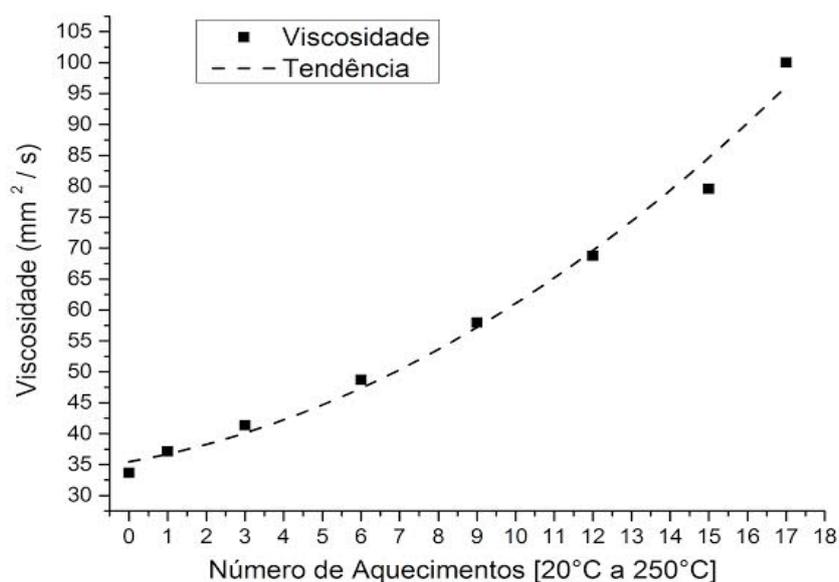


Figura 39 - Viscosidade à 23°C, obtidos para cada um dos dezoito aquecimentos.

Fonte: Autoria própria.

Após obter as equações das curvas de tendência apresentadas nas Figuras 36, 37 e 38, foi realizada a sobreposição das mesmas, a fim de verificar cada índice, depois de cada ciclo de aquecimento, conforme mostra a Figura 40. Na Figura 40, os resultados do índice de iodo foram interpretados de forma inversa para ser possível a observância da sua comparação com as demais grandezas analisadas. Além dessas curvas os resultados dos valores dielétricos apresentados na Figura 33, e da viscosidade, Figura 39, também estão expostos, em comparação, na Figura 40.

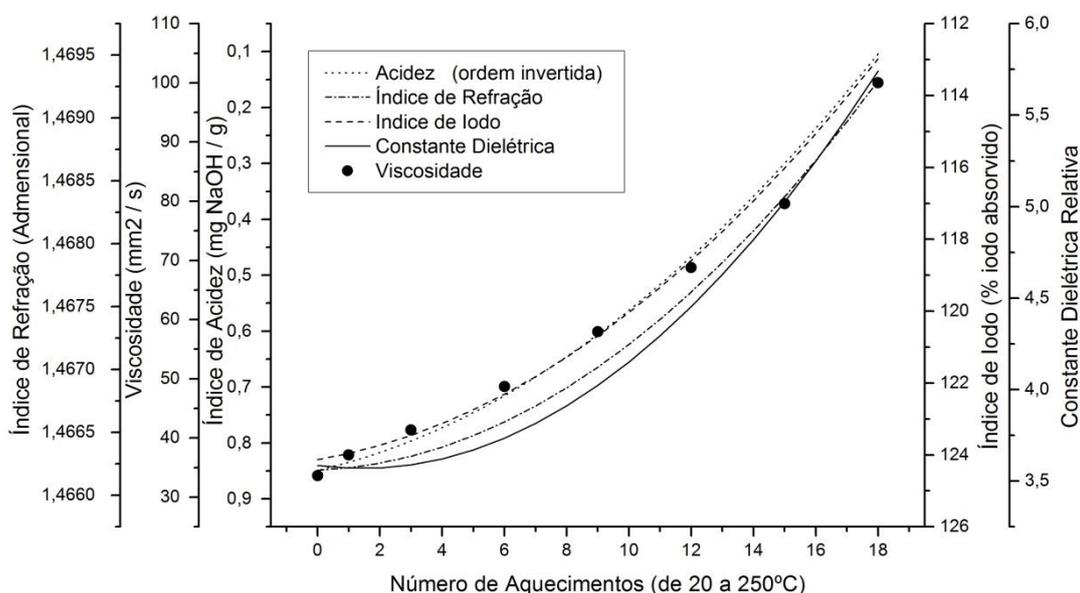


Figura 40 - Sobreposição das curvas de tendência dos índices de refração, acidez, iodo, constante dielétrica e valores da viscosidade das amostras analisadas.

Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados apresentados, pode-se verificar que houve uma alteração definitiva no valor da constante dielétrica da amostra de óleo de soja após cada ciclo de aquecimento. Os resultados indicam ainda uma tendência a degradação da amostra. As análises químicas dos índices que determinam as condições de deterioração do óleo analisado neste trabalho apresentam comportamento semelhante ao comportamento apresentado pelo valor dielétrico coletado pelo instrumento de medição, ou seja, as grandezas físicas analisadas estão intimamente relacionadas entre si sempre que a amostra era

condicionada a um processo de aquecimento e resfriamento. Há uma correlação com a curva dielétrica apresentada na Figura 32, com as demais curvas que estão sobrepostas na Figura 40 através de suas linhas de tendência, alterando apenas o sentido da curva do índice de iodo para o modo crescente, apenas a fim de sobrepô-las, assim determinando que para cada ciclo de aquecimento os índices químicos analisados seguem a mesma tendência da curva dielétrica apresentada.

As quatro curvas apresentadas na Figura 40, que são a constante dielétrica, índice de iodo, refração e acidez das amostras podem ser aproximadas por uma equação de segundo grau como observado na Tabela 07. Além destas, a equação que descreve a viscosidade da Figura 39, também foi apresentada.

Tabela 07 – Resultados do ajuste polinomial para as curvas de aquecimento mostradas na Figura 40.

Parâmetro Físico-Químico	Função
Acidez	Acidez(T) = $-0,001600 \cdot T^2 + 0,0702 \cdot T + 0,1039$
Refração	Refrac(T) = $0,000009 \cdot T^2 + 0,0001 \cdot T + 1,4662$
Iodo	Iodo(T) = $-0,026300 \cdot T^2 - 0,1462 \cdot T + 124,13$
Dielétrico	Er(T) = $0,007900 \cdot T^2 - 0,0224 \cdot T + 3,5848$
Viscosidade	Visco(T) = $0,113000 \cdot T^2 + 1,4660 \cdot T + 35,067$

Fonte: Autoria própria.

A primeira correlação possível entre todos esses parâmetros físico-químicos e a constante dielétrica analisados é que todos podem ser aproximados através de equações polinomiais de segunda ordem.

Para a análise do óleo de soja virgem, todas as curvas têm um comportamento que dependem de suas características próprias e como se deseja analisar o comportamento em função de diferentes aquecimentos, zeraram-se os valores constantes para dar uma mesma amplitude inicial. Dessa forma, foi possível encontrar um fator de proporcionalidade entre as curvas, de modo que houvesse sobreposição das mesmas e que o comportamento evolutivo em função do estresse térmico fosse semelhante, como apresentado na Figura 41.

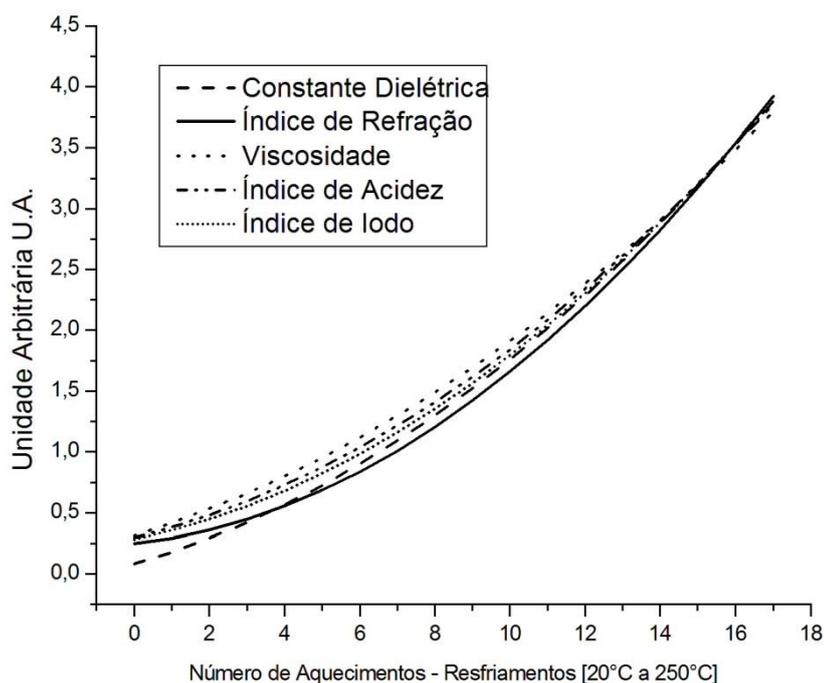


Figura 41 - Sobreposição índice de refração, acidez, iodo, viscosidade e constante dielétrica.

Fonte: Autoria própria.

3.4.3 Análise dos Resultados

Através dos resultados encontrados avaliando as características dos valores dielétricos coletados conforme variações de temperatura e isso correlacionado com parâmetros físico-químicos analisados em laboratório é possível verificar que para cada ciclo de aquecimento que o óleo é levado, a constante dielétrica comporta-se de forma crescente de forma evolutiva com a mesma tendência dos parâmetros físico-químicos analisados. Considerando essa correlação pode-se definir que a qualidade do óleo vegetal pode ser determinada através da determinação da constante dielétrica em um processo rápido e com custos inferiores, substituindo um processo de análise em laboratório das características físico-químicas.

Os resultados experimentais analisados em laboratório para os índices de refração, acidez, iodo e viscosidade comprovaram que, a reutilização do óleo vegetal em processo de fritura, processo simulado por meio de repetidos ciclos de aquecimento e resfriamento da amostra, resultam na sua

deterioração. Nesse processo de reutilização da amostra, a constante dielétrica seguiu a mesma tendência dos parâmetros físico-químicos investigados. Com base nessa comparação, é possível determinar a qualidade do óleo vegetal analisado através de uma única análise. Considerando a facilidade de se realizar a análise da constante dielétrica *in situ*, o protótipo do sensor desenvolvido pode ser utilizado para a análise da qualidade do óleo vegetal em substituição aos ensaios de laboratório. No caso de óleos residuais, o protótipo do sensor pode ser utilizado na análise de qualidade da amostra para definição de possíveis reutilizações, tais como: biocombustíveis, tintas, sabão, etc. De acordo com a qualidade da matéria-prima pode-se definir a sua destinação, relacionando a sua qualidade ao custo de produção, ou seja, por exemplo, um óleo de má qualidade poderá ter um custo elevado para produção de biocombustível, diminuindo sua rentabilidade, sendo então este melhor aplicado na produção de sabão, que requer uma qualidade inferior.

Para a produção de biocombustíveis, onde se procura custo relativamente baixo dos catalisadores, alto rendimento e velocidade de reação, a transesterificação homogênea, que utiliza como catalisadores: soda, hidróxidos de sódio e potássio ou outras bases é a principal tecnologia utilizada no mundo. Portanto para esse processo se faz de extrema necessidade analisar as características físico-químicas em que a matéria-prima se encontra pois elas devem estar isentas ou com baixíssimos teores de ácidos graxos livres, fosfolipídios (gomas) e água (KNOTHE, 2008, p. 4). Os ácidos graxos e as gomas reagem rapidamente com os catalisadores básicos, para formar sabão. O primeiro efeito negativo dessa reação química é que ela consome parte do catalisador, sendo necessário colocar um excesso dele para garantir que a sua ação catalítica ocorra de forma eficiente. O outro fator é a própria formação de sabão, que irá dificultar a separação da glicerina e do biodiesel no final do processo, ou, dependendo da quantidade formada, até mesmo inviabilizá-la além de tornar mais complexa e onerosa a lavagem e purificação do biocombustível. Por outro lado, a presença da água favorece a reação de hidrólise, na qual o óleo vegetal ou o biodiesel reagem com a água formando ácidos graxos, que por sua vez irão consumir o catalisador e formar mais sabão (KNOTHE, 2008, p. 4). Esse processo de análise da matéria prima pode ser realizado através do sensor capacitivo proposto.

Para aplicações alimentares, a ANVISA determina que o óleo seja reutilizado em até três frituras consecutivas. Também determina um índice de acidez para o óleo vegetal de soja do tipo 1 máximo em 0,3 (Resolução RDC n.º 482, de 23 de setembro de 1999). Portanto ao observar os resultados da Figura 38, pode-se verificar que este índice é alcançado até o terceiro aquecimento e, pode ser correlacionado com o valor da constante dielétrica em 3,75. Dessa forma, avaliando os limites determinados na Resolução RDC n.º 482, de 23 de setembro de 1999, é possível, por meio do sensor capacitivo definir apenas através da constante dielétrica se este óleo está apto a ser utilizado para um fim alimentar ou se o mesmo necessita ser alterado. Em caso de substituição, pode ser avaliado através dos itens descritos no parágrafo anterior, definindo sua possível destinação relacionando seu custo de produção com rendimentos.

4 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Foram realizadas análises da variação da constante dielétrica de amostras de óleo de soja durante dezoito ciclos de aquecimento e resfriamento da temperatura ambiente até a temperatura de 250°C. Também foram analisados óleos já durante um ciclo longo (oito horas contínuas) de aquecimento em temperatura constante (180°C). Os resultados mostram que a constante dielétrica aumenta com o aumento da temperatura. Na temperatura máxima de aquecimento proposto, 250 °C e a partir do resultado dos experimentos realizados neste trabalho com óleo de soja virgem, a constante dielétrica das amostras chegou a aumentar em cem vezes o seu valor inicial. Ainda, após cada ciclo completo de aquecimento e resfriamento, verificou-se que o valor da constante dielétrica sofre um ligeiro acréscimo, indicando uma alteração definitiva nas propriedades físico-químicas das amostras. Os resultados obtidos sugerem um método para qualificar de modo simples o estado de óleos vegetais submetidos seguidamente à variações de temperatura.

Na área de alimentos, a determinação da constante dielétrica, como proposta neste trabalho, pode ser suficiente para analisar a qualidade do óleo de soja utilizado na fritura de alimentos de forma rápida, simples e econômica. Entretanto, para tal, é necessário correlacionar o comportamento observado com uma combinação da análise apresentada com análises físico-químicas as quais permitem a determinação de um valor limite para a constante dielétrica a partir do qual a amostra esteja degradada para utilização alimentar e/ou para ser possível definir onde o óleo em análise pode ser reaproveitado da melhor maneira, como em biocombustíveis, tintas e demais aplicações. Para reciclagem do óleo, os parâmetros físico-químicos necessários para analisar suas possíveis destinações, também podem ser substituídos pela constante dielétrica que está correlacionada com tais parâmetros.

Para correlacionar tais resultados da constante dielétrica foram realizadas análises do valor da viscosidade e dos índices de acidez, refração, e iodo para cada amostra coletada em cada ciclo de aquecimento e, com isso, comprovou-se que quanto maior o valor da constante dielétrica encontrado para o óleo analisado, maior será seu índice de alterações físico-químicas

definitivas (em função dos parâmetros analisados). O sensor desenvolvido conforme resultados apresentados não sofreu alterações em sua estrutura suportando a temperatura desejada para análise do material dielétrico e assim portanto sendo eficaz em suas medições para correlacionar tal grandeza com parâmetros químicos afim de analisar a qualidade de um material, sendo de maior agilidade e menor custos ao processo químico em laboratório.

Para trabalhos futuros, considera-se a possibilidade de utilizar outros tipos de materiais isolantes como a Mica que suporte maiores temperaturas e um novo protótipo miniaturizado fazendo com que a quantidade de amostra necessária para realizar uma análise seja menor, fazendo com que o dispositivo se torne algo em tamanho mais prático ao usuário.

5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Joanna K. P.; NUNES Gabriela. P.; TEIXEIRA Cintia C. M.; RODRIGUES Diego P.; MELLO José R. Caracterizações Físico-Químicas de Óleos Vegetais Utilizados Para Produção de Biodiesel com Metodologias Alternativas Simples. **XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ABREPRO**. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_TN_STP_135_855_18349.pdf>. Acesso em: 13 out. 2015.

ASTM (American Society for Testing and Materials US). Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and the Calculation of Dynamic Viscosity), Vol 11. p 19. **ASTM D-4451990**. Philadelphia, 1999. Disponível em: <<http://www.chemyiqi.com/pdf/astmd445-2006.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2015.

ASTM, American Society for Testing and Materials. Standar E-230. Annual Book of ASTM Standards. Vol 11. p 2. **ASTM D-4451990**. Philadelphia, 1999. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/E230.htm> >. Acesso em: 13 fev. 2015.

BARBOSA Rodrigo O.; SILVA Marcos R.; SILVA Gabriel M.L.D.; STRUFFALDI A. Environmental sustainability and reverse logistics: An analysis of the recycling networks of cooking oil waste in Sao Paulo, Brazil. **Management of Engineering & Technology (PICMET), 2014 Portland International Conference on. IEEE**. Jul 2014. Kanazawa, Japan. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6921167&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6921167>. Acesso em: 15 fev. 2015.

BARBOSA, Alex P. F.; RODRIGUES, Cláudio R. C. Nova metodologia para calibração de viscosímetros do tipo copo Ford. In: **METROSUL – Congresso Latino-Americano de Metrologia**. Abril 2004, Foz do Iguaçu. Disponível em: <<http://repositorios.inmetro.gov.br/handle/10926/507>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

BILLEK, G. et al. Heated fats in the diet. **The role of fats in human nutrition**. Chichester, Ellis Horwood ,1985. p. 163-71. Disponível em: < www.fao.org/docrep/w0073e/w0073e04.htm>. Acesso em: 15 fev. 2015.

BORIM, Andrea C. A.; PINTO Carlos A. R. Medição de Umidade de Solo Através de Sensores Capacitivos. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**. Valinhos, V1, n.1, 2006. ISSN 1980-1793. Disponível em: <<http://www.pgsskroton.com.br/seer/index.php/rcext/article/view/2395>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

BOYLESTAD e NASHESKY; **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 8ª Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

Brasil. Ministério da Saúde. Resolução RDC n.º 482, de 23 de setembro de 1999. Regulamento técnico para fixação de Identidade e Qualidade de Óleos e Gorduras vegetais. **ANVISA**

Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Disponível em:

<http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/a2190900474588939242d63fbc4c6735/RDC_482_1999.pdf?MOD=AJPERES>. Acesso em: 15 fev. 2015.

CAVALCANTE, Marisa.; TAVOLARO, Cristiane; MOLISANI, Elio. Física para Iniciantes com Arduino. **Revista Brasileira de Física**. São Paulo, v. 33. n.4. 2011. Disponível em:

<<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/334503.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2015

DEL RÉ, Patricia V. Comportamento de óleos vegetais em frituras descontínuas de produtos pré-fritos congelados. **Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas**, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2003.

Dielectric Constant Chart Manual Técnico. **IFM Eletronic**. Disponível em: < [http:// http://www.ifm.com/img/dielectric_constants.pdf](http://www.ifm.com/img/dielectric_constants.pdf)>. Acesso em :17 de Mar. de 2015.

FERNANDES Maria W. de S.; FALCÃO, Heloísa A. S.; ALMEIDA Simone G. Índice de Peróxido e de Acidez em Óleos de Fritura de uma Rede de Fast Food do Distrito Federal. **Anuário da Produção de Iniciação Científica Discente**. Valinhos, Vol 13, n. 16, 2010. Disponível em: < http://ojs.unesp.br/index.php/revista_proex/article/viewFile/883/1049>. Acesso em: 15 fev. 2015

FERNANDES, Roberto K. M.; PINTO, Janete M. B.; MEDEIROS, Otoniel M.; PEREIRA, Cinthia A. Biodiesel a partir de óleo residual de fritura: alternativa energética e desenvolvimento sócio-ambiental. **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Rio de Janeiro – RJ, 2008. Disponível em:

<http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_077_542_12014.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2015

GILA D.Martinez; MARCHAL P.Cano; GARCIA J.Garcia; ORTEGA J.Gómez. Hyperspectral imaging for determination of some quality parameters for olive oil. **Automation and Computing (ICAC), 2012 18th International Conference on IEEE**. Sep 2012. Loughborough, United Kingdom, 2012. Disponível em: <

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6330512&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6330512>. Acesso em: 15 fev. 2015

GROSSI Marco; LECCI Giuseppe Di; TOSCHI Tullia G.; RICCO Bruno. Fast and Accurate Determination of Olive Oil Acidity by Electrochemical Impedance Spectroscopy. **Sensors Journal, IEEE** (Volume:14 , Issue: 9). Sep 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6809165&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6809165>. Acesso em: 15 fev. 2015

Manual Técnico Materiais - Acrílico. **INDAC - Instituto Nacional Para o Desenvolvimento do Acrílico**. Disponível em: <<http://www.indac.org.br/arquivos/manual-orientacao-tecnica-unigel.pdf>>. Acesso em: 16 Fev. de 2015.

JORGE, Neusa; CORSINI, Mara da S.; SOARES, B. B. P.; OLIVEIRA Ana M. R.; VICENTE, Eduardo. Perfil de Ácidos Graxos e Avaliação da Alteração em Óleos de Fritura. **Química Nova**. São Paulo, Vol. 31, n. 5, 956-961, 2008. Disponível em: <http://quimicanova.s bq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=1018>. Acesso em: 16 Fev. de 2015.

JORGE, Neusa; SOARES, Bruno B. P.; LUNARDI, Vanessa M.; MALACRIDA, Cassia R. Alterações físico-químicas dos óleos de girassol, milho e soja em frituras. **Química Nova**. São Paulo, Vol. 28, n. 6, 947-951, 2005. Disponível em: <http://quimicanova.s bq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=3174>. Acesso em: 16 fev. de 2015.

KERCHNER, Russel M.; CORCORAN, George F.; **Circuitos de Corrente Alternada**. Porto Alegre, Editora Globo, 1973.

KNOTHE Gerhard; GERPEN Jon V.; KRAHL Jurgen; RAMOS Luiz P. **Manual de Biodiesel, 1a ed**, Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 2008.

KUPHALDT, Tony R. Lessons in Eletric Circuits. **Open Book Project**, 2007. Disponível em: <<http://www.allaboutcircuits.com>>. Acesso em : 14 ago. 2014.

LI Jian; ZOU Ping, GRZYBOWSKI P. Stanislaw. Preparation of a vegetable oil-based nanofluid and investigation of its breakdown and dielectric properties. **Electrical Insulation Magazine, IEEE** (Volume:28 , Issue: 5). Oct 2012. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6268441&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6268441>. Acesso em: 16 fev. de 2015.

MARQUES Anne C., VALENTE Tessa B., ROSA Claudia S. Formação de toxinas durante o processamento de alimentos e as possíveis conseqüências para o organismo humano. **Revista de Nutrição**. São Paulo, 2009; 22(2):283-93. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-52732009000200010>. Acesso em: 16 fev. de 2015.

MENDONÇA, Marcio A.; BORGIO, Luiz A.; ARAÚJO, Wilma M.C.; NOVAES, Maria R.C.G. Alterações físico-químicas em óleos de soja submetidos ao processo de fritura em unidades de produção de refeição no Distrito Federal. **Com Ciência Saúde**, Brasília, n.19, p. 115-122, dez./abr. 2008. Disponível em:

http://www.escs.edu.br/pesquisa/revista/2008Vol19_2art04altera%C3%A7oes.pdf>. Acesso em: 13 fev. de 2015.

MOREIRA, Lúcia. Medição de temperatura usando-se termopar. **Cerâmica Industrial**. V.07. 2002. Disponível em: <http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v07n05/v7n5_6.pdf>. Acesso em: 10 fev. de 2015.

MORETTO, Eliane.; FETT, Roseane. **Óleos e Gorduras vegetais - Na indústria de alimentos**. Varela: São Paulo-SP, 1998.

PEREIRA, Alessandra F. C., et al. NIR spectrometric determination of quality parameters in vegetable oils using PLS and variable selection. **Food Research International** .Vol 4 (2008): 341-348. Disponível em:

<http://www.researchgate.net/publication/232407375_NIR_spectrometric_determination_of_quality_parameters_in_vegetable_oils_using_PLS_and_variable_selection>. Acesso em: 16 fev. de 2015.

Manual Técnico. **Raychem Products**. Disponível em: <http://raychem.te.com/documents/websevice/fetch.ashx?fileid=12357>>. Acesso em: 20 Mar. de 2015.

Resolução ANP nº 45, de 25.8.2014 – DOU 25.8.2014. **Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Disponível em:< [http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2014/agosto/ranp%2045%20-%202014.xml?fn=documentrameset.htm\\$f=templates\\$3.0](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2014/agosto/ranp%2045%20-%202014.xml?fn=documentrameset.htm$f=templates$3.0)> Acesso em: 20 Mar. de 2015.

RIQUE Ana B.R.; SOARES Eliane A.; MEIRELLES Claudia M. Nutrição e exercício na prevenção e controle das doenças cardiovasculares. **Revista Brasileira Medicina do Esporte**. vol 8. 2002. Disponível em:< http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-86922002000600006> Acesso em: 28 Mar. de 2015.

SANTOS Carla S.P. et al. Effect of cooking on olive oil quality attributes. **Food Research International**. Porto, Apr 2013.

Disponível em:< http://www.researchgate.net/publication/260975182_Effect_of_cooking_on_olive_oil_quality_attributes> Acesso em: 28 Mar. de 2015.

SANTOS, Angelica G; LOREGIAN, Henrique B.; SOARES Jimmy; BRASIL Alex N.; NUNES Diego L. Alterações Ocorridas no Óleo de Cozinha Durante o processo de Fritura. **ENERBIO-UFMG**, 2009.

Disponível em:< http://alexbrasil.com.br/_upload/5b8a476d88d41b410d7329ea57a51589.pdf >
Acesso em: 21 mar. de 2015.

SOUZA, David J.; **Desbravando o PIC: Ampliado e atualizado para PIC 16F628A**. 12ª Ed. São Paulo: Editora Érica, 2009.

SPOHNER Milan et al. Study Of Electrical And Rheological Properties Of Natural And Other Oils. **19th IEEE International Symposium on Electrical Insulation**. San Juan, ISEI 2012. Jun 2012. Disponível em:< <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6251420>>
Acesso em: 21 mar. de 2015.

SUWARNO Harno; RUBALDI. Effects of Temperature on Dielectric Properties of Rhicinius Oils as Insulating Liquid. **International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis IEEE**. Apr 2008. Biejing, China.

Disponível em:< http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6416390&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6416390> Acesso em: 10 mar. de 2015.

TOMASZ, Martin. Use Analog Techniques To Measure Capacitance In Capacitive Sensors. **Electronic Design**. Nova York, Nov. 2012.

Disponível em:< <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/White%20Papers/lsh-Methods-of-Accurately-Measuring-Capacitive-RH-Sensors.pdf>> Acesso em: 10 mar. de 2015.

TOUDJA Tahar.; CHETIBI Fouzia.; BELDJILALI Azzeddine.; MOULAI Hocine. Electrical and physicochemical properties of mineral and vegetable oils mixtures. Dielectric Liquids (ICDL), **2014 IEEE 18th International Conference on**. Eslovenia, Jun 2014.

Disponível em:< <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6893145>> Acesso em: 20 mar. de 2015.

TUORILA Hely; RECCHIA Annamaria. Sensory perception and other factors affecting consumer choice of olive oil. In **Olive Oil Sensory Science**, eds E Monteleone, S Langstaff. Wiley-Blackwell, Oxford, 2014.

Disponível em:< <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118332511.ch3/summary>>
Acesso em: 18 mar. de 2015.

UNII Surya K.; YAAKOB Zahira; PUDUKUDY Manoj; NARAYANAN Binitha N. Single Step Production of Biodiesel from Used Cooking Oil. **Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2013 International IEEE**. Ouarzazate, May, 2013.

Disponível em:< http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6529712&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6529712> Acesso em: 18 mar. de 2015.

URIARTE, Patricia S.; GUILLÉN, Maria D. Formation of toxic alkylbenzenes in edible oils submitted to frying temperature. In fluence of oil composition in main components and heating time. **Food Research International**. Rio de Janeiro, 43, 2161–2170. (2010).

Disponível em:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996910002528>>

Acesso em: 13 mar. de 2015.

VAN-VLACK, Lawrence H. **Princípios de Ciência dos Materiais**. Editora Afiliada, 13ª edição, 2000.

VELOSO, Yago M.S.; FREITAS Lucas F.L.; AMARAL João H. B. Rota para Reutilização de óleos Residuais de Fritura. **Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e tecnológicas**. V.1 N. 15. Sergipe, 2012.

Disponível em:< <https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernoexatas/article/view/177> >

Acesso em: 15 mar. de 2015.

Manual Técnico de Fabricação e Uso de Fibras de Vidro. **VICK, FIBRA DE VIDRO TVE**. 2015.

Disponível em: < <http://www.vick.com.br/vick/novo/datasheets/datasheet-fibra-de-vidro.pdf>.>

Acesso em: 15 fev. de 2015.

WITSCHINSKI, Fabieli; GHISLENI, Cilda P.; VALDUGA Eunice. Alterações do Óleo de Soja em Fritura Descontínua de Produtos Empanados Congelados em uma Unidade de Alimentação e Nutrição. **Alimentos e Nutrição**. Araraquara, Vol 23. N. 03, 2012. Disponível em: < <http://serv-bib.fcfar.unesp.br/seer/index.php/alimentos/article/viewArticle/499>>. Acesso em: 15 fev. de 2015.

YANG, Hong; IRUDAVARAJ, Joseph; PARADKAR, Manish M., Discriminant analysis of edible oils and fats by FTIR, FT-NIR and FT-Raman spectroscopy. **Food Chemistry**. Rio de Janeiro, Vol. 93, issue 1, 2005. Disponível em:

<http://www.researchgate.net/publication/223242234_Discriminant_analysis_of_edible_oils_and_fats_by_FTIR_FT-NIR_and_FT-Raman_spectroscopy>. Acesso em: 15 fev. de 2015.