

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**ANÁLISE DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE  
RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR EM BAIXO  
CAMPO NA ESTERILIZAÇÃO DA PALMA**

**João Pedro da Silva Resende - RA: 754225**

**Trabalho de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química da  
Universidade Federal de São Carlos**

**Orientadora: Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira**

**SÃO CARLOS  
2024**

## **BANCA EXAMINADORA**

Orientador: Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira, DEQ/UFSCar

Convidado: Profa. Dra. Patrícia Moreira Lima, DEQ/UFSCar

Professor da disciplina: Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar, DEQ/UFSCar

Trabalho de Graduação apresentado no dia 22 de fevereiro de 2024  
perante a seguinte banca examinadora:

Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira, DEQ/UFSCar  
Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar, DEQ/UFSCar  
Profa. Dra. Patrícia Moreira Lima, DEQ/UFSCar

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família que me apoiou desde o início na minha decisão de cursar uma faculdade pública renomada. Apoiaram-me a cursar engenharia química e a fazer parte não só da UFSCar, mas de São Carlos, palco de construção da minha base familiar. Eu, assim como meu pai, José Aurélio, tive a oportunidade de sentir na pele o que é estudar até altas horas e simplesmente tirar uma nota zero na prova. Agradeço a ele por ter me dado forças para continuar e pelos ensinamentos compartilhados.

À minha mãe, agradeço todo amor e carinho, além de todas as marmitas proporcionadas. Ela, que também teve sua trajetória por São Carlos, serve como guia dos princípios da vida, como humildade, compaixão e gentileza. Não faltaram momentos de saudade ao cruzar, na rua da minha casa, a pensão onde ela se acomodou enquanto cursava o Colégio Caaso e construía a vida da nossa família próxima ao meu pai. Quem dirá quando eu subia duas ruas e dava de cara com o local onde ela e meu pai moraram juntos e planejaram toda a vida da minha irmã Isabela. Juntos, encerramos com chave de ouro o ciclo dela na federal. Obrigado Isa por ter sido minha parceira, irmã de sangue e alma e melhor amiga. Sou eternamente grato por ter você e ainda mais nessa fase linda da vida. Você me apresentou a cidade da melhor forma possível, levando-me para o lugar certo. Logo, agradeço à República Tipo Zero e todos os moradores que ali convivi. Não é sobre dividir aluguel e sim dividir a vida e seus ensinamentos.

Agradeço à Márcia Cristina, nossa governanta na república e mãe de incontáveis filhos. Em especial, ao seu carinho comigo.

Outro agradecimento especial, porém, para a minha tia Cláudia, também vinculada à UFSCar, que sempre foi um porto seguro nas situações da vida, além de uma companhia leve e alegre.

Agradeço também a todos os meus outros familiares que, mesmo de longe, incentivaram-me e enviaram energias positivas.

Por fim, deixo meu muito obrigado à toda universidade, em especial ao departamento da engenharia química e aos docentes presentes nele, que possibilitaram tudo isso, e à empresa Fine Instrument Technology, que abriu a porta do mercado de trabalho para mim e apresentou o mundo do controle de qualidade e processos e da ressonância.

## RESUMO

Este trabalho aborda a aplicação da Ressonância Magnética Nuclear (RMN) como uma inovação tecnológica para ser um auxiliar na otimização do processo de esterilização do óleo de palma. O estudo parte do princípio de que o processo e a qualidade da extração do óleo de palma são mal controlados, já que se leva até oito horas para analisar perdas de óleo em um processo contínuo através de métodos convencionais de análises, como é o caso de análises de extração por solvente químico, conhecido como Soxhlet. Analisando essa grande problemática, este trabalho propõe uma análise da eficácia da RMN em baixo campo magnético ao ser implementada no controle de qualidade da etapa de esterilização dos cachos cheios de frutos frescos de palma. Isso é possível graças às análises físico-químicas, rápidas e precisas, que um espectrômetro de RMN realiza. A motivação desse estudo é então fundamentada na necessidade crítica de buscar novas tecnologias que atendam as especificidades e demandas do mundo atual. A RMN em baixo campo magnético é proposta então como uma solução tecnológica inovadora, capaz de analisar parâmetros de amostras, como a determinação do teor de óleo, fator crucial para o controle de qualidade e eficiência do processo de extração da palma. Essa tecnologia por si só já é antiga, da década de 50 mais especificamente, porém sua aplicação na indústria de extração do óleo de palma é tão recente quanto à utilização de RMN para Controle e Certificação de Qualidade (CCQ) de produtos e processos industriais (COLNAGO, 2017). Enfatizando o controle de qualidade das perdas decorrentes da esterilização, as quais são identificadas através do teor de óleo contido no vapor condensado e nos cachos vazios, uma análise financeira de Return Over Investment (ROI) da implementação da RMN como controlador de qualidade é realizada para avaliar a viabilidade desta tecnologia. Contando com apoio da empresa brasileira Fine Instrument Technology (FIT) e de uma indústria extratora de óleo de palma, os resultados do estudo trazem um passo significativo em direção à inovação e ao aprimoramento dos processos industriais de extração de óleos. Proporcionando insights valiosos sobre os benefícios da aplicação dessa tecnologia na indústria de óleos, pode-se observar que equipamento de RMN analisa precisamente o teor de óleo contido em perdas no processo, assim como analisado pelos métodos convencionais, porém muito mais rápido, o que possibilita o controle do processo. Tendo maior agilidade, novos pontos de controle podem ser implementados, como a análise da matéria-prima em seu recebimento, possibilitando a minimização de perdas através de ajustes e ganhos relevantes às indústrias.

## ABSTRACT

This work addresses the application of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) as a technological innovation to help optimize the palm oil sterilization process. The study assumes that the process and quality of palm oil extraction are poorly controlled, as it takes up to eight hours to analyze oil losses in a continuous process using conventional analysis methods, as is the case with chemical solvent extraction analysis, known as Soxhlet. Analyzing this major problem, this work proposes an analysis of the effectiveness of NMR in a low magnetic field when implemented in the quality control of the sterilization stage of bunches filled with fresh palm fruits. This is possible thanks to the fast and precise physicochemical analyzes that an NMR spectrometer performs. The motivation for this study is therefore based on the critical need to seek new technologies that meet the specificities and demands of today's world. Low magnetic field NMR is therefore proposed as an innovative technological solution, capable of analyzing sample parameters, such as determining oil content, a crucial factor for quality control and efficiency of the palm extraction process. This technology in itself is already old, from the 1950s more specifically, but its application in the palm oil extraction industry is as recent as the use of NMR for Quality Control and Certification (CCQ) of industrial products and processes (COLNAGO, 2017). Emphasizing the quality control of losses resulting from sterilization, which are identified through the oil content contained in the condensed steam and empty bunches, a financial analysis of Return Over Investment (ROI) of the implementation of RMN as a quality controller is carried out to evaluate the viability of this technology. With the support of the Brazilian company Fine Instrument Technology (FIT) and a palm oil extracting industry, the results of the study bring a significant step towards innovation and improvement of industrial oil extraction processes. Providing valuable insights into the benefits of applying this technology in the oil industry, it can be seen that NMR equipment precisely analyzes the oil content contained in losses in the process, as analyzed by conventional methods, but much faster, which allows process control. With greater agility, new control points can be implemented, such as the analysis of raw materials upon receipt, enabling the minimization of losses through adjustments and gains relevant to the industries.

## SUMÁRIO

<b>ANÁLISE DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR EM BAIXO CAMPO NA ESTERILIZAÇÃO DA PALMA .....</b>	<b>1</b>
<b>BANCA EXAMINADORA .....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1. Óleo de palma .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2. Processo de extração do óleo de palma .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3. Esterilização .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4. Controle de qualidade e de processo .....</b>	<b>20</b>
<b>1.4.1. Legislações envolvidas no controle de qualidade da indústria da palma</b>	
20	
<b>1.4.2. Metodologias de controle de qualidade .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4.2.1. Extração por solvente químico (Soxhlet) .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4.2.2. Equipamento de espectrometria e sua aplicação industrial .....</b>	<b>23</b>
<b>1.5. Ressonância Magnética Nuclear e suas aplicações .....</b>	<b>24</b>
<b>1.6. Impactos da implementação de uma nova tecnologia .....</b>	<b>26</b>
<b>2. METODOLOGIA .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1. Procedimento de análise e dados experimentais utilizados .....</b>	<b>29</b>

<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1. Resultados.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2. Discussão.....</b>	<b>35</b>
<b>4. CONCLUSÃO.....</b>	<b>36</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>37</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Frutos de <i>Elaeis guineensis</i> na árvore, maduros e duas semanas antes de maduros.	<b>12</b>
<b>Figura 2.2</b>	Fruto da <i>Elaeis guineensis</i> , palmeira de palma	<b>13</b>
<b>Figura 2.3</b>	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq. (cultivada)	<b>14</b>
<b>Figura 2.4</b>	Processo de extração do óleo de palma bruto	<b>16</b>
<b>Figura 2.5</b>	Esterilizador horizontal	<b>18</b>
<b>Figura 2.6</b>	Cachos vazios de palma	<b>19</b>
<b>Figura 2.7</b>	Figura esquema do extrator Soxhlet	<b>22</b>
<b>Figura 2.8</b>	SpecFIT	<b>23</b>
<b>Figura 2.9</b>	Esquema simplificado de um equipamento de RMN	<b>25</b>
<b>Figura 3.1</b>	Amostra sendo inserida no SpecFIT	<b>28</b>
<b>Figura 3.2</b>	Interface do Software SpecFIT	<b>29</b>
<b>Figura 3.3</b>	Sugestões de ajustes a partir dos dados das perdas em cachos vazios	<b>30</b>
<b>Figura 3.4</b>	Sugestões de ajustes a partir dos dados de perdas em vapor condensado	<b>31</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>1</b>	Resultados das porcentagens de perdas obtidas nos cachos vazios e no vapor condensado, com os experimentos utilizando o SpecFIT ao longo de sete semanas.	<b>33</b>
<b>2</b>	Porcentagens médias perdidas nos cachos vazios e no vapor condensado	<b>34</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que o setor de qualidade nas indústrias nem sempre é estruturado da forma mais correta para seguir protocolos e legislações. Muitas vezes as empresas fazem o mínimo para cumprir os requisitos e isso impacta, para além da qualidade do produto de interesse, o controle do processo como um todo. Uma vez sem o controle de processo, desafios são enfrentados na hora de mensurar o rendimento de uma fábrica. No caso da indústria do óleo de palma, por exemplo, um método comum de análise para assegurar a qualidade do óleo é a extração do óleo via solvente químico. Porém, é uma análise que leva até oito horas para se obter um resultado e, ao pensar em um processo contínuo, é um tempo muito longo. Não podendo interromper o processo de extração, o que muitas fábricas fazem atualmente é continuar o processamento enquanto não se obtém uma resposta de qualidade, o que não é recomendado. Dessa forma, buscar novas metodologias para acompanhar a qualidade e o rendimento do processo industrial em tempo real é imprescindível.

Como proposto para um engenheiro químico, compreender e analisar a viabilidade de se implementar novas tecnologias em uma indústria é uma de suas atividades fundamentais. Atualmente, há poucos estudos relacionados a utilização de Ressonância Magnética Nuclear na indústria do óleo de palma. Dessa forma, utilizando os conhecimentos da engenharia química, junto à literatura disponível e a experiência das empresas no mercado, é possível trazer respostas à principal pergunta de uma diretoria corporativa: “Como é possível melhorar o processo que executamos hoje?”. Para isso, o controle de processos e de qualidade são dois pontos de partida dentro de um estudo de escala industrial.

A busca por soluções inovadoras e eficientes na indústria de produção de óleo de palma, ou dendê, tem sido uma prioridade em virtude da crescente demanda por esse óleo, das preocupações relacionadas à sustentabilidade ambiental e às questões de saúde (NGAN, 2022). Segundo Thiago Prianti, especialista em negócios internacionais da Aboissa Commodity Brokers, em 2023 a produção mundial do óleo de palma atingiu mais de 80 milhões de toneladas, concentrando cerca de 85% da produção na Malásia e Indonésia. Ainda, tem-se a Tailândia crescendo fortemente, enquanto o Brasil encontra-se em oitavo lugar no ranking dos produtores, estimando-se de 600 a 620 mil toneladas por ano (PRIANTI, 2023).

Dentre as etapas iniciais do processo de extração do óleo de palma, tem-se a esterilização dos cachos cheios de frutos frescos de palma. Processo muito comum de se realizar em equipamentos e suprimentos hospitalares, a esterilização é também uma etapa crítica no processo de extração de óleos, pois influencia diretamente na qualidade do produto desejado e no rendimento do processo (SMITH, 2018). Ou seja, é uma etapa fundamental da extração por impactar na qualidade e quantidade de óleo disponível para extração. É nela que cachos são submetidos a altas temperaturas e por longos períodos, para que os frutos se desprendam facilmente dos cachos por debulhamento e ao mesmo tempo fiquem livres de impurezas. Dessa forma, acompanhar de perto como está indo a etapa de esterilização é fundamental, não apenas para o sucesso do processo industrial, mas também para a sustentabilidade ambiental.

Uma das maneiras de se analisar o teor de óleo ao longo do processo de extração é com a utilização de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) em baixo campo magnético. Essa é uma técnica de análise não invasiva e não destrutiva que permite a caracterização das propriedades físicas e químicas dos materiais, incluindo a determinação do teor de óleo (CHEN & WANG, 2019). Para isso, essa tecnologia utiliza ímãs que geram baixos campos magnéticos e emitem pulsos de radiofrequência para descrever características de amostras. Essas características são obtidas a partir de curvas de relaxamento, que por sua vez são uma representação do tempo em que os spins dos átomos presentes na amostra levam para voltar ao seu estado de equilíbrio após serem excitados pelos campos magnéticos. A utilização dessa tecnologia tem o potencial de oferecer vantagens significativas em termos de controle de processo e qualidade, eficiência energética e redução de custos (CAMARGO, 2020; COLNAGO, 2017).

A presente monografia propõe uma análise do impacto da implementação de RMN para analisar e acompanhar as perdas resultantes da esterilização do óleo de palma de uma indústria extratora específica. São análises importantes para se fazer, visto que há uma grande dificuldade de se controlar o processo, já que o método tradicional utilizado para quantificar teor de óleo leva um bom tempo para apresentar o resultado.

A pesquisa desenvolvida representa um passo importante em direção à inovação e ao aprimoramento de processos industriais, especificamente o de extração do óleo de palma. Vale ressaltar que este trabalho conta com o apoio da empresa brasileira FIT (Fine Instrument Technology). Ao analisar o impacto de uma nova implementação tecnológica,

é possível avaliar sua consequência na quantidade de produto obtido e na lucratividade do processo, mantendo sempre a qualidade do produto final.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordada a literatura utilizada para que este estudo atingisse os objetivos propostos por ele. Dessa forma, uma sequência de tópicos e conceitos foi elaborada didaticamente para uma melhor compreensão.

### 2.1. Óleo de palma

A indústria de extração do óleo do fruto de palma, mostrado na Figura 2.1, é de extrema importância global, visto que esse óleo é amplamente utilizado na fabricação de produtos alimentícios, produtos de higiene pessoal, cosméticos e muitos outros. Entretanto, essa indústria enfrenta uma série de desafios complexos relacionados à eficiência dos processos de extração, ao consumo de recursos naturais e ao impacto ambiental de sua plantação principalmente. Assim, a indústria da palmeira *Elaeis Guineensis* enfrenta desafios para melhorar a eficiência e reduzir o impacto ambiental de suas operações (RITTNER, 1996).

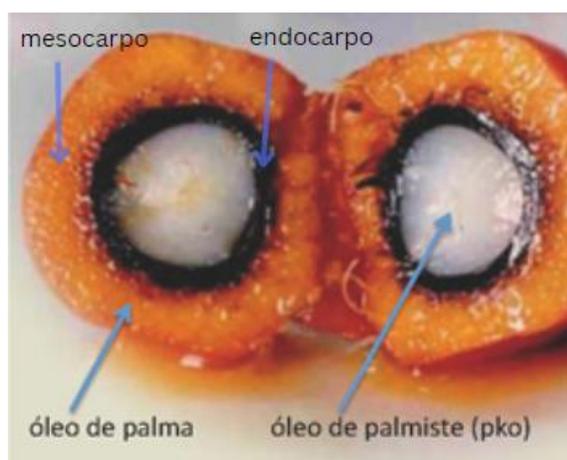
**Figura 2.1.** Frutos de *Elaeis guineensis* na árvore, maduros e duas semanas antes de maduros.



**Fonte:** BONGOMAN, 2008.

Tendo sua origem na África, uma palmeira dessa pode render até 12 cachos por ano. Tendo uma densidade de 130 a 160 palmeiras por hectare, cada cacho rende de 1000 a 3000 frutos e pesa entre 20 e 30 quilogramas. Já os frutos costumam pesar cerca de 10 gramas cada (BIODIESEL, 2013). Os frutos são praticamente pretos quando jovem e amarelos ou avermelhados quando maduros, e são constituídos basicamente por mesocarpo (polpa), fibroso rico em óleo, o qual envolve o endocarpo rígido, o qual contém a semente da palma, conhecido como palmiste, como pode ser observado na Figura 2.2. A semente, contida pelo endocarpo, é também é rica em óleo e permite a produção do óleo de palmiste separadamente.

**Figura 2.2.** Fruto da *Elaeis guineensis*, palmeira de palma



**Fonte:** Adaptado de AKIRA (2012)

Conhecido também por dendezeiro, pode atingir até 15 metros de altura, com suas folhas medindo cerca de 7 metros de comprimento e suas bases recobertas por espinhos, como pode ser observado na Figura 2.3.

**Figura 2.3.** *Elaeis guineensis* Jacq. (cultivada)



**Fonte:** Reprodução – AGUILAR, 2012.

Devido a sua versatilidade, eficiência na produção e propriedades desejáveis, o óleo de palma é o mais produzido e comercializado do mundo. Apesar da indústria de alimentos utilizar grandes quantidades desse óleo em seus processos, como a indústria de margarinas, chocolates, snacks processados, óleos de cozinha, entre outras, e serem as principais responsáveis pelo consumo, outras aplicações não alimentícias também determinam sua alta demanda, como a indústria de cosméticos, higiene, limpeza e biodiesel (ESFERA BRASIL, 2023). Sua composição basicamente é dada por ácidos graxos, dos quais 52-57% é oleico (C18:1), 25-30% palmítico (C16:0), 10-13% linoleico (C18:2), 3-4,5% esteárico (C18:0) e até 0,4% de ácido linolênico (C18:3) (FARIA-MACHADO).

Nos últimos anos, em cenário global, a COVID-19 em 2020 fez com que os preços do óleo de palma também sofressem grande impacto. Por conta das políticas adotadas durante a pandemia e pelo fato de a colheita da palma ser ainda pouco mecanizada, a disponibilidade de mão de obra teve uma queda brusca, afetando a quantidade de óleo extraído nas indústrias. Ao ter pouco óleo extraído, a oferta diminuiu, aumentando-se os preços. A guerra entre Rússia e Ucrânia, que perdura desde 2022, chocou ainda mais os preços do petróleo, fretes e mercadorias por conta da cadeia logística entre Europa, Ásia e outros continentes. Ainda em 2022, o presidente da Indonésia, maior produtora do mundo de óleo de palma, bloqueou as exportações para combater a inflação local. A cada

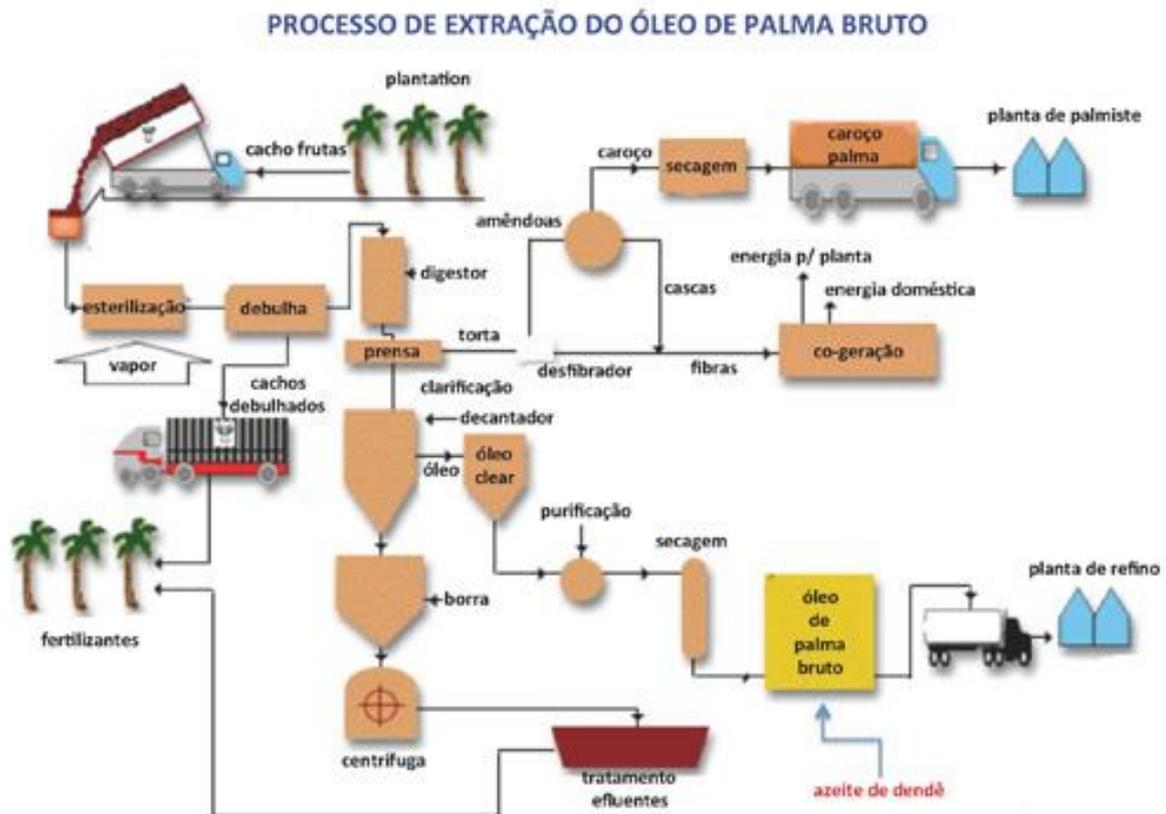
semana, 800 mil toneladas desse óleo eram estocadas, chegando a um ponto onde não se tinha mais lugar para armazenagem. Assim, o governo retrocedeu e implorou para que compradores barganhassem o óleo de palma para retirá-lo do país urgentemente, fazendo com que os preços caíssem da noite para o dia, regulando o seu mercado (PRIANTI, 2023).

A crescente demanda global impulsionou a expansão das plantações de palma, frequentemente associada ao desmatamento, à perda de biodiversidade e a conflitos sobre a posse da terra (ZEFERINO, 2023). Portanto, é indispensável buscar métodos que não apenas otimizem a produção e o processamento do óleo de palma, mas também que minimizem os impactos ambientais advindos da plantação deste fruto. Só assim é possível operar uma indústria e administrar suas crescentes demandas mantendo práticas sustentáveis e responsáveis.

## **2.2. Processo de extração do óleo de palma**

O processo de extração do óleo de palma é complexo e envolve diversas etapas, desde a colheita dos frutos de palma até a sua extração, como pode ser observado na Figura 2.4.

Figura 2.4. Processo de extração do óleo de palma bruto



Fonte: AKIRA (2012)

O óleo de palma bruto, ou simplesmente óleo de palma, pode ser vendido da forma que traz o final do processo mostrado acima, ou refinado e vendido em prateleiras de supermercado, ou ainda para serem processados junto a outros alimentos. Para este trabalho, o foco será na etapa de esterilização, seguida da etapa de debulhamento.

De modo geral, os cachos cheios de frutos frescos de palma são colhidos da plantação e levados à unidade industrial. Chegando lá, os cachos são esterilizados de uma hora a uma hora e quinze minutos e de 110 a 130°C, com inserção de vapor com pressão próximo de 3 kg/cm<sup>2</sup> (aproximadamente 2,9 atm) e debulhados na sequência, para se separar os cachos dos frutos. Os debulhadores costumam ter de 1,8 a 2 metros de diâmetro e de 3 a 5 metros de comprimento, operando em temperaturas de 110 a 120°C por uma hora e quarenta, aproximadamente. Os cachos debulhados são retirados do processo e redirecionados para atuarem como fertilizantes. Os frutos então vão para o digestor, onde

são aquecidos entre 80 e 90°C e agitados mecanicamente por 15 minutos em média, a fim de que os frutos comecem a soltar suas camadas e o óleo. Após isso vai para a etapa de prensagem por prensa mecânica tipo *Expeller* e posterior decantação, onde separa-se o óleo da borra, a qual é tratada como efluente. Já a torta da prensagem é levada para separação das amêndoas das fibras e cascas, onde essas servirão como insumos de caldeiras para cogeração de energia, enquanto aquelas servirão para produção de óleo de palmiste. O óleo segue então para a etapa de clarificação, onde será purificado para separação das impurezas e da água do óleo. Na sequência, o óleo vai para secagem e posteriormente fica pronto para sua comercialização.

### **2.3. Esterilização**

Uma das etapas iniciais do processo de extração do óleo de palma é a esterilização dos cachos cheios de frutos de palma recebidos na unidade industrial, a qual impacta diretamente na qualidade e eficiência do processo de extração. Operando até 15 toneladas de cachos de frutos frescos e utilizando vapor de injeção em pressão de 2,5 a 3 atm, esterilizadores horizontais costumam ter diâmetro de dois metros e largura de quinze metros, consumindo até 200 kg de vapor por tonelada de cachos de palma cheios de frutos (RITTNER, 1995).

Na etapa de esterilização é necessário eliminar microrganismos indesejados, assegurar a qualidade e a segurança do óleo de palma a ser produzido e facilitar o processo de extração dele. A forma tradicional de realizar essa esterilização é através de autoclaves de alta pressão, conforme mostrado na Figura 2.5.

**Figura 2.5.** Esterilizador horizontal



**Fonte:** Alibaba

Esse é um método que consome grandes quantidades de energia, como a injeção de três mil quilos de vapor para uma batelada de quinze toneladas de cachos de palma durante uma hora. De modo geral, essa etapa consiste em inserir cachos de frutos frescos da palma em um grande e fechado cilindro de ferro fundido e que, ao receber uma quantidade alta de vapor, realiza o cozimento do fruto e aquecimento das outras partes ali presentes. Essa etapa é realizada também para facilitar o processo de desprendimento dos frutos dos cachos na etapa seguinte, de debulhamento, e para conter processos naturais do fruto.

Conforme o cacho de palma atinge seu estado de amadurecimento, inicia-se um processo de decomposição do óleo contido no cacho cheio. Esse processo é conhecido como acidificação e conforme o cacho é cortado de sua fonte original, acelera-se esse processo. A etapa de esterilização do fruto é também uma forma de deter o processo de acidificação. Além disso, traz outros benefícios ao processamento do fruto, como amolecer a polpa do fruto e o desprendimento da amêndoa da casca (SILVA, 2020).

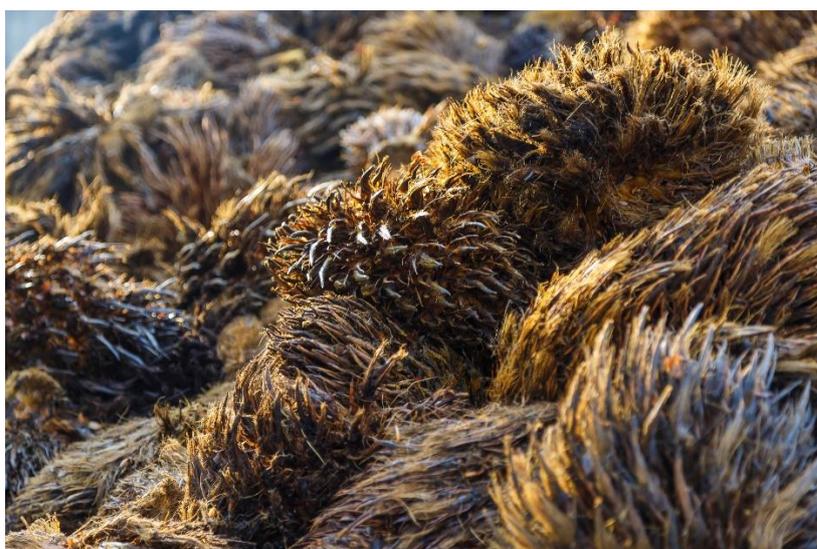
Por conta da necessidade de gerar grandes quantidades de vapor de alta pressão nas autoclaves e de manter sua temperatura e pressão constantes, o uso de grande quantidade de energia é indispensável. Porém, este uso intenso de energia faz com que seja um dos principais desafios da extração da palma, visto que contribui para os custos operacionais elevados e impactos ambientais associados à essa indústria. Além disso, devido à natureza e ao volume dos cachos cheios de frutos frescos processados, a grande quantidade de água utilizada para gerar vapor, resfriar e limpar os frutos da palma após a esterilização de alta

pressão também é um problema desta indústria. Portanto, buscar maneiras para otimizar esta etapa é crucial para melhorar a eficiência do processo, reduzir custos e minimizar o impacto ambiental.

Para que essa otimização do processo seja possível, deve-se partir de uma análise de parâmetros determinantes para o rendimento do processo. No caso da esterilização da palma, o teor de óleo presente nos cachos vazios e no vapor condensado, ambos resíduos da etapa, são os principais parâmetros a serem controlados, uma vez que o óleo contido nessas partes não pode ser misturado de volta no óleo que será extraído dos frutos e posteriormente comercializado. Assim, é necessário manter o funcionamento da esterilização o mais regulado possível, para que o teor de óleo considerado como perda e contido nos resíduos, seja o menor possível. Dessa forma, através de análises de teor de óleo contido no vapor condensado e nos cachos vazios, conforme mostrado na Figura 2.6, é possível analisar e determinar se a esterilização está tendo o rendimento esperado ou não.

Vale ressaltar que existe um tempo e uma temperatura ideal, que varia conforme a maturidade do fruto da palma que entra no esterilizador, para que os frutos se soltem dos cachos no debulhamento (RITTNER, 1995). Porém, tais padrões variam de acordo com a matéria-prima processada.

**Figura 2.6.** Cachos vazios de palma



**Fonte:** LANGKON, 2014.

De modo geral, se um fruto estiver muito maduro ao entrar no esterilizador, pode-se reduzir o tempo dessa etapa. E a recíproca é verdadeira, ou seja, se a palma estiver longe do seu estado maduro, é necessário um maior tempo de batelada. Vale lembrar que sempre se busca utilizar as temperaturas mais baixas possíveis e tempos curtos de manutenção de temperaturas elevadas (RITTNER, 1995).

## **2.4. Controle de qualidade e de processo**

O controle de qualidade e de processo estão diretamente relacionados, uma vez que, ao se realizar análises rápidas da qualidade da matéria que entra e sai de uma etapa do processo de extração do óleo, pode-se controlar pontualmente essa etapa.

No esterilizador, por exemplo, pode-se identificar se as condições de operação estão dentro do esperado a partir de alguns parâmetros como acidez, índice de peróxidos, teor de óleo, umidade e impurezas, composição de ácidos graxos e teor de vitaminas. Caso não esteja, pode-se tomar decisões estratégicas, como aumentar a temperatura de uma próxima batelada ou o tempo que essa deverá durar, ou ainda reavaliar a qualidade da matéria-prima recebida. Esses são parâmetros cruciais para determinar a adequação do óleo para consumo e seu uso em aplicações industriais, e avaliar o rendimento do processo, analisando o teor de óleo contido nas perdas, por exemplo.

Para se controlar tais parâmetros, algumas tecnologias de análises recebem maior destaque por conta de suas precisões, baixas porcentagens de erros e alta velocidade nas leituras ao se analisar amostras. A que ganha maior destaque é a Ressonância Magnética Nuclear em baixo campo magnético, a qual surge como uma tecnologia promissora, ainda pouco explorada quando aplicada para a indústria do óleo de palma, e que oferece uma análise não invasiva, precisa, rápida e detalhada da composição química do óleo.

### **2.4.1. Legislações envolvidas no controle de qualidade da indústria da palma**

As legislações envolvidas no controle de qualidade do óleo de palma são variadas de acordo com as análises realizadas. Abaixo estão listadas duas das principais normativas recomendadas na literatura técnica para a avaliação da qualidade do óleo de palma extraído, sendo elas a *AOCS Ak 3-94* e a *ISO 10565*.

A *AOCS Ak 3-94* é uma metodologia desenvolvida pela *American Oil Chemists' Society* (AOCS), organização reconhecida internacionalmente por suas normas rigorosas relacionadas a óleos, gorduras e materiais relacionados. Especificamente a *AOCS Ak 3-94* é uma metodologia para a determinação de teor de óleo em amostras secas a partir de sinais coletados em equipamentos RMN.

Já a *ISO 10565* é uma norma da *International Organization for Standardization* relacionada especificamente ao óleo e à gordura de sementes oleaginosas. Essa norma especifica o método de RMN para a determinação do teor de óleo e umidade nas sementes. Embora não seja específica para o óleo de palma, os princípios podem ser aplicáveis na análise de matérias-primas utilizadas na indústria do óleo de palma. Essa norma descreve métodos de extração e quantificação do óleo presente nas sementes, o que é fundamental para avaliar a qualidade e a quantidade do óleo que pode ser extraído das sementes. O controle preciso da umidade também é crucial, pois afeta a conservação e a qualidade das sementes e do óleo extraído.

Ambas as normas são fundamentais para garantir a qualidade, a segurança e a conformidade dos produtos dentro da indústria de óleos e gorduras, incluindo o óleo de palma.

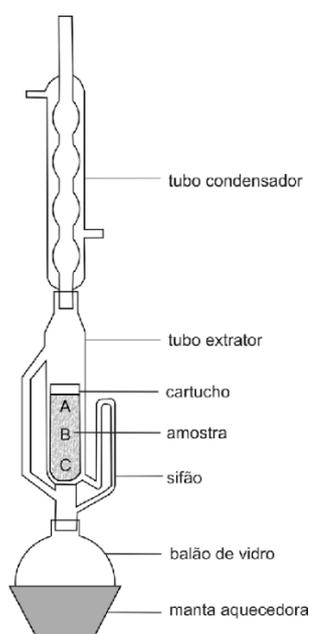
## **2.4.2. Metodologias de controle de qualidade**

Para atender as legislações citadas, existem algumas técnicas possíveis para se realizar o controle de qualidade, onde algumas são mais convencionais e outras mais inovadoras. Abaixo estão duas dessas técnicas.

### **2.4.2.1. Extração por solvente químico (Soxhlet)**

Sendo uma metodologia tradicional para se analisar o teor de óleo contido na palma, o método via extração por solvente químico, conhecido como Soxhlet, utiliza equipamentos laboratoriais de bancada, como mostrado na Figura 2.7.

**Figura 2.7.** Figura esquema do extrator Soxhlet



**Fonte:** Shinzato (2010)

Porém, esse é um método pouco efetivo para controle de qualidade em tempo real, não sendo adequado como controlador de qualidade de um processo contínuo, e que apresenta precisão aquém do desejado, visto que está sujeito a erros humanos comuns em análises laboratoriais. Por isso, acaba-se utilizando-o apenas para ter noção de como está o andamento do processo e como indicador para possíveis calibrações de espectrômetros, o qual será explicado mais adiante.

Nesse método, o óleo é extraído da amostra por contato com solvente orgânico e é posteriormente separado. O teor dos óleos corresponde ao peso do resíduo remanescente após a evaporação do solvente (BRAZACA, 2016).

O solvente mais comum utilizado neste método é o hexano, composto que apresenta algumas especificações não muito favoráveis à indústria de alimentos, que é o caso da palma. Ele é um composto neurotóxico, podendo causar danos ao sistema nervoso central

e periférico, levando a sintomas como dores de cabeça, tontura, fadiga, entre outros. Além disso, ele é conhecido por ser altamente inflamável, volátil, facilitando a sua inalação, e de difícil recuperação e remoção completa, ou seja, é um composto perigoso de se utilizar (EPA, 2020).

#### 2.4.2.2. Equipamento de espectrometria e sua aplicação industrial

O SpecFIT (Figura 2.8), equipamento de RMN em baixo campo magnético utilizado como uma nova tecnologia implementada em indústrias, é o espectrômetro de RMN desenvolvido e comercializado pela empresa brasileira FIT e utilizado pela empresa estudada neste trabalho.

**Figura 2.8.** SpecFIT



**Fonte:** autoral

Este equipamento é operado dentro de uma sala climatizada e tem uso facilitado. Como pode-se observar na Figura 8, o equipamento possui um orifício em sua base superior, onde são inseridos tubos de ensaio, com diâmetros específicos, contendo amostras do que se deseja analisar. Uma vez inserida no equipamento, clica-se em um botão do computador para se iniciar uma análise, a qual tem seu resultado devolvido em vinte segundos.

Um exemplo prático dentro da indústria da palma é a interpretação que o software faz ao se inserir o tubo de ensaio contendo uma amostra do fruto maduro da palma, ou do cacho vazio, ou do vapor condensado durante a esterilização. Em vinte segundos, o software pode analisar diversos parâmetros a respeito de uma amostra sólida ou líquida, como o teor de óleo ali presente, a acidez, umidade, teor de ácidos graxos, entre outros. É importante ressaltar que só é possível se analisar um único tipo de amostra por vez e que, para cada tipo de amostra, é necessária uma curva de calibração diferente.

Esses são alguns exemplos na indústria da palma, porém há uma diversificação enorme de aplicações para diferentes matrizes que espectrômetros podem oferecer. Outras matrizes de oleaginosas possuem análises bem parecidas. Já outras matrizes, como o setor de têxteis, combustíveis, produtos cárneos, contêm aplicações distintas.

Os espectrômetros de RMN em baixo campo magnético necessitam de uma calibração, a qual é realizada através de correlações com métodos tradicionais. Dentre os métodos tradicionais que existem para se realizar análises e correlacionar os resultados com a tecnologia RMN, o principal a ser utilizado para medir teor de óleo em oleaginosas é o método de extração por solvente, ou Soxhlet, como abordado anteriormente.

## **2.5. Ressonância Magnética Nuclear e suas aplicações**

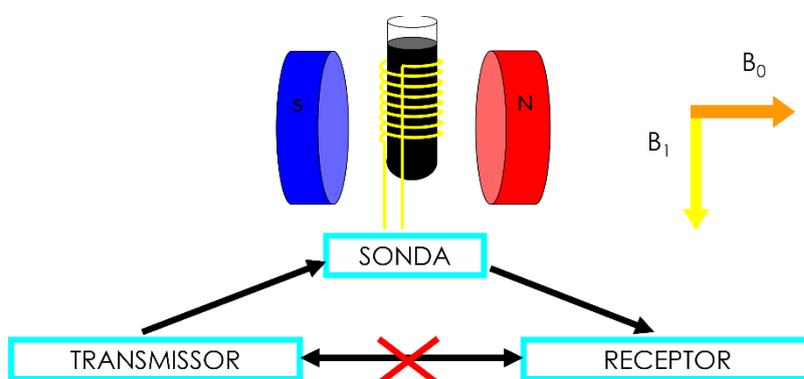
A Ressonância Magnética Nuclear (RMN) é uma das formas de espectroscopia, sendo uma técnica não invasiva e que possibilita a análise das propriedades físicas e químicas dos materiais, passando a ser uma ferramenta valiosa no monitoramento de processos industriais.

Conhecida também por relaxometria, a Ressonância Nuclear Magnética em baixo campo magnético ou RMN no domínio do tempo (RMN-DT), emerge como uma técnica crucial para o monitoramento integral da produção de matérias-primas, abrangendo desde a sua origem agrícola até a chegada ao consumidor. Este método é notável por sua capacidade de análise direta de alta frequência, que alia baixo custo operacional à facilidade de captura de sinais.

Seu funcionamento pode ser observado na Figura 2.9, mas de modo geral, consiste na polarização de amostras a partir de ímãs que interferem nos spins nucleares e

momentos magnéticos de moléculas. Ao se emitir um pulso de radiofrequência em uma sonda, a qual envolve o tubo de ensaio contendo a amostra, é provocada uma excitação nos núcleos das moléculas. Ao finalizar o pulso, as moléculas tendem a voltar ao seu estado de equilíbrio e, por isso, apresentam um comportamento específico em relação ao seu campo magnético. Esse comportamento é analisado através dos sinais de ressonância e traduzido através de equações matemáticas complexas para que um software, atrelado ao equipamento, possa reproduzir os resultados de forma didática.

**Figura 2.9. Esquema simplificado de um equipamento de RMN**



**Fonte:** autoral

A geração de sinais de RMN exige a presença de núcleos atômicos que respondem à ressonância, absorvendo energia e alterando seus estados de spin. Entre estes, o núcleo de hidrogênio é frequentemente escolhido devido ao seu número atômico ímpar, que lhe confere propriedades magnéticas e angulares únicas. Este núcleo possui um quantum de spin distinto de zero, permitindo-lhe interagir com campos magnéticos por meio de seu momento de dipolo magnético, gerando sinais perceptíveis nos equipamentos de RMN (CRESTANA, 2017). A escolha do núcleo de hidrogênio é justificada também por ser o elemento mais abundante em amostras orgânicas.

O reconhecimento e a adoção da RMN na medicina tiveram um crescimento acelerado após a década de 70 (COLNAGO, 2017). Especialmente no setor de óleos e gorduras, a técnica recebeu validação e certificação internacional pela Organização Internacional de Normalização (ISO 8292-1, 2008), marcando sua importância e eficácia em contextos regulatórios e de garantia de qualidade.

O uso de RMN em baixo campo, em particular, tem se mostrado eficaz em processos de extração do óleo de palma, permitindo a caracterização em tempo real dos frutos de palma e seus resíduos durante diversas etapas, o que é um fator importante para o controle de qualidade e de processo (CAMARGO, 2020).

A literatura existente abrange uma baixa gama de tópicos relacionados à tecnologia de RMN aplicada à esterilização de óleo de palma. Estudos anteriores têm explorado a aplicação dessa tecnologia inovadora em processos de esterilização de outros produtos alimentícios, destacando sua capacidade de monitorar as mudanças das propriedades físicas e químicas das amostras durante a esterilização (SMITH, 2018). Portanto, as aplicações específicas da RMN na esterilização de óleo de palma ainda carecem de investigação detalhada, ou seja, ainda existem lacunas de conhecimento importantes a serem preenchidas.

Enquanto o método tradicional de quantificação do teor de óleo por extração por solvente leva até oito horas para caracterizar uma amostra em termos de teor de óleo contido nela (SANTANA, 2021), um espectrômetro de RMN consegue analisar em cerca de vinte segundos. Porém, por limitações do próprio processo, este método tem sido utilizado na esterilização para caracterizar amostras de vapor condensado e cachos vazios de hora em hora.

## **2.6. Impactos da implementação de uma nova tecnologia**

A análise do impacto em um processo ao se implementar uma nova técnica é importante em todo tipo de empresa, independentemente do segmento que ela atua e, para a indústria do óleo de palma não é diferente. Uma das formas para se fazer uma análise dessa é fazer uma comparação entre o antes e o depois. Ou seja, comparar os resultados obtidos com a extração antes de se implementar uma nova técnica, com os obtidos após a implementação dela.

Otimizações no processo produtivo, como a implementação de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, podem resultar em uma redução significativa dos custos operacionais, ao mesmo tempo em que minimizam o impacto ambiental. Portanto, avaliar

cuidadosamente esses fatores é fundamental para assegurar que a produção do óleo de palma esteja em seu máximo rendimento e ao mesmo tempo ecologicamente sustentável.

Os métodos de esterilização utilizados na indústria do óleo de palma, por exemplo, têm um impacto direto nos custos operacionais e na qualidade do produto. Tradicionalmente, a esterilização é realizada através de métodos térmicos, que embora sejam eficazes, consomem uma grande quantidade de energia e podem comprometer a qualidade do óleo devido à degradação térmica (RITTNER, 1995).

A introdução da RMN em baixo campo como um controlador de qualidade e auxiliar de controle de processos, uma vez que faz rapidamente as análises da matéria, representa uma inovação com potencial, embora o custo inicial de implementação dessa tecnologia possa ser oneroso para alguns.

Outra maneira de se analisar o impacto causado pela implementação de um novo equipamento em uma indústria é por meio de Retorno Sobre Investimento. Conhecido popularmente como ROI (*Return Over Investment*), esse cálculo matemático consiste em dizer o tempo que um investimento leva para ter seu valor recuperado. Para isso, é necessário analisar diversos fatores, mas de modo geral, considerar os custos envolvidos com o equipamento, tanto com a compra, quanto com sua utilização, e comparar com a economia gerada por ele ao ser utilizado no processo.

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia utilizada para este estudo foi determinada de acordo com o objetivo de acompanhar as perdas resultantes da etapa de esterilização da palma utilizando um espectrômetro. Então, para se analisar o impacto da implementação da tecnologia de RMN no processo de extração do óleo de palma da empresa em estudo, precisou-se coletar dados de teor de óleo contido no vapor condensado e nos cachos vazios, ambos considerados como perdas da etapa de esterilização. Uma vez tendo os dados, que são resultados das leituras de análises feitas no equipamento, é possível analisá-los e avaliar o quão impactante é a implementação dessa tecnologia no processo.

Basicamente, uma vez recebido os cachos de frutos frescos da palma na unidade industrial estudada, inicia-se o processo de preparação para que estes cachos sejam

esterilizados. Os cachos são então separados em lotes e inseridos no esterilizador. Muito comum em plantas extratoras de óleo de palma, ele suporta até 20 toneladas de cachos por batelada.

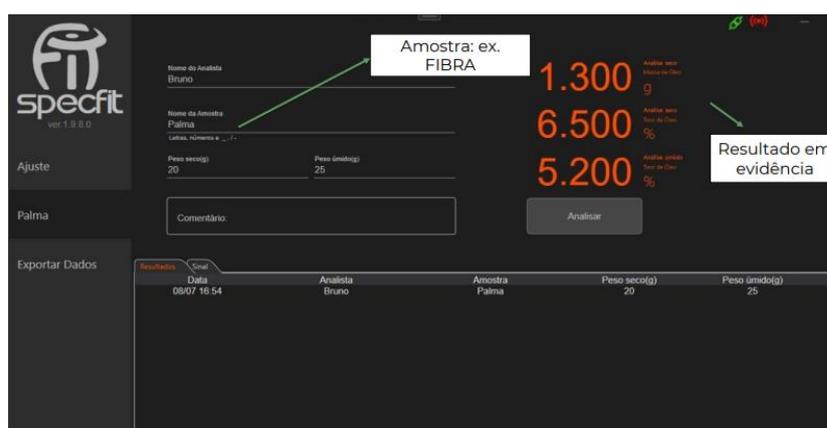
Dessa forma, realiza-se uma batelada de uma hora a uma hora e quinze minutos e de 110 a 130°C, com inserção de vapor com pressão próximo de 3 kg/cm<sup>2</sup> (aproximadamente 2,9 atm). Logo após serem esterilizados, toda a matéria ali presente passa por um debulhador, a fim de separar os frutos dos cachos. Ao final dessa etapa, amostras de cachos vazios e de vapor condensado são retiradas e levadas para o laboratório. Então separa-se amostras de cachos vazios contendo 5, 7 e 10 gramas cada, e 20, 30 e 40 gramas de vapor condensado, para que assim sejam analisadas no equipamento. O modo de inserção de amostra no equipamento e a interface do software, que mostra os resultados de teor de óleo nas perdas, por exemplo, são observados na Figura 3.1 e 3.2, respectivamente.

**Figura 3.1.** Amostra sendo inserida no SpecFIT



**Fonte:** autoral

**Figura 3.2.** Interface do Software SpecFIT



**Fonte:** autoral

### **3.1. Procedimento de análise e dados experimentais utilizados**

Para realizar a coleta de dados de teor de óleo perdido durante o processo de esterilização e estudar suas consequências, é necessário realizar os experimentos em processos reais de extração. Porém, é um estudo que necessita meses de acompanhamento, o que para este trabalho de graduação foi inviável. Por este motivo, e para ampliar a base de conhecimento disponível na literatura, um cliente da FIT, o qual optou por não ser identificado, disponibilizou os dados solicitados de análises, usando espectrômetros de RMN, das perdas contidas na etapa de esterilização.

A análise do impacto do espectrômetro de RMN é realizada através dos dados de perdas de teor de óleo contido nos cachos vazios e no vapor condensado, obtidos através da utilização do equipamento implementado no controle de qualidade da unidade industrial.

Analisando-se amostras de cachos vazios e vapor condensado de um certo lote que foi esterilizado, pode-se replicar os resultados para o restante do lote que ainda não foi esterilizado. Dessa forma, tendo um melhor conhecimento de como está a etapa do processo e o material ali processado, facilita a tomada de decisões estratégicas que visem a melhora do rendimento da operação, como a realização de ajustes no equipamento. Considerando este calibrado para que seja possível auxiliar a manter as perdas da etapa

as mais próximas do ideal, pode-se obter o teor de óleo com potencial de ser recuperado e o impacto que esse teor causará no faturamento através do lote todo.

O impacto é calculado a partir da quantidade de óleo contida nos resíduos da esterilização. Faz-se a diferença entre o valor real de teor de óleo contido nas perdas e o valor teórico, sendo de 3% para perdas em cacho vazio e 0,5% em vapor condensado. Tais valores teóricos foram determinados pela empresa a partir de cálculos teóricos e de análises empíricas utilizando Soxhlet ao longo dos processamentos da indústria.

Quando se fala em equipamento calibrado a partir dos valores teóricos e reais das perdas contidas na esterilização, significa que os engenheiros responsáveis por essa etapa realizaram os devidos ajustes no equipamento, como correções na temperatura, pressão e tempo de operação, já que essas condições são fatores determinantes para uma maior facilidade de soltura dos frutos dos cachos e menor perda em forma de vapor (RITTNER, 1996).

Vale ressaltar que para adequar um esterilizador, é necessário conhecer como estão os resultados de sua operação. Por isso, analisar a porcentagem de óleo contido nas perdas da etapa é algo indispensável, já que é possível assimilar o óleo perdido em cachos vazios e vapor condensado com o óleo que pode ser extraído a mais.

Conhecendo os resultados do processo, faz-se ajustes no equipamento para que sejam verificados na próxima batelada. Na sequência, os ajustes são verificados a partir dos resultados das análises de teor de óleo nas perdas antes e depois de se realizar o ajuste, e validados. Caso necessite alguma correção a mais, ela é feita e validada posteriormente, a fim de propor sempre o melhor rendimento para o esterilizador. Para fins didáticos, as Figuras 3.3 e 3.4 mostram algumas sugestões de ajustes no processo de acordo com os dados das perdas.

**Figura 3.3.** Sugestões de ajustes a partir dos dados de perdas em cachos vazios

% PERDA NOS CACHOS	> QUE 3%	1. Verificar tempo de cozimento dos frutos, o mesmo pode estar excessivo para a maturidade do fruto que passa na linha; 2. Verificar variações no funcionamento do debulhador; 3. Verificar e se necessário, ajustar volume de dosagem dos frutos no fojo de alimentação do relder, equilibrando o volume de entrada de frutos no debulhador.	CONFORME	MONITORAR
			NÃO CONFORME	REVISAR AÇÕES

Fonte: autoral

**Figura 3.4.** Sugestões de ajustes a partir dos dados de perdas em vapor condensado

% ESTERILIZAÇÃO	> QUE 0,5%	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar tempo de cozimento dos frutos, o mesmo pode estar excessivo para a maturidade do fruto que passa na linha;</li> <li>2. Verificar oscilações de pressão (pressão baixa) no painel de controle dos esterilizadores e realizar correções no fornecimento de vapor, pontuando origem da oscilação (baixa pressão da caldeira, má vedação das portas de segurança, vazamento nos vasos de pressão);</li> <li>3. Verificar e se necessário ajustaro tempo do ciclo de dreno do condensado nos esterilizadores.</li> </ol>	CONFORME	MONITORAR
			NÃO CONFORME	REVISAR AÇÕES

**Fonte:** autoral

Uma vez com o processo ajustado pelos responsáveis, pode-se projetar a quantidade de óleo que deixará de ser perdido, como dito anteriormente, a qual reflete no resultado financeiro da indústria. Ao projetar-se tal teor de óleo economizado ao longo do tempo, pode-se prever o impacto no rendimento do processo como um todo.

Além disso, desprezando os custos extras envolvidos na produção em decorrência dos ajustes realizados na esterilização por serem mínimos, segundo a empresa, e levando em conta os novos valores das perdas e o valor atual de mercado do óleo de palma, é possível calcular o impacto financeiro da implementação do equipamento na produção em um determinado período. Por consequência, obtém-se o ROI deste investimento. Esse cálculo é realizado basicamente subtraindo a porcentagem real de perda pela porcentagem teórica aceita como perda. O resultado é o percentual de óleo perdido, que se considerará como economia posteriormente.

Em termos de balanço de massa, segundo a empresa que forneceu os dados, a proporção de óleo contido no cacho vazio e no vapor condensado corresponde a 23,4% e 3%, respectivamente, do cacho de fruto fresco. A partir disso, pode-se obter a porcentagem de óleo perdida por essas partes, porém em relação ao cacho de fruto fresco.

Dessa forma, fazendo os cálculos, tanto referente a perda contida em cacho vazio, quanto em vapor condensado, em relação ao cacho de fruto fresco, basta somar ambas as porcentagens de perda de teor de óleo e multiplicá-las pela quantidade de cacho de fruto fresco processados diariamente para se obter a perda de óleo total diária referente à esterilização.

Assim, é possível projetar e analisar as toneladas de óleo que seriam perdidas em cada lote e que são aproveitadas após ajustes no esterilizador. Tendo em mente o valor de mercado do óleo de palma, pode-se prever o impacto real trazido pelo equipamento, tanto

em quantidade de óleo com potencial de ser aproveitado, quanto em possível lucratividade para a empresa.

A partir dessa economia, compara-se ela com o custo trazido pelo instrumento de RMN implementado para um determinado período, obtendo assim o ROI, ou seja, o período que leva para se recuperar o valor gasto com a implementação do equipamento, é possível avaliar financeiramente a implementação.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Resultados**

Os resultados em porcentagens de perdas nos cachos vazios e no vapor condensado, obtidos com o uso de espectrômetro pela unidade industrial que compartilhou os dados, foram listados na Tabela 1.1.

**Tabela 1.1. Resultados das porcentagens de perdas obtidas nos cachos vazios e no vapor condensado com os experimentos utilizando o SpecFIT ao longo de sete semanas.**

<b>Dia</b>	<b>Teor de óleo em Cachos Vazios (%)</b> Referência: 3,00%	<b>Teor de óleo em Vapor Condensado (%)</b> Referência: 0,50%
1-jun	3,14	1,44
2-jun	4,24	0,33
3-jun	6,60	0,65
4-jun	6,91	0,53
6-jun	5,87	1,16
8-jun	7,46	2,21
9-jun	5,81	4,32
10-jun	4,85	0,78
11-jun	6,61	1,18
13-jun	3,52	0,38
15-jun	3,82	0,44
16-jun	4,49	0,86
17-jun	5,60	0,40
18-jun	4,47	0,32
21-jun	4,43	0,45
22-jun	5,50	0,46
23-jun	7,84	0,34
24-jun	8,13	0,82
25-jun	5,36	1,04
26-jun	3,68	0,96
27-jun	3,36	0,48
28-jun	1,93	0,56
29-jun	4,18	0,51
30-jun	6,97	0,40
1-jul	6,31	0,39
2-jul	6,78	0,86
7-jul	7,48	0,55
8-jul	6,02	0,99
9-jul	5,22	0,48
10-jul	5,23	1,65
11-jul	3,52	0,00
12-jul	5,07	0,85
13-jul	10,73	0,56
14-jul	2,90	1,77
15-jul	3,65	0,00
16-jul	3,60	0,47
20-jul	4,88	0,64
21-jul	3,01	0,40
22-jul	6,35	0,32

**Fonte:** autoral

Estimou-se então as porcentagens médias perdidas, tanto para os cachos vazios, quanto para o vapor condensado e listou-as na Tabela 1.2.

**Tabela 1.2. Porcentagens médias perdidas nos cachos vazios e no vapor condensado**

<b>Média das perdas nos Cachos Vazios (%)</b> <b>Referência: 3,00</b>	<b>Teor de óleo em Cacho Vazio no Cacho Cheio de Fruto Fresco (%)</b>	<b>Média das perdas no Vapor Condensado (%)</b> <b>Referência: 0,50</b>	<b>Teor de óleo em Vapor Condensado no Cacho Cheio de Fruto Fresco (%)</b>
5,27	23,40	0,79	3,00

**Fonte:** autoral

A partir das médias, iniciou-se os cálculos comparativos para que se obtivesse o ROI. Assim, partiu-se inicialmente da diferença entre os valores de perdas referência e verdadeiros, tanto para as perdas no cacho vazio, quanto no vapor condensado.

Dessa forma, fazendo primeiramente para o cacho vazio, tem-se a porcentagem de óleo perdido, o qual poderá ser economizado, sendo 2,27%.

De acordo com a empresa, considera-se que o cacho de fruto fresco é composto de 23,40% de cacho vazio. Dessa forma, para obter a quantidade de óleo perdida para os cachos vazios, porém ao analisar o cacho do fruto fresco, basta multiplicar o resultado de 2,27% por 23,40%, resultando em 0,53%.

Considerando que a planta extratora estudada processa em média 400 toneladas de cacho de fruto fresco por dia, conclui-se que 2,12 toneladas de óleo são perdidas para os cachos vazios diariamente. Isso é o equivalente a 63,7 toneladas perdidas mensalmente.

Ao fazer de forma análoga para o vapor condensando, tem-se 0,29% de óleo que poderá ser economizado.

Também segundo a empresa e seu balanço de massa, considera-se que o vapor condensado corresponde a 3,00% do cacho de fruto fresco. Dessa forma, para obter a quantidade de óleo perdida para o vapor condensado, basta multiplicar os 0,29% pelos

3,00%, resultando em 0,01% de economia em termos de teor de óleo no cacho de fruto fresco.

Em uma planta que processa 400 toneladas por dia, são perdidas o equivalente a 0,04 toneladas diárias, correspondendo a 1,2 toneladas mensais.

Somando-se as perdas contidas em cachos vazios e vapor condensado, tem-se uma perda total na etapa de esterilização de 64,9 toneladas mensais. Considerando o valor médio da tonelada de óleo de palma para 2023 como USD 813.00, sendo equivalente a R\$ 4.065,00, estima-se que o valor das perdas, as quais podem ser evitadas, está ao redor de R\$ 263.818,00 reais mensais. É um valor bem significativo para uma planta de médio porte que extrai 400 toneladas diárias. Vale ressaltar que extratoras de grande porte chegam a extrair 1000 toneladas diariamente.

## **4.2. Discussão**

Pensando no equipamento de RMN como um controlador de qualidade, os resultados apresentados por ele foram satisfatórios ao trazer teores de óleo contidos nas perdas da esterilização instantaneamente ao fim de uma batelada. Ainda mais pelo fato de que antes a empresa não tinha resultados instantâneos sobre as perdas da etapa. Já que o processo não pode parar, deve-se manter o seu controle e realizar ajustes quando necessário. Sem um controle do processo de esterilização, a maximização de seu desempenho de acordo com a matéria-prima fica comprometida.

Para além da utilização em uma etapa inicial e, pelo fato de o teor de óleo ser um parâmetro determinante da quantidade de óleo extraído ao final do processo, um equipamento de RMN pode apresentar bom desempenho quando utilizado como auxiliar em outras etapas do processo de extração.

Pensando no custo aproximado de R\$ 275.000,00 do espectrômetro implementado e desprezando outros custos envolvidos com sua utilização, ao projetar as economias trazidos por ele, pôde-se observar que, em aproximadamente um mês, o valor investido já é recuperado. Ou seja, é um investimento que apresenta um excelente ROI.

Pode-se observar então que a implementação de espectrômetro de Ressonância Magnética Nuclear trouxe números expressivos e bom desempenho como controlador de

qualidade e processos, quando analisados parâmetros como o teor de óleo contido em perdas. Uma economia de aproximadamente R\$ 263.818,00 por mês, correspondente ao aproveitamento de quase 65 toneladas de óleo, controlando-se apenas uma etapa inicial de toda a extração, é um valor extremamente relevante no faturamento anual da indústria estudada.

Não é fácil obter boas oportunidades de investimentos com ROI extremamente curtos em empresas de pequeno ou médio porte. Enquanto isso, a implementação da tecnologia RMN em extratoras de óleo de palma que fazem análises via Soxhlet, apresenta um ROI aproximadamente de um mês. Porém, vale ressaltar que o equipamento tem a possibilidade de ser utilizado para analisar perdas em outras etapas da extração, fazendo com que o equipamento tenha um impacto maior ainda.

Dessa forma, este trabalho, que teve como objetivo principal analisar o impacto da utilização de RMN em baixo campo na esterilização da palma, apresentou resultados relevantes sobre teor de óleo contido em perdas.

## **5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Tal trabalho vai ao encontro do propósito de um engenheiro químico, uma vez que cumpre com as expectativas de analisar o impacto causado pela implementação de novas tecnologias em processos, e de tomar decisões estratégicas baseadas em resultados. Ainda mais por partir de análises físico-químicas para se realizar controle de qualidade e de processo em indústrias. O conteúdo estudado também se alinha com as tendências de sustentabilidade e responsabilidade social das empresas, contribuindo para uma produção mais eficiente e ambientalmente consciente.

Para além da análise do impacto do equipamento, a partir de dados e estatística pode-se criar padrões e então automações para que respostas sejam emitidas a partir do momento em que amostras são analisadas. Como exemplo, pode-se pensar na matéria-prima sendo analisada em seu recebimento. Retira-se amostras dessa matéria-prima e analisa-se suas características. O software usado para salvar os dados das análises realizadas no espectrômetro compartilha instantaneamente essas informações com a nuvem e em questão de segundos o engenheiro responsável pelo esterilizador recebe todas

as informações sobre o lote a ser processado. Ao chegar o momento de esterilizar mais dessa matéria-prima, o esterilizador já estará ajustado de acordo com as características deste lote.

Pode-se concluir ainda que a qualidade do óleo final não depende apenas das etapas do processo de extração, visto que a maturidade do fruto no recebimento impacta diretamente na eficiência de cada etapa do processo. Dessa forma, soluções como a bonificação do produtor que entregar cachos de palma mais maduros são muito eficientes, uma vez que estará mais próximo de se obter uma padronização do que entra no processo. Tal padronização acarreta uma estabilidade do processo pois, mantendo-se um padrão no grau de maturidade do cacho, menor é a variação necessária das condições de operação de cada etapa do processo. Assim, facilitará a padronização do processo de extração como um todo e conseqüentemente a maximização de cada etapa, inclusive a de esterilização aqui estudada. Em outras palavras, tendo uma entrada e um processo estável, o resultado é estável também.

Em resumo, este trabalho serviu de contribuição para o avanço do conhecimento na área de engenharia química, especificamente na extração de óleo de palma, integrando a tecnologia de RMN em baixo campo em processos de esterilização como controlador de qualidade e de processos. Portanto, pode direcionar estudos para preencher lacunas de conhecimento existentes na literatura, explorar novas possibilidades de otimização e recomendar práticas à indústria de produção de óleos, alinhando sempre eficiência, qualidade e sustentabilidade.

## **6. REFERÊNCIAS**

- AGUILAR, Reinaldo. *Elaeis guineensis* Jacq. (cultivada). 22 de julho de 2012. Flickr. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/plantaspeninsulaosa/7625151776/in/photostream/>. Acesso em: 22/02/2024.
- AKIRA, R. Saboaria artesanal. Roberto Akira. 2012. Disponível em: <http://www.japudo.com.br/saboaria/introducao/#indice>. Acesso em: 27/01/2024.

BIODIESELBR. Palma. Biodieselbr. 26 de janeiro de 2006. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/plantas/palma/palma>. Acesso em: 27/01/2024.

BONGOMAN. Elaeis guineensis fruits on tree, ripe and 2 weeks before ripe. Taken at my farm in Ajumaku, Ghana. Wikimedia Commons. 17 de março de 2008. Disponível em:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elaeis\\_guineensis\\_fruits\\_on\\_tree.jpg?uselang=pt-br#filelinks](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elaeis_guineensis_fruits_on_tree.jpg?uselang=pt-br#filelinks). Acesso em: 28/02/2024.

BRAZACA, Solange. Determinação de lipídeos. Aula prática N° 5. Laboratório de análise de alimentos e nutrição. 31 de abril de 2016. Moodle ESALQ - USP (Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição).

CAMARGO, M.P.E., COSTA, C.C. (2020). Relatório de avaliação dos impactos de tecnologias geradas pela Embrapa. Embrapa Instrumentação (São Carlos-SP). 29 de janeiro de 2020. Disponível em: [https://bs.sede.embrapa.br/2019/relatorios/instrumentacao\\_metodomedicacao.pdf](https://bs.sede.embrapa.br/2019/relatorios/instrumentacao_metodomedicacao.pdf). Acesso em: 23/01/2024.

CARNEIRO, Taymã (2022). Fruto de palma tem várias aplicações, como o óleo de dendê; entenda. G1Pará. Rede Liberal. 3 de julho de 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2022/07/03/fruto-de-palma-tem-varias-aplicacoes-como-o-oleo-de-dende-entenda.ghtml>. Acesso em: 27/12/2023.

CHEN, L. & WANG, Y. (2019). Application of low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) in the study of oil palm fruits. *Journal of Food Science and Technology*, 56(8), 3369-3377.

COLNAGO, L. A.; ANDRADE, F. D. D. RMN no domínio do tempo fundamentos e aplicações offline e inline. Em: *Biotecnologia Aplicada à Agro&Indústria - Vol. 4.*[s.l.] Editora Blucher, 2017. p. 439–470.

CRESTANA, S.; FOSCHINE, M. M.; FERREIRA, M. D. Instrumentação póscolheita em frutas e hortaliças. Embrapa ed. Brasília: [s.n.]

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Toxicological Review of n-Hexane (CAS No. 110-54-3) In Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS). Washington, D.C., EPA, 2020.

ESFERA BRASIL (2023). Conheça a palma de óleo, planta que dá origem ao óleo vegetal mais consumido no mundo. Exame. Disponível em: <https://exame.com/blog/brasil-com-palma/conheca-a-palma-de-oleo-planta-que-da-origem-ao-oleo-vegetal-mais-consumido-no-mundo/>. Acesso em: 22/01/2024.

FARIA-MACHADO, Adelia Ferreira de, et al. Óleo de palma de alto oleico produzido no Brasil. I Congresso Luso-Brasileiro de Horticultura. Sessão Outras. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/178330/1/clbhort-p-581-586-adelia.pdf>. Acesso em: 21/02/2024.

GRUPO BBF (2023). Cultivo sustentável da palma de óleo transforma o agronegócio na região Norte do Brasil. Grupo BBF. Disponível em: <https://www.grupobbf.com.br/noticias/cultivo-sustentavel-da-palma-de-oleo-transforma-o-agronegocio-na-regiao-norte-do-brasil/>. Acesso em: 27/01/2024.

INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS. São Carlos: a Capital da Tecnologia. [S.l.]: [s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.ifsc.usp.br/efc/sao-carlos-a-capital-da-tecnologia/>. Acesso em: 11/01/2024.

LANGKON, Sabah. Squeezed Oil palm fruits (PEFB - Palm oil Empty Fruit Bunch) at Langkon Palmoil Mill (Kilang Kelapa Sawit Langkon). Wikimedia Commons. 13 October 2014. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Langkon\\_Sabah\\_Kilang-Kelapa-Sawit-Langkon-04.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Langkon_Sabah_Kilang-Kelapa-Sawit-Langkon-04.jpg). Acesso em: 21/02/2024.

MARCONI. Extrator de Óleos e Graxas através de Solventes, tipo Soxhlet. Marconi. Disponível em: <https://www.marconi.com.br/produto/187/extrator-de-oleos-e-graxas-atraves-de-solventes44-tipo-soxhlet#!prettyPhoto>. Acesso em: 19/01/2024.

MIRANDA, Beatriz Ottoni Azevedo Porto. Análise de falha de um gerador de vapor utilizado em autoclave. 2018. 60. Monografia (Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, São Mateus - ES, 2018.

NGAN, S. L., et al. (Social Sustainability of Palm Oil Industry: A Review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3. May 2022. Available at: <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.855551>. Accessed on: 08/01/2024.

PRIANTI, T.; PEREIRA H. Óleo de palma: revisão e perspectivas de mercado no Brasil e no mundo. Abrapalma, 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=h9tMixa-kjA>. Acesso em: 07/01/2024.

RITTNER, Herman (1995). Óleo de palma: tecnologia e utilização. São Paulo: H. Rittner

SANTANA, Irene. Novo método permite análise instantânea do óleo de palma. Revista Cultivar. 20 de setembro de 2023. Disponível em:

<https://revistacultivar.com.br/noticias/novo-metodo-permite-analise-instantanea-do-oleo-de->

[palma#:~:text=A%20análise%20de%20teor%20de,que%20pode%20levar%20algumas%20horas](https://revistacultivar.com.br/noticias/novo-metodo-permite-analise-instantanea-do-oleo-de-palma#:~:text=A%20análise%20de%20teor%20de,que%20pode%20levar%20algumas%20horas). Acesso em: 28/01/2024.

SHINZATO, Mirian Chieko, et al. Alteração experimental de rochas carbonáticas, Caverna das Pérolas, Iporanga (SP). Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 31 (1/2), 23-34, 2010.

SILVA, Rafael. A esterilização na extração de óleo de palma. LinkedIn, maio 2020.

Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/esterilização-na-extração-de-óleo-palma-rafael-silva/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 27/01/2024.

SMITH, J. D. (2018). Palm Oil: Production, Processing, Characterization, and Uses. AOCS Publishing.

ZEFERINO, M; RAMOS, S. de F. Mercado Mundial de Óleos Vegetais: panorama e perspectivas. Análises e Indicadores do Agronegócio, São Paulo, v. 18, n. 5, p. 1-8, maio 2023. Disponível em:

<http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=16138>. Acesso em: 24/01/2024.