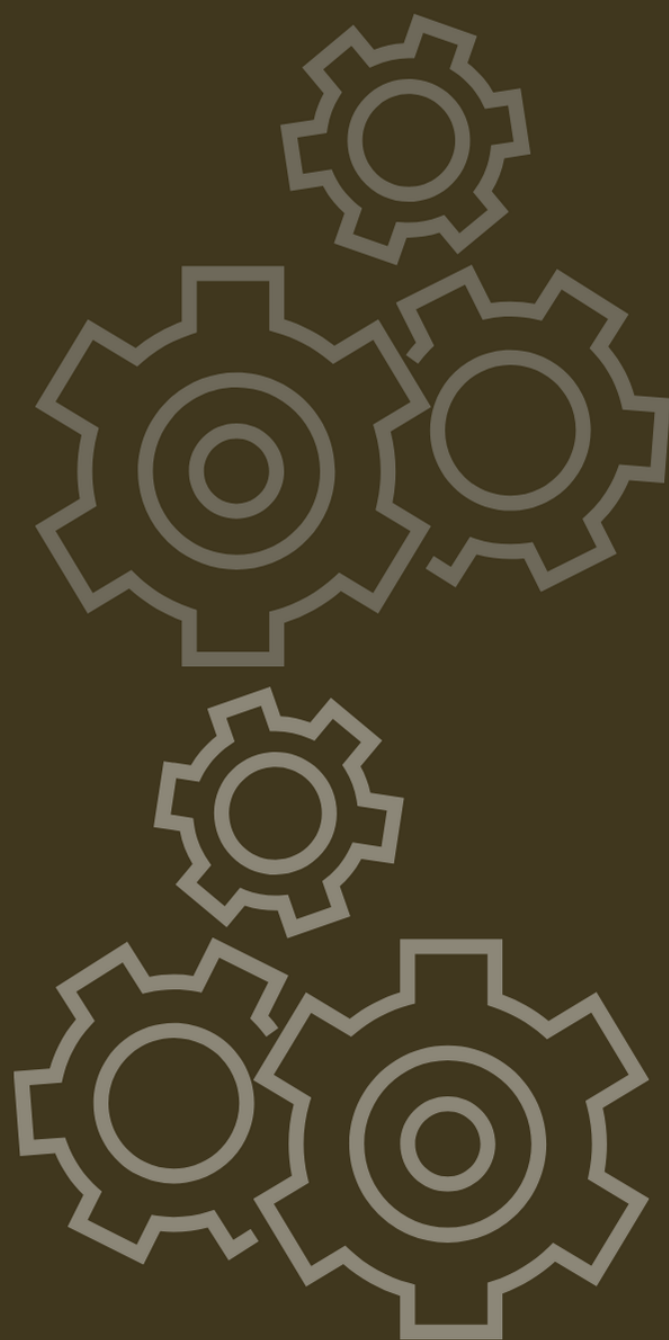


ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADORES

ALINE MARA OLIVEIRA

OSVALDO SENA GUIMARÃES



VOLUME
24



Editora Poisson



Aline Mara Oliveira
Osvaldo Sena Guimarães
(Organizadores)

Engenharia, Gestão e Inovação Volume 24

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2026

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais

MSc. Davilson Eduardo Andrade

Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas

MSc. Fabiane dos Santos

Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC

Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy

MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O482e

Engenharia, Gestão e Inovação – Volume 24 / Organização:

Aline Mara Oliveira, Osvaldo Sena Guimarães – Belo Horizonte MG: Editora Poisson, 2026. 180 p.

Formato: PDF

ISBN: 978-65-5866-644-8

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Gestão 3. Inovação. I. OLIVEIRA, Aline Mara
II. GUIMARÃES, Osvaldo Sena III. Título

CDD-620

SÔNIA MÁRCIA SOARES DE MOURA – CRB 6/1896



O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.

Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br

Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Transição energética: análise de contextos globais e realidade brasileira 06

Igor Pacífico Xavier da Silva, Lara Carla Freitas Rodrigues, Paulo Danton Félix da Costa, Pedro Victor de Sousa Albuquerque, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8.CAP.01

Capítulo 2: Geração compartilhada de energia: impactos econômicos em cooperativas fotovoltaicas 32

Maria Heloisa Medeiros de Souza, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8.CAP.02

Capítulo 3: Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass in Bahia (Brazil): from a regional biomass hub to high-value platform chemicals 46

Júlia Gimenez Iervolino, Luiza Vasconcelos Santos, Ronaldo Costa Santos

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8.CAP.03

Capítulo 4: Detecção do nível de água de uma câmara utilizando uma webcam 68

Diêgo Rodrigues de Resende, Mário Cupertino da Silva Júnior, Leonardo Carneiro Araújo

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8.CAP.04

Capítulo 5: A importância da utilização do Power BI na construção de um *dashboard* de KPI no controle de qualidade de uma empresa 87

Guilherme do Canto Pereira, Moisés Teles Madureira

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8.CAP.05

Capítulo 6: Rastreabilidade como ferramenta de gestão da qualidade: diagnóstico e proposta de intervenção no controle de não conformidades de umidade em uma usina sucroalcooleira 93

Wellington Fernandes do Nascimento Júnior, Ânoar Abbas El Aouar, Pierre Corrêa Martins, Joselma Araújo de Amorim, José Evangelista Santos Ribeiro

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8.CAP.06

Capítulo 7: Análise de desempenho de sistemas de filas em um terminal rodoviário localizado no município de Abaetetuba/PA 119

Raul Alexandre Silva dos Santos, Eduardo Braga Costa Santos, Denise Dantas Muniz, Marinaldo de Jesus dos Santos Rodrigues

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8.CAP.07

SUMÁRIO

Capítulo 8: Estudo de filas de caminhões na recepção de leite em indústria de laticínio usando métodos estocásticos 132

Marina Ester Magrini Antônio, Yung-Chin Shih

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8.CAP.08

Capítulo 9: Abordagem multimodal para auxílio à detecção de tumores cerebrais utilizando redes neurais totalmente convolucionais 154

Alan Marques da Rocha, Antonia Alana Claudino Sousa

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8.CAP.09

Capítulo 10: Viscoelastic polyurethane foams from unmodified kraft lignin dispersed into methoxy polyethylene glycol and palm kernel oil as partial substitutes of petroleum-based polyols..... 175

Camila Campos Flôres, Thiago C Rufno, Lara Robert Nahra, Isabelle Zavecz Rodrigues, Maurício Pinheiro Oliveira

DOI: 10.36229/978-65-5866-644-8.CAP.10

Autores 194

Capítulo 1

Transição energética: análise de contextos globais e realidade brasileira

Igor Pacífico Xavier da Silva

Lara Carla Freitas Rodrigues

Paulo Danton Félix da Costa

Pedro Victor de Sousa Albuquerque

Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

Resumo: A transição energética configura-se como um processo dinâmico e multifatorial, influenciado por fatores históricos, políticos, geográficos e econômicos específicos de cada nação. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo examinar a transição energética nos âmbitos internacional e nacional, analisando seus determinantes estruturais e as distintas trajetórias adotadas pelos países selecionados anteriormente e posteriormente ao Acordo de Paris, assinado em 2015. Na Alemanha, a estratégia foi orientada por preocupações relacionadas à segurança energética e à redução dos riscos associados à geração nuclear, promovendo a expansão de fontes renováveis e a reorganização do setor elétrico. Nos Estados Unidos, a crise do petróleo de 1973 impulsionou políticas fundamentadas em inovação tecnológica e incentivos fiscais como instrumentos de diversificação da matriz energética. A China, em resposta ao agravamento da poluição atmosférica, estabeleceu metas ambientais mais rigorosas e realizou investimentos expressivos em energias renováveis, consolidando posição de destaque global nesse segmento. O Brasil, por sua vez, diante da vulnerabilidade econômica decorrente da elevação dos preços do petróleo na década de 1970 e da disponibilidade de recursos naturais, estruturou políticas estratégicas como o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) e ampliou a geração hidrelétrica, resultando em uma matriz elétrica majoritariamente renovável. Em síntese, observa-se que, embora as motivações e estratégias adotadas sejam distintas, há convergência quanto à necessidade de descarbonização progressiva das matrizes energéticas, especialmente após 2015, quando o Acordo de Paris reforçou a coordenação internacional ao estabelecer metas comuns de mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Ainda assim, persistem desafios estruturais associados à dependência de combustíveis fósseis, evidenciando que a transição energética exige transformação sistêmica, integração setorial e compromisso político contínuo para sua efetiva consolidação.

Palavras-chave: Transição energética, Matriz energética, Crise do petróleo, Descarbonização, Energias renováveis.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico da humanidade possui raízes históricas moldadas pelo consumo de combustíveis fósseis (Santos *et al.*, 2025), além disso, o desenvolvimento das sociedades modernas possui base energética centrada no carvão, petróleo e gás natural (SMIL, 2024). Entretanto, a dependência desses combustíveis trouxe consequências ambientais severas, e a atual crise climática é o resultado de um modelo de desenvolvimento firmado no uso irracional de combustíveis fósseis (Gorayeb *et al.*, 2019).

Como resultado do uso intensivo de combustíveis fósseis, durante décadas, pode-se citar às mudanças climáticas em decorrência do efeito estufa, considerado atualmente uma das maiores problemáticas enfrentadas pela humanidade. Como consequência de tal efeito, com aumento da temperatura global devido a emissão dos gases do efeito estufa (GEE), principalmente gás carbono, metano, óxido nitroso, clorofluorcarbonos, entre outros, tem-se o derretimento das calotas polares e o aumento do nível dos oceanos (Santos *et al.*, 2025).

Segundo Veiga (2019), mais de 75% do dióxido de carbono emitido são gerados a partir da queima de combustíveis fósseis, elevando a temperatura média global e ocasionando eventos climáticos extremos. Moreira (2019), evidência que o uso descontrolado dessas fontes de energia evidencia um modelo econômico insustentável, que privilegia o crescimento imediato em detrimento da estabilidade ambiental no longo prazo. Desse modo, Santos *et al.* (2025) coloca que é inegável que a civilização contemporânea enfrenta um dilema: manter o atual paradigma energético ou buscar alternativas viáveis capazes de reduzir a pegada de carbono e mitigar os impactos da crise climática.

A vista disso, faz-se necessário uma alteração no sistema energético mundial. De acordo com Sachs (2000), a crise climática configura-se não apenas como uma problemática ambiental, mas também como um desafio de natureza política e econômica, o qual demanda uma transformação profunda da matriz energética em escala global. De modo semelhante, Vasconcellos (2002) sustenta que a busca por fontes energéticas limpas e sustentáveis ultrapassa a dimensão ambiental, constituindo-se também como uma estratégia essencial para assegurar a segurança energética e reduzir a vulnerabilidade das economias que apresentam elevada dependência de combustíveis fósseis.

Nessa conjuntura, torna-se imprescindível a implementação de políticas voltadas à transição energética, capazes de promover a substituição gradual das fontes fósseis por alternativas renováveis e, assim, fomentar um modelo de desenvolvimento mais sustentável. A transição energética configura-se como um caminho indispensável para a mitigação dos efeitos da crise climática, ao mesmo tempo em que contribui para a redução da dependência de fontes poluentes e para a promoção da preservação da biodiversidade.

Conforme expõe Holmgren (2013), a transição energética consiste na substituição gradual das fontes energéticas fundamentadas em combustíveis fósseis por fontes renováveis, como a solar, a eólica, a biomassa e a hidrelétrica, assegurando maior equilíbrio ambiental e eficiência na utilização dos recursos naturais. Nessa mesma perspectiva, essa transformação vai além da simples diversificação da matriz energética, uma vez que implica uma reorganização estrutural dos sistemas de produção e consumo de energia, associada a investimentos em tecnologias limpas e à descentralização da geração energética (Bursztyn e Bursztyn, 2013). Todavia, a concretização desse processo enfrenta obstáculos expressivos, sobretudo no que diz respeito à infraestrutura indispensável para a integração das fontes de energias renováveis.

Segundo Peixoto *et al.* (2016), para que a transição energética seja possível, é necessária a ampliação e modernização na rede elétrica, para garantir maior estabilidade na distribuição de energia elétrica, principalmente proveniente das energias renováveis. De mesmo modo, Mauad *et al.* (2017) colocam que o elevado custo inicial para a implantação de usinas solares e eólicas ainda se configura como um fator limitante em diversos países, o que demanda a adoção de políticas públicas de incentivo e de mecanismos de financiamento sustentáveis.

A transição energética também demanda a existência de uma regulação eficiente e de políticas governamentais que estimulem o desenvolvimento das energias limpas. Conforme destacam Galindo-Leal *et al.* (2005), a expansão das fontes renováveis deve ser planejada de modo a não comprometer a integridade dos biomas naturais, minimizando a fragmentação de habitats e a perda de espécies. Ademais, Vasconcellos *et al.* (2005) alertam que projetos de grande porte, como usinas hidrelétricas e parques eólicos, podem provocar alterações significativas no equilíbrio ecológico quando não são adequadamente regulamentados e monitorados. Dessa forma, a transição energética deve estar intrinsecamente associada à preservação da biodiversidade, assegurando que o avanço das energias limpas ocorra sem comprometer os ecossistemas naturais.

Por todo exposto, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise acerca da transição energética no contexto internacional e nacional. Sendo organizado da seguinte forma: a seção 2 mostra os contextos históricos da transição energética dos países: Alemanha, Estados Unidos, China e Brasil. Na sequência, a seção 3, trata das etapas metodológicas utilizadas na presente pesquisa. Por fim, a análise dos resultados, na seção 4, que trata dos resultados da transição energética, bem como uma tabela resumo com os principais marcos ocorridos em cada país.

2. TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Nesta seção, é abordado o contexto internacional da transição energética nos países da Alemanha, Estados Unidos e China, apresentando um panorama comparativo sobre como o conceito de transição energética surgiu e se consolidou em cada um desses contextos (seção 2.1). Na sequência, na seção 2.2, será tratado o contexto nacional dessa temática no país, trazendo os principais marcos históricos que impulsionam seu desenvolvimento, bem como os desafios vigentes no cenário atual. Em ambas as subseções (2.1 e 2.2), busca-se compreender de que forma os países abordados incorporaram o termo “transição energética” em suas políticas e estratégias, bem como identificar as características atuais de suas matrizes energéticas.

2.1. CONTEXTO INTERNACIONAL

2.1.1. ALEMANHA

A transição energética na Alemanha iniciou sua trajetória nas décadas de 1970 e 1980 com algumas propostas sobre o tema lançadas no parlamento, mas o termo veio a se popularizar com a publicação do livro *“Energiewende: Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran”*, que traduzido para o português é “Transição Energética: Crescimento e Prosperidade sem Petróleo e Urânio”. Os autores definiram a transição energética, naquele momento, como uma mudança necessária de um modelo energético insustentável, super dependente do petróleo e da energia nuclear, para uma matriz

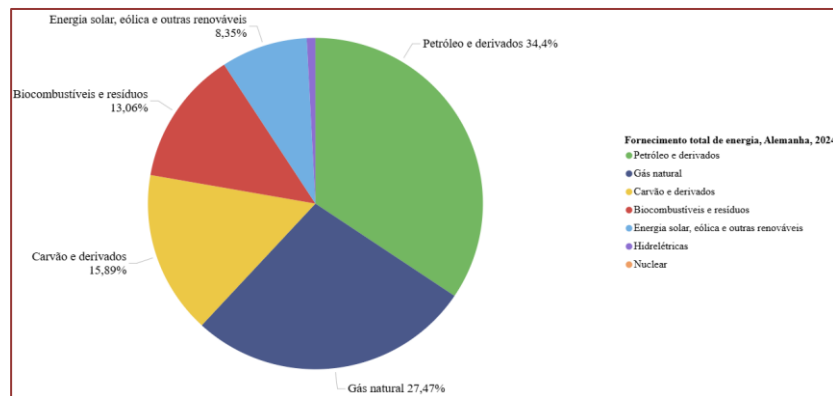
energética sustentável, baseada em fontes renováveis e formas de eficiência energética. Naquele contexto, o foco não eram as mudanças climáticas, mas a segurança energética que o país deveria desenvolver a fim de não ficar tão exposto aos conflitos externos de seus fornecedores, como também evitar acidentes nucleares (Krause *et al.*, 1980).

Posteriormente, na década de 2000, o governo alemão criou a Lei de Energias Renováveis (EEG), sendo o ponto fundamental para acelerar e incentivar o uso de energias renováveis no país, já que a partir daí foram estabelecidos subsídios e tarifas para a produção de energia solar, eólica e biomassa. Porém, um grande impulso para a transição energética do país ocorreu em 2011, com o acidente nuclear de Fukushima, no Japão. Esse evento fomentou as iniciativas anti nucleares no país, culminando para o desenvolvimento da meta nacional que envolvia o desligamento de todas as usinas nucleares do país até 2022 (BMWK, 2022). A exclusão da energia nuclear de sua matriz energética, motivou a Alemanha acelerar a intensificação no investimento em energias renováveis e na eficiência energética, buscando reduzir sua dependência de fontes que pudessem apresentar riscos ambientais e geopolíticos, além de tornar mais clara os objetivos da política de transição, que agora envolviam diminuir as emissões de carbono e buscar uma maior autonomia energética.

A intensificação dos esforços resultou no estabelecimento de metas ambiciosas para o país. Segundo a Lei de Proteção Climática (Klimaschutzgesetz), a Alemanha se comprometeu a alcançar a neutralidade de carbono até 2045 e reduzir suas emissões de gases do efeito estufa em até 65% até 2030, em comparação com os níveis de 1990 (OECD/IEA, 2020). Para isso, diversas políticas públicas foram criadas visando o apoio ao armazenamento de energia e à criação de redes inteligentes, visando garantir a eficiência do sistema. Além disso, o país vem investindo cada vez mais na expansão de usinas elétricas e solares (CEBRI, 2017).

O principal desafio, porém, vem da necessidade da descontinuação do uso de carvão, petróleo e gás natural no país. Como destacado na Figura 1, até 2024, esses combustíveis ainda ocupavam 80% da matriz energética da Alemanha, especialmente pelos setores industrial, residencial e de transporte.

Em função dos desafios encontrados e da matriz energética com forte presença de combustíveis não renováveis, mostrada na Figura 1, alguns programas nacionais vêm sendo implementados com o intuito específico de atuar na diminuição da utilização de tais combustíveis. A exemplo disso, surgiu a Lei do Carbono, instituída em 2019, onde se propôs que até 2038 a Alemanha deverá desligar todas as usinas que utilizam carvão para a geração de eletricidade. Para isso, um programa de desligamento gradual das usinas foi proposto, fornecendo incentivos monetários para as empresas, e estabilidade orçamentária para os trabalhadores que forem afetados. Além disso, incentivos para a eletrificação dos transportes e para o desenvolvimento de novos combustíveis também fazem parte dos esforços do país para realizar a transição energética dentro de suas metas (BMWK, 2025).

Figura 1 - Matriz energética da Alemanha 2024

Fonte: Adaptado de IEA (2025)[18].

2.1.2. ESTADOS UNIDOS

A trajetória das políticas energéticas dos Estados Unidos iniciou na década de 1970, com a dependência do país em relação ao petróleo estrangeiro, motivando a criação do Departamento de Energia (DOE) em 1977. Sendo assim, o objetivo era centralizar e fortalecer a segurança energética nacional. Pouco antes disso, o termo "transição energética" (*energy transition*) ficou conhecido após o presidente dos EUA ter feito o uso em seu discurso à nação sobre energia, em 1977, no qual destacou a necessidade de uma mudança significativa na forma como o país produzia e consumia energia.

Na década seguinte, a Conferência das Nações Unidas sobre Novas e Renováveis Fontes de Energia (1981) reforçou o interesse por fontes alternativas, embora a ação climática ainda fosse tímida. Nos anos 1990, com o surgimento de preocupações globais sobre as mudanças climáticas, os Estados Unidos assinaram o Protocolo de Kyoto em 1998 sob o governo de Bill Clinton. No entanto, o Senado recusou a ratificação, alegando impactos econômicos e a isenção de obrigações para países em desenvolvimento. Ainda assim, estados como Califórnia e Nova York lideraram iniciativas locais em energia limpa, promovendo a eficiência energética e o uso de renováveis.

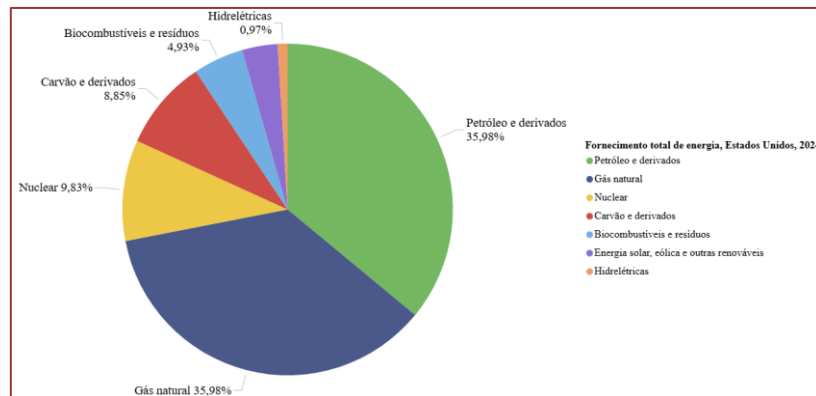
Na década de 2000, os governos vigentes intensificaram os incentivos para fontes renováveis, com destaque para bioenergia, energia solar e energia eólica. Em 2005, por exemplo, foi criada a Lei de Política Energética (*Energy Policy Act*), que estimulou a inserção de biocombustíveis na matriz energética e o avanço do fraturamento hidráulico (*fracking*) aumentou a produção de gás natural, contribuindo para a redução das emissões ao substituir o carvão mineral.

Ainda entre os anos de 2009 e 2015, políticas ambiciosas ganharam espaço com o *American Recovery and Reinvestment Act*, que destinou cerca de US\$ 90 bilhões a investimentos em energia limpa. Sendo assim, o *Clean Power Plan*, lançado em 2015, estabeleceu limites inéditos para emissões de carbono de usinas termelétricas, marcando um esforço federal em direção à descarbonização. Esse período também foi caracterizado por um crescimento expressivo da energia solar e energia eólica e pela implementação de créditos fiscais federais para tecnologias limpas, como painéis solares e veículos elétricos, consolidando um ambiente favorável à transição energética.

A matriz elétrica apresentada na Figura 2 mostra que os combustíveis fósseis ainda representam a maior parcela da geração, com 71,96% do total, sendo o gás natural a principal fonte individual 35,98% e o petróleo e derivados com também com 35,98%, enquanto carvão e derivados apresentam uma contribuição de 8,85%. Em contrapartida, as fontes renováveis: energia solar, eólica, hidrelétrica e outras renováveis, somam aproximadamente 5% da geração quando juntas.

Outro ponto de relevância é a energia nuclear que ocupa a terceira posição entre o *ranking*, com 9,83%, superando individualmente várias fontes renováveis. Os biocombustíveis e resíduos aparecem de forma mais tímida, com 4,93% do total, distribuídos entre: madeira, gás de aterro e resíduos sólidos urbanos. Observa-se, portanto, que embora os fósseis ainda predominem, há uma participação significativa de fontes limpas e uma diversificação gradual, por menor que seja a participação de renováveis, indicando movimento em direção a uma matriz mais sustentável.

Figura 2 - Matriz energética dos EUA 2024



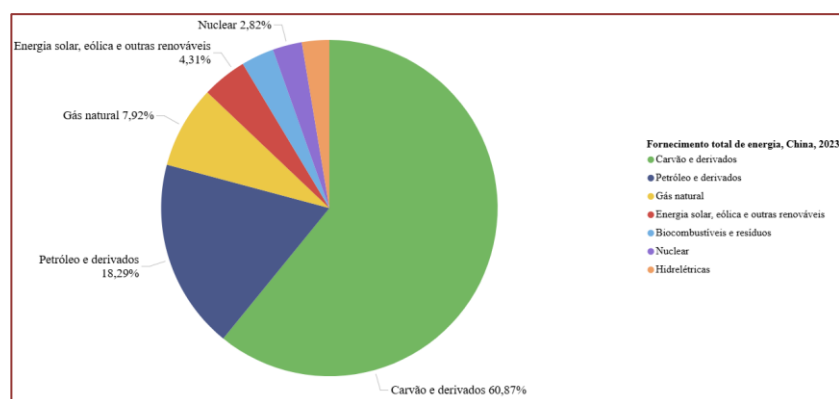
Fonte: Adaptado de IEA (2025).

2.1.3. CHINA

Enquanto o conceito de "transição energética" no Ocidente remonta às crises do petróleo da década de 1970 (nos Estados Unidos, focada em segurança de oferta) e ao surgimento do ambientalismo político na década de 1980 (na Alemanha, com a *Energiewende*), a trajetória da China seguiu um cronograma distinto, ditado por suas próprias necessidades de desenvolvimento. Até o início do século XXI, o país não discutia "transição" no sentido de descarbonização, mas sim "expansão" para suprir uma demanda industrial reprimida. Foi somente em 2014 que o termo ganhou centralidade política definitiva, quando o presidente Xi Jinping introduziu a estratégia dos "Quatro A", formalmente denominada "Revolução Energética" (*Nengyuan Geming*), que propunha revolucionar o consumo, a oferta, a tecnologia e o sistema institucional de energia (IEA, 2021). Diferente dos modelos ocidentais precoces, a transição chinesa é marcada por um profundo paradoxo contemporâneo: o país sustenta a posição de maior emissor global de gases de efeito estufa, impulsionado por uma matriz ainda dependente de combustíveis fósseis, conforme mostra a Figura 3, ao mesmo tempo em que se estabelece como o líder incontestável na expansão da capacidade de geração de energia renovável (IEA, 2021).

Após as reformas econômicas iniciadas no final da década de 1970, a estratégia de desenvolvimento chinesa foi fundamentada na industrialização acelerada, um processo que demandava uma fonte de energia abundante e de baixo custo. A resposta foi encontrada nas vastas reservas domésticas de carvão, que se tornaram o alicerce da matriz energética e da segurança nacional (Wu, 2016). Durante este período, a política energética era sinônimo da política do carvão, e a segurança energética era definida primordialmente pela autossuficiência, ou seja, a capacidade de suprir a demanda interna sem depender de importações (Zhang, 2008). A participação do carvão na matriz de consumo de energia primária era superior a 70% durante a maior parte deste período, alimentando o crescimento econômico e a urbanização sem precedentes (Center for Strategic and International Studies, 2022).

Figura 3 - Matriz energética da China 2021



Fonte: Adaptado de IEA (2025).

Um ponto importante ocorreu em 1993, quando a China se tornou um importador líquido de petróleo. Este evento forçou uma reavaliação do conceito de segurança energética, introduzindo a vulnerabilidade associada à dependência de mercados externos e rotas marítimas, e diversificando as preocupações estratégicas para além do carvão (Zhang, 2008). Contudo, essa era de crescimento exponencial deixou um legado de severa degradação ambiental, com níveis alarmantes de poluição do ar e chuva ácida, cujas consequências sociais e econômicas se tornariam o principal catalisador para a fase seguinte da política energética.

O início do século XXI foi marcado pela crescente insatisfação popular com a crise ambiental. Episódios de poluição atmosférica extrema, que culminaram no fenômeno conhecido como "airpocalypse" a partir de 2013, tornaram a questão ambiental um fator de risco para a estabilidade social, elevando-a ao topo da agenda política do governo central (LI et al., 2021). Em resposta a essas pressões, a China começou a construir um robusto arcabouço legal e regulatório. O marco fundamental desta fase foi a Lei de Energia Renovável de 2006, um instrumento pioneiro que estabeleceu mecanismos essenciais para o fomento das energias limpas, como a compra obrigatória de toda a eletricidade renovável gerada pela rede e a implementação de tarifas de compra garantida (feed-in tariffs) (International Union for Conservation of Nature, 2010).

Essa nova direção foi operacionalizada através dos Planos Quinquenais (FYP), que passaram a incorporar metas ambientais e energéticas cada vez mais ambiciosas. O 11º

FYP (2006-2010) representou uma virada histórica ao introduzir, pela primeira vez, uma meta obrigatória de redução de 20% na intensidade energética (consumo de energia por unidade do PIB), sinalizando um compromisso com a eficiência energética (Wang, 2009). Subsequentemente, o 12º FYP (2011-2015) aprofundou essa tendência ao estabelecer a primeira meta de redução da intensidade de carbono (emissões de CO₂ por unidade do PIB) em 17% e uma meta de 11,4% para a participação de energias não fósseis no consumo de energia primária (Center for Climate and Energy Solutions, 2012). Juntas, essas políticas criaram a base para a aceleração que se seguiria.

Na era pós-Acordo de Paris, a China consolidou sua posição como uma superpotência em energia renovável. O país não apenas se tornou o maior produtor e instalador de painéis solares e turbinas eólicas, mas também passou a dominar as cadeias de suprimentos globais dessas tecnologias, o que contribuiu para uma drástica redução de seus custos em escala mundial (Yale Environment 360, 2023). Essa expansão foi impulsionada tanto por metas ambientais quanto por uma clara estratégia industrial, visando a liderança em setores tecnológicos de alto valor agregado. Em 2023, a China foi responsável por quase dois terços do crescimento global da capacidade de energia renovável (Balkan Green Energy News, 2024).

2.2. CONTEXTO NACIONAL

A transição energética refere-se ao processo histórico de transformação da matriz energética, caracterizado pela substituição gradual de fontes fósseis e intensivas em carbono por fontes renováveis e sustentáveis, buscando conciliar desenvolvimento econômico, segurança energética e mitigação das mudanças climáticas (IEA, 2021). Embora o conceito tenha surgido no cenário internacional após a crise do petróleo da década de 1970, sua aplicação no contexto brasileiro consolidou-se de forma progressiva e multifacetada.

A terminologia “transição energética” começou a ganhar relevância no Brasil a partir da crise mundial do petróleo. Entre 1973 e 1979, as crises internacionais do petróleo evidenciaram a vulnerabilidade dos países dependentes da importação desse recurso, impulsionando a criação de políticas públicas voltadas à utilização de combustíveis alternativos no Brasil. Em 14 de novembro de 1975, foi instituído o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) como resposta à crise da época, consolidando o uso do etanol como combustível e posicionando o Brasil como referência mundial no setor sucroenergético (EPE, 2023; Tolmasquim, 2016). Essas políticas estruturantes se somaram à tradição histórica de forte presença da energia hidráulica no país.

Ainda na década de 1970, em 1974, teve início a construção da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, que entrou em operação em 1984, um marco que transformou significativamente a oferta elétrica do país, garantindo ao Brasil uma matriz energética diferenciada em relação a outras nações, majoritariamente composta por fontes hídricas (MME, 2020; Itaipu Binacional, 2025). Segundo a IEA (2024), essa base histórica explica por que o Brasil já se destaca entre os países com maior participação de renováveis em sua matriz energética, mesmo antes da intensificação da agenda global de descarbonização.

Nos anos 1990, com a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92), a discussão sobre sustentabilidade e energia limpa tornou-se central nas políticas públicas. A Rio-92 resultou em documentos e tratados internacionais

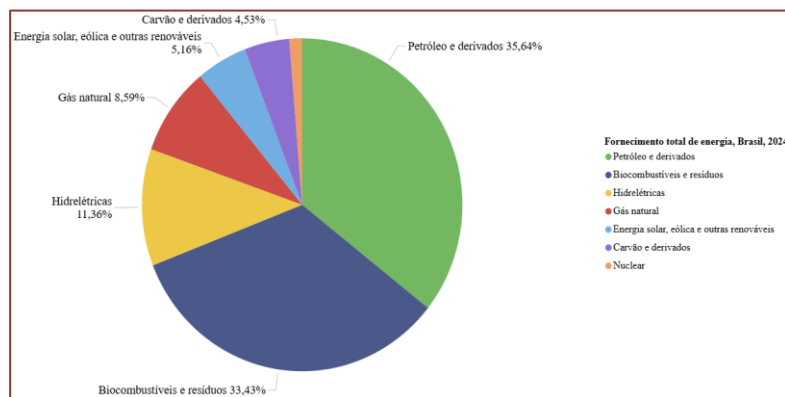
que influenciaram diretamente a agenda energética e ambiental do Brasil, como a Agenda 21, que estabeleceu diretrizes para políticas públicas sustentáveis, incentivando países a planejar o uso racional da energia e promover fontes renováveis e eficiência energética. São oriundos da Agenda 21 a criação da Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável (CPDS), o estímulo à gestão integrada dos recursos energéticos, valorizando aspectos sociais e ambientais, e a articulação entre governo, academia e setor produtivo em projetos de energia limpa. Ainda na Rio-92 foi firmada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC), sendo o primeiro tratado internacional a reconhecer oficialmente o papel dos gases do efeito estufa (GEE) nas mudanças climáticas. Este tratado estabeleceu base para o Protocolo de Quioto (1997) e, posteriormente, o Acordo de Paris (2015) (EPE, 2019; ONU, 1992).

Outro marco importante ocorreu no início dos anos 2000, com a instituição do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que fomentou a diversificação da matriz elétrica por meio da inserção de usinas eólicas, pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e biomassa. Esse programa representou o ponto de partida para a expansão das renováveis não hidráulicas, que décadas depois assumiram maior protagonismo (IEA, 2024).

Embora as ações pioneiras do Brasil em relação à transição energética datem da década de 1970, com a criação do Proálcool, por ex., e a posterior expansão hidrelétrica, o Acordo de Paris (2015) representou um ponto de inflexão institucional global, marcado pela reorientação de prioridades, como a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o estabelecimento de metas de descarbonização no centro das políticas energéticas e climáticas. O acordo de Paris também promoveu a redefinição de instrumentos, incentivando o uso de políticas de mercado e de planejamento, como leilões, programas de eficiência energética e metas setoriais, além de uma reorientação das políticas públicas energéticas. A partir de então, projetos de grande porte no setor passaram a ser avaliados não apenas sob a ótica técnica e econômica, mas também em função de suas implicações climáticas, de direitos humanos e de preservação da biodiversidade (ONU, 2015; Brasil, 2022).

Tal Acordo intensificou a pressão por coerência entre as políticas energéticas e as metas climáticas, promovendo uma integração mais estreita entre desenvolvimento econômico, justiça socioambiental e sustentabilidade (IPCC, 2021). No cenário contemporâneo, a transição energética brasileira demonstra um progresso notável, mas com desafios setoriais específicos.

Dentro desse contexto e como mostra o Balanço Energético Nacional (BEN, 2025), o país alcançou um marco histórico com 50% de renovabilidade em sua matriz energética total em 2024, impulsionado pela expansão vigorosa de fontes como a biomassa, a energia eólica e a solar (*vide* Figura 4). Ao observar a matriz energética, a liderança do Brasil na transição energética é inegável, com 88,2% de fontes renováveis em 2024, com predominância das hidrelétricas, complementadas pelo rápido crescimento da solar fotovoltaica e da eólica. A expansão da geração distribuída solar e dos parques eólicos tem transformado a paisagem energética, diversificando a oferta e aumentando a segurança do sistema.

Figura 4 - Matriz energética do Brasil 2024

Fonte: Adaptado de EPE BEN (2025).

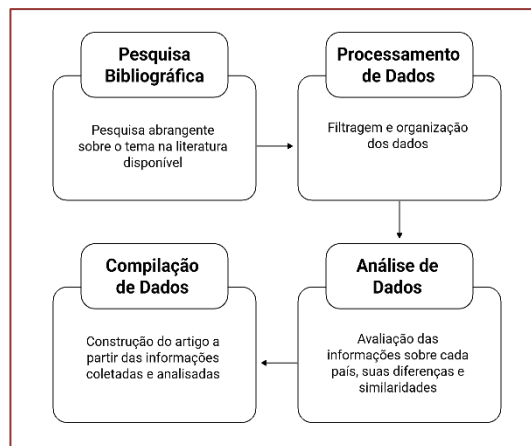
Contudo, a análise setorial revela que o ritmo e o impacto da transição energética no Brasil não são uniformes em toda a economia. Enquanto o setor elétrico avança de forma consistente, outros setores apresentam desafios mais complexos. Por ex., a saber, o setor de transportes emerge como o que mais requer um impulso significativo. Apesar de um aumento no consumo de biocombustíveis como etanol e biodiesel (crescimentos de 30,1% e 19,3% respectivamente em 2024), a dependência de combustíveis fósseis ainda é predominante. Isso se reflete na menor renovabilidade da matriz de energia no transporte, que, comparada à matriz elétrica ou mesmo à industrial, demonstra a necessidade urgente de políticas e investimentos mais robustos para a eletrificação da frota, o avanço do hidrogênio verde e o uso de biocombustíveis avançados (BEN, 2025).

Já o setor industrial, por sua vez, apresenta um cenário intermediário na transição energética. Conforme o BEN (2025), a renovabilidade da indústria brasileira ficou em 64,4% em 2024. A eletricidade, o bagaço de cana e a lenha são as principais fontes renováveis que contribuem para esse desempenho, embora carvão mineral, gás natural e óleo combustível ainda tenham participação relevante. A alta participação do bagaço de cana, impulsionada pela produção de açúcar e alimentos e bebidas, é um ponto forte, mas o setor segue dependente de fontes fósseis para parte significativa de suas operações.

No plano internacional, o Brasil tem buscado alinhar sua trajetória à agenda climática global. Ao ratificar o Acordo de Paris, o país apresentou sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), que prevê a redução das emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025 e 43% até 2030, em relação aos níveis de 2005, além da meta de alcançar a neutralidade climática até 2050 (IEA, 2024; MME, 2020). Tais compromissos integram o país ao conjunto de nações que estruturam suas políticas energéticas e ambientais em função dos acordos multilaterais, destacando a relevância da transição energética no contexto nacional e internacional.

3. METODOLOGIA

A presente seção abordará o passo a passo necessário para a construção do presente trabalho. Inicialmente, a Figura 5 resume as quatro etapas metodológicas aplicadas e posteriormente cada etapa é descrita com maior grau de detalhamento.

Figura 5 - Etapas da metodologia do trabalho

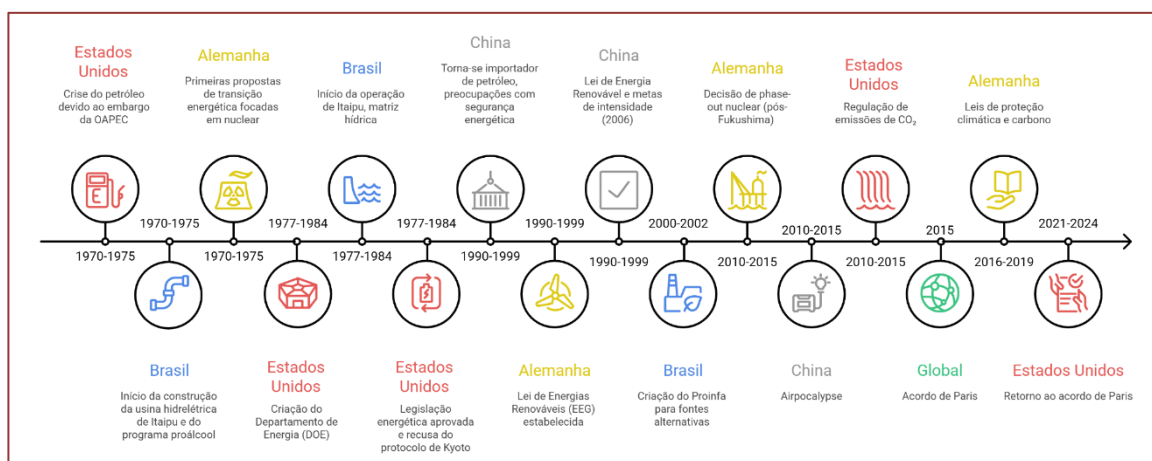
Fonte: Elaboração própria (2025).

- **Pesquisa Bibliográfica:** consistiu na revisão bibliográfica sistemática, realizada com o objetivo de reunir informações a fim de evidenciar e compreender a evolução do conceito de transição energética em diferentes países e seus impactos nas políticas energéticas mundiais e brasileiras. Utilizou-se como recorte temporal de análise, os períodos antes e após o Acordo de Paris, em 2019.
- **Processamento de dados:** esta etapa compila e organiza os dados quantitativos e qualitativos referentes à evolução das matrizes energéticas e das políticas climáticas em diferentes países. Foram consideradas informações do IEA *Data and Statistics* e balanços energéticos nacionais de energia.
- **Análise de dados:** foi realizada a seleção final dos “países-chave” para o estudo comparativo, baseada na filtragem dos dados obtidos na etapa anterior. Critérios como avanço tecnológico em geração elétrica de baixo carbono, histórico de políticas públicas e investimentos consistentes em descarbonização, foram levados em consideração como indicadores de relevância para a escolha dos países analisados. Dentre os países selecionados com base nesses critérios, foram escolhidos Alemanha, Estados Unidos e China para o contexto internacional, além do Brasil em contexto nacional. Após a seleção, realizou-se um refinamento dos dados quantitativos e qualitativos desses países, incluindo a análise de recorte temporal, a fim de evidenciar tendências em comuns e divergentes entre esses países.
- **Compilação de dados:** os dados e análises provenientes das etapas anteriores serviram para a elaboração das discussões, comparações entre os países e conclusões do artigo. Os dados qualitativos foram organizados em tabelas comparativas, possibilitando uma visão integrada do progresso da transição energética, evidenciando avanços, desafios e lacunas tanto no Brasil quanto nos países internacionais analisados. A partir dessas observações, são feitas sugestões para trabalhos futuros.

4. ANÁLISE E DISCUSSÕES

Esta seção tem como objetivo trazer uma breve análise das informações abordadas na seção 2 deste trabalho, buscando discutir as mudanças ocorridas ao decorrer do tempo em relação a transição energética em cada país, seus marcos, objetivos e desafios aparentes. A Figura 6 mostra uma linha do tempo dos eventos mais marcantes para cada país dentro desse contexto, tendo como referência o ano de 2015 quando ocorreu o Acordo de Paris.

Figura 6 - Linha do tempo da transição energética nos países em estudo

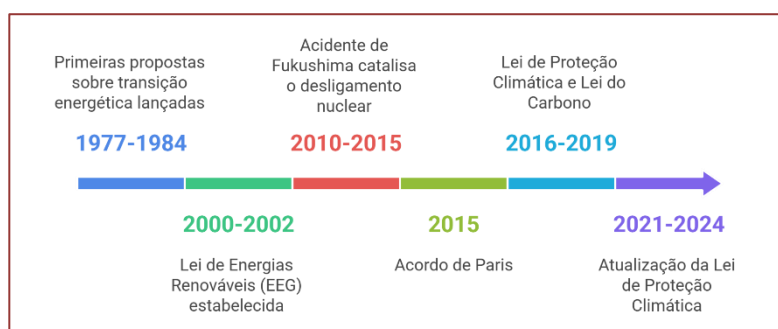


Fonte: Elaborado pelos autores a partir da literatura consultada (2025).

4.1. ALEMANHA

A partir das informações anteriormente expostas na seção 2.1, é possível perceber que o processo de transição energética na Alemanha, a "Energiewende", iniciou-se muito antes do apelo ambiental global marcado pelo Acordo de Paris em 2015. A Figura 7 traz os marcos históricos mais relevantes no país em ordem cronológica.

Figura 7 - Linha do tempo da transição energética na Alemanha



Fonte: Elaborado pelos autores a partir da literatura consultada. (2025).

- **1977-1984:** em seu princípio, nas décadas de 1970 e 1980, a transição tinha como principal objetivo garantir a segurança energética do país, reduzindo a

dependência de petróleo importado, e mitigar os riscos associados a acidentes nucleares (Krause *et al.*, 1980).

- **2000-2002:** dois eventos foram catalisadores cruciais que aceleraram e redefiniram a trajetória da Energiewende. Primeiro, a criação da Lei de Energias Renováveis (EEG) na década de 2000 estabeleceu o marco regulatório fundamental, criando um ambiente de investimento seguro através de subsídios e tarifas garantidas que impulsionaram massivamente a expansão da energia solar, eólica e de biomassa.
- **2010-2015:** Posteriormente, o desastre nuclear de Fukushima em 2011 fomentou a decisão histórica de desativar todas as usinas nucleares do país até 2022 (BMWK, 2022). Este passo consolidou a transição para as renováveis e alinhou definitivamente os objetivos da Energiewende com a agenda climática, proposta em 2015 pelo Acordo de Paris, estabelecendo metas ambiciosas como a neutralidade de carbono até 2045 (IEA, 2020).
- **2016-2019:** o governo alemão implementou políticas robustas, como: a Lei de Proteção Climática de 2016, quando assumiu a meta de se tornar neutra em carbono até 2045 e de cortar em 65% suas emissões de gases de efeito estufa até 2030, tomando 1990 como referência.(OECD/IEA, 2020), e a Lei do Carbono em 2019, que estabeleceu um cronograma para o desligamento completo das usinas a carvão até 2038, incluindo programas de compensação financeira para empresas e apoio aos trabalhadores afetados (BMWK,2025). Contudo, a decisão de abandonar a energia nuclear enquanto se tenta eliminar os combustíveis fósseis criou um "dilema duplo", aumentando a dependência do gás natural como uma energia de transição e expondo o país a novas vulnerabilidades geopolíticas.
- **2021-2024:** a Lei do Carbono passou por uma atualização, visto que apesar dos notáveis avanços na geração de energia limpa, o principal e mais complexo desafio da Alemanha permanece sendo sua profunda dependência dos combustíveis fósseis. Como destacado, até 2023, carvão, petróleo e gás natural ainda compunham cerca de 80% da matriz energética do país, sendo essenciais para setores vitais como a indústria, o transporte e o aquecimento doméstico. Esta dependência estrutural torna a descarbonização uma tarefa monumental e multifacetada. Para enfrentar este desafio, o sucesso final da Energiewende dependerá, portanto, da capacidade da Alemanha de superar essa dependência fóssil, equilibrando suas metas climáticas com a necessidade de manter a competitividade industrial e a segurança energética.

4.2. ESTADOS UNIDOS

Aqui será mostrada a linha do tempo dos principais acontecimentos que envolvem a transição energética nos EUA, *vide* Figura 8.

Figura 8 - Linha do tempo da transição energética nos EUA

Fonte: Elaborado pelos autores a partir da literatura consultada (2025).

A transição energética nos Estados Unidos apresenta-se como um processo multifacetado, que combina inovação tecnológica, políticas públicas estruturadas e estratégias de mercado voltadas para a descarbonização gradual da matriz energética. O país, historicamente dependente de combustíveis fósseis, tem desempenhado papel de destaque na formulação de tecnologias e instrumentos regulatórios voltados à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), destacando-se, entre elas, as iniciativas relacionadas ao desenvolvimento das energias renováveis, da captura de carbono e da produção de hidrogênio de baixo carbono (Lima, 2022).

Nos últimos anos, os Estados Unidos têm adotado políticas expressivas para acelerar a transição energética, com base em compromissos firmados no Acordo de Paris (2015) e reafirmados nas conferências subsequentes. Um dos principais marcos dessa trajetória foi a promulgação do Inflation Reduction Act (IRA), em 2022, que instituiu um dos maiores pacotes de investimentos em energia limpa da história do país. Esse programa prevê incentivos fiscais, subsídios diretos e créditos tributários para projetos de energia renovável, eficiência energética e tecnologias de descarbonização, como o Carbon Capture and Storage (CCS) e o Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS).

Crise do petróleo de 1973 e implicações iniciais para política energética: A crise do petróleo em 1973, com o embargo pelos países da OPEP, expôs a vulnerabilidade energética dos EUA ao suprimento externo de petróleo, gerando uma ruptura estrutural no sistema energético e despertando preocupações governamentais com segurança energética, diversificação de fontes e eficiência. Esta ruptura acelerou o interesse por políticas de conservação de energia e pelo desenvolvimento de alternativas à dependência do petróleo importado. Do ponto de vista das transições sociotécnicas, esse momento funcionou como “evento desencadeador”, ou melhor dizendo, foi o gatilho que alterou o ambiente institucional e político da energia nos EUA, preparando o terreno para reformas posteriores no arcabouço regulatório e na infraestrutura energética (Saundry, 2019).

Esse evento ressalta que mudanças no sistema energético não ocorrem apenas por inovação tecnológica, mas também por choques externos que realinham expectativas, riscos percebidos e prioridades políticas — o que se alinha com a literatura que enfatiza fatores exógenos (como choques de preços) no delineamento de transições energéticas. (MDPI).

Criação do United States Department of Energy (DOE) em 1977: Em 4 de agosto de 1977, com a aprovação do “Department of Energy Organization Act”, os Estados Unidos criaram

o DOE, integrando várias agências federais dispersas e reconhecendo explicitamente a energia como uma prioridade de política nacional. Essa institucionalização proporcionou uma estrutura de governo centralizada para formular, coordenar e implementar políticas energéticas, incluindo eficiência, segurança energética, pesquisa tecnológica e diversificação de fontes (Saundry, 2019).

Política de eficiência energética: Energy Policy and Conservation Act (EPCA) de 1975 e normas subsequentes: A EPCA de 1975 implementou uma abordagem federal para aumentar a oferta energética doméstica, conter a demanda, e criar a Reserva Estratégica de Petróleo (SPR). Além disso, estabeleceu o programa federal para padrões de eficiência de equipamentos de consumo, que foi ampliado em leis posteriores (como a EISA 2007). (The Department of Energy's Energy.gov).

Lei de Política Energética de 1992 (Energy Policy Act of 1992): A Energy Policy Act de 1992 (EPACT92) incorporou múltiplos componentes: incentivos para combustíveis alternativos, requisitos para frotas governamentais, metas de eficiência energética, além de reformas regulatórias para utilitários. Esta lei marcou a transição legislativa de preocupação com segurança energética para inclusão mais formal de fontes limpas e alternativos. (Choices Magazine).

Do ponto de vista teórico, esta fase representa a expansão do regime energético existente para acomodar nichos emergentes (biocombustíveis, veículos alternativos) — ou seja, abre-se o campo para inovações tecnológicas e regulatórias que rompem progressivamente com o modelo fóssil-centrado.

Revolução do gás de xisto (“shale gas”) nos EUA

A partir dos anos 2000, a combinação de perfuração horizontal e fraturamento hidráulico permitiu um boom na extração de gás de xisto nos EUA, reduzindo o preço do gás natural e gerando uma substituição rápida, ainda que parcial, do carvão na geração elétrica. Essa revolução tecnológica-econômica alterou o panorama da energia fóssil nos EUA e acelerou a transição para um mix menos intensivo em carbono. (ScienceDirect).

Crescimento das fontes renováveis e padrões de portfólio (RPS) estaduais

Durante as décadas de 2000 e 2010, vários estados dos EUA adotaram Renewable Portfolio Standards (RPS) que exigiam que utilities obtivessem uma fração mínima de sua eletricidade a partir de fontes renováveis. Essas normas estaduais impulsionaram significativamente a implantação de energia eólica e solar, gerando sinal de investimento e escala industrial para as renováveis (Duffield, 2006). (Choices Magazine)

Na visão de transição energética, os RPS funcionam como instrumentos de “pull” que retiram barreiras de mercado e criam ambiente para que as tecnologias emergentes alcancem maturação. Eles ajudam a deslocar o regime prioritariamente fóssil para um regime em direção a fontes mais limpas.

Lei de Política Energética de 2005 (Energy Policy Act of 2005): Este marco legislativo dos EUA introduziu incentivos ampliados para biocombustíveis, veículos alternativos, e estímulos ao gás natural. Ele também estabeleceu padrões de eficiência para diversos produtos e abriu caminho para maior participação de renováveis e gás no sistema energético.

Teoricamente, a EPAct2005 representa uma convergência de diversos drivers: política industrial, mudança tecnológica, e resposta à segurança energética. Ela evidencia como a

transição energética envolve múltiplos vetores (eletricidade, transporte, combustíveis) e não apenas mudança de geração elétrica.

American Recovery and Reinvestment Act (ARRA) de 2009 – estímulo à energia limpa: Em resposta à crise financeira de 2008, os EUA aprovaram o ARRA que destinou aproximadamente US\$90 bilhões para projetos de energia limpa, eficiência energética e renováveis. Esse enorme estímulo fiscal acelerou o desenvolvimento, escala e implantação de tecnologias de baixo carbono, gerando efeitos de aprendizagem, redução de custo e maturação do mercado.

Clean Power Plan (CPP) – 2015 e tentativa de regulação federal de CO₂: Em agosto de 2015, a EPA lançou o CPP, com o objetivo de reduzir as emissões de CO₂ de usinas termelétricas existentes em cerca de 32% até 2030, em relação a 2005. Além dos benefícios ambientais projetados, o CPP representou uma tentativa de deslocar o regime elétrico fóssil para um regime mais limpo por meio da regulação.

Teoricamente, este evento mostra a transição de políticas predominantemente de incentivo para políticas regulatórias — um passo crucial para internalização de custos externos (emissões de carbono) e sinalização para investimento em tecnologia de geração menos emissora. Ao mesmo tempo, o CPP enfrentou barreiras legais e políticas, ilustrando os impasses institucionais que podem retardar a transição.

Paris Agreement (2015) e o impacto internacional sobre a política energética dos EUA: Durante a COP21, em dezembro de 2015, foi adotado o Paris Agreement, com o objetivo global de limitar o aquecimento bem abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais. Para os EUA, esse tratado internacional funcionou como um marco de legitimação da necessidade de descarbonização e como pressão institucional para políticas domésticas de transição energética.

Nos Estados Unidos, cerca de 40% das emissões de dióxido de carbono estão associadas à geração de energia elétrica, e estima-se que a implementação do CCS possa reduzir entre 80% e 90% dessas emissões. Apenas as usinas movidas a carvão são responsáveis pela emissão de aproximadamente 3,5 milhões de toneladas de CO₂ por ano, o que reforça a importância de tais tecnologias para o cumprimento das metas ambientais do país (Brahmbhatt, 2016).

A adoção dessas políticas tem permitido avanços expressivos na diversificação da matriz elétrica. Em 2023, as fontes renováveis — especialmente solar e eólica — ultrapassaram, em diversos períodos, a geração proveniente do carvão, refletindo o resultado de décadas de investimentos em pesquisa e desenvolvimento. No entanto, o gás natural continua desempenhando papel relevante, atuando como fonte de transição devido à sua flexibilidade e menor intensidade de carbono quando comparado ao carvão.

Na perspectiva de transição tecnológica e institucional, a criação do DOE marca a emergência de um regime energético reconfigurado, no qual o Estado assume papel proativo e coordenador. Esse evento é crucial no referencial porque representa a mudança de “governança distribuída” para “governança integrada” da política energética, condição necessária para suportar mudanças de escala no sistema energético.

A política de eficiência energética (EPCA) de 1975 representou um mecanismo de “desacoplamento” entre uso de energia e crescimento econômico, e constitui uma das primeiras iniciativas sistemáticas para reduzir a intensidade energética do sistema. No contexto teórico da transição energética, ela mostrou como melhorias incrementais no

regime (normas de eficiência) podem contribuir para preparar o sistema para absorver mudanças maiores na oferta de energia.

Em termos de teoria de transição, esse evento funcionou como um impulso de mercado e tecnologia que reduziu os custos relativos de uma alternativa ao carvão. Contudo, também introduz impasses: o gás natural, embora menos emissor de CO₂ que o carvão, ainda é fóssil, e o lock-in de infraestrutura e os impactos de metano são questões que desafiam a narrativa de “renováveis imediatas” (ScienceDirect).

No referencial teórico, o ARRA demonstrou como choques econômicos podem ser convertidos em oportunidades de transição energética: o gasto público massivo funcionou como um impulsor de inovação em escala e permitiu que nichos tecnológicos se aproximassem do regime dominante.

Em termos teóricos, o Paris Agreement mostra a interconexão entre regimes nacionais e internacionais: ele condiciona e orienta a formulação de políticas energéticas domésticas, cria expectativas de mercado para tecnologias limpas e reforça a urgência da mudança estrutural do sistema energético. Essa interface global-local serve para entender por que a transição energética não é apenas uma escolha doméstica, mas parte de um contexto regulatório e técnico globalizado.

4.3. CHINA

Seguindo o mesmo formato que as subseções 4.1 e 4.2, esta subseção mostrará a linha do tempo dos principais acontecimentos que envolvem a transição energética na China, *vide* Figura 9.

Figura 9 - Linha do tempo da transição energética na China



Fonte: Elaborado pelos autores a partir da literatura consultada (2025).

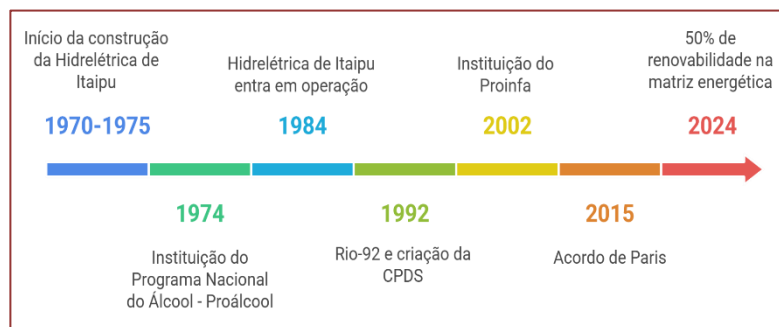
- **1978:** com o início das reformas econômicas e a política de "Reforma e Abertura", a estratégia de desenvolvimento chinesa fundamentou-se na industrialização acelerada. Esse processo demandava uma fonte de energia abundante e de baixo custo, encontrada nas vastas reservas domésticas de carvão, que se tornaram o alicerce da matriz energética e da segurança nacional (Wu, 2016). Neste período, a segurança energética era definida primordialmente pela autossuficiência, com o carvão representando mais de 70% do consumo de energia primária (CSIS, 2022).
- **1993:** a China tornou-se importadora líquida de petróleo, um evento que forçou a reavaliação do conceito de segurança energética do país. Isso introduziu a

vulnerabilidade associada à dependência de mercados externos e rotas marítimas, diversificando as preocupações estratégicas para além do carvão (Zhang, 2008). No entanto, o crescimento exponencial desta era deixou um legado de severa degradação ambiental, cujas consequências sociais se tornaram catalisadoras para mudanças futuras.

- **2006:** a promulgação da Lei de Energia Renovável estabeleceu o marco fundamental para o fomento das energias limpas no país. A legislação introduziu mecanismos essenciais, como a compra obrigatória de toda a eletricidade renovável gerada pela rede e a implementação de tarifas de compra garantida (feed-in tariffs). Essa medida foi crucial para impulsionar o desenvolvimento inicial do setor e criar as bases para a futura liderança tecnológica chinesa (IUCN, 2010).
- **2013:** episódios de poluição atmosférica extrema, que culminaram no fenômeno conhecido como "airpocalypse", tornaram a questão ambiental um fator de risco para a estabilidade social. A crise elevou a pauta ambiental ao topo da agenda política do governo central, impulsionando uma "guerra contra a poluição" e acelerando a transição para fontes mais limpas não apenas por razões energéticas, mas como um imperativo de saúde pública e legitimidade política (Li et al., 2021).
- **2020:** o anúncio das metas de "duplo carbono" redefiniu a ambição climática nacional, com o compromisso de atingir o pico de emissões de CO₂ antes de 2030 e alcançar a neutralidade de carbono até 2060. Esse compromisso passou a orientar os programas de eletrificação dos setores de transporte e indústria, além de estimular investimentos maciços em tecnologias futuras, como hidrogênio verde e captura de carbono (CCUS), buscando conciliar o crescimento econômico com objetivos climáticos globais (IEA, 2021).
- **2024:** ao analisar a trajetória atual, observa-se um profundo paradoxo: o país sustenta a posição de maior emissor global de gases de efeito estufa, impulsionado por uma matriz ainda dependente de combustíveis fósseis, ao mesmo tempo em que se estabelece como líder incontestado na expansão da capacidade renovável (IEA, 2021). A discussão central recai sobre o desafio estrutural do "carbon lock-in", onde a frota jovem de usinas a carvão cria uma inércia contra a desativação acelerada devido à necessidade de segurança da rede (Theberge, 2024). Adicionalmente, consolida-se a importância da dimensão socioeconômica, encapsulada no conceito de "transição justa", visto que províncias inteiras dependem da economia do carvão. O sucesso da transição passa a ser medido não apenas pela capacidade instalada, mas pela habilidade do Estado em implementar políticas de requalificação e diversificação econômica para mitigar impactos sociais (Banco Mundial, 2022).

4.4. BRASIL

Finalizando a análise dos países e a partir do exposto na subseção 2.2 deste trabalho, é possível realizar uma análise acerca dos principais marcos de sucesso e seus impactos na transição energética brasileira. A Figura 10 ilustra esses marcos em ordem cronológica.

Figura 10 - Linha do tempo da transição energética no Brasil

Fonte: Elaborado pelos autores a partir da literatura consultada(2025).

- **1970:** durante esta década, o preço do barril quadruplicou, afetando as economias dependentes da importação de petróleo, como o Brasil. O aumento do preço provocou altos gastos com as importações energéticas, aumentando assim as dívidas externas, pois o país manteve altos investimentos em infraestrutura e financiamentos para a importação do recurso energético, gerando aumento da inflação e estagnação da economia (Tolmasquim, 2016).
- **1975:** com a instituição do Proálcool, como política de substituição da gasolina por etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, o programa estimulou a produção em larga escala do etanol; aumentou a competitividade no setor automobilístico, com o desenvolvimento de motores *flex* adaptados ao biocombustível; além da consolidação de um setor sucroenergético nacional, integrando agricultura, indústria e tecnologia. O Proálcool foi considerado o primeiro grande marco da transição energética do Brasil (MME, 1975).
- **1984:** com abundância de rios e relevo favorável, o Brasil investiu fortemente em grandes usinas hidrelétricas, como Itaipu Binacional, reduzindo a dependência do petróleo importado e consolidando a matriz elétrica renovável (ITAIPU, 2025).
- **1992:** a Rio-92 significou para o Brasil inserir a descarbonização como meta de política energética, fortalecer o papel dos órgãos como o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e o Ministério de Minas e Energia (MME) na agenda climática, e desenvolver estratégias para mitigação de emissões de GEE. Esta Conferência introduziu ainda o conceito de transição energética justa e sustentável envolvendo redução da dependência de combustíveis fósseis, expansão de energias renováveis descentralizadas, e consideração dos impactos socioambientais em grandes obras (Pereira; Nascimento, 2021). Além disso, após a Rio-92, iniciou-se no país um processo de reorientação institucional, com a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) e do Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), voltados à eficiência energética; a expansão do uso de fontes renováveis, como biomassa e hidrelétrica; além do fortalecimento da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com foco em regulação sustentável (EPE, 2025).
- **2003:** o PROINFA gerou incentivos para a criação de um mercado interno de equipamentos e serviços ligados às energias renováveis. No setor eólico, por exemplo, promoveu a instalação de fabricantes nacionais de aerogeradores, torres

e componentes, o que permitiu uma significativa redução de custos nos leilões de energia realizados na década seguinte (EPE, 2025). Essa nacionalização tecnológica foi essencial para consolidar a competitividade das fontes alternativas no Brasil, integrando-as de forma sustentável à matriz elétrica e reduzindo a vulnerabilidade a choques de oferta hidrológica (Goldemberg; Lucon, 2007). O programa impulsionou o desenvolvimento de *know-how* técnico em projetos de geração eólica e biomassa. Além disso, fomentou a capacitação profissional e pesquisa aplicada em instituições como o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e universidades públicas (Pereira; Nascimento, 2021). Segundo Goldemberg e Lucon (2007), a transição energética brasileira depende tanto de políticas públicas consistentes quanto de instituições de pesquisa robustas, algo que o PROINFA conseguiu consolidar, tornando o Brasil referência na integração de tecnologias renováveis em larga escala. O PROINFA contribuiu diretamente para a redução das emissões de GEE, ao substituir fontes fósseis e reduzir a pressão por expansão hidrelétrica em áreas ambientalmente sensíveis (Brasil, 2002). Com isso, o programa antecipou práticas que seriam mais tarde reforçadas pelo Acordo de Paris (2015), como a diversificação da matriz, a valorização de energias limpas e a busca pela neutralidade de carbono (Pereira; Nascimento, 2021).

- **2015:** após o Acordo de Paris, o país passou a incorporar o conceito de descarbonização como eixo estruturante de sua política energética. Isso se traduziu em maior incentivo às fontes renováveis, como a energia eólica, solar e biomassa, bem como na busca por maior eficiência energética e eletrificação do transporte. O Acordo impulsionou a integração entre política energética e política climática, forçando a compatibilização das metas setoriais com as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) apresentadas pelo Brasil (MMA, 2021). O Acordo de Paris exerceu ainda pressão regulatória e reputacional sobre empresas e instituições brasileiras, incentivando-as a adotar práticas sustentáveis e a divulgar inventários de emissões. Isso estimulou a criação de novos mercados, como o mercado de créditos de carbono, e reforçou a importância da transparência e da governança ambiental no setor energético (IPCC, 2021).
- **2025:** ao analisar os dados disponibilizados pelo BEN (2025) observa-se um crescimento de 8,5% de renovabilidade na matriz energética do Brasil na última década. Na repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) as principais variações foram o aumento do Licor preto e outras renováveis, associado ao crescimento da produção de celulose; Eólica e Solar, seguindo a tendências dos últimos anos; e a expansão da oferta de Carvão mineral devido à crescente geração de eletricidade no setor siderúrgico. A variação em Mtep para Licor preto e outras renováveis, Eólica, Solar e Carvão mineral foram, respectivamente, 3,55, 1,02, 1,80 e 0,71. O setor de transportes e industrial destacam-se pelo maior consumo de energia em 2024, somando juntos um total de 65% do consumo do país. Destaca-se para a indústria, a participação das fontes energéticas Bagaço de cana, devido a produção de açúcar associado ao setor de alimentos e bebidas; e Licor Preto, em função do aumento da produção de celulose. Em contrapartida, no setor de transporte, com 25,7% de renovabilidade, destaca-se o aumento do consumo de Etanol Hidratado devido à maior competitividade do biocombustível em relação a Gasolina tipo C, e a crescente demanda pelo Biodiesel, impulsionado pelo consumo de diesel, ligado a elevação do percentual de adição do biodiesel ao diesel para 14% em volume a partir de março de 2024. Adicionalmente, em 2024, as emissões de CO₂ atingiram

cerca de 431,3 milhões de toneladas, correspondente a um aumento de 0,6% comparado ao ano anterior, sendo para os setores transporte e industrial, 214,3 e 74,8 MtCO₂eq, respectivamente. No entanto, o setor agropecuário e o uso da terra, somam juntos aproximadamente 70% das emissões de GEE no Brasil, enquanto o setor energético corresponde a apenas 20,5% (BEN, 2025).

4.5. RESUMO DOS MARCOS HISTÓRICOS DOS PAÍSES ANALISADOS

Como abordado anteriormente, o desenvolvimento do conceito e do movimento de transição energética é um processo dinâmico, adaptado às necessidades e realidades de cada país analisado. De fato, entender como as ações em prol dessa mudança foram construídas durante os anos garante uma visão abrangente do que já foi alcançado e do que ainda precisa ser feito para o desenvolvimento sustentável. Sendo assim, foi elaborado um quadro resumo (*vide* Quadro 1) com os marcos históricos aqui discutidos, visando mostrar distintamente os avanços obtidos.

Quadro 1: Resumo dos marcos históricos de cada país no contexto da transição energética

Período	Alemanha	Estados Unidos	China	Brasil
1970-1975		1973 oil crisis — embargo petrolífero da OAPEC contra EUA e aliados.	A estratégia de desenvolvimento é fundamentada na industrialização acelerada, com base no uso de carvão. (1970).	Início da construção da Hidrelétrica de Itaipu Binacional (1973); Instituído o Programa Nacional do Alcool - Proálcool (1974).
1977-1984	Primeiras propostas sobre transição energética são lançadas no parlamento, com foco em segurança e riscos nucleares. Publicação do livro "Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran", introduzindo o termo "Transição Energética"	United States Department of Energy (DOE) criado pelo Jimmy Carter através da "Department of Energy Organization Act"; O Presidente Jimmy Carter utiliza o termo "transição energética" em discurso à nação.		A Hidrelétrica de Itaipu entra em operação, garantindo uma matriz energética diferenciada ao Brasil, composta majoritariamente por fontes hídricas.
1990-1999		Energy Policy Act of 1992 sancionada; Assina o Protocolo de Kyoto em 1998, mas o Senado recusa a ratificação, alegando impactos econômicos.	Torna-se importador líquido de petróleo em 1993, forçando a reavaliação do conceito de segurança energética.	Com a Rio-92, a Agenda 21 foi elaborada e ela resultou na criação da Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável (CPDS) no país.
2000-2003	Cria a Lei de Energias Renováveis (EEG), estabelecendo subsídios e tarifas para acelerar a produção de energia limpa (2000).	Incentivos governamentais para a produção de energia por meio de fontes renováveis, com destaque para bioenergia, energia solar e eólica (2000).	Promulga a Lei de Energia Renovável (2006), com mecanismos de compra obrigatória e tarifas de incentivo. O 11º Plano Quinquenal (2006-10) estabelece a primeira meta obrigatória de redução da intensidade energética.	Instituição do Programa de Incentivo às fontes Alternativas de Energia Elétrica - Proinfa (2003).

Quadro 1: Resumo dos marcos históricos de cada país no contexto da transição energética (continuação)

Período	Alemanha	Estados Unidos	China	Brasil
2005		Aprova a Lei de Política Energética (2005), que estimula biocombustíveis e o avanço do fracking. O Recovery Act (2009) destina US\$ 90 bi para energia limpa.		
2009		American Recovery and Reinvestment Act of 2009 ("Recovery Act") destina US\$ 90 bi para energia limpa/eficiência.		
2010-2015	O acidente de Fukushima (2011) catalisa a decisão de desligar todas as usinas nucleares até 2022.	Clean Power Plan lançado pela Environmental Protection Agency (EPA) — primeiro regulamento federal a estabelecer limites de emissão de CO ₂ para usinas termelétricas.	O fenômeno "airpocalypse" (a partir de 2013) eleva a poluição a uma prioridade nacional. O 12º Plano Quinquenal (2011-15) aprofunda as metas de redução de intensidade de carbono.	
Período	Alemanha	Estados Unidos	China	Brasil
Acordo de Paris 2015	Paris Agreement adotado em COP21, Paris — marco global			
2016-2019	Lei de Proteção Climática e Lei do Carbono (2019).	EUA depositam instrumento de aceitação do Paris Agreement (2016); Donald Trump anuncia intenção de retirada dos EUA do Paris Agreement. (2017).		
2021-2024	Atualização da Lei de Proteção Climática (2021);	Joe Biden assina ordem executiva para readmissão dos EUA no Paris Agreement e em 2021 Estados Unidos oficialmente reingressam no Paris Agreement. Promulgação do Inflation Reduction Act -IRA (2022).	Responsável por quase dois terços do crescimento global da capacidade renovável (2023).	50% de renovabilidade em sua matriz energética (2024).

Fonte: Elaboração própria a partir da literatura consultada (2025).

5. CONCLUSÃO

Por fim, após toda a análise realizada no presente estudo, é possível inferir que o processo de transição energética é globalmente dinâmico e multifatorial, cuja evolução e prioridades são profundamente afetadas pelas realidades históricas, políticas, geográficas e econômicas de cada país. Por exemplo, a Alemanha iniciou a transição com o foco na segurança energética e exclusão dos riscos causados pelas usinas nucleares. Já os Estados Unidos, motivados pela crise do petróleo de 1973, priorizaram a criação de processos os quais fomentaram a transição através da inovação tecnológica e estímulos fiscais massivos. Por outro lado, a China, foi forçada a estabelecer metas de desenvolvimento sustentável devido ao *airpocalypse*, a crise ambiental interna que propiciou um grande

investimento em energias renováveis no país, o tornando líder global na expansão desse tipo de fonte. O Brasil, por sua vez, devido a iminente crise econômica causada pela importação dos barris de petróleo com o preço elevado na década de 1970, e por causa da disponibilidade de recursos naturais, passou a investir em programas, como o Proálcool, e obras que, com o passar do tempo, trouxeram grandes benefícios para o país e o tornaram um exemplo a ser seguido, tendo sua matriz elétrica fortemente atrelada a recursos hídricos.

Entretanto, é notável que um esforço coletivo e mais focado passou a ser praticado pós 2015, devido ao Acordo de Paris que conseguiu reorientar as políticas energéticas das nações aqui estudadas, traçando objetivos comuns para a descarbonização e mitigação das emissões de gases do efeito estufa (GEE) como centro do desenvolvimento da transição energética. O processo para atingir esses objetivos, porém, não se mostra simples, devido a diversas variáveis que tornam o processo complexo e multissetorial. De forma geral, cada país tem seus pontos críticos próprios, mas um desafio comum a maioria é a dependência dos combustíveis fósseis em diferentes setores da sociedade. Na Alemanha, nos EUA e na China, o carvão, petróleo e gás natural ainda dominam a matriz energética total, exigindo um esforço contínuo para a superação da dependência estrutural dos combustíveis fósseis o que inclui investimentos massivos para a transformação de suas matrizes energéticas, diminuindo a utilização de derivados do petróleo e utilizando mais fontes renováveis. Em contraste, o Brasil, com sua matriz elétrica historicamente renovável, enfrenta o desafio de expandir essa renovabilidade para outros setores da matriz energética, especialmente o setor de transportes.

A jornada da transição energética com o objetivo de atingir a neutralidade climática, se mostra, portanto, fundamentalmente, um processo de transformação sistêmica, onde o sucesso depende do esforço, comprometimento e adaptabilidade de cada nação, não se restringindo apenas às aqui abordadas. De fato, a transição energética transcende a esfera técnica ou econômica, ela representa um compromisso civilizacional. A concretização do sucesso global está condicionada à garantia de que o avanço das políticas de transição resulte em uma mudança sistêmica e equitativa em todos os setores da economia. Somente assim será possível viabilizar o contínuo desenvolvimento da sociedade humana de forma sustentável, reconhecendo e integrando as necessidades da natureza, coexistindo com ela de maneira responsável e harmoniosa.

REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). Brazil: Energy Policy Review 2024. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/brazil>. Acesso em: 08 set. 2025.
- [2] BALKAN GREEN ENERGY NEWS. IRENA: China has 64% share in 2024 renewables growth, half of world's solar power capacity. Balkan Green Energy News, 27 mar. 2024.
- [3] BANCO MUNDIAL. O desenvolvimento de energias renováveis na China: uma parceria de 40 anos entre a China e o Banco Mundial. Washington, D.C.: Banco Mundial, 2022.
- [4] BMWK. Ending coal-generated power. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2025. Disponível em: <https://www.bundesregierung.de/breg-en/service/archive/kohleausstiegsgesetz-1717014>. Acesso em: 19 set. 2025.
- [5] BMWK. German Nuclear Phase-Out Completed in 2022: Energy Transition and Security Strategy Report. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022.
- [6] BRAHMBHATT, M.; HAUSKER, K.; HENSON, R. Carbon Capture and Storage in the United States. Washington, D.C.: World Resources Institute, 2016.

- [7] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Quinta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília: MMA, 2022.
- [8] BRASIL. Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Ministério de Minas e Energia, 1975. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br>.
- [9] BURSZTYN, M.; BURSZTYN, M. Fundamentos de política e gestão ambiental: caminhos para a sustentabilidade. Rio de Janeiro: Garamond, 2013.
- [10] CEBRI – Centro Brasileiro de Relações Internacionais. The Geopolitics of Energy: Dialogues Paper. Rio de Janeiro: CEBRI, 2017.
- [11] CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS. Energy and Climate Goals of China’s 12th Five-Year Plan. Arlington, VA: C2ES, mar. 2012.
- [12] CENTER FOR STRATEGIC AND INTERNATIONAL STUDIES. How is China’s energy footprint changing? ChinaPower, 23 set. 2022.
- [13] CHOICES MAGAZINE. Energy Policy Act of 1992 and U.S. Energy Transitions. Disponível em: <https://www.choicesmagazine.org>.
- [14] DUFFIELD, John; WOOD, John. Renewable Energy Policy and the Rise of RPS in the U.S. Energy Policy, 2006.
- [15] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2023. Brasília: EPE, 2023.
- [16] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2025 – Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2025.
- [17] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2025 (ano-base 2024). Brasília: EPE, 2025.
- [18] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Rio de Janeiro: EPE, 2019.
- [19] GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I. G. Mata Atlântica: biodiversidade, ameaças e perspectivas. Belo Horizonte: Conservação Internacional, 2005.
- [20] GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento. 3. ed. São Paulo: Edusp, 2007.
- [21] GORAYEB, A.; BRANNSTROM, C.; MEIRELES, A. J. Impactos socioambientais da expansão de energia eólica no Nordeste brasileiro. Revista Brasileira de Geografia Física, 2019.
- [22] HOLMGREN, D. Permacultura: princípios e caminhos além da sustentabilidade. São Paulo: Via Terra, 2013.
- [23] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [24] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2021. Paris: OECD/IEA, 2021.
- [25] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. An energy sector roadmap to carbon neutrality in China. Paris: IEA, 2021.
- [26] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Germany 2020: Energy Policy Review. Paris: OECD/IEA, 2020.
- [27] INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. Explaining the success of the 2006 Chinese Renewable Energy Law. IUCN, 2010.
- [28] ITAIPU BINACIONAL. Nossa História. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br>.
- [29] KRAUSE, Florentin; BOSSEL, Hartmut; MÜLLER-REIßMANN, Karl-Friedrich. Energiewende: Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran. Frankfurt: S. Fischer Verlag, 1980.
- [30] LI, T.; WANG, Y.; ZHAO, D. The evolution of China’s energy and climate policy in the face of the Paris Agreement. Climate Policy, 2021.
- [31] LIMA, J. A. Transição energética e políticas climáticas nos Estados Unidos. Brasília: IPEA, 2022.

- [32] MAUAD, F. F.; FERREIRA, L. da C.; TRINDADE, T. C. G. Energia renovável no Brasil. São Carlos: EESC/USP, 2017.
- [33] MDPI. Energy Transitions: Socio-Technical Perspectives.
- [34] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME, 2020.
- [35] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME, 2020.
- [36] MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) do Brasil: Atualização 2021. Brasília: MMA, 2021.
- [37] MOREIRA, J. R. S. Energias renováveis: geração distribuída e eficiência energética. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- [38] ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) – Agenda 21. Nova York: United Nations, 1992.
- [39] PEIXOTO, M. G.; LUZ, F. C.; BRITO, R. F. Energias renováveis e sustentabilidade ambiental no Brasil. Recife: EdUFPE, 2016.
- [40] PEREIRA, A. O.; NASCIMENTO, L. F. Sustentabilidade e Política Energética no Brasil Pós-Rio-92. Revista de Política Ambiental, 2021.
- [41] SACHS, I. Caminhos para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Garamond, 2000.
- [42] SANTOS, A. N. S. et al. Transição energética e preservação. Observatorio de la Economía Latinoamericana, 2025.
- [43] SAUNDRY, Peter. Energy Policy: A Scholarly Review. In: Encyclopedia of Energy. Elsevier, 2019.
- [44] SMIL, V. Energy and Civilization: A History. Cambridge: MIT Press, 2024.
- [45] SOVACOL, Benjamin K. The United States’ energy transition: drivers, barriers, and pathways. Energy Policy, 2012.
- [46] THE DEPARTMENT OF ENERGY. Energy.gov – Efficiency and Conservation.
- [47] THEBERGE, M. E. De-Risking Decarbonisation: China’s Just Transition From Coal. Social Inclusion, 2024.
- [48] TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. Perspectivas e desafios da transição energética no Brasil. Rio de Janeiro: Synergia, 2016.
- [49] UNITED NATIONS (UN). Paris Agreement. New York: United Nations, 2015.
- [50] UNITED NATIONS. Paris Agreement. 2015.
- [51] UNITED STATES. American Recovery and Reinvestment Act (ARRA), 2009.
- [52] UNITED STATES. Department of Energy Organization Act, 1977.
- [53] UNITED STATES. Energy Independence and Security Act (EISA), 2007.
- [54] UNITED STATES. Energy Policy Act (EPAAct), 1992.
- [55] UNITED STATES. Energy Policy Act of 1992 (EPAAct 1992).
- [56] UNITED STATES. Energy Policy Act of 2005 (EPAAct 2005).
- [57] UNITED STATES. Energy Policy and Conservation Act (EPCA), 1975.
- [58] UNITED STATES. Environmental Protection Agency. Clean Power Plan (CPP), 2015.
- [59] UNITED STATES. Inflation Reduction Act (IRA), 2022.
- [60] VASCONCELLOS, G. F. Transição energética e desenvolvimento sustentável no Brasil. Brasília: MME, 2002.
- [61] VASCONCELLOS, G. F.; BAUTISTA VIDAL, J.; GUIMARÃES, R. P. Biomassa e bioenergia: fundamentos e perspectivas para o Brasil. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.
- [62] VEIGA, J. E. da. A descarbonização da economia global. São Paulo: Editora 34, 2019.

- [63] WANG, K. China's energy conservation policies and activities since 1980 and their impacts. Review of Environmental Economics and Policy, 2009.
- [64] WU, L. China's Post-Coal Growth. London: LSE, 2016.
- [65] YALE ENVIRONMENT 360. Despite a Coal Boom, China is on Track for a Surge in Renewables. 2023.
- [66] ZHANG, Z. Why did the energy intensity in China decrease in the 1990s? In: China's Energy Strategy. Washington, D.C.: Brookings Institution Press, 2008.

Capítulo 2

Geração compartilhada de energia: impactos econômicos em cooperativas fotovoltaicas

Maria Heloisa Medeiros de Souza

Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

Resumo: A crescente demanda por fontes de energia renovável no Brasil tem impulsionado o desenvolvimento de novos modelos de geração elétrica descentralizada. Neste contexto, a geração compartilhada por meio de cooperativas de energia surge como uma alternativa viável, especialmente para consumidores que não possuem condições técnicas ou financeiras de instalar sistemas próprios. Este estudo tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica da geração compartilhada de energia solar fotovoltaica por meio de uma cooperativa localizada no estado do Rio Grande do Norte. A metodologia empregada foi baseada numa abordagem descritiva e qualitativa, utilizando dados técnicos, administrativos e econômicos fornecidos pela própria cooperativa, além de documentos públicos e legislação vigente. Foram analisadas quatro usinas em operação, seus modelos de compensação de energia, estrutura de rateio e economia gerada aos cooperados. Os resultados demonstram que o modelo proporciona economia significativa nas faturas de energia elétrica, com estabilidade operacional, uso eficiente da rede e gestão centralizada via plataforma digital. Um exemplo prático de um cliente cooperado foi mostrado para ilustrar o retorno financeiro alcançado. Conclui-se que a geração compartilhada via cooperativa é uma solução tecnicamente viável e socialmente inclusiva, com potencial de replicação em outras regiões.

Palavras-chave: Geração distribuída, Cooperativas de energia, Geração compartilhada.

1. INTRODUÇÃO

A crise climática energética global impõe desafios urgentes aos sistemas de produção e consumo de energia. O aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), associado à dependência de fontes fósseis e centralizadas, tem levado governos, empresas e a sociedade civil a buscar alternativas sustentáveis e descentralizadas [1]. Nesse cenário, a Geração Distribuída (GD) de energia surge como uma estratégia inovadora para diversificar a matriz elétrica, reduzir perdas técnicas e comerciais no processo de transmissão e distribuição e promover maior autonomia energética local [2].

No Brasil, a GD foi regulamentada pela primeira vez por meio da Resolução Normativa nº482 da ANEEL, publicada em 2012. Essa Resolução permitiu que consumidores gerassem sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia, como a solar fotovoltaica, por exemplo, e compensassem o excedente injetado na rede por meio do sistema de compensação de energia elétrica. A iniciativa trouxe uma nova fase ao setor elétrico nacional, marcada pela descentralização da produção de energia e pelo surgimento de novos atores, como os prossumidores, isto é, consumidores que também geram sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis, em especial a solar fotovoltaica [3].

Desde então, o Brasil vem vivenciando um crescimento expressivo da geração distribuída, impulsionando especialmente pela energia solar fotovoltaica, que segundo o [4] equivale a 80% de uso na GD. A redução dos custos dos equipamentos, incentivos fiscais e marcos regulatórios favoráveis fomentaram novos modelos de negócios, como os sistemas coletivos de geração compartilhada [5].

Sendo assim, dentre os modelos de sistemas coletivos de compartilhamento de geração de energia, destacam-se as cooperativas de energia solar, que representam uma alternativa democrática de acesso à geração renovável. As cooperativas energéticas contribuem para a sustentabilidade ambiental, e fortalecem o capital social, estimulando o desenvolvimento local e promoção da inclusão energética. No entanto, ainda são poucos os estudos que analisam em profundidade a viabilidade técnica e econômica dessas iniciativas, especialmente no contexto das regiões menos industrializadas do país.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica da geração compartilhada de energia solar fotovoltaica por meio de uma cooperativa local. Além de contribuir para a literatura sobre energia renovável e cooperativismo, o estudo pretende fornecer subsídios para políticas públicas e iniciativas que desejem replicar esse modelo em outras regiões do Brasil.

2. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

A Geração Distribuída no Brasil se desenvolve principalmente a partir da energia solar fotovoltaica, aproveitando a abundância de radiação solar no país e na modularidade na tecnologia, que permite sua instalação em diversas escalas [6]. Esse crescimento tem sido impulsionado por políticas públicas e evoluções regulatórias que permitem o compartilhamento da energia gerada entre múltiplos consumidores.

Inicialmente estabelecida pela Resolução Normativa nº 482/2012 e posteriormente aprimorada pela Resolução nº 687/2015 da ANEEL, a regulamentação introduziu o conceito de geração compartilhada, viabilizando a criação de consórcios, associações e cooperativas de energia. Esse modelo permite que diversos consumidores compartilhem

os créditos de uma única unidade geradora, sem a necessidade de realizar troca de titularidade para o nome da cooperativa ou de outro modelo adotado.

A GD alcançou um novo patamar com a promulgação da Lei nº 14.300/2022, que instituiu o Marco Legal da Geração Distribuída. A Lei trouxe maior segurança jurídica ao setor e definiu regras de transição para o sistema de compensação de créditos, reforçando o papel das fontes renováveis na matriz energética brasileira [7].

De acordo com a [8], até abril de 2025 o Brasil atingiu a marca de 28 GW de potência instalada em geração distribuída (GD), beneficiando mais de 2,7 milhões de unidades consumidoras em todo o país. Apenas nos quatro primeiros meses de 2025, houve um acréscimo de aproximadamente 2,8 GW em potência instalada, oriunda principalmente de sistemas de microgeração (até 75 kW) e minigeração (acima de 75 kW até 5 MW), em conformidade com os limites estabelecidos pela Lei nº 14.300/2022 [7].

2.1. GERAÇÃO COMPARTILHADA

No contexto regulatório brasileiro, a GD é classificada, de forma geral, em Geração Distribuída Individual e Geração Distribuída Compartilhada, conforme previsto pela própria Lei 14.300/2022 e regulamentado pela ANEEL [7].

A Geração Distribuída Individual ocorre quando o sistema de geração, geralmente solar fotovoltaico, é instalado na mesma unidade consumidora, como em residências, comércios ou propriedades rurais. Nessa modalidade, o consumidor utiliza a energia gerada para autoconsumo instantâneo e injeta o excedente na rede da distribuidora, recebendo créditos de energia para compensação futura [6].

Por outro lado, a Geração Distribuída Compartilhada permite que múltiplas unidades consumidoras compartilhem a energia gerada por uma única usina localizada em ponto distinto das unidades consumidoras. Isso é viabilizado por meio da constituição de cooperativas ou consórcios, nas quais os consumidores associados recebem créditos proporcionais à sua cota de participação [9]. Essa modalidade foi formalmente estabelecida pela [10] da ANEEL, e posteriormente incorporada ao Marco Legal da Geração Distribuída do Brasil [7].

A GD compartilhada é especialmente importante para consumidores que não possuem condições técnicas, como ausência de telhado ou espaço próprio, ou recursos financeiros suficientes para investir individualmente em sistemas fotovoltaicos. Esse modelo favorece o acesso de moradores de apartamentos, pequenos comerciantes, produtores rurais, instituições públicas e comunidades em regiões de baixa renda, permitindo a inclusão energética e a democratização da geração limpa [9].

Com o amadurecimento da GD individual, que cresceu de forma acelerada nas últimas décadas, conforme os números mostrados anteriormente, a GD compartilhada surge como modelo complementar, inclusivo e cooperativo. Esse avanço está inserido em um contexto em que o cooperativismo energético ganha força como uma solução coletiva para o acesso à energia solar. Logo, cooperativas de geração compartilhada têm possibilitado investimentos em escala, reduzindo os custos por usuário e ampliando os impactos sociais, ambientais e econômicos positivos nas comunidades onde atuam [11].

2.2. COOPERATIVAS

A cooperativa é uma sociedade de natureza civil, formada por no mínimo 20 pessoas, com gestão democrática, participativa e sem fins lucrativos, que visa atender objetivos econômicos e sociais comuns. Os próprios associados são responsáveis pela gestão e fiscalização da entidade, exercendo o controle coletivo sobre as decisões e resultados [9].

Do ponto de vista legal, a Lei nº 5764/1971 define a sociedade cooperativa como uma associação de pessoas que reciprocamente se obrigam a contribuir com bens ou serviços para o exercício de uma atividade econômica de proveito comum, sem objetivo de lucro [12]. Esse modelo organizacional se baseia em princípios da economia solidária, como autogestão, participação ativa e distribuição equitativa dos resultados.

A aplicação do cooperativismo à geração de energia elétrica é uma tendência relativamente recente no Brasil, mas com crescente aceitação. As primeiras experiências datam de 2016, quando começaram a surgir iniciativas nos estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Paraná, a partir das possibilidades abertas pela Resolução Normativa nº 687/2015 da ANEEL. Essa normativa introduziu o modelo de geração compartilhada, permitindo a constituição de cooperativas e consórcios para geração distribuída de energia a partir de fontes renováveis [10].

A partir de 2022, com a promulgação da Lei nº 14.300/2022, o Marco Legal da Geração Distribuída, o cooperativismo energético ganhou novo impulso, e a legislação consolidou esse modelo como uma alternativa legítima e incentivada, conferindo segurança jurídica para empreendimentos coletivos e detalhando os critérios para a compensação de créditos de energia elétrica [7]. Trata-se da principal regulamentação vigente sobre geração descentralizada no país.

De acordo com o Anuário do Cooperativismo Brasileiro [5], existem atualmente mais de 900 cooperativas com iniciativas de geração de energia renovável em operação no Brasil, com atuação predominante nas regiões Sul e Sudeste, que juntas concentram algo em torno de 58%. A região Nordeste responde por cerca de 26,8%, com destaque para os estados da Bahia, Rio Grande do Norte e Ceará, onde o alto potencial solar tem favorecido a expansão dessas iniciativas. Estados como Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Santa Catarina concentram os maiores volumes de geração compartilhada em ambiente cooperativo.

Casos de sucesso demonstram a viabilidade do modelo, como por ex., a Cogecom, sediada em Minas Gerais, possui mais de 405 MW de potência instalada, atendendo consumidores em oito estados brasileiros, com geração anual superior a 350 milhões de kWh [13]. Já a Cooperideal, em Santa Catarina, foca em cooperativas voltadas para o setor agrícola, promovendo o acesso à energia limpa a pequenos produtores rurais.

As cooperativas solares viabilizam o acesso à geração fotovoltaica a grupos que, individualmente, não teriam condições técnicas (como falta de telhado ou espaço físico) ou financeiras para instalar seus próprios sistemas. Elas promovem não apenas economia na fatura de energia, mas também inclusão social, desenvolvimento local e maior consciência ambiental entre os cooperados.

Do ponto de vista econômico, os cooperados geralmente alcançam reduções de até 80% nas faturas de energia elétrica, com retorno sobre o investimento (*payback*) variando entre cinco a sete anos, dependendo da escala do projeto, custos operacionais e modelo de gestão [5;11].

Contudo, o modelo ainda enfrenta obstáculos, como a burocracia regulatória, a dificuldade de acesso a linhas de crédito específicas, a necessidade de capacitação técnica para a gestão eficiente das cooperativas e a falta de difusão de informação em regiões com baixo índice de alfabetização energética [11].

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido com base em uma abordagem descritiva e qualitativa, por meio de um estudo de caso de uma cooperativa de geração compartilhada de energia solar localizada no estado do Rio Grande do Norte (RN), na cidade de Mossoró, com usinas situadas em cidades do interior do RN. No caso, em Apodi, Mossoró e Governador Dixt Sept Rosado.

A metodologia adotada constituiu inicialmente em uma análise documental de dados técnicos e administrativos fornecidos pela própria cooperativa, além da observação de dados públicos sobre o setor elétrico e normativos regulatórios vigentes. O objetivo principal foi avaliar a estrutura operacional, potência instalada, os resultados energéticos e os benefícios percebidos por seus cooperados.

Os dados analisados foram organizados a partir de três fontes principais: planilhas internas com dados de geração mensal das usinas pertencentes a cooperativa; documentos técnicos sobre estrutura das usinas, incluindo potência instalada, local de implantação e tipos de instalação; planilhas com dados como economia mensal, valor da energia gerada (R\$/kWh) e energia compensada em créditos.

A cooperativa analisada opera dentro do modelo de geração distribuída, conforme previsto na Lei nº 14.300/2022. Atualmente, possui quatro usinas solares fotovoltaicas em operação, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1- Usinas pertencentes à cooperativa

USINA	ANO DA INSTALAÇÃO	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	POTÊNCIA INSTALADA (kW)	GERAÇÃO MENSAL ESTIMADA (kWh)	OBSERVAÇÕES
UFV1	2018	TRAFO PARTICULAR: 300kW; INVERSORES: 5 x SUNTRIO PLUS 60kW; MÓDULOS: 1225 x RISUN ENERGY - RGM7E - 156P - 330W	300	54169,5	SISTEMAS OPERANDO EM CONDIÇÕES NORMAIS
UFV2	2023	INVERSOR: 1 x GROWATT - MAX 75KTL3 LV; MÓDULOS: 180 x LUXEN - LNVU 550M	75	13266	SISTEMAS OPERANDO EM CONDIÇÕES NORMAIS
UFV3	2024	INVERSOR: 1 x GROWATT - MAX 75KTL3 LV; MÓDULOS: 180 x LUXEN - LNVU 550M	75	13266	SISTEMAS OPERANDO EM CONDIÇÕES NORMAIS
UFV4	2024	INVERSOR: 1 x GROWATT - MAX 75KTL3 LV; MÓDULOS: 240 x LUXEN - LNSU - 410M	75	13266	SISTEMAS OPERANDO EM CONDIÇÕES NORMAIS

Fonte: Autoria própria.

Os dados mostrados na Tabela 1 indicam que a cooperativa opera dentro dos parâmetros esperados para sistemas fotovoltaicos no Nordeste, ou seja, a geração mensal específica, calculada pela razão entre a geração mensal estimada (kWh) e a potência instalada (kWp), varia entre 133,96 e 134,84 kWh/kWp/mês nas quatro usinas, o que está dentro da faixa de desempenho esperada para a referida Região, conforme o Atlas Brasileiro de Energia Solar [14]. Esses resultados demonstram que os sistemas operam com boa eficiência, apresentando geração compatível com o potencial solar da localidade e com a capacidade de atendimento às unidades cooperadas.

As usinas fotovoltaicas UFV1, UFV2, UFV3 e UFV4, pertencentes à cooperativa analisada, possuem características técnicas semelhantes quanto à capacidade instalada e ao perfil de geração mensal. As usinas UFV2, UFV3 e UFV4, por ex., estão instaladas em solo, enquanto a UFV1 encontra-se em um prédio, onde parte da energia gerada atende primeiramente à própria edificação. No entanto, a quantidade de cooperados vinculados a cada uma destas usinas é diferente. Essa distribuição diferenciada não se deve à diferença na produção energética, mas sim a uma estratégia de organização interna adotada pela cooperativa com o intuito de garantir estabilidade e previsibilidade na compensação de créditos energéticos entre os membros. Ao distribuir os cooperados de forma equilibrada entre as usinas, mesmo com capacidades semelhantes, busca-se assegurar que nenhuma unidade consumidora fique sem os créditos necessários em função de variações sazonais na geração ou flutuações no consumo individual.

Além disso, cada usina opera com uma lógica própria de contribuição de créditos, considerando o consumo histórico dos cooperados, sua participação proporcional no sistema e o excedente médio de geração da unidade. Por exemplo, a UFV2, atende atualmente a cinco cooperados, com base em um critério de dimensionamento que considera não apenas a geração da usina, mas também o perfil de consumo de cada participante, os limites contratuais de compensação e a margem de segurança estabelecida pela cooperativa para evitar *déficit* energético.

Outro aspecto relevante a ser destacado é o mecanismo de reaproveitamento do excedente energético, característico do modelo de geração compartilhada por meio de cooperativa. De acordo com a Lei nº 14.300/2022, os créditos de energia elétrica gerados por unidade consumidora participante de geração compartilhada que não forem utilizados no mês de referência, podem ser compensados em ciclos subsequentes dentro do prazo de validade de 60 meses (§3º do art. 18 da referida Lei) [7]. No contexto da cooperativa estudada, esse princípio é aplicado da seguinte forma: quando, ao final de um ciclo mensal, a energia injetada na rede for superior à soma do consumo de todos os cooperados, o excedente permanece registrado no sistema da distribuidora como crédito disponível. Esse crédito não é perdido, mas retorna como saldo à unidade geradora da cooperativa, podendo ser utilizado futuramente para suprir *déficits* eventuais.

Portanto, em períodos em que a geração for inferior à demanda conjunta dos cooperados esse saldo acumulado poderá ser utilizado para complementar os créditos, garantindo continuidade no fornecimento e estabilidade na compensação. Essa sistemática respeita o modelo de rateio previsto para a geração compartilhada e fortalece a resiliência operacional do empreendimento cooperativo [12].

Dando continuidade ao trabalho, a seção 4 tratará sobre a análise dos dados obtidos das usinas fotovoltaicas UFV1, UFV2, UFV3 e UFV4.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Visualizados os dados iniciais da cooperativa, na seção 3, a Tabela 2 e Tabela 3 apresentam os primeiros detalhamentos técnicos da usina UFV2. A Tabela 2 reúne os dados de geração mensal média de energia elétrica (em kWh), extraídos dos relatórios mensais fornecidos pela concessionária local, COSERN (Companhia Energética do Rio Grande do Norte). Já a Tabela 3 mostra os dados operacionais da UFV2, como o número de cooperados atendidos, os percentuais de desconto aplicados sobre o valor do kWh, os valores compensados mensalmente e a economia média obtida por cooperado.

Tabela 2 - Relatório resumo

UFV2 - Apodi						
DADOS DOS ÚLTIMOS 12 MESES - CC XXXX2698						
MÊS/ANO	CONTA CONTRATO	E. CONSUMIDA (kWh)	E. INJETADA (kWh)	E. COMPENSADA(kWh)	E. FATURADA (kWh)	E. EXCEDENTE (kWh)
jun/24	XXXX2698	47	12656	0	100	12656
jul/24	XXXX2698	55	12073	0	100	12073
ago/24	XXXX2698	139	13547	39	100	13508
set/24	XXXX2698	157	13698	57	100	13641
out/24	XXXX2698	296	15458	196	100	15262
nov/24	XXXX2698	265	14456	165	100	14291
dez/24	XXXX2698	283	14776	183	100	14593
jan/25	XXXX2698	266	13252	166	100	13086
fev/25	XXXX2698	266	14082	166	100	13916
mar/25	XXXX2698	299	14126	199	100	13927
abr/25	XXXX2698	212	13105	112	100	12993
mai/25	XXXX2698	210	13611	110	100	13501
jun/25	XXXX2698	216	12792	116	100	12676

Fonte: Adaptado de COSERN.

Tabela 3 - Cooperados da Ufv2

UFV2 - Apodi						
COOPERADOS (UC)	CONSUMO MÉDIO (kWh)	CRÉDITO ENVIADOS (kW)	VALOR DO kWh ATUAL/JULHO(R\$)	DESCONTO	VALOR DO kWh COM DESCONTO (R\$)	ECONOMIA DO CLIENTE (R\$)
XXXX4117	4650	4650	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 633,70
XXXX8966	285	285	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 40,97
XXXX4010	400	400	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 60,63
XXXX5388	600	600	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 66,02
XXXX2345	5900	5900	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 1.630,08

Fonte: Autoria própria.

No caso da usina Ufv1, instalada sobre um edifício, a mesma apresenta uma característica híbrida, pois parte da energia gerada é consumida instantaneamente pela própria edificação, enquanto o excedente é injetado na rede e convertido em créditos de energia, sendo posteriormente distribuídos aos cooperados. Essa dualidade é representada na sequência com a Tabela 4 e Tabela 5, que mostram os relatórios mensais e os dados de alocação dos cooperados vinculados a essa unidade.

Tabela 4 - Relatório resumo

UFV1 - Mossoró							
DADOS DOS ÚLTIMOS 12 MESES - CC XXXX3800							
MÊS/ANO	ENERGIA CONSUMIDA NA PONTA (kWh)	ENERGIA CONSUMIDA FORA PONTA (kWh)	ENERGIA INJETADA NA PONTA (kWh)	ENERGIA INJETADA FORA PONTA (kWh)	ENERGIA COMPENSADA NA PONTA (kWh)	ENERGIA COMPENSADA FORA PONTA (kWh)	EXCEDENTE TOTAL (kWh)
mai-24	503,76	2.287,20	0,00	32.566,56	503,76	2.287,20	29.436,80
jun-24	604,51	2.450,40	0,00	31.679,40	604,51	2.450,40	28.244,68
jul-24	525,53	2.131,20	0,00	35.173,13	525,53	2.131,20	32.186,22
ago-24	512,04	2.025,60	0,00	37.799,38	512,04	2.025,60	34.940,03
set-24	523,32	2.018,40	0,00	42.292,10	523,32	2.018,40	39.421,59
out-24	565,25	1.994,40	0,00	43.398,34	565,25	1.994,40	40.483,55
nov-24	657,02	2.236,80	0,00	41.289,41	657,02	2.236,80	37.982,79
dez-24	510,31	2.164,80	0,00	36.040,66	510,31	2.164,80	33.044,93
jan-25	523,80	1.716,00	0,00	41.556,25	523,80	1.716,00	38.987,35
fev-25	365,14	1.411,20	0,00	40.516,70	365,14	1.411,20	38.510,95
mar-25	346,75	1.368,00	0,09	35.962,64	346,75	1.368,00	34.030,18
abr-25	467,45	1.723,20	0,00	39.448,91	467,45	1.723,20	36.964,57
mai-25	425,11	1.624,80	0,00	40.290,47	425,11	1.624,80	37.971,07

Fonte: Adaptado de COSERN.

Tabela 5 - Cooperados da UFV2

UFV1 - Mossoró						
COOPERADOS (UC)	CONSUMO MÉDIO (kWh)	CRÉDITO ENVIADOS (kWh)	VALOR DO kWh ATUAL/JULHO(R\$)	DESCONTO	VALOR DO kWh COM DESCONTO (R\$)	ECONOMIA DO CLIENTE
XXXX5407	1900	1900	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 264,14
XXXX7833	750	750	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 214,24
XXXX2682	3000	3000	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 274,48
XXXX2384	600	600	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 77,56
XXXX5650	6000	6000	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 725,06
XXXX5199	600	600	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 57,09
XXXX9619	9000	9000	0,995390703	25%	0,745390703	R\$ 2.558,26

Fonte: Autoria própria.

Na sequência, da

Tabela 6 até a Tabela 9, são apresentados os dados operacionais das usinas UFV3 e UFV4, permitindo a continuidade da análise comparativa entre os diferentes arranjos adotados pela cooperativa. Ambas operam exclusivamente com geração remota, injetando toda a energia produzida na rede da distribuidora e convertendo-a em créditos, posteriormente distribuídos entre os cooperados conforme critérios de rateio previamente definidos.

Tabela 6 - Relatório resumo

UFV3 - Governador Dix Sept Rosado						
DADOS DOS ÚLTIMOS 12 MESES - CC XXXX5510						
MÊS/ANO	CONTA CONTRATO	E. CONSUMIDA (kWh)	E. INJETADA (kWh)	E. COMPENSADA(kWh)	E. FATURADA (kWh)	E. EXCEDENTE (kWh)
mai/24	XXXX5510	0	12309	0	100	12309
jun/24	XXXX5510	32	12113	0	100	12113
jul/24	XXXX5510	32	12408	0	100	12408
ago/24	XXXX5510	31	12881	0	100	12881
set/24	XXXX5510	35	15768	0	100	15768
out/24	XXXX5510	30	14468	0	100	14468
nov/24	XXXX5510	29	12969	0	100	12969
dez/24	XXXX5510	33	12729	0	100	12729
jan/25	XXXX5510	29	12549	0	100	12549
fev/25	XXXX5510	30	11530	0	100	11530
mar/25	XXXX5510	27	13352	0	100	13352
abr/25	XXXX5510	26	12634	0	100	12634
mai/25	XXXX5510	30	15683	0	100	15683

Fonte: Adaptado de COSERN.

Tabela 7 - Cooperados da Ufv3

UFV3 - Governador Dix Sept Rosado						
COOPERADOS (UC)	CONSUMO MÉDIO (kWh)	CRÉDITO ENVIADOS (kWh)	VALOR DO kWh ATUAL/JULHO(R\$)	DESCONTO	VALOR DO kWh COM DESCONTO (R\$)	ECONOMIA DO CLIENTE
XXXX6790	1900	1900	0,995390703	25%	0,745390703	R\$ 418,60
XXXX3298	600	600	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 84,17
XXXX3181	300	300	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 48,29
XXXX3793	400	400	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 25,14
XXXX0194	600	600	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 67,79
XXXX7424	350	350	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 63,36
XXXX0671	400	400	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 45,95
XXXX3391	750	750	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 189,87
XXXX4772	500	500	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 107,89
XXXX7876	450	450	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 68,14
XXXX9056	500	500	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 103,04
XXXX4802	250	250	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 35,55

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Relatório resumo

UFV4 - Governador Dix Sept Rosado						
DADOS DOS ÚLTIMOS 12 MESES - CC XXXX0121						
MÊS/ANO	CONTA CONTRATO	E. CONSUMIDA (kWh)	E. INJETADA (kWh)	E. COMPENSADA(kWh)	E. FATURADA (kWh)	E. EXCEDENTE (kWh)
mai/24	XXXXX0121	1	10846	0	100	10846
jun/24	XXXXX0121	1	10548	0	100	10548
jul/24	XXXXX0121	2	13394	0	100	13394
ago/24	XXXXX0121	7	16739	0	100	16739
set/24	XXXXX0121	2	12737	0	100	12737
out/24	XXXXX0121	1	11811	0	100	11811
nov/24	XXXXX0121	2	13878	0	100	13878
dez/24	XXXXX0121	1	13438	0	100	13438
jan/25	XXXXX0121	1	12231	0	100	12231
fev/25	XXXXX0121	2	14045	0	100	14045
mar/25	XXXXX0121	1	11151	0	100	11151
abr/25	XXXXX0121	1	13963	0	100	13963

Fonte: Adaptado COSERN.

Tabela 9 - Cooperados da Ufv4

UFV4 - Governador Dix Sept Rosado						
COOPERADOS (UC)	CONSUMO MÉDIO (kWh)	CRÉDITO ENVIADOS	VALOR DO kWh ATUAL/JULHO(R\$)	DESCONTO	VALOR DO kWh COM DESCONTO (R\$)	ECONOMIA DO CLIENTE
XXXX1904	1200	1200	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 187,24
XXXX6231	2500	2500	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 367,29
XXXX3776	4500	4500	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 675,75
XXXX7911	600	600	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 88,03
XXXX4277	1100	1100	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 29,73
XXXX1626	400	400	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 238,71
XXXX9018	1260	1260	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 202,81
XXXX6915	500	500	0,995390703	20%	0,795390703	R\$ 69,06

Fonte: Autoria própria.

As Tabelas de 6 a 9 mostram as informações sobre geração média, compensação energética e desempenho econômico, evidenciando a padronização dos procedimentos de gestão, ainda que com estratégias específicas de alocação entre as usinas.

A compensação é realizada pela plataforma digital Hube, que automatiza o acesso aos dados de consumo das unidades consumidoras diretamente junto ao sistema da COSERN, utilizando as credenciais individuais de cada cooperado. O sistema identifica o consumo mensal de cada unidade, calcula a quantidade de energia a ser compensada, aplica o desconto acordado contratualmente no valor do kWh, que pode variar entre 20% e 25%, conforme o contrato específico de cada cooperado. Depois é emitido, de forma automatizada, um boleto mensal com o valor correspondente à energia utilizada.

Nas quatro usinas FV, os cooperados atendidos não consomem a energia diretamente. Em vez disso, recebem mensalmente os créditos em sua fatura de energia elétrica, reduzindo consideravelmente o valor a ser pago à distribuidora. O pagamento final do cooperado compreende duas parcelas: o valor mínimo da fatura da concessionária, acrescido do

encargo de distribuição (Fio B¹), e o boleto da cooperativa, que corresponde à energia compensada no período.

De acordo com o artigo 17 da Lei nº 14.300/2022, os consumidores que aderirem ao sistema de compensação de energia após a vigência da nova lei (ou durante o período de transição, com determinadas condições) devem pagar a parcela da TUSD referente ao custo da rede (TUSD-Fio B), aplicada sobre a energia injetada e posteriormente compensada. O valor do Fio B é calculado com base na quantidade de energia (kWh) compensada no mês, multiplicada pela tarifa TUSD-Fio B vigente definida pela distribuidora local, no caso deste estudo, a COSERN.

O processo de faturamento e cobrança é realizado mensalmente, de forma automatizada, garantindo controle sobre os valores movimentados e estabilidade na operação. A estrutura administrativa é centralizada, mas o modelo mantém os princípios do cooperativismo ao permitir que múltiplos consumidores compartilhem os benefícios de uma geração renovável sem necessidade de instalação própria de equipamentos.

Além dos dados consolidados, serão apresentados exemplos individuais de cooperados na seção 4, de forma a ilustrar os efeitos práticos da geração compartilhada na economia mensal de energia elétrica.

Por todo o exposto, a análise dos dados operacionais das quatro usinas solares fotovoltaicas (UFV1, UFV2, UFV3 e UFV4) da cooperativa, mostra um desempenho técnico condizente com as expectativas para sistemas localizados no semiárido nordestino, com altos níveis de radiação solar e boa eficiência de geração. As Tabelas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, evidenciaram uma geração mensal estável ao longo do ano, com pequenas variações associadas à fatores climáticos sazonais.

É importante destacar que as usinas UFV1, UFV3 e UFV4 operam exclusivamente com geração remota, injetando a totalidade da energia produzida na rede da distribuidora (COSERN), enquanto a UFV2, por estar instalada sobre um edifício, atende parte do consumo local e converte o excedente em créditos para os cooperados. Essa configuração híbrida da UFV2 demonstra um uso otimizado da estrutura, reduzindo perdas na entrega direta da energia.

Em relação à distribuição dos cooperados, o modelo adotado pela cooperativa leva em consideração o histórico de consumo, a margem de segurança para compensação e a rotatividade contratual. Sendo assim, mostrou-se eficiente para garantir a regularidade no atendimento. Mesmo em períodos de menor irradiação solar, não foram registrados *déficits* relevantes na geração, conforme demonstram os dados consolidados.

A plataforma Hube foi fundamental para garantir a precisão do processo de compensação, permitindo o acesso em tempo real aos dados de consumo dos cooperados, a aplicação automatizada dos percentuais de desconto e a geração dos boletos mensais. Os descontos variaram entre 15% e 30% sobre o valor da energia compensada, conforme acordos contratuais individuais, o que assegura maior flexibilidade financeira dentro da gestão da cooperativa.

No aspecto econômico, os dados indicam uma economia significativa nas faturas de energia dos cooperados. A média de economia mensal por unidade consumidora gira em

¹ O Fio B representa a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) referente à remuneração da infraestrutura utilizada pela distribuidora para entregar a energia elétrica ao consumidor, mesmo quando esta é compensada por meio de geração distribuída.

torno de R\$ 70,00 até R\$ 800,00, dependendo do perfil de consumo, do percentual de desconto e da capacidade de geração da usina à qual está vinculada.

Para finalizar as análises, a seção 4.1 mostra um exemplo prático de um cliente cooperado visando demonstrar o retorno financeiro alcançado.

4.1. DEMONSTRAÇÃO DA APLICAÇÃO DE MODELO DE GERAÇÃO COMPARTILHADA

Para ilustrar o impacto prático do modelo de geração compartilhada tratado anteriormente, é demonstrado o exemplo da unidade identificada como UC XXXX4117 (cidade de Apodi/RN), mostrada na Tabela 3, vinculada à usina UFV1. Trata-se de uma escola de médio porte que aderiu à cooperativa em 02/2024 e apresenta um consumo médio mensal de 4.650 kWh.

A partir dos créditos recebidos pela cooperativa, a escola teve, em média, 4.650 kWh compensados mensalmente, com um desconto de 20% sobre o valor do kWh. Ao longo do período de fevereiro de 2024 a junho de 2025, a economia acumulada na conta de energia elétrica da unidade foi de aproximadamente R\$ 8.600,00, com uma economia mensal média de R\$ 633,40. Essa economia representa cerca de 20% da fatura original, tornando o modelo atrativo mesmo para consumidores de médio porte, como instituições de ensino.

Caso a escola estivesse no mercado cativo, sem adesão ao modelo cooperativista, o gasto acumulado estimado, no mesmo período, teria sido cerca de R\$ 56.000,00, considerando a tarifa média local para consumidores do grupo B. Logo, observa-se que a adesão à cooperativa proporcionou, portanto, uma redução efetiva de algo em torno de 15% sobre esse total.

Além da redução direta na conta de energia, a escola cooperada não precisou arcar com custos de instalação, operação ou manutenção do sistema, uma vez que toda a infraestrutura é de responsabilidade da cooperativa, reforçando a viabilidade do modelo para consumidores que não possuem espaço físico ou recursos para instalar um sistema próprio.

Os valores apresentados foram estimados com base nas tarifas da distribuidora local (COSERN), considerando a classe tarifária aplicável, a média mensal de consumo e o desconto percentual oferecido pela cooperativa.

5. CONCLUSÃO

A partir da análise deste trabalho, verificou-se que a geração compartilhada por meio de cooperativas de energia solar fotovoltaica representa uma alternativa tecnicamente viável e economicamente atrativa. A análise realizada, considerando um estudo de caso de uma cooperativa localizada no estado do Rio Grande do Norte, evidenciou que o modelo cooperativista, amparado pelo Marco Legal da Geração Distribuída (Lei nº 14.300/2022), possibilita o acesso democrático à geração renovável, sobretudo para consumidores que não dispõem de infraestrutura ou capital para investir em sistemas próprios.

Os dados operacionais das quatro usinas (UFV1, UFV2, UFV3 e UFV4) analisadas demonstraram desempenho compatível com os padrões esperados para a região Nordeste, apresentando geração específica mensal estável e adequada à potência instalada. A estratégia de alocação dos cooperados, os mecanismos de rateio de créditos energéticos e o uso de plataformas digitais para gestão automatizada consolidam uma

estrutura operacional eficiente e transparente, promovendo a sustentabilidade econômica da iniciativa.

Adicionalmente, observou-se que os cooperados obtêm economia expressiva nas suas faturas de energia elétrica, sem necessidade de investimentos iniciais ou encargos com manutenção, reforçando o caráter acessível e colaborativo do modelo. O reaproveitamento dos créditos excedentes e o cumprimento das diretrizes regulatórias vigentes indicam maturidade na gestão do empreendimento, que pode servir de referência para futuras iniciativas similares.

Contudo, apesar dos resultados positivos, o modelo cooperativista enfrenta alguns desafios relevantes, como a necessidade constante de atualização tecnológica, a complexidade dos trâmites regulatórios junto à distribuidora, a dependência de plataformas digitais com alto grau de automação, e as dificuldades de acesso a linhas de crédito específicas para expansão.

Além disso, a gestão coletiva exige um esforço contínuo de transparência e comunicação com os cooperados, o que demanda capacitação e estrutura organizacional adequada. Conclui-se, portanto, que o modelo de geração compartilhada, via cooperativa, se apresenta como uma ferramenta relevante para a descentralização da matriz elétrica brasileira.

Para futuras pesquisas, recomenda-se a ampliação da análise para outras modalidades de geração compartilhada, bem como a investigação de indicadores socioambientais e os impactos do modelo nas comunidades atendidas. Um outro ponto que pode ser analisado, se refere à abordagem de estratégias para superar os desafios identificados visando consolidar e expandir esse tipo de iniciativa.

REFERÊNCIAS

- [1] IPCC – **Intergovernmental Panel on Climate Change. Sixth Assessment Report.** Geneva: IPCC, 2022
- [2] ANEEL – **Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de Compensação de Energia Elétrica - Perguntas Frequentes.** 2023. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- [3] LIMA, Lucas de Souza; MARQUES, Antonio Carlos. **O papel do prosumidor no setor elétrico brasileiro: perspectivas e desafios.** Revista Brasileira de Energia, v. 25, n. 2, p. 75–92, 2019. Disponível em: <https://www.rbe.org.br/article/view/82>. Acesso em: 23 jul. 2025.
- [4] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2025.** Relatório de Síntese. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 12 jul. 2025.
- [5] OCB – **Organização das Cooperativas Brasileiras. Manual Jurídico das Cooperativas de Energia.** Brasília: Sistema OCB, 2021.
- [6] ABSOLAR – **Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica.** Panorama 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br>. Acesso em: 12 jul. 2025.
- [7] BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. **Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2021-2022/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 18 jul. 2025.
- [8] ANEEL – **Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração Compartilhada: Perguntas Frequentes.** Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 15 jul. 2025.

- [9] SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Geração Distribuída e Cooperativas de Energia Solar**. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br>. Acesso em: 13 jul. 2025.
- [10] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. **Altera a Resolução Normativa nº 482/2012 para aprimorar as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2025.
- [11] CORREIA FILHO, D. P.; MEDEIROS, R. T.; LOPES, A. G. **Geração Compartilhada de Energia: Aspectos Operacionais**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 11, n. 2, p. 89–105, 2022.
- [12] BRASIL. Lei nº 5764, de 16 de dezembro de 1971. **Dispõe sobre a criação e funcionamento das sociedades cooperativas**. Diário Oficial da União. Brasília, 1971.
- [13] COGECOM. Cooperativa Geral de Energia Compartilhada. **Relatório Anual 2025**. Disponível em: <https://www.cogecom.com.br>. Acesso em: 28 jun. 2025.
- [14] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2017/files/p0901.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2025.

Capítulo 3

Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass in Bahia (Brazil): from a regional biomass hub to high-value platform chemicals

Júlia Gimenez Iervolino

Luiza Vasconcelos Santos

Ronaldo Costa Santos

Abstract: In the context of the global energy transition and the urgent need to mitigate greenhouse gas emissions, lignocellulosic biomass has emerged as a strategic renewable feedstock for the sustainable production of fuels and value-added chemicals. Its thermochemical conversion, through the decomposition of cellulose, hemicellulose, and lignin, enables access to a wide spectrum of oxygenated intermediates and hydrocarbon products. Among available conversion routes, pyrolysis has attracted considerable attention, particularly for bio-oil production. However, bio-oil derived from conventional pyrolysis is characterized by high oxygen content, low energy density, and limited chemical stability, which constrain its direct utilization. Catalytic pyrolysis has therefore been proposed as an effective upgrading strategy, as it enables in situ modification of reaction pathways, promoting deoxygenation, aromatization, and improved product selectivity under controlled operating conditions. Bahia (Brazil) presents a highly diverse and abundant portfolio of biomass resources—including castor bean, oil palm, soybean, cotton, sisal, sugarcane, and macaúba—with significant potential for thermochemical valorization. Despite this favorable scenario, systematic studies addressing catalytic conversion pathways and process integration remain limited. This review critically examines the application of catalytic pyrolysis to biomass resources available in Bahia, emphasizing the influence of catalyst type, reactor configuration, and operating conditions on product distribution and quality. Promising regional feedstocks are identified based on their physicochemical properties, availability, and compatibility with catalytic pyrolysis, aiming to meet the requirements of the chemical and energy industries. A structured literature review combined with bibliometric analysis using VOSviewer was employed to map research trends, key catalysts, and platform molecules associated with biomass valorization. The results highlight catalytic pyrolysis—particularly when combined with zeolite-based catalysts such as ZSM-5—as the dominant and most versatile pathway for converting regional lignocellulosic biomass into upgraded bio-oil and high-value platform chemicals, including furans, aromatics, and organic acids. Overall, the findings reinforce the role of catalytic pyrolysis as a central enabling technology for the development of a sustainable, diversified bio-based energy and chemical landscape in Bahia and similar biomass-rich regions.

Keywords: Lignocellulosic biomass, Catalytic pyrolysis, Zeolite catalysis, Platform molecules, Bio-oil upgrading, Biomass valorization, Energy transition.

1. INTRODUCTION

The global energy transition is driven by the urgent need to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. This imperative has catalyzed significant interest and increasing investments in biomass-derived natural polymers, particularly those from lignocellulosic sources. These biomolecules offer a promising alternative for both the energy and chemical industries. They show strong potential to meet the growing demand for sustainable solutions. In this context, biomass stands out as a strategic platform for developing innovative pathways toward high-value-added chemicals. This approach delivers economic benefits while mitigating environmental impacts (Rial, 2024).

To obtain industrial products, biomass undergoes thermochemical conversion. Common routes include combustion, liquefaction, gasification, and pyrolysis (Stöcker, 2023). These methods heat biomass to 400–800 °C without complete combustion. Pyrolysis, which breaks down organic matter without oxygen, has become prominent. It offers a promising path to bio-oil production, a sustainable alternative to fossil fuels (Uddin et al., 2018).

Despite its potential, pyrolysis-derived bio-oil faces significant challenges in yield and quality. Most limitations arise from complex chemical reactions during pyrolysis. Integrating pyrolysis with catalysis has emerged as a highly promising strategy to address these drawbacks. This method offers several advantages over non-catalytic pyrolysis, including lower operating temperatures and shorter reaction times. The result is a more efficient and potentially sustainable process (Ferreira, 2014).

Bahia (Brazil) is a strategic region with immense potential for developing high-quality biomass. Its predominantly agrarian economy and privileged geographical location favor the cultivation of many energy crops (Cunha et al., 2021).

Bahia's main biomass feedstocks include castor bean, macaúba, oil palm (dendê), soybean, cotton, sisal (agave), and local palm species. All offer considerable potential for biofuel production in the state. Among them, macaúba oil stands out, attracting investments from major companies due to its high energy yield and sustainability profile. Beyond biofuel, macaúba cultivation in Bahia contributes to carbon sequestration, with estimates showing up to an 80% reduction in CO₂ emissions from its cultivation and processing (Almeida, 2024). These factors position Bahia as a key region for renewable energy, closely aligning the state's economic development with environmental mitigation.

Despite this favorable and expanding scenario, substantial investments are still required to harness its full potential. Although Bahia is a promising region, its biomass resources remain underexplored. Further studies are needed to evaluate which feedstocks and products can be generated efficiently and sustainably (França et al., 2022). Rigorous assessment of biomass viability must consider not only energy potential but also environmental impacts. This includes developing technologies that ensure biomass use does not compromise the integrity of biomes, biodiversity, or sensitive ecosystems. Only through a balanced approach can Bahia's biomass potential become a sustainable reality, benefiting both the environment and the local economy.

This work investigates catalytic pyrolysis of Bahia's biomass resources to answer: How do different catalysts influence product distribution and quality in locally available biomass, and which feedstocks are best suited to meet chemical and energy demands through this process? By linking regional biomass with catalytic technologies, this study identifies promising valorization routes for biofuels and high-value chemicals, supporting strategic and sustainable use of mapped resources.

2. THEORETICAL BACKGROUND

2.1. PYROLYSIS

Pyrolysis is a versatile and technically robust route for biomass conversion. It generates fuels and value-added chemicals through controlled thermochemical decomposition (Moraes, 2017). The term 'pyrolysis' originates from Greek: 'pyro' (πῦρ) means fire or heat, and 'lysis' (λύσις) means decomposition or cleavage (Silvério et al., 2008). IUPAC defines pyrolysis as the thermal decomposition of chemical compounds under inert conditions, with little or no oxygen present (IUPAC, 2007).

One main advantage of pyrolysis is its relatively low direct emissions. In addition, the process forms multiple product streams—bio-oil, solid carbonaceous residue (char), and permanent gases (Uddin et al., 2018). The efficiency and distribution of these products are governed by key process parameters: heating rate, operating temperature, and the residence times for solids and vapors (Stöcker, 2023). These variables, in turn, influence the extent of primary devolatilization and secondary reactions, including cracking, condensation, and repolymerization.

Depending on the operating conditions, pyrolysis is classified as slow, intermediate, fast, or flash pyrolysis (Rangel et al., 2023). Each regime leads to different product distributions, as summarized in Table 1. Specifically, synthesis gas components—such as methane, carbon monoxide, carbon dioxide, and hydrogen—are favored at high temperatures and with prolonged vapor residence times. In contrast, char forms more readily under lower temperatures and longer solid residence times. Finally, for maximum bio-oil production, moderate temperatures, rapid heating, and short vapor residence times are best, as they limit secondary degradation reactions (Rangel et al., 2023).

Table 1 - Type of pirolysis

Process	Time (s)	Heating rate (K/s)	Particle Size (mm)	Temperature (K)	Oil Yield (%)	Char Yield (%)	Gas Yield (%)
Slow	450–550	0,1–1	5–50	550–950	30	35	35
Fast	0,5–10	10–200	<1	850–1250	50	20	30
Flash	<0,5	>1000	<0,2	1050–1300	75	12	13

Source: M. N. Uddin et. al., (2018).

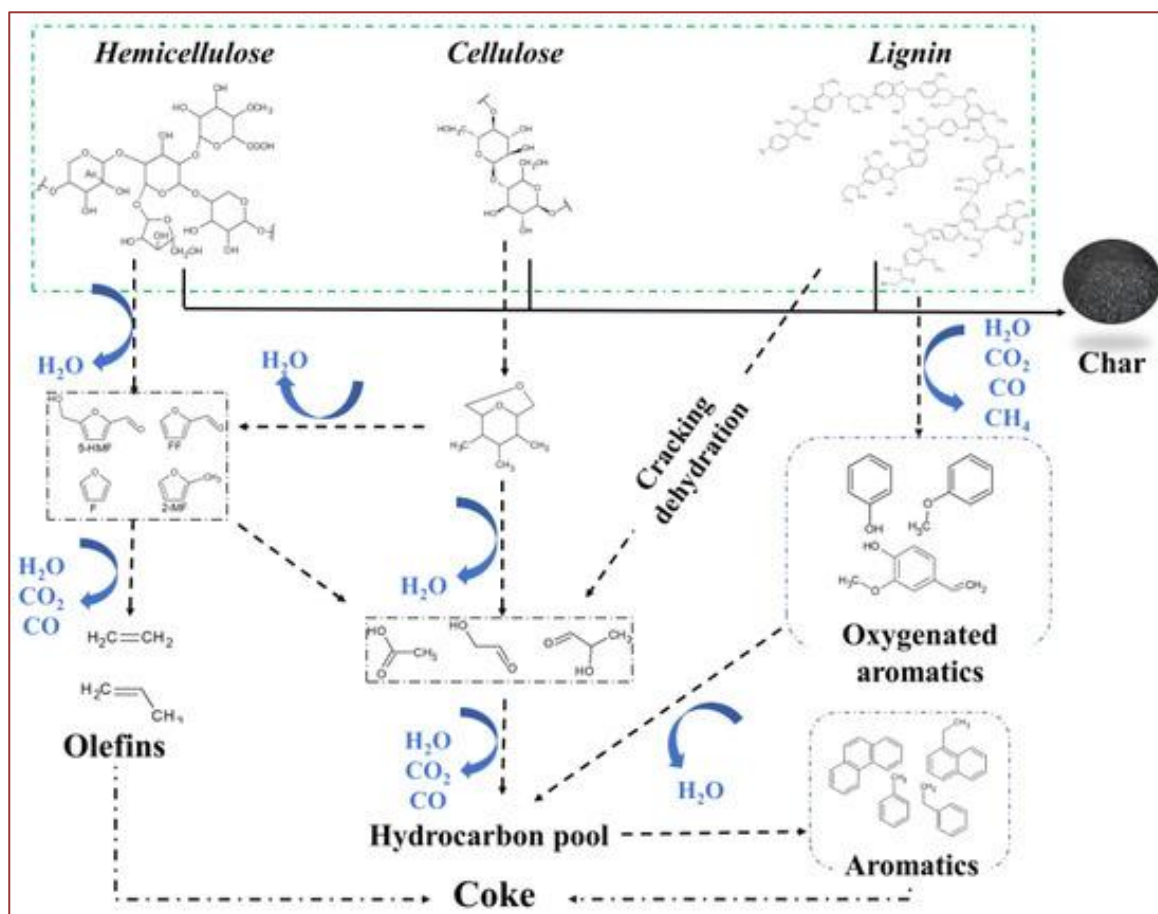
Despite its relevance, bio-oil from conventional pyrolysis has limitations. These include low energy density, high oxygen content, chemical instability, and the tendency to form coke during storage or subsequent processing. Such drawbacks are associated with oxygenated compounds, such as acids, aldehydes, ketones, phenolics, and sugars. These compounds are generated from the thermal decomposition of cellulose, hemicellulose, and lignin (Ferreira, 2014). Therefore, using raw bio-oil directly is constrained. Upgrading strategies are essential for practical applications.

Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass helps address the limits of non-catalytic pyrolysis. Specifically, adding catalysts to the pyrolytic environment alters reaction pathways in situ, thereby promoting deoxygenation, cracking, and aromatization reactions. As a result, catalytic pyrolysis can improve bio-oil quality by reducing oxygenated species and boosting chemical stability. It can also increase selectivity toward targeted products, like light hydrocarbons and aromatics. In addition, this approach allows operation under milder conditions, such as lower temperatures and shorter reaction times, compared to conventional pyrolysis.

Catalytic pyrolysis expands the potential of thermochemical biomass conversion. It couples feedstock decomposition with catalytic upgrading. As a result, lignocellulosic resources can be transformed more efficiently and selectively into fuels and high-value-added chemicals.

2.2. CATALYTIC PYROLYSIS AND PLATFORM MOLECULES

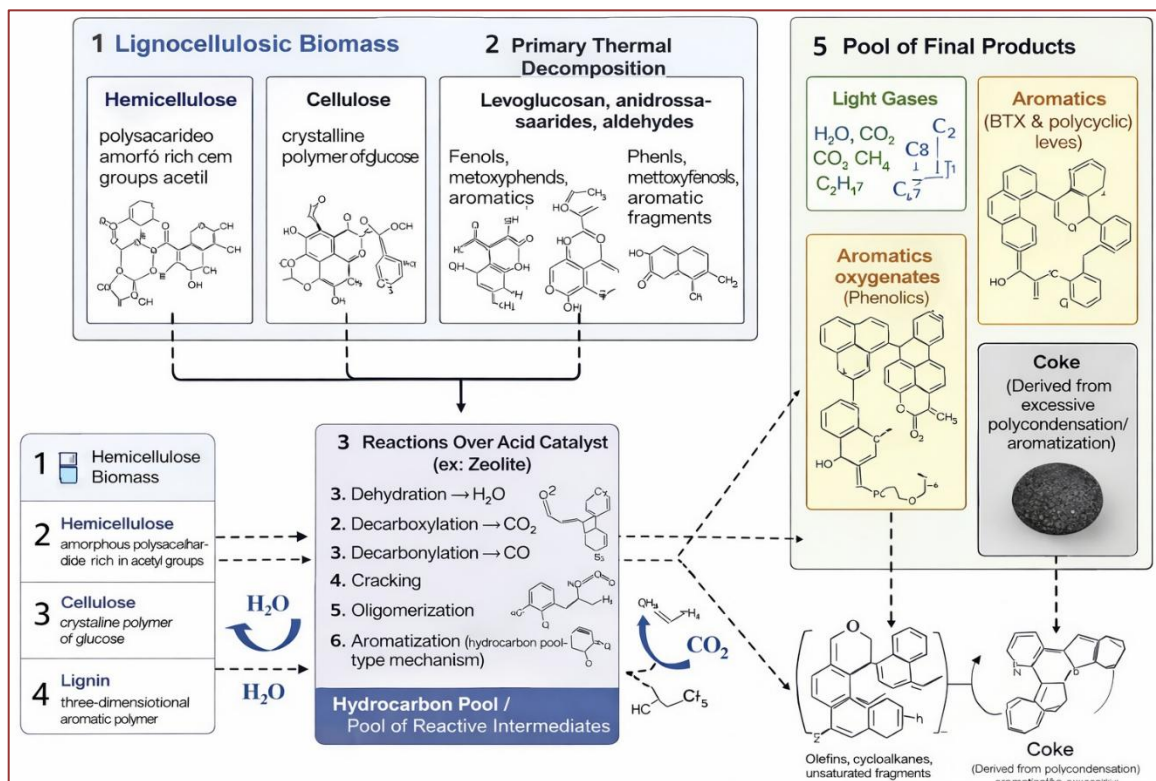
Catalytic pyrolysis has emerged as a highly promising approach for producing bio-oil and higher-value chemical derivatives from lignocellulosic biomass (Wang et al., 2022). The incorporation of catalysts into the pyrolytic process significantly enhances both product quality and selectivity by modifying reaction pathways and suppressing undesirable secondary reactions. As a result, catalytic pyrolysis promotes the formation of compounds such as furans, methylfuran, furfural, benzene, toluene, xylene, phenolics, aromatic hydrocarbons, synthesis gas, as well as oxygenated species including aldehydes, ketones, and alcohols. Concurrently, the formation of undesired by-products, such as char and coke, is effectively mitigated through catalytic intervention (Rangel et al., 2023), as illustrated in Figure 1.

Figure 1. Representative compounds obtained from catalytic pyrolysis

Among the products generated by catalytic pyrolysis, hydrocarbons, aromatic compounds (both oxygenated and non-oxygenated), and furanic derivatives are of particular relevance due to their high industrial and economic value. These compounds are commonly referred to as platform molecules, as they serve as fundamental building blocks for the synthesis of a wide range of chemical products, spanning from bulk commodities to advanced specialty chemicals (Salma et al., 2021).

Figure 2 schematically illustrates the main reaction pathways involved in the catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass and the formation of value-added platform molecules. The process begins with the thermal decomposition of the primary biomass constituents—cellulose, hemicellulose, and lignin—resulting in a complex mixture of oxygenated intermediates, including anhydrosugars (e.g., levoglucosan), aldehydes, ketones, acids, and phenolic fragments. These primary products arise from depolymerization and fragmentation reactions during the initial thermal stage.

Figure 2. Reaction pathways and product distribution in the catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass, illustrating the formation of oxygenated intermediates, hydrocarbon pool species, platform molecules, light gases, aromatics, and coke



Upon contact with acidic catalysts, particularly zeolitic materials, these intermediates undergo secondary catalytic transformations, including dehydration, decarboxylation, decarbonylation, cracking, oligomerization, and aromatization. These reactions collectively contribute to the formation of a so-called “hydrocarbon pool,” consisting of highly reactive surface intermediates that act as precursors for the generation of light hydrocarbons, aromatic compounds, and oxygenated aromatics.

As depicted in Figure 2, catalytic upgrading promotes the selective conversion of oxygen-rich pyrolysis vapors into light gases (CO , CO_2 , CH_4 , C_2 – C_4 hydrocarbons), mono-aromatic compounds (BTX), and phenolic derivatives, while simultaneously suppressing the formation of heavy oxygenates. However, excessive secondary condensation and polymerization reactions may lead to coke formation, posing a major challenge to catalyst stability and long-term process operation.

This mechanistic framework highlights the critical role of catalyst acidity, pore architecture, and reaction environment in steering product distribution during catalytic pyrolysis. By tailoring catalyst properties and operating conditions, it is possible to maximize the yield of targeted platform molecules while minimizing coke formation, thereby enhancing the overall efficiency and sustainability of biomass valorization routes.

According to the United States Department of Energy (US DOE), platform molecules are relatively simple chemical compounds derived from biomass that can be efficiently converted into more complex, higher-value products through downstream chemical processing (Salma et al., 2021). In the Brazilian context, several platform molecules are of

particular strategic interest:

Glycerol

Glycerol is a highly reactive compound that can be converted into value-added products such as 1,3-propanediol and lactic acid via oxidation, esterification, and dehydration reactions. Its derivatives find widespread applications in bioplastics, fuel additives, cosmetics, and pharmaceutical formulations.

5-Hydroxymethylfurfural (HMF)

HMF, characterized by a furan ring bearing aldehyde and hydroxymethyl functional groups, is a key intermediate for the synthesis of compounds such as 2,5-furandicarboxylic acid (FDCA), levulinic acid, and furfuryl alcohol through oxidation and hydrogenation pathways. These derivatives play an important role in the production of bioplastics, biofuel additives, and functional polymeric materials.

Ethanol

Owing to its chemical versatility, ethanol can be catalytically converted into ethylene, acetaldehyde, and acetic acid via dehydration and oxidation reactions. These derivatives are extensively used in the manufacture of plastics, solvents, and fuel additives, and are also used directly as a biofuel.

In addition to these molecules, catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass can form other important intermediates, such as furfural and levulinic acid (Table 2), which are widely used in the biofuel, solvent, and renewable materials industries.

Table 2 - Platform Molecules, Derivatives and Industrial Applications

Platform Molecule	Derivatives	Industrial Applications	Reference
Xylitol	Ethylene and propylene glycol; polyesters; xylaric acid; xylonic acid; arabonic acid; arabinoic acid	Sweetener, de-icing agent, automotive antifreeze	Linga; Venkateswar Rao et al. (2016)
Sorbitol	1,4-sorbitan; isosorbide; polyether-polyol; ascorbic acid	Sweetener, humectant, thickener, cryostabilizer	Furtwengler and Avérous (2018)
Glycerol	Epichlorohydrin; 1,2-propanediol; 1,3-propanediol; mono-, di- and tri-esters; glyceric acid; acrolein	Triacetin; food additive; pharmaceutical products; personal care polyol; alkyd resins; tobacco; explosives; detergents; cellophane; fungicides; bioplastics; chemical agents	Contreras-Andrade et al. (2014); Kabbour; Luque
Furfural	Furan; levulinic acid	Decolorizing agents; fuel transportation	Kabbour, Luque (2020)
Ethanol	Ethanol	Alcoholic beverages; sterilizing agent; organic solvent; fuels	Dezam et al. (2017); He et al. (2018); Magalhães Júnior et al. (2018)
Aspartic Acid	Amino-γ-butyrolactone; aspartic anhydride	Sweetener (aspartame)	Vasilii et al. (2012)

Table 2 - Platform Molecules, Derivatives and Industrial Applications (continuation)

Platform Molecule	Derivatives	Industrial Applications	Reference
Succinic Acid	3-aminotetrahydrofuran; 2-amino-1,4-butanediol; polyaspartic acid; 1,4-butanediol; γ -butyrolactone; tetrahydrofuran; N-methyl-2-pyrrolidone; diesters; polyamides; polyesters	Pharmaceutical applications	Kohli et al. (2019)
Malic Acid	Chlorosuccinic acid	Artificial sweetener; food additives	Naudé and Nicol (2018)
Levulinic Acid	Methyltetrahydrofuran; esters; γ -valerolactone; 5-methyl-2-pyrrolidone; diphenolic acid	Unsaturated polyester resins; food additive; animal feed; dye mordant; polyhydric alcohols	Girisuta and Heeres (2017)
Lactic Acid	Copolymers	Biodegradable polymers; food heating applications	Xue et al. (2016)
Itaconic Acid	Methyl-1,4-BDO; 3-methyl-THF; 3- and 4-GBL; 2-methyl-1,4-butanediamine; pyrrolidones	Styrene; butadiene polymers (dye receptivity for fibers); nitrile latex	Okabe et al. (2009)
Fumaric Acid	1,4-butanediol; γ -butyrolactone; tetrahydrofuran; unsaturated polyesters; L-aspartic acid; malic acid	Unsaturated polyesters; resins; food additive; animal feed; dye mordant; polyhydric alcohols	Li and Xing (2017)
5-Hydroxymethylfurfural (HMF)	Dimethylfuran; 2,5-furandicarboxylic acid; levulinic acid	Pharmaceutical applications; biodegradable polymers	Lima (2021)

The production of platform molecules from lignocellulosic biomass represents a critical step toward reducing dependence on fossil-based resources and advancing the transition to a low-carbon economy. In Brazil, the abundance of biomass, favorable climatic conditions, and extensive land availability position the country as a strategic hub for the development of a sustainable bioeconomy.

Nevertheless, the efficient conversion of lignocellulosic biomass into high-value products requires continued advances in process design, catalyst development, and reactor engineering. This context underscores the importance of sustained investments in research and technological innovation to maximize the sustainable utilization of renewable biomass resources and to enable their integration into future energy and chemical production systems.

2.3. REACTORS AND PROCESS CONFIGURATION (IN SITU / EX SITU)

Catalytic pyrolysis is typically conducted under an inert atmosphere and at elevated temperatures. Pressure conditions depend on reactor design and process scale. Selecting an appropriate reactor system is a critical aspect of process development. This choice depends on several factors. These include the type and physicochemical properties of the biomass feedstock, the targeted product spectrum, catalyst characteristics, operating temperature range, pyrolysis regime, project budget, and tolerance toward coke formation and catalyst deactivation (Salma et al., 2021). A variety of reactor

configurations have been reported in the literature, as illustrated in Table 3. There are also different strategies for introducing biomass and catalysts into the system.

Table 3 - Pyrolysis Reactors and Products

Reactor Type	Description	Products Obtained	Reference
Fixed-Bed Reactor	Simple reactor in which the feedstock is arranged in a fixed bed, with heat introduced from the bottom of the bed.	Char, combustible gases	Vilela et al. (2023)
Fluidized-Bed Reactor	Reactor in which the feedstock is placed in a fluidized bed, with air or gas flow used to keep the particles suspended.	Bio-oil, combustible gases	Levenspiel (2004)
Rotary Reactor	Reactor with a rotating cylindrical vessel in which the feedstock is externally heated; continuous motion promotes uniform heating of the material.	Char, bio-oil	Vilela et al. (2023)
Microwave Reactor	Advanced reactor in which heating occurs through microwave irradiation, without the use of a flame, representing a more costly alternative.	Bio-oil, combustible gases	Vilela et al. (2023)
Batch Reactor	Reactor used for small-scale operations and for the production of different products using a single unit.	Bio-oil, combustible gases	Levenspiel (2004)

2.3.1. IN SITU AND EX SITU CATALYTIC PYROLYSIS

Process configuration plays a decisive role in determining reaction efficiency, catalyst performance, and product distribution.

In Situ Catalytic Pyrolysis

In the in situ configuration, biomass and catalyst are physically mixed before entering the reactor. Pyrolysis vapors generated during thermal decomposition interact directly with the catalyst surface. This direct contact allows rapid catalytic upgrading in the same reaction environment. It also promotes short diffusion distances and fast vapor–catalyst contact. These features can enhance conversion rates.

However, in situ catalytic pyrolysis presents notable challenges. The catalyst and biomass are simultaneously exposed to high heating rates and evolving vapors. This condition can lead to incomplete utilization of catalytic pores, especially if vapor generation occurs before the catalyst reaches its optimal activation temperature. Also, direct contact between the catalyst and solid biomass residues increases the chance of coke deposition. This may degrade bio-oil quality and accelerate catalyst deactivation by blocking pores and depleting active sites (Wang et al., 2022).

Ex Situ Catalytic Pyrolysis

In the ex situ configuration, biomass pyrolysis and catalytic upgrading occur in separate spaces. Biomass is thermally decomposed in a primary reactor. The resulting vapors are then sent to a secondary catalytic reactor. This arrangement allows independent control of pyrolysis and catalytic upgrading conditions. Factors such as temperature, residence time, and catalyst loading can be adjusted separately.

As a result, ex situ catalytic pyrolysis usually favors higher selectivity toward aromatic hydrocarbons and synthesis gas. It also reduces catalyst fouling by solid residues. Although using another reactor increases process complexity and capital costs, this setup provides better control over product composition and improved catalyst stability. It is attractive for applications needing precise tuning of chemical outputs (Rangel et al., 2023).

Choosing between in situ and ex situ catalytic pyrolysis depends on several factors. These include the desired product slate, catalyst coking sensitivity, reactor scale, and budget. It is important to balance operational flexibility, catalytic efficiency, and process cost. This balance ensures both technical and economic viability.

2.4. MAIN CATALYST TYPES

Catalysts direct catalytic pyrolysis toward targeted products. Key physicochemical properties—acidity type and strength, pore structure, surface area, and location of active sites—control catalyst activity, selectivity, and deactivation resistance.

2.4.1 ZEOLITES

The International Zeolite Association (IZA) defines zeolites as crystalline aluminosilicates with three-dimensional microporous frameworks. Their high surface area, strong adsorption, and molecular sieving make them well-suited for catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass (Wang et al., 2022).

Brønsted and Lewis acidity in zeolites comes from silicon replaced by aluminum, which creates negatively charged sites offset by protons or extra-framework cations. These acidic sites drive C–C and C–O bond breaking, dehydration, cracking, and aromatization. Too much acidity or poor pore design can lead to unwanted polymerization and condensation, resulting in coke buildup and catalyst deactivation (Rangel et al., 2023).

Among zeolitic catalysts, ZSM-5 has been extensively employed due to its medium-pore microporous structure and well-balanced acidity, which favor the formation of mono-aromatic hydrocarbons. This contrasts with mesoporous materials such as SBA-15, MCM-41, and MUS-S, which were explored to address the diffusion limitations of microporous zeolites. ZSM-5's high surface area and shape-selective properties improve bio-oil quality by lowering viscosity and reducing acidity, while the larger pore diameters of mesoporous materials facilitate the conversion of bulky oxygenated intermediates and mitigate coke deposition, thus enhancing catalyst lifetime and process stability (Dada et al., 2021).

2.4.2. METAL OXIDES

Metal oxide-based catalysts are widely investigated in catalytic pyrolysis due to their redox and acid-base properties, which enable effective deoxygenation of pyrolysis vapors and promote hydrocarbon-rich product streams. Unlike zeolites, which rely mainly on acidity and pore structure, metal oxides such as Cu_2O , Fe_2O_3 , CaO , and ZnO exhibit distinct catalytic functionalities based on their electronic structure and surface chemistry (Wang et al., 2022).

These materials typically provide a high density of accessible active sites, facilitating selective and relatively stable catalytic transformations. In particular, basic oxides such as CaO favor decarboxylation and decarbonylation reactions, while transition-metal oxides support redox-driven pathways and hydrogen-transfer reactions. The selection of an appropriate metal oxide catalyst must therefore consider the chemical composition of the biomass feedstock, including its lignocellulosic fractions and inorganic content, as well as external factors such as cultivation conditions, climate, and associated ash composition (Dada et al., 2021).

Choosing the right catalyst, reactor setup, and feedstock introduction method is essential for efficient catalytic pyrolysis. Better catalyst and reactor designs can expand the use of catalytic pyrolysis, develop sustainable conversion routes, and reduce reliance on fossil fuels.

2.5. MAIN BIOMASS FEEDSTOCKS FOR PLATFORM MOLECULE PRODUCTION

Lignocellulosic biomass is one of the most important renewable resources for the production of platform molecules. It is widely available and has a well-defined structural composition. These materials are mainly made up of three major plant cell wall constituents: cellulose, hemicellulose, and lignin (Table 4). Together, these components give plants mechanical strength and biological protection (Ramalho, 2017).

Cellulose is a linear homopolysaccharide composed of glucose units ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) linked by β -1,4-glycosidic bonds. It has a high degree of polymerization ($\geq 10^6$) and accounts for about 40–50 wt% of dry biomass (Almeida, 2008). Hemicellulose is a heterogeneous polysaccharide made of pentoses (β -D-xylose, α -D-arabinose), hexoses (β -D-mannose, β -D-glucose, α -D-galactose), and uronic acids (α -D-glucuronic and 4-O-methylglucuronic acids). It typically represents 20–40 wt% of dry biomass (Puhl, 2024). Lignin is the most structurally complex. It forms a three-dimensional aromatic network composed of phenylpropanoid units, including coniferyl, sinapyl, and *p*-coumaryl alcohols. These are interconnected by various ether and carbon-carbon linkages.

The amounts of these parts vary a lot depending on where the biomass comes from, how it's grown, and how fields are managed. These differences directly affect how well processes that convert biomass into useful products work. Things like how wet the biomass is, or how much ash it has, also matter for how efficient these processes are. If the biomass is too wet, more energy is needed for drying, lowering efficiency. Ash can help or hinder the process, depending on its composition and amount (Rajendran, 2017; Puri et al., 2024).

Table 4 - Structural Percentage of Major Biomass Components

Biomass	Lignine (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Reference
Agricultural Residues	17	38	32	(McMillan, 1994)
Banana Waste	14	40	15	(Lapo, 2020)
Nut shell	37,5	41,2	55	(Halysh, 2018)
Wheat straw	17	30	28–35	(Tian, 2018)
Almond shell	69	12	30	(Balci et al., 1993)
Sesame stalk	33	29	35	(Ates et al., 2006)
Grasses	40–50	30–40	15–30	(Dhyani e Bhaskar, 2018)
Cotton boll shell	49	33,1	11	(Çağlar e Demirbaş, 2000)
Cotton stalk	30	35	12	(Keshav, 2021)
Corn stalk	26	34	25	(Chong, 2021)
Sugarcane	24–27	57	24	(Chong, 2021)
Macaúba endocarp	40,47	34,2	56,3	(Gontijo, 2015)
Agave Sisalana	11	73	13	(Castro, 2020)
Green Coconut	30,95	42,91	16,76	(EMBRAPA, 2019)

2.5.1. BIOMASS RESOURCES IN BAHIA

Bahia's geographical and climatic conditions support a wide diversity of biomass feedstocks. This makes it a promising region for sustainable bio-based initiatives. Its mesoregions have distinct agricultural profiles. When paired with catalytic pyrolysis technologies, these profiles enable the production of high-value platform molecules.

Center-North Bahia: This region has a semi-arid climate and low rainfall. Sisal and macaúba are the main crops. They adapt well to water scarcity and are suitable for thermochemical conversion because of their low moisture content (Fávaro and Rocha, 2022). Corn is also common. Its residues, such as straw, are suitable for energy and chemical applications (Santos and Ohara, 2016).

Center-South Bahia: This region plays an important role in coffee production within the North-Northeast of Brazil. However, climatic variability and technological limitations have constrained productivity, potentially affecting residue availability for large-scale conversion processes (Santos et al., 2018).

Northeast Bahia: Although its agribusiness sector is smaller, this region still offers potential feedstocks such as corn, sisal, orange, and passion fruit. The residues from these crops may be used as raw materials for thermochemical valorization (Bispo, 2012).

São Francisco Valley (Bahia): Benefiting from deep, well-drained soils, this region is a major fruit-producing hub, particularly for mangoes, grapes, and bananas. Residues from these crops exhibit low ash content, which is favorable for catalytic conversion processes and reduces the risk of catalyst poisoning (Ministério da Agricultura, 2023).

Extreme West Bahia: This region is a key grain producer in Brazil. Its productivity in soybean, cotton, and corn is supported by a large aquifer. Soybean oil has high energy density and is widely used in biofuel production. Associated residues are important for integrated biorefinery schemes (Kelles and Biscaro, 2017).

South Bahia: This region is marked by high biodiversity and strong production of cocoa,

coconut, and oil palm (*dendê*). Cocoa husks, with low moisture and ash contents, are highly suitable for energy conversion, while coconut fiber, with high lignin and cellulose contents, is particularly attractive for thermochemical applications (Marafon et al., 2019; Silva et al., 2021).

Metropolitan Region of Salvador: Although mainly an industrial hub, agriculture is still significant here. Main crops are sugarcane, cassava, and coconut. Their residues can be used in catalytic pyrolysis to make bio-oil and catalytic char (Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, 2021).

The technical and economic feasibility of biomass use depends on continuous availability, harvest timing, logistics, and competitiveness. Catalytic pyrolysis efficiently converts these residues into high-value products such as hydrocarbons, organic acids, and phenolics. By tailoring lignocellulosic composition and catalyst function, product selectivity can be directed toward specific chemical classes.

Map 1 - Mesoregion of Bahia



Source: Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (2020).

Tables 5 and 6 summarizes Bahia's regional data and biomass characteristics. These show the state's strong potential for biomass-to-chemicals conversion. This supports sustainable development and reinforces Bahia as a strategic bioeconomy center.

Table 5- Biomasses from Bahia and Their Main Products

Biomass	Product	Reference
Macaúba	Biodiesel , oils	Embrapa (2021)
Oil Palm	Biodiesel	Embrapa (2021)
Coco da Baía	Solid biofuels (charcoal)	Marafon <i>et.al.</i> (2019)
Mandioca	Ethanol	Feltran <i>et al</i> (2016)
Cocoa	Biofuels, syngas, biochar, bio-oil	Silva <i>et.al.</i> (2021)
Corn	Starch, vitamins, fibers, oil, ethanol	Santos e Ohara (2016)
Castor Bean	Bio-oil, bunker fuel (marine fuel)	Soares. V. V. (2022)
Sisal	Second-generation ethanol	Thomas, H.Y <i>et. al.</i> (2024)
Soybean	Biofuels	Kelles, Biscaro, 2017
Cotton	Oild, Ethanol, Biodiesel	Oliveira <i>et.al.</i> (2023)

Table 6- Main Biomass Feedstocks in Bahia by Region

Mesoregion	Subregion or Main City	Climate	Main Biomass	Other Biomass
Center-South	Barra da Choça	Semi-arid / Tropical	Coffee	Cocoa, tropical fruits
Center-North	Sertão Baiano	Semi-arid	Sisal	Corn, castor bean, cashew nut, macaúba, cassava
Metropolitan Region	–	Equatorial Tropical	Sugarcane	Cassava, corn, pineapple, coconut, banana
Extreme West	São Desidério	Tropical Savanna	Soybean	Cotton, corn
South	Dendê Coast (Costa do Dendê)	Tropical	Cocoa, oil palm (dendê)	Coconut, cassava
São Francisco Valley	Juazeiro	Semi-arid / Tropical Savanna	Grape	Mango, banana, sugarcane

3. METHODOLOGY

As outlined in Section 2, this study adopted a rigorous methodological framework to conduct a systematic literature review focused on catalytic pyrolysis and its potential application to biomass resources available in Bahia. The bibliographic survey was conducted in Google Scholar, covering the period from 2014 to 2024, to capture recent advances and emerging trends in the thermochemical conversion of biomass.

A central component of the methodology was the use of VOSviewer (Visualizing Scientific Landscapes), widely recognized for its ability to map co-occurrence networks and

thematic interconnections within the scientific literature. Bibliographic data were retrieved from The Lens database, which provides comprehensive access to peer-reviewed publications and technological patents. Targeted keyword combinations were employed, including *"biomass"*, *"catalytic pyrolysis"*, *"catalyst"*, *"Bahia"*, *"conversion"*, and *"bio-oil"*, with the application of semantic filters to refine the search results. This approach enabled the identification of critical relationships among key concepts and facilitated the prioritization of research areas with high scientific and industrial relevance.

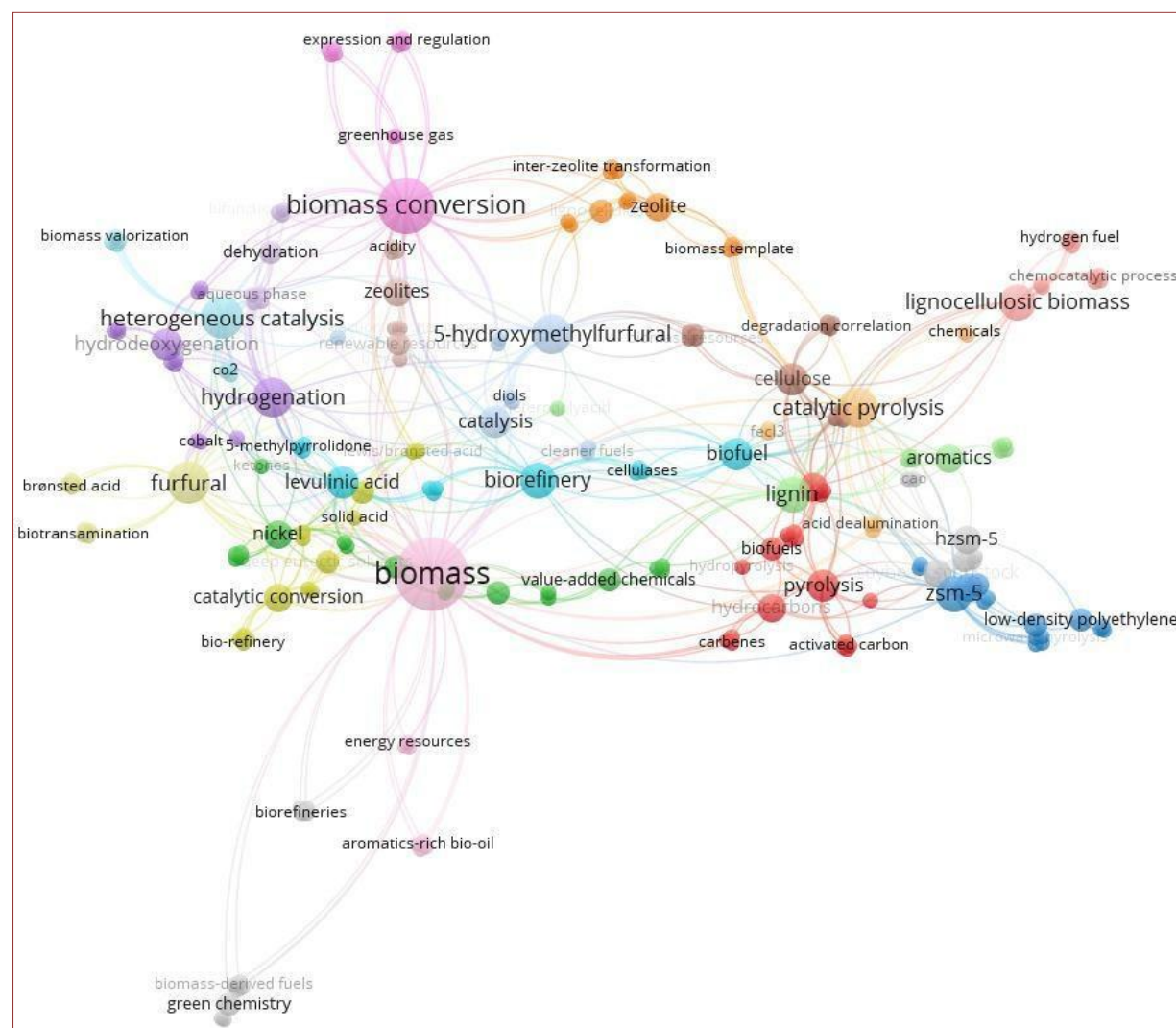
In parallel, a critical assessment of technological developments in catalytic pyrolysis was conducted. This focused on the chemical composition of regional biomass feedstocks, the structural and physicochemical characteristics of the catalysts used, and bio-oil production efficiency. It also evaluated the influence of operating conditions, including temperature, heating rate, and reaction atmosphere. The review addressed gaps in the current state of the art, especially around industrial scalability and the adaptability of reactor configurations, such as fluidized-bed and batch reactors, to different lignocellulosic biomass profiles.

Through this integrated methodological approach, the study aimed to establish a robust theoretical foundation. This supports future experimental and applied research. It also enables the formulation of strategic pathways for the valorization of biomass resources in Bahia. The combination of a structured review protocol, advanced bibliometric analysis, and reference management tools ensured a comprehensive, technically sound assessment that aligns with contemporary scientific and technological demands.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The bibliometric analysis using VOSviewer provides a clear visualization of the scientific landscape of biomass valorization and highlights catalytic pyrolysis, catalytic conversion, and heterogeneous catalysis as central, highly interconnected research themes (Figure 3). The strong clustering around these concepts confirms catalytic pyrolysis as a key technological pathway for transforming lignocellulosic biomass into value-added platform molecules, including furfural, 5-hydroxymethylfurfural (HMF), levulinic acid, and 5-methylpyrrolidone.

Figure 3 - Vosviewer Bibliometric network highlighting the central role of catalytic pyrolysis and zeolitic catalysis in lignocellulosic biomass valorization and platform molecule production



Within this network, zeolitic catalysts—particularly ZSM-5—show the strongest correlation with catalytic pyrolysis and platform molecule formation. This strong association reflects the well-established role of zeolite acidity, pore architecture, and shape selectivity in promoting essential reactions such as dehydration, decarboxylation, decarbonylation, cracking, and aromatization. These reactions are fundamental to the selective conversion of oxygen-rich pyrolysis vapors into hydrocarbon-rich streams and aromatics, which are highly valued by the chemical and energy sectors.

The VOSviewer map also reveals a close linkage between catalytic pyrolysis and final products such as biofuels, aromatic hydrocarbons, hydrogen for energy applications, and activated carbon. This connectivity underscores the alignment between current research efforts and industrial demand for renewable fuels and chemicals, reinforcing the relevance of catalytic pyrolysis as a core process within emerging biorefinery concepts.

From a feedstock perspective, the results indicate that the efficient production of platform molecules in Brazil depends on selecting biomass resources with high cellulose and

hemicellulose content, as these fractions are directly associated with the formation of HMF and furfural, respectively. In parallel, product yield and quality are governed by careful control of pyrolysis operating conditions. Intermediate temperature regimes, combined with precise control of heating rate and residence time, favor the formation of upgraded bio-oil and minimize undesired secondary reactions. In this context, batch and fluidized-bed reactors emerge as particularly suitable configurations, offering the operational flexibility and process control required to accommodate the compositional diversity of regional biomass feedstocks.

Among the catalysts identified, ZSM-5 stands out as the most suitable material for biomass valorization due to its thermal stability, tunable acidity, and well-defined microporous structure. These characteristics enable high selectivity toward aromatic compounds and deoxygenated products. Furthermore, incorporating metal oxides provides an additional degree of freedom for catalyst design, enabling modulation of redox and acid–base properties to target specific product slates. This flexibility is especially relevant for tailoring catalytic systems to the physicochemical characteristics of biomass resources available in Bahia.

Based on regional availability and compositional suitability, *Agave sisalana*, macaúba, and sugarcane—particularly sugarcane bagasse—emerge as the most promising feedstocks for catalytic pyrolysis in Bahia. Sugarcane bagasse benefits from large-scale availability as an industrial residue and a high lignocellulosic content, making it an attractive and economically viable option. In contrast, other crops such as soybean, corn, cotton, cocoa, and oil palm, despite their abundance, are more constrained by their strong integration into food and textile supply chains, limiting their allocation to energy conversion routes.

Agave sisalana presents a particularly attractive opportunity due to its high resistance to semi-arid conditions and its current underutilization in low-value applications. Similarly, macaúba combines a favorable lignocellulosic composition with an emerging market, positioning it as a promising candidate for thermochemical and catalytic routes aimed at the production of advanced biofuels and high-value chemicals.

Overall, integrating advanced catalytic materials, catalytic pyrolysis technologies, and strategically selected regional biomass feedstocks offers a coherent, sustainable pathway to the production of renewable fuels and chemicals. This approach not only enhances the valorization of local resources but also supports economic development and the energy transition in Bahia, positioning the region as a relevant biomass hub within the broader bioeconomy.

5. CONCLUSIONS

This review consolidates catalytic pyrolysis as a strategically relevant pathway for the valorization of lignocellulosic biomass resources available in Bahia, positioning it as a viable route for the sustainable production of renewable fuels and value-added chemicals. By integrating bibliometric analysis with a critical assessment of biomass composition, catalyst functionality, reactor configurations, and operating conditions, the study demonstrates that product yield, selectivity, and quality are strongly governed by the interplay between feedstock properties and catalytic process design.

The analysis identifies the Center-North mesoregion and the Metropolitan Region of Salvador as particularly favorable areas for the deployment of catalytic pyrolysis, given the availability of sugarcane, macaúba, and sisal. These feedstocks exhibit high cellulose

and hemicellulose contents, which are directly associated with the formation of key platform molecules and upgraded bio-oil fractions. The findings further highlight the critical influence of intrinsic biomass characteristics—such as ash and moisture contents—on process performance. While inorganic ash components may induce undesired side reactions, excessive moisture reduces overall energy efficiency and compromises bio-oil quality, underscoring the need for effective pretreatment strategies.

From a catalytic perspective, zeolite-based materials, especially ZSM-5, emerge as benchmark catalysts due to their thermal stability, tunable acidity, and well-defined pore architecture, which collectively promote deoxygenation, cracking, and aromatization reactions. The incorporation of metal oxides offers additional opportunities to tailor catalyst functionality, enabling enhanced deoxygenation and improved control over product distribution to meet the specific demands of the chemical and energy sectors.

Despite the demonstrated potential of catalytic pyrolysis, the transition from laboratory and pilot scales to industrial implementation remains a critical challenge. Progress in reactor scalability, catalyst lifetime, and adaptability to heterogeneous biomass feedstocks is essential. Fluidized-bed and batch reactor configurations offer significant advantages in terms of operational control and flexibility; however, their industrial deployment requires robust reactor designs, efficient heat and mass transfer, and integrated process optimization to ensure economic viability.

Overall, the strategic integration of advanced catalytic materials, optimized pyrolysis technologies, and regionally abundant biomass resources provides a coherent framework for strengthening Bahia's bioeconomy. This approach contributes to greenhouse gas emission reductions, supports circular economy principles by valorizing lignocellulosic residues, and reinforces the energy transition. Consequently, Bahia holds strong potential to evolve into a competitive biomass hub capable of supplying renewable, low-carbon fuels and chemicals to both national and global markets, representing a significant economic and environmental opportunity.

REFERENCES

- [1] ALMEIDA, Larissa (2024) **Saiba como a macaúba será utilizada para a produção de biocombustíveis na Bahia**. Disponível em: <<https://www.correio24horas.com.br/agenda-bahia/saiba-como-a-macauba-sera-utilizada-para-a-producao-de-biocombustiveis-na-bahia-0824>>. Acesso em: 30 out. 2024.
- [2] ALMEIDA, Marlon (2008) **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gás-óleo em craqueamento catalítico**. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://186.202.79.107/download/bio-oleo-a-partir-da-pirolise-rapida.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [3] BARROS, Talita ; JARDINE, José (2023) **Macaúba: matéria-prima para biodiesel**. EMPRAPA. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel/materias-primas/macauba>. Acesso em: 02 nov. 2024.
- [4] BLAMONT, Emmanuel; VARGENS, José; TORRES, Pedro; MENDONÇA, Jackson. (2002). O Semi-árido da Bahia: problemas, desafios e possibilidades. **Revista do Semiárido**, v. 5, n. 2, p. Disponível em: http://www.seagri.ba.gov.br/sites/default/files/v5n2_semiarido.pdf. Acesso em: 13 nov. 2024.
- [5] BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2023). **Fávaro visita polo de fruticultura no Vale do São Francisco e conversa com produtores rurais**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/favaro-visita-polo-de-fruticultura-no-vale-do-sao-francisco-e-conversa-com-produtores-rurais>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- [6] COLLARD, F. X., & Blin, J. (2014). A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and

composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. In **Renewable and Sustainable Energy Reviews** (Vol. 38, pp. 594–608). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.013>

- [7] CUNHA, Tony Jarbas Ferreira (2021). **Clima e relevo**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Clima e Relevo, Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/carcateristicas-do-territorio/recursos-naturais/clima-e-relevo>. Acesso em: 4 out. 2024.
- [8] DADA, Tewodros; SHEEHAN, Madoc; MURUGAVELH, S.; ANTUNES, Elsa (2021).
- [9] **A review on catalytic pyrolysis for high-quality bio-oil production from biomass**. *Biomass Conversion and Biorefinery*, [S.l.], v. 11, n. 10, p. 3761-3780. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01391-3>. Acesso em: 02 nov. 2024.
- [10] FÁVARO, Simone; ROCHA, José (2022). **A nova cadeia produtiva da macaúba para bioprodutos e descarbonização**. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1149154/a-nova-cadeia-p-rodutiva-da-macaua-para-bioprodutos-e-descarbonizacao>. Acesso em: 02 nov. 2024.
- [11] FELTRAN, José; LOSADA, Teresa; LIMONTA, Cassia Regina; AGUIAR, Eduardo; ANEFALLOS, Lilian (2017). **Potencial da cultura da mandioca para bioenergia**. Instituto Agronômico de Campinas. Disponível em: <https://oagronomico.iac.sp.gov.br/?p=27#:~:text=A%20mandioca%20%C3%A9%20uma%20esp%3%A9cie,ha%2Fano%20de%20mat%3%A9ria%20seca>. Acesso em: 13 nov. 2024.
- [12] FERREIRA, Nathália de Lima. **Pirólise de biomassa lignocelulósica utilizando diferentes catalisadores para produção de bio-óleo** (2014). 120 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Química. Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/SFSA-9JLURF>. Acesso em: 13 nov. 2024.
- [13] FRANÇA, Samuel; MENEZES, Rômulo ; DUTRA, Emmanuel; SANTOS, Edvaldo; SILVA, Samuel; SILVA, SOUSA, Maria; Elias; SALES, Aldo ; SAMPAIO, Everardo (2022). **Biomassa, energia e desenvolvimento na região Nordeste do Brasil: Histórico e perspectivas**. Disponível em: <https://revistainovacao.facepe.br/index.php/revistaFacepe/article/view/93>. Acesso em: 8 set. 2024
- [14] INTERNATIONAL ZEOLITE ASSOCIATION. **Zeolite Database Help** (2024). Disponível em: https://europe.iza-structure.org/IZA-SC/DatabaseHelp_Structures.html. Acesso em: 22 nov. 2024.
- [15] IUPAC. **Pyrolysis** (2007). In: IUPAC Compendium of Chemical Terminology. 3. ed. Online version 3.0.1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1351/goldbook.P04961>. Acesso em: 13 nov. 2024.
- [16] JUNIOR, Ferraz (2022) “Série Energia”: Mais de 80% da matriz energética vêm de recursos fósseis. **Jornal da USP**, São Paulo. Disponível em: <https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/serie-energia-mais-de-80-da-matriz-energetica-vem-de-recursos-fosseis/>. Acesso em: 10 set. 2024
- [17] KABBOUR, Mario; LUQUE, Rafael (2020). **Furfural as a platform chemical: from production to applications**. In: GUO, Xianglin et al. (Org.). *Furfural: Production, Chemistry, and Applications*. Cordoba: Elsevier B.V., Cap. 10, p. 221-248. DOI: 10.1016/B978-0-444-64307-0.00010-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978044464307000010X>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- [18] KELLES, Maria; BISCARO, André (2017). **O uso da biomassa de origem agrícola – a soja e o milho**. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS (CONAPESC). Anais [...]. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2017/TRABALHO_EV070_MD1_SA16_ID1307_02052017223604.pdf. Acesso em: 22 nov. 2024.
- [19] LEVENSPIEL, O. Engenharia das reações químicas. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- [20] LIMA, João (2021). **Obtenção de compostos químicos a partir de fontes renováveis utilizando o 5-HMF como intermediário**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021. Disponível em: http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/41679/1/2021_Jo%C3%A3oPedroVieiraLima.pdf. Acesso em: 18 nov. 2024.
- [21] MARAFON, Anderson; NUNES, Maria; AMARAL, André; SANTOS, Jonas (2019). **Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica: potencialidades e desafios**. 70 f. Empresa

Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Tabuleiros Costeiros), Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/210127/1/DOC-234.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2024.

[22] MONTEIRO, Rosana ;SOUSA, Ana; PEREIRA, Maria (2022). **Prevenção de infecções crônicas de Pseudomonas aeruginosa em fibrose quística: o ácido aspártico como terapia adjuvante de tobramicina**. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/92976>. Acesso em: 24 out. de 2024

[23] MITSUHARA, Ariane (2021). **Revisão Sobre O Potencial De Produção De Etanol De Segunda Geração A Partir Da Palha De Cana De Açúcar**. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Instituto de Química – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/fb06cd5e-ba15-4d1f-bac6-0b8d220e0de8/content>. Acesso em: 10 set. 2024

[24] MORAES, Marília (2017). **Pirólise catalítica de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/28387>. Acesso em: 10 set. 2024

[25] NISHU, Ronghou; RAHMAN, Maksudur.;SARKER, Manobrendo; CHAI, Meiyun.; LI, Chong; CAI, Junmeng (2019). A review on the catalytic pyrolysis of biomass for the bio-oil production with ZSM-5: Focus on structure. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 141, p. 45-59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106301>.

[26] NOVACANA. **Macaúba: planta promete ser uma alternativa para a produção de biocombustíveis** (2023). Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/macaua-planta-vez-producao-biocombustiveis-2> 51023. Acesso em: 13 out. 2024

[27] OLIVEIRA, Carlos; MÜLLER, Júlia; OLIVEIRA, Patrícia; SILVA, Afonso; LEAL, Tarcísio (2023). **Resíduos da indústria de algodão: estratégias ecoresponsáveis para geração de bioenergia**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA AGROINDÚSTRIA. Anais [...]. Disponível em: <https://ciagro.institutoidv.org/ciagro2023/uploads/236.pdf>. DOI: 10.31692/2764-3425/v4i1.415. Acesso em: 22 nov. 2024.

[28] PUHL, B (2024). **Bio-óleo e carvão a partir do processamento hidrotérmico da serragem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Santa Maria, 2024. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFSM_2dd6b229e7a998597ff603a4bb915799. Acesso em: 26 out. 2024.

[29] PURI, Lokeshwar; HU, Tracy; NATERER, Greg (2024). **Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis**. *Frontiers in Fuels*, v. 2, p. 1378361. DOI: 10.3389/ffuel.2024.1378361. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/fuels/articles/10.3389/ffuel.2024.1378361/full>. Acesso em: 13 nov. 2024.

[30] QIU, Bingbing; TAO, Xuedong; WANG, Jiahao; LIU, Ya; LI, Sitong; CHU, Huaqiang (2022). Research progress in the preparation of high-quality liquid fuels and chemicals by catalytic pyrolysis of biomass: A review **Energy Conversion and Management**, v. 268, p. 115647, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115647. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115647>. Acesso em: 13 nov. 2024.

[31] RAJENDRAN, Karthik (2017). Effect of moisture content on lignocellulosic power generation: energy, economic and environmental impacts. **Journal of Engineering**, v. 5, n. 4, p. 78, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/5/4/78>. Acesso em: 13 nov. 2024.

[32] RANGEL, Maria.; MAYER, Francieli, M.d.S.;SABOIA,Giovanni.; SILVA, Mateus; Motta, Arthur (2023). **Selecting Catalysts for Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass**. *Biomass* 2023, 3, 31–63. <https://doi.org/10.3390/biomass3010003>. Acesso em: 28 out. 2024

[33] RIAL, Rafael (2024). Biofuels versus climate change: Exploring potentials and challenges in the energy transition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 196, 114369. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2024.114369>

[34] SALMA, Alaa., DJELAL, Hayet, ABDALLAH, Rawa, FOURCADE, Florence; AMRANE, Abdeltif (2021).

[47] WANG, Wenli; GU, Yaxin; ZHOU, Chengfen; & HU, Changwei (2022). **Current Challenges and Perspectives for the Catalytic Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass to High-Value Products**. In *Catalysts* (Vol. 12, Issue 12). MDPI. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal12121524>

[48] WANDERLEY, Lívio; SANTOS, Nanety; PORTUGAL, Wellyngton (2014). Um estudo de dinamismos setoriais por mesorregiões do Estado da Bahia, no intervalo entre 2006 e 2012, através do modelo shift-share analysis. **Revista RENE**, v. 8, n. 1, p. 1-10, jan.-jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.9771/1516-9022rene.v8i1.15343>. Acesso em: 22 nov. 202

Capítulo 4

Detecção do nível de água de uma câmara utilizando uma webcam

Diêgo Rodrigues de Resende

Mário Cupertino da Silva Júnior

Leonardo Carneiro Araújo

Resumo: Este trabalho teve como objetivo identificar o nível de água em uma câmara utilizando processamento de imagem. O projeto consistiu na aplicação e análise de técnicas de processamento de imagem para realçar o nível da água e tornar possível sua identificação. Para acompanhamento, análise e controle dos dados de nível nesta câmara, desenvolveu-se um sistema supervisor.

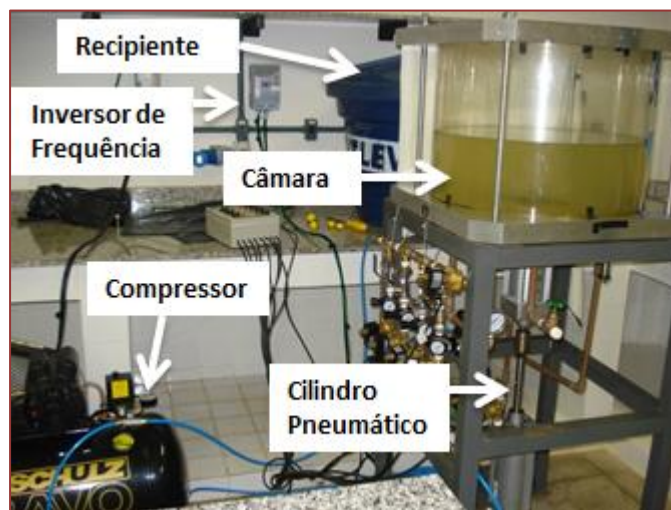
Palavras-chave: processamento de imagens, câmara hiper-hipobárica, sistema supervisor.

1. INTRODUÇÃO

A hidrelétrica é a forma mais utilizada no país para a obtenção de energia elétrica, porém as usinas causam fortes impactos ambientais e um deles é a mortandade de peixes. As turbinas das hidrelétricas geram uma forte descompressão que ataca qualquer indivíduo que as atravesse, essa súbita variação de pressão gera diferentes lesões nos peixes, conhecidas como barotrauma [1]. Com o intuito de estudar esse fenômeno nos peixes e propor soluções para esse problema, o Laboratório de Saneamento e Estudos Ambientais do Campus Alto Paraopeba possui uma planta piloto capaz de simular este efeito da variação de pressão gerada por uma turbina hidrelétrica.

O equipamento é basicamente formado por uma câmara hiper-hipobárica capaz de suportar até 5 bar, a pressão no interior dessa câmara pode ser bruscamente alterada devido à existência de um cilindro pneumático acoplado à sua parte inferior. Em turbinas de usinas de grande porte, a pressão pode atingir valores superiores a 20 bar. Contudo, estudos indicam que variações de pressão da ordem de 2 a 5 bar já são suficientes para provocar barotrauma em peixes. Para movimentar o cilindro existe um compressor de ar e válvulas devidamente instaladas. Já o fluxo de água no interior da câmara é feito por uma bomba d'água e um recipiente de água dedicado ao sistema. A bomba é acionada por um inversor de frequência que também faz parte da planta. A Figura 1 mostra o sistema e destaca os principais componentes.

Figura 1. Câmara hiper-hipobárica da UFSJ



Para a realização do experimento de descompressão os seguintes passos são seguidos:

- Com a câmara ainda aberta é colocado um quantidade de água que atinja aproximadamente 18 cm de nível, em seguida os peixes são inseridos, geralmente uma média de 10 peixes.
- A câmara é lacrada e a entrada de água é liberada, como o tanque está lacrado a entrada de água aumenta a pressão interna da câmara.
- No momento em que a pressão na câmara atinge o valor desejado o registro de saída de água é aberto, isso é feito para tornar a pressão no tanque constante, ou seja, é desejável que o fluxo de água que entra seja igual ao que sai.

- Com a pressão constante, o nível de água também deve permanecer estável. Quando variações são detectadas, os fluxos de entrada ou saída devem ser ajustados com o intuito de restabelecer o nível. Este acompanhamento deve ser mantido durante todo o período de aclimação dos peixes à nova condição de pressão, que tem duração de 10 horas.
- Após a aclimação completa-se a câmara com água e a pressão interna no tanque é bruscamente alterada, isso é feito pelo pistão instalado na parte inferior da câmara. Primeiramente a pressão é aumentada para um valor estipulado pelo operador, em seguida é feita a descompressão.
- Finalmente a pressão é liberada através de uma válvula na parte superior. A câmara é aberta e os peixes são retirados e abertos para análise das lesões sofridas pela descompressão.

Como pode ser notado na descrição do experimento o nível de água presente na câmara deve ser monitorado, e atualmente esse nível é medido manualmente por uma pessoa com uma fita métrica. Com o intuito de aperfeiçoar a leitura desse nível, deseja-se automatizar essa tarefa. A visão computacional foi a alternativa encontrada devido à inviabilidade do uso de um sensor de nível convencional no interior da câmara, uma vez que esta deve ser hermeticamente lacrada e submetida a fortes variações de pressão. Como a câmara é transparente, a utilização de imagens tornou-se uma solução promissora para a medição do nível de água, sendo sua eficácia dependente da câmara utilizada e das técnicas de processamento empregadas.

1.1. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de monitoramento do nível de água na câmara hiper-hipobárica, por meio de visão computacional utilizando uma webcam, integrado a um sistema supervisor. A informação de nível será utilizada nos experimentos de descompressão com peixes e poderá futuramente ser empregada na automação do controle do fluxo de água na câmara..

2. METODOLOGIA

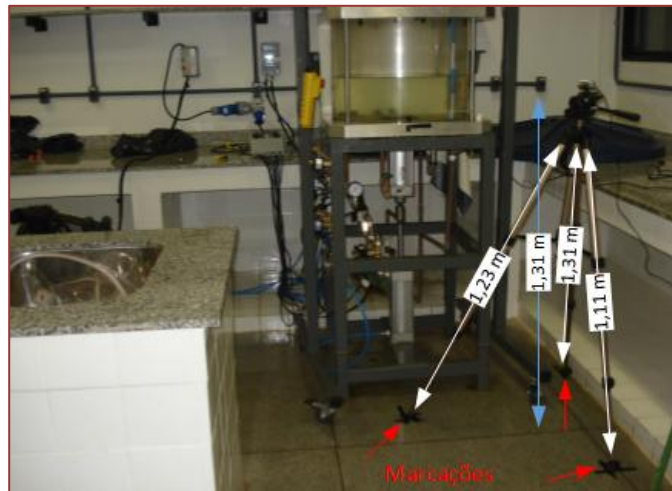
A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho pode ser dividida em quatro etapas, sendo estas apresentadas a seguir:

A. Aquisição de Imagem

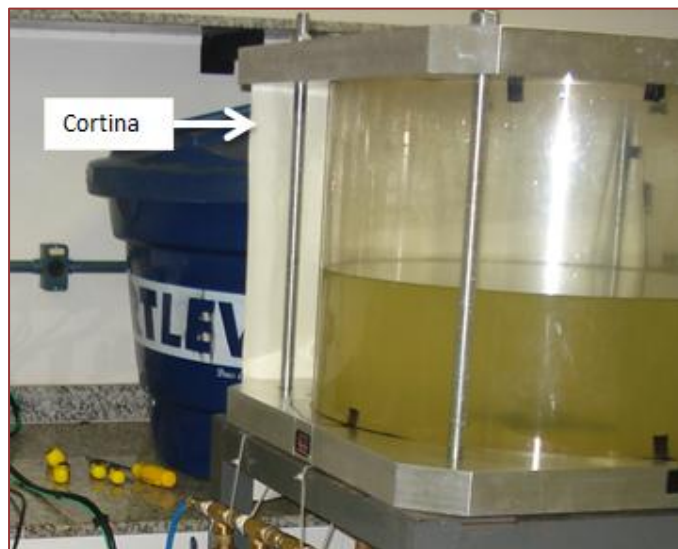
A aquisição de imagem foi feita no Laboratório de Saneamento e Estudos Ambientais do Campus Alto Paraopeba, onde a câmara de descompressão está localizada. Para realizar a captura de imagens, uma webcam com resolução igual a 2 megapixels foi utilizada, sendo esta fixada em um tripé como mostrado na figura 2.

A câmera foi posicionada em diferentes locais e orientações com o intuito de avaliar o efeito da sua localização, relativa à câmara, nas imagens obtidas e no respectivo processamento para identificação do nível.

O posicionamento adequado — aquele que permitiu a detecção confiável do nível em diferentes condições de iluminação do ambiente, seja durante o dia ou à noite — foi fixado por marcação no piso do laboratório, e as alturas de cada pé do tripé foram registradas para garantir a reprodutibilidade do experimento. Veja a Figura 2.

Figura 2. Posicionamento da webcam

O tanque da câmara é feito de acrílico o que possibilita ver através deste, assim quando a webcam é posicionada ela pode captar objetos presentes atrás do tanque, como estes objetos podem interferir na detecção do nível de água, uma cortina branca foi colocada na parte traseira do tanque, como mostrado na Figura 3.

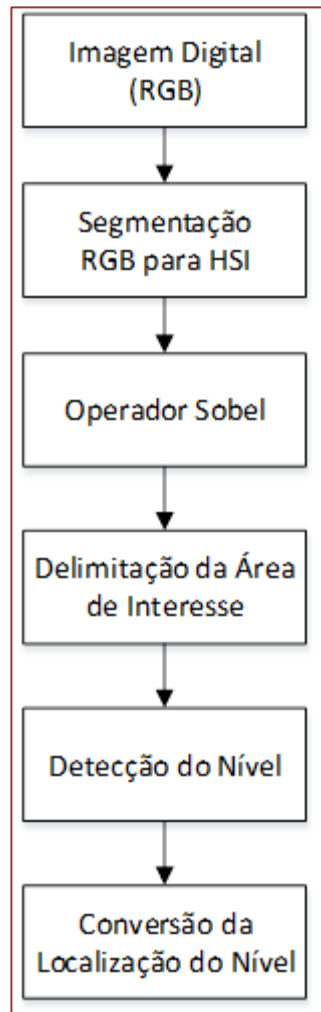
Figura 3. Cortina instalada no tanque

B. Processamento de Imagem

Uma imagem digital pode ser entendida como uma função bidimensional $f(x, y)$, onde x e y são as coordenadas espaciais do pixel, menor elemento da imagem, e f é a intensidade da imagem naquele ponto. Quando composta por coordenadas e intensidades finitas a imagem é dita digital [2]. A manipulação por computador de uma imagem digital com o intuito em obter uma imagem de saída na qual se possa identificar com maior facilidade padrões de interesse é chamada de processamento de imagens digitais. Esse processo é

muito utilizado nos mais variados tipos de aplicações e é uma alternativa muito interessante quando o uso de sensores não é possível ou inviável. No presente trabalho o processamento de imagem será utilizado para tornar o nível de água o mais visível possível, facilitando sua detecção. Este processamento foi feito utilizando o software LabView da National Instruments, de acordo com os passos mostrados no diagrama apresentado na Figura 4.

Figura 4. Diagrama de processamento de imagem



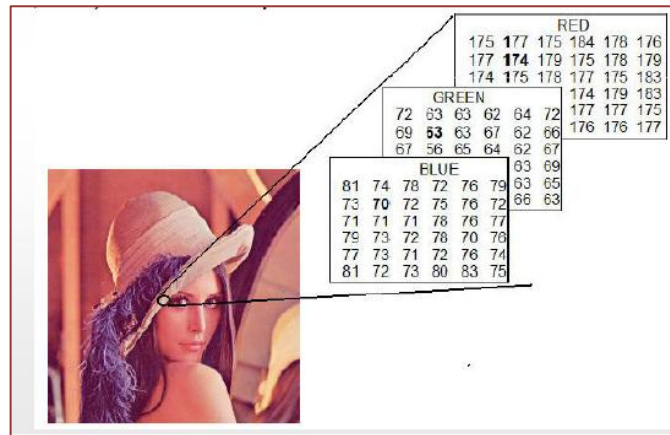
- *Imagem Digital (RGB)*

A Webcam utilizada no trabalho fornece uma imagem com dimensão 640x480 e formato RGB, porém para captar o nível de água é necessário que esta imagem seja tratada, isto é, manipulada para realçar o contraste existente no nível.

Como definido anteriormente uma imagem pode ser entendida como uma matriz e os elementos desta matriz são os pixels e o valor de cada pixel denota a intensidade de cor naquele ponto. Porém uma imagem colorida é formada pela combinação de três matrizes (veja a Figura 5), ou seja, três imagens com os planos de cores bases, que são vermelho, verde e azul (RGB – Red, Green and Blue), assim é necessário que seja extraído dessa

imagem somente a parte mais relevante para o problema.

Figura 5. Imagem colorida com destaque para os planos de cores



- *Transformação RGB para HSI*

A imagem RGB é convertida para o formato HSI (Hue, Saturation and Intensity), isso significa que após a conversão obteve-se três matrizes: uma de tonalidade, uma de saturação e uma de intensidade. A matriz de intensidade será empregada para a detecção de bordas, pois é nela que as bordas se manifestam de forma mais proeminente — as bordas correspondem a variações abruptas de brilho, que são captadas diretamente pelo canal de intensidade. As matrizes de matiz e saturação, por carregarem informação cromática, podem apresentar pouca variação nas regiões de borda, tornando-as menos adequadas para este fim. Essa característica é justamente a base de funcionamento dos filtros de bordas derivativos [3].

- *Operador Sobel*

Existem vários métodos de detecção de bordas, neste trabalho foram testados os métodos Robersts, Prewitt, Sobel e Canny, eles são conhecidos como filtros por derivadas. Eles calculam o gradiente da intensidade da imagem em cada ponto, assim conseguem determinar a direção da variação de claro para escuro e a quantidade de variação nessa direção.

Imagens foram adquiridas e submetidas ao processamento com todos os filtros citados acima, com o objetivo de identificar o mais eficiente para a detecção do nível da água. O filtro de Sobel foi o que apresentou melhor desempenho, detectando as bordas de forma mais nítida e consistente sob as diferentes condições de iluminação avaliadas. O operador Sobel é implementado através da convolução da imagem com duas máscaras, sendo uma para variações verticais (Equação 1) e uma para horizontais (Equação 2).

$$M_v = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

$$M_h = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Realizando as seguintes convoluções, onde I é a imagem:

$$V_v = M_v * I \quad (3)$$

$$V_h = M_h * I \quad (4)$$

Obtém-se a magnitude V do gradiente e o ângulo de direção Θ do vetor gradiente em relação ao eixo x :

$$V = \sqrt{V_v^2 + V_h^2} \quad (5)$$

$$\Theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_h}{V_v}\right) \quad (6)$$

Após passar pelo operador Sobel a imagem apresenta somente as bordas do ambiente, a Figura 6 mostra o antes e depois da aplicação do filtro Sobel.

- *Delimitação da Área de Interesse*

Em posse da imagem com as bordas destacadas é necessário a delimitação da região de interesse, na qual se deseja identificar uma forma, nesse problema uma “linha” horizontal que denota o nível da água. O software utilizado no processamento possui uma ferramenta chamada ROI (Region of Interest), ela possibilita delimitar uma área utilizando apenas o mouse. Após delimitada a área é possível executar ações somente naquela área da imagem. Na Figura 7 o retângulo verde denota a região de interesse, que é da base até o topo do tanque, possibilitando acompanhar qualquer nível de água.

- *Deteção do Nível*

O próximo passo após a delimitação da região é a identificação do nível de água, que neste projeto foi utilizado a transformada de Hough [4]. Esta transformada é um método capaz de identificar formas facilmente parametrizadas, como retas, círculos e elipses.

Figura 6. Imagem da câmara antes e depois do filtro Sobel

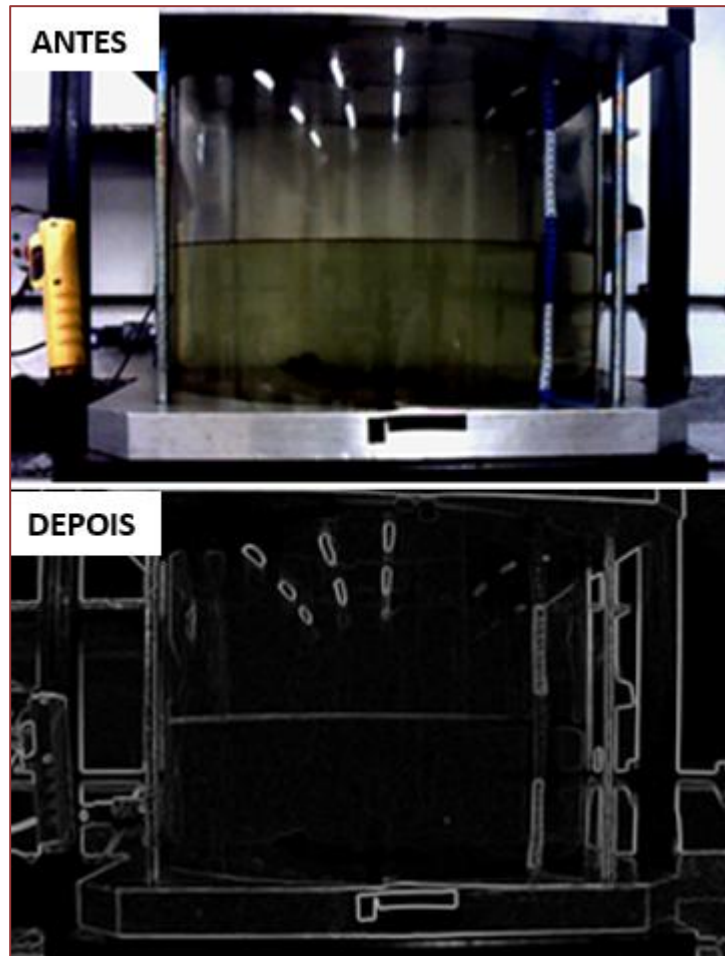
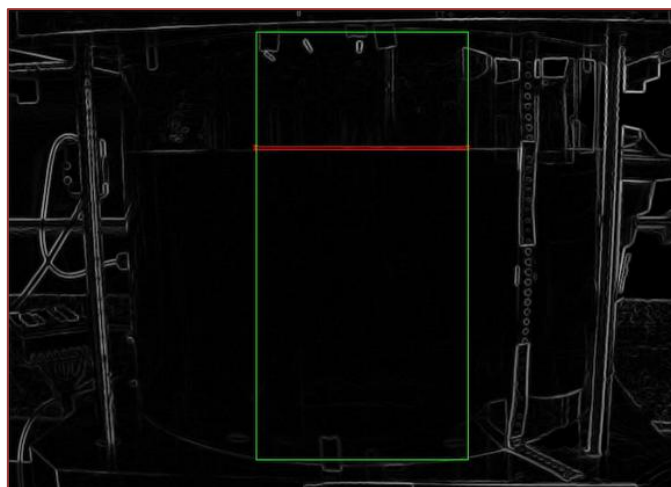


Figura 7. Região de interesse da imagem



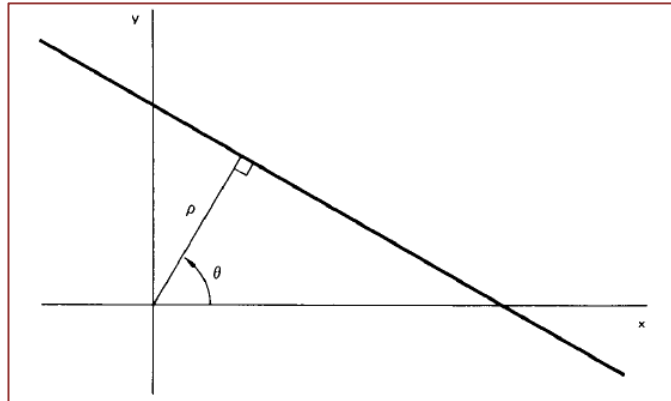
Para a identificação de retas a ideia é mapear todos os pontos pertencentes a uma mesma reta em apenas um ponto em um novo espaço paramétrico. Este método especifica uma linha reta pelo ângulo θ da sua normal e sua distância algébrica ρ da origem. A Equação 7

descreve essa geometria.

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (7)$$

Restringindo θ de 0 a π pode-se descrever qualquer linha no plano x - y com apenas um ponto no plano θ - ρ . Veja a Figura 8.

Figura 8. Parâmetros para identificação de uma linha [4]



O LabView possui uma função (Find Edge VI) que implementa a transformada de Hough, esta função retorna a localização da reta encontrada e a identifica na imagem, esta identificação pode ser vista na Figura 7 como uma linha vermelha sobre o nível da água.

- *Conversão da Localização do Nível*

A função Find Edge VI retorna a localização da reta em pixels, ela retorna as coordenadas x e y iniciais e finais da reta. Na Figura 9 os pontos representam os pixels de uma imagem, o retângulo verde a região de interesse e a linha vermelha o nível do tanque.

Como o nível do tanque deve ser dado em centímetros é necessária uma conversão de pixels para centímetros. É sabido que o tanque possui uma altura h , logo o retângulo verde deve possuir esta mesma altura, e sabendo que o nível da água é igual a n , então a variável a representa a distância entre o nível e o topo do tanque, o nível de água em pixels pode ser descrito pela Equação 8.

$$n = h - a \quad (8)$$

As variáveis h e a estão em função de pixels e são definidas de acordo com as equações 9 e 10.

$$h = y_{id} - y_{se} \quad (9)$$

$$a = \frac{y_i - y_f}{2} - y_{se} \quad (10)$$

Onde:

y_i coordenada vertical do primeiro ponto da reta de nível.

y_f coordenada vertical do segundo ponto da reta de nível.

y_{se} coordenada vertical superior esquerda do retângulo .

y_{id} coordenada vertical inferior direita do retângulo.

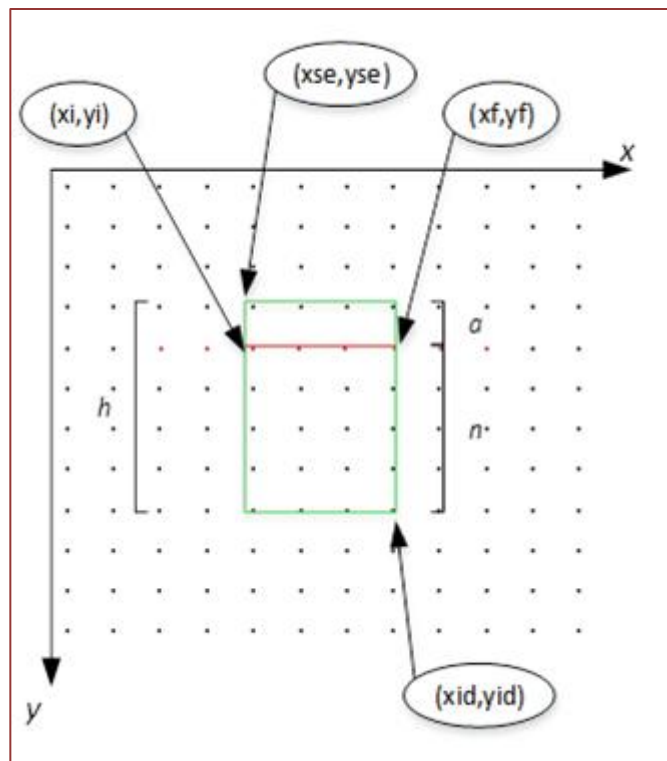
Sabendo que a altura real do tanque é igual a 40,5 cm a seguinte relação entre pixels e centímetros pode ser definida:

$$1 \text{ pixel} = \frac{40,5}{h} \text{ cm} \quad (11)$$

Logo o nível do tanque em centímetros será dado por:

$$n_{cm} = \frac{(h-a)40,5}{h} \quad (12)$$

Figura 9. Localização do nível na imagem



C. Sistema Supervisório

Além de conseguir obter o nível do tanque é necessário apresentar essa informação de maneira clara para o operador e dar a possibilidade de salvá-la para análises posteriores, por isso foi desenvolvido um sistema supervisório. Este também foi desenvolvido no LabVIEW, que é uma linguagem de programação gráfica amplamente utilizada na indústria, academia e laboratórios de pesquisa para aquisição de dados [5].

A tela principal do sistema supervisório esta apresentada na Figura 10, cada funcionalidade foi marcada com um número para melhor identificação durante a explicação.

Após inicializar o sistema e posicionar a câmera o passo seguinte é a determinação da região de interesse, isso é feito utilizando a funcionalidade 1 do sistema supervisório, esta funcionalidade desenha um retângulo com base em dois pontos, o usuário deve selecionar a ferramenta e escolher o ponto superior esquerdo do retângulo e arrastar o mouse até o ponto inferior direito do retângulo desejado, estes pontos estão destacados na Figura 10. A distância vertical entre estes pontos deve corresponder a altura do tanque, pois todo o cálculo de correspondência entre a distância real e a distância na imagem é feito com base na posição destes pontos, ou seja, um ponto deve estar no topo do tanque e o outro na base. A largura do retângulo não interfere diretamente no cálculo do nível, porém recomenda-se que seja próxima à indicada na Figura 10. Uma largura muito pequena pode não capturar a borda da superfície da água de forma completa, prejudicando a detecção pelo filtro de Sobel e pela Transformada de Hough. Por outro lado, uma largura excessiva pode incluir regiões com variações de intensidade irrelevantes, introduzindo bordas falsas e comprometendo a correta identificação da linha da superfície da água.

Com a região de interesse escolhida o sistema já é capaz de detectar o nível de água na câmara, esta informação é mostrada de maneira intuitiva através da funcionalidade 2, que tem o formato de um tanque. Em sua parte inferior é possível ver o nível em centímetros com precisão de uma casa decimal.

Geralmente no período de aclimação dos peixes na câmara, o operador determina um limite máximo e um mínimo onde o nível deve permanecer, caso algum destes não seja respeitado o operador deve realizar uma ação de controle de fluxo de água. Para facilitar a visualização destes limites a funcionalidade 3 permite a entrada de um limite inferior e um superior, assim toda vez que o algum destes não for respeitado o respectivo alarme na funcionalidade 4 irá acender. Além dos alarmes de nível inferior e superior, a funcionalidade 4 também apresenta o alarme de erro, toda vez que o sistema não for capaz de detectar o nível este alarme acenderá em vermelho, assim como os outros.

Com o intuito em identificar o experimento realizado o operador deve preencher cabeçalho de dados, estas informações estarão contidas no arquivo de dados gerado pelo sistema. Este preenchimento deve ser feito na funcionalidade 5, nela é possível entrar com título, nome do operador, descrição, data, horário e local onde o arquivo será criado. Depois de preencher todos os campos o operador deve clicar com o mouse sobre o botão “Confirmar Criação do Arquivo de Dados”.

Após ter realizado os procedimentos descritos anteriormente o operador pode inicializar o armazenamento dos dados, isto é, clicando com o mouse na funcionalidade 6, botão “Gravar Dados de Nível”. Ao iniciar a gravação uma mensagem confirmando aparecerá na funcionalidade 7, que é basicamente um display para mensagens. Para finalizar a

aggravação de dados o operador deve clicar sobre a funcionalidade 8, botão parar, e posteriormente sobre a funcionalidade 9, botão sair. É muito importante que a sequência para finalizar a gravação seja realizada corretamente, caso contrário erros podem acontecer.

As funcionalidades mostradas na Figura 10 são as principais, porém, existem outras telas com informações e controles secundários no sistema supervisorio. Na Figura 11 é possível notar duas novas abas secundárias do sistema, a aba Imagem Real que mostra a imagem captada pela câmera antes de ser processada e a aba Gráfico do Nível, esta apresenta em tempo real um gráfico do nível de água do tanque. Outras abas também presentes no sistema são as abas Relatório de Alarmes e Configurações, a primeira apresenta um histórico com o nome do alarme ativado, a hora e data de ocorrência, veja a Figura 12.

A aba Configurações mostrada na Figura 13 merece atenção especial, pois esta contém controles do processamento de imagem e qualquer alteração pode interferir no funcionamento do sistema. Na Figura 13 é possível observar que as configurações estão separadas em dois grupos de parâmetros e mais dois parâmetros separados, o primeiro grupo, “Opções do Detector de Contorno” especifica os parâmetros que são usados para computar as informações de gradiente de bordas e detectá-las.

Figura 10. Tela principal do sistema supervisorio com algumas marcações didáticas

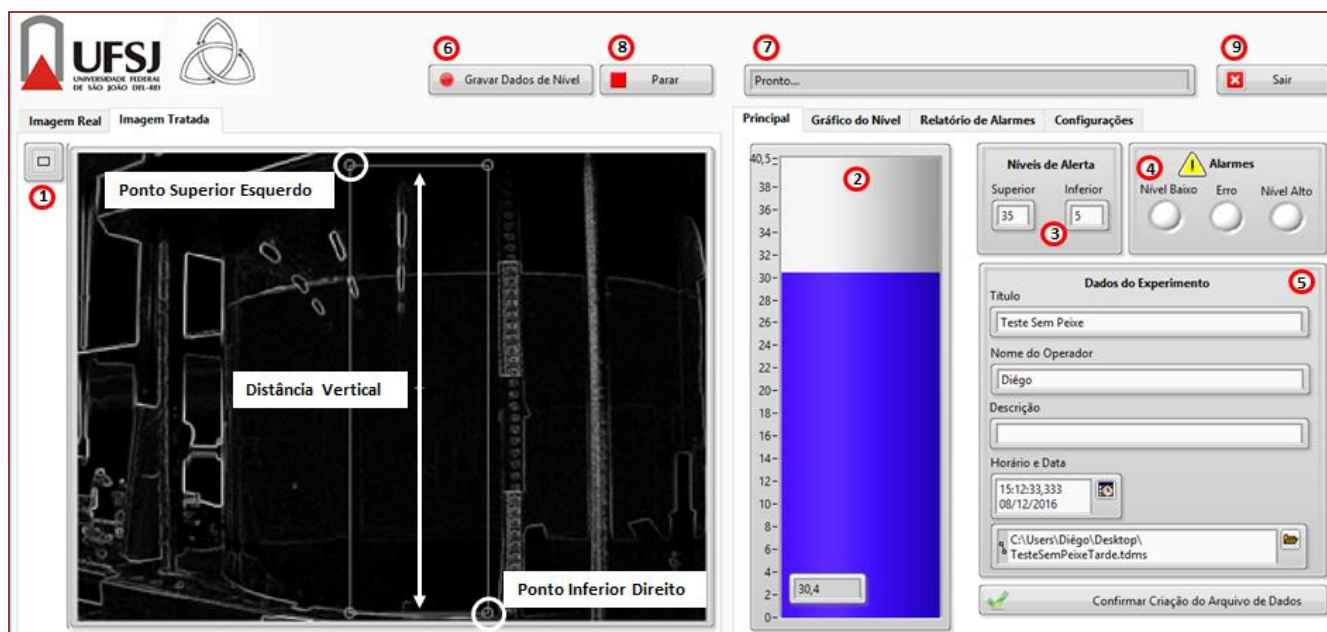


Figura 11. Telas secundárias do sistema supervisório

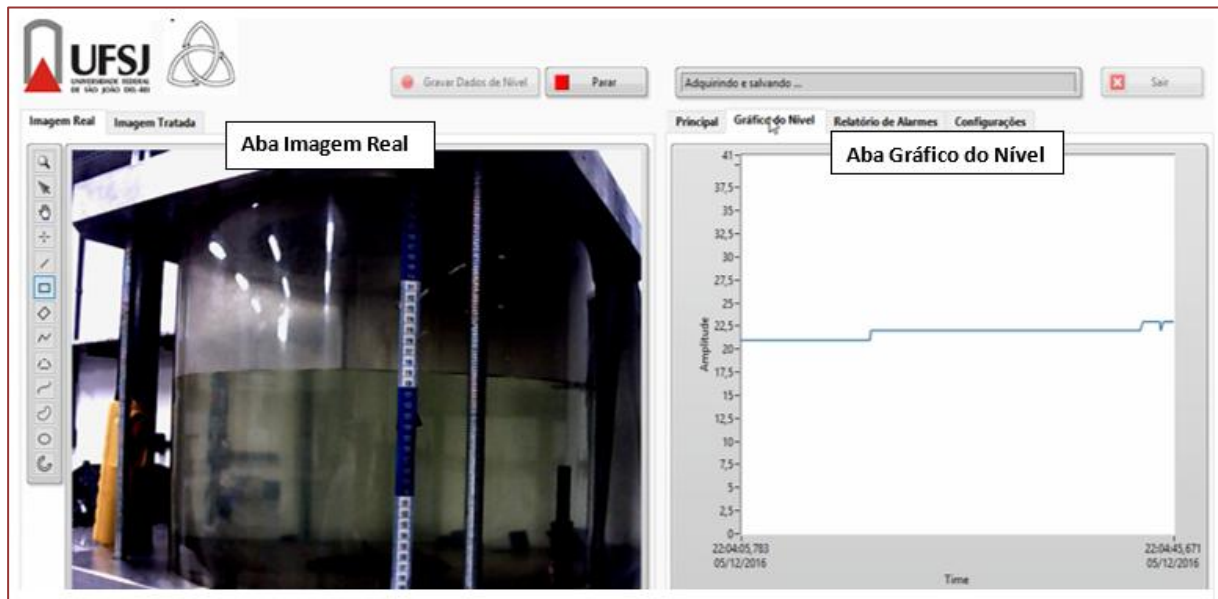


Figura 12. Relatório de Alarmes

Gráfico do Nível	Relatório de Alarmes	Configurações																																																																		
<table border="1"> <tr><td>Nível Baixo</td><td>09/12/2016</td><td>19:15:52</td></tr> <tr><td>Nível Baixo</td><td>09/12/2016</td><td>19:15:52</td></tr> <tr><td>Nível Baixo</td><td>09/12/2016</td><td>19:15:53</td></tr> <tr><td>Erro de Leitura</td><td>09/12/2016</td><td>19:16:28</td></tr> <tr><td>Erro de Leitura</td><td>09/12/2016</td><td>19:16:29</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:24</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:24</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:24</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:25</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:25</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:25</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:26</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:26</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:26</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:26</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:26</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:27</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:27</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:27</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:27</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:27</td></tr> <tr><td>Nível Alto</td><td>09/12/2016</td><td>23:59:28</td></tr> </table>			Nível Baixo	09/12/2016	19:15:52	Nível Baixo	09/12/2016	19:15:52	Nível Baixo	09/12/2016	19:15:53	Erro de Leitura	09/12/2016	19:16:28	Erro de Leitura	09/12/2016	19:16:29	Nível Alto	09/12/2016	23:59:24	Nível Alto	09/12/2016	23:59:24	Nível Alto	09/12/2016	23:59:24	Nível Alto	09/12/2016	23:59:25	Nível Alto	09/12/2016	23:59:25	Nível Alto	09/12/2016	23:59:25	Nível Alto	09/12/2016	23:59:26	Nível Alto	09/12/2016	23:59:26	Nível Alto	09/12/2016	23:59:26	Nível Alto	09/12/2016	23:59:26	Nível Alto	09/12/2016	23:59:26	Nível Alto	09/12/2016	23:59:27	Nível Alto	09/12/2016	23:59:27	Nível Alto	09/12/2016	23:59:27	Nível Alto	09/12/2016	23:59:27	Nível Alto	09/12/2016	23:59:27	Nível Alto	09/12/2016	23:59:28
Nível Baixo	09/12/2016	19:15:52																																																																		
Nível Baixo	09/12/2016	19:15:52																																																																		
Nível Baixo	09/12/2016	19:15:53																																																																		
Erro de Leitura	09/12/2016	19:16:28																																																																		
Erro de Leitura	09/12/2016	19:16:29																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:24																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:24																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:24																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:25																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:25																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:25																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:26																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:26																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:26																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:26																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:26																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:27																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:27																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:27																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:27																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:27																																																																		
Nível Alto	09/12/2016	23:59:28																																																																		

Os seguintes parâmetros podem ser alterados neste grupo:

Polaridade da Borda especifica a polaridade das bordas a ser encontradas (Rising Edges, Falling Edges e All Edges).

Tamanho do Kernel especifica o tamanho do kernel de detecção da borda.

Largura especifica o número de pixels em média perpendicular à direção de pesquisa.

Intensidade Mínima do Contorno especifica a menor intensidade requerida para que o contorno seja detectado.

Tipo de Interpolação especifica o método de interpolação usado para localizar a posição do contorno (Bilinear, Zero Order e Bilinear Fixed).

Método de Processamento de Dados é o método utilizado para processar os dados extraídos para a detecção de bordas (Average e Median).

Já o segundo grupo, “Opções de Ajuste de Linha” especifica as opções que são usadas para detectar as linhas retas. Os seguintes parâmetros podem ser alterados neste grupo:

Número de Linhas especifica o número de bordas retas para encontrar.

Tipo especifica o método usado para encontrar a borda retilínea (Hough Edge Rake, First Edge, Best Edge, First Edge Rake e Best Edge Rake).

Pontuação Mínima especifica o número mínimo de pontos da borda retilínea encontrada.

Pontuação Máxima especifica o número máximo de pontos da borda retilínea encontrada.

Orientação especifica a angulação em que se espera encontrar a borda retilínea.

Tolerância Angular especifica a precisão angular esperada da borda retilínea.

Tamanho do Passo especifica a distância em pixels entre as linhas de pesquisa usadas com o método de varredura.

Min. SNR (db) especifica a relação sinal/ruído mínima (SNR) dos pontos de borda usados para ajustar a borda retilínea.

Min. Pontos (%) especifica o número mínimo de pontos como uma porcentagem do número de linhas de pesquisa que precisam ser incluídas na borda reta detectada.

Iterações de Hough especifica o número de iterações usadas no método de Hough.

Já os dois parâmetros sem grupo são o **modo de cor** e o **método**, o primeiro define o formato de cor da imagem a ser usado para realizar o processamento, neste caso o HSI. O segundo define qual filtro utilizar para a detecção de bordas, o filtro Sobel foi o escolhido. O porquê da escolha destes últimos dois parâmetros foi discutido anteriormente no texto.

Figura 13. Aba de configurações do processamento de imagem

Principal **Gráfico do Nível** **Relatório de Alarmes** **Configurações**

Opções Detector de Contorno

Edge Options

Edge Polarity
▲ ▼ Rising Edges

Kernel Size
▲ ▼ 3

Width
▲ ▼ 3

Minimum Edge Strength
▲ ▼ 10,00

Interpolation Type
▲ ▼ Bilinear Fixed

Data Processing Method
▲ ▼ Average

Direção de Pesquisa
▲ ▼ Bottom to Top

☐ Mostrar Área de Pesquisa
☐ Mostrar Linhas de Pesquisa
☐ Mostrar Contornos Encontrados
☒ Mostrar Resultado

☐ Cor da Área de Pesquisa
☐ Cor das Linhas de Pesquisa
☐ Cor dos Locais de Borda
☐ Cor do Resultado

Grupo de Sobreposição
▲ ▼

Opções de Ajuste de Linha

Número de Linhas
▲ ▼ 1

Tipo
▲ ▼ Hough Edge Rake

Min. Score
▲ ▼ 10

Max. Score
▲ ▼ 1000

Orientação
▲ ▼ 0

Faixa de Ângulo
▲ ▼ 45

Tolerância de Ângulo
▲ ▼ 1

Tamanho do Passo
▲ ▼ 7

Min. SNR (db)
▲ ▼ 0

Min. Pontos (%)
▲ ▼ 25

Iterações de Hough
▲ ▼ 5

Modo de Cor
▲ ▼ HSI

Método
▲ ▼ Sobel

D. Validação do trabalho

Como no período de aclimação o nível de água mínimo no tanque é de 18 cm, quantidade necessária para acomodar os peixes antes de lacrar a câmara, os testes foram feitos a partir deste nível. Assim um fluxo pequeno de entrada de água foi mantido causando variações lentas no nível de água do tanque. Durante este período os dados gerados pelo sistema foram acompanhados e paralelamente mediu-se manualmente o nível do tanque com intervalos de um minuto, utilizando uma trena de medição.

A validação do trabalho será feita comparando o gráfico do nível de água no tanque gerado pelo sistema e o gráfico gerado através dos dados de nível coletados manualmente com uma trena de medição. Através dessa metodologia é possível saber se o sistema foi capaz de acompanhar as mudanças de nível e ao mesmo tempo se o nível captado realmente é o real.

Estes testes foram feitos em horários diferentes com o intuito em verificar o funcionamento do sistema em diferentes condições de luz. Também foi possível a realização de um teste com peixes no tanque, no entanto este teste ficou limitado a

variações pequenas de nível, pois os peixes faziam parte de um experimento de uma aluna de mestrado, dessa forma não era possível variar o nível para um teste mais elaborado.

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser apresentados de forma mais clara através dos gráficos comparativos obtidos, estes apresentam o nível medido manualmente e o nível medido pelo sistema, assim é possível verificar se o sistema foi capaz de detectar o nível corretamente e averiguar as diferenças entre os níveis.

Os gráficos das Figuras 14,15 e 16 apresentam o nível do tanque medido pelo sistema e manualmente durante os períodos da manhã, tarde e noite, respectivamente. Nota-se que o sistema foi capaz de detectar o nível nos três horários diferentes.

Figura 14. Gráfico do teste realizado pela manhã

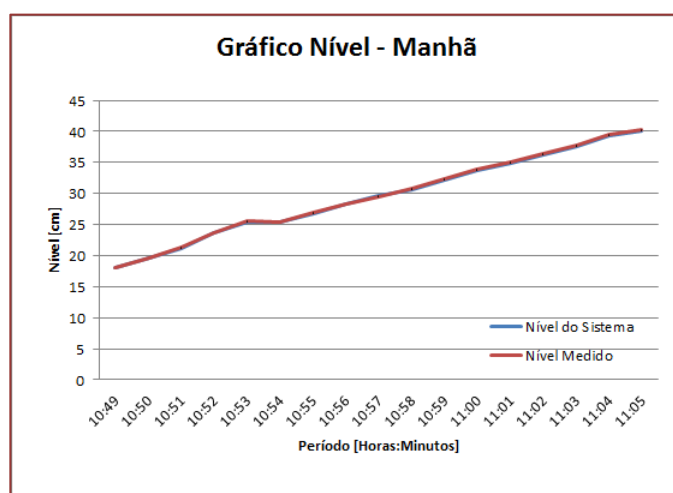
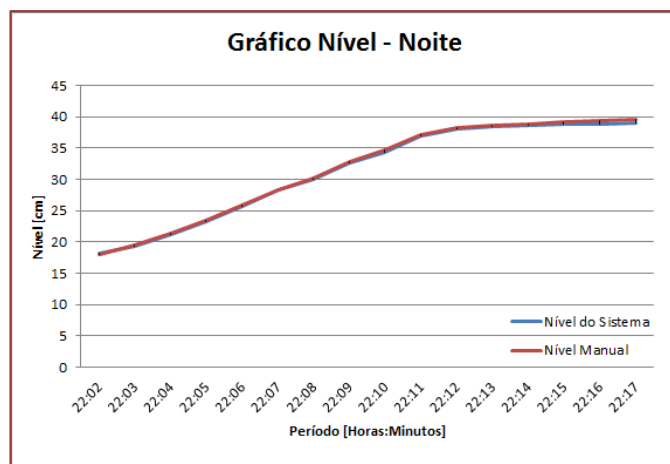


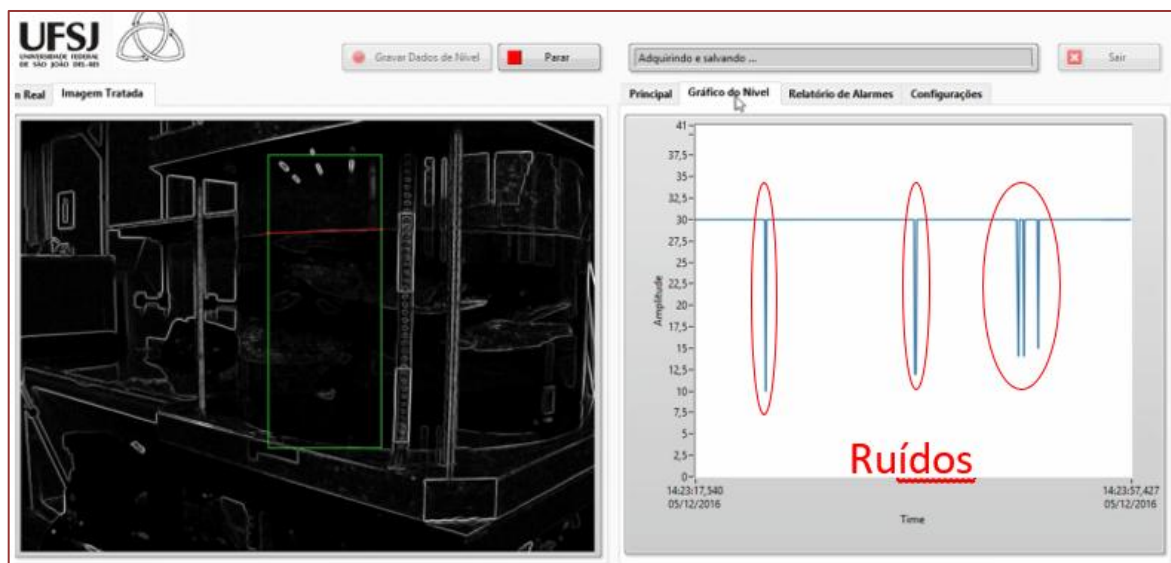
Figura 15. Gráfico do teste realizado à tarde



Figura 16. Gráfico do teste realizado à noite

Os gráficos anteriores comprovam que o sistema consegue identificar o nível, mas não deixam claro o erro em relação ao valor real, a média e a mediana do erro encontrado em cada situação testada foram calculadas e estão apresentadas abaixo:

- Teste realizado pela manhã
Média do erro: -0,1 cm
Mediana do erro: -0,1 cm
- Teste realizado pela tarde
Média do erro $\cong 0$ cm
Mediana do erro = 0,1 cm
- Teste realizado à noite
Média do erro: -0,1 cm
Mediana do erro: -0,1 cm

Figura 17. Teste com peixes no tanque

No teste realizado com peixes no tanque notou-se a presença de ruídos na detecção do nível, como mostrado na Figura 17. Estes ruídos foram captados nos instantes que os peixes passavam próximos ao acrílico e na região de captação de detecção de bordas, demarcada pelo retângulo verde mostrado na Figura 17. Porém, apesar do ruído apresentado o monitoramento do nível ainda pode ser feito com sucesso, pois os ruídos são pontuais e muito discrepantes do nível, estes estão em destaque na Figura 17.

4. CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos pode-se concluir que é possível fazer o monitoramento do nível de água na câmara utilizando uma webcam, pois a média de erro apresentada pelo sistema nos casos sem peixes na câmara e os ruídos apresentados no caso com peixes não comprometem o monitoramento do nível durante os testes de descompressão.

Conclui-se também que o sistema supervisório construído facilita o monitoramento por apresentar de maneira bem clara o nível e torna possível a análise de dados posteriormente os experimentos, pois salva os dados. O sistema supervisório também possibilita a adequação do sistema de captura de nível em caso de alterações de estrutura da câmara, pois permite configurar parâmetros do processamento de imagem.

Já pensando na utilização do sistema para a automação do controle do fluxo de água na câmara, seria necessário um aperfeiçoamento com o objetivo de eliminar os ruídos apresentados devido aos peixes. Em um sistema de controle estes ruídos podem gerar ações de controle equivocadas e comprometer experimentos de descompressão.

REFERÊNCIAS

- [1] B. V. Beirão, N. C. B. Marciano, L. S. Dias, R. C. Falcão, E. W. Dias, D. L. Fabiano, C. B. Martinez, L. G. M. Silva, R. Walker, R. Brown and Z. D. Deng. Barotrauma em peixes em usinas hidrelétricas: ferramentas para o estudo. *Boletim da Sociedade Brasileira de Ictiologia*, N° 115, páginas 26-36, Londrina, Setembro, 2015.
- [2] R. C. Gonzalez, R. E. Woods. *Digital Image Processing 3ª edição*, Pearson, 2007.
- [3] J. Trevis, J. Kring. *LabVIEW for Everyone: Grafical Programming Made Easy and Fun*, Prentice Hall, 2006.
- [4] R. O. Duda, R. E. Hart. Use of Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Pictures. *Communications of the ACM*, páginas 11-15, Menlo Park, California, Janeiro, 1972.
- [5] K. N. Plataniotis, A. N. Venetsanopoulos. *Color Image Processing and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [6] I.Hasan, M. Satzger, M. Sattler, R. Duester, T. Hies, E. Jose. An Effective Camera Based Water level recording Technology for Flood Monitoring. *Congress Office INTERPRAEVENT*, Lucerne, Suíça, 2016.

Capítulo 5

A importância da utilização do Power BI na construção de um dashboard de KPI no controle de qualidade de uma empresa

Guilherme do Canto Pereira

Moisés Teles Madureira

Resumo: A gestão da qualidade, particularmente no setor regulamentado como o de cosméticos e farmacêuticos, exige o monitoramento contínuo e assertivo do desempenho do laboratório e da cadeia produtiva. O presente artigo discute a importância estratégica da adoção de plataformas de Business Intelligence (BI), como o Microsoft Power BI, na construção de um *dashboard* de Key Performance Indicators (KPIs) no Controle de Qualidade (CQ) de uma Empresa do Segmento Cosmético. O estudo demonstrou que a integração de fontes de dados heterogêneas (como Dynamics AX, Excel e SharePoint) via Power BI transforma relatórios estáticos em uma ferramenta de gestão dinâmica e visual. KPIs críticos, como Lead Time de Liberação, Taxas de Reprovação e Status de Lotes (Aprovado, Abertos, Falha), tornam-se imediatamente acessíveis, permitindo que a liderança de CQ realize análises preditivas, tome decisões em tempo real e mantenha o foco no atingimento de metas operacionais. A visualização de dados proporcionada pelo BI é essencial para a proatividade na gestão da qualidade.

Palavras-chave: Gestão da Qualidade, Business Intelligence, Power BI, Indicadores de Desempenho (KPIs), Controle de Qualidade.

1. INTRODUÇÃO

O Controle de Qualidade (CQ), que abrange processos rigorosos como a validação de métodos analíticos (ANVISA, 2017; Leite, 2008), é um pilar insubstituível na indústria moderna. No entanto, a excelência na qualidade não se sustenta apenas pela conformidade técnica, mas também pela eficiência operacional na gestão dos processos. A necessidade de transformar grandes volumes de dados de CQ em informações estratégicas e acionáveis levou à adoção de soluções de Business Intelligence (BI).

Ferramentas de BI, como o Microsoft Power BI, representam a evolução da análise de dados, permitindo a consolidação, modelagem e visualização de informações de forma interativa e preditiva (Davenport e Harris, 2007).

Os Key Performance Indicators (KPIs) são métricas vitais que traduzem os objetivos estratégicos da organização em metas mensuráveis (Kaplan e Norton, 1996). No contexto de CQ, os KPIs monitoram desde o fluxo de materiais até a performance da liberação, sendo cruciais para a otimização de recursos e garantia de *throughput*.

O objetivo deste artigo é demonstrar, por meio de um estudo de caso em um Laboratório Farmacêutico/Cosmético, a superioridade da utilização do Power BI para a criação de um *dashboard* de CQ, destacando como essa plataforma resolve desafios de integração e visualização de dados oriundos de sistemas como o Dynamics AX e planilhas diversas.

2. A CONSTRUÇÃO DO DASHBOARD DE CQ COM POWER BI

O projeto de construção do *dashboard* de CQ demonstrou que o Power BI possui a capacidade de conectar e integrar diversas fontes de dados (planilhas de alimentação, BD PROD, SharePoint), superando a fragmentação de informações típica de setores que dependem de múltiplos *softwares* e registros manuais.

A plataforma permite a criação de um modelo de dados unificado, aplicando regras de negócio e cálculos complexos (como a fórmula do Lead Time Dias Úteis), garantindo que todos os usuários estejam acessando uma única fonte de verdade. A visualização é o fator transformador do BI: as métricas não são apenas números em uma tabela, mas sim gráficos e *cards* que comunicam instantaneamente tendências, gaps e status.

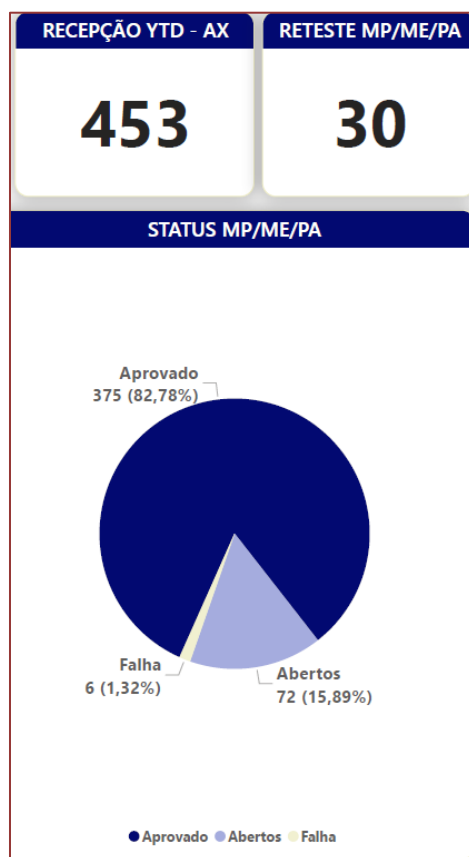
Os KPIs selecionados e monitorados no *dashboard* são essenciais para a saúde operacional do CQ:

2.1. KPIS DE EFICIÊNCIA E PRODUTIVIDADE

A visibilidade do throughput de materiais e produtos acabados é fundamental. O *dashboard* consolida a entrada e o processamento de lotes:

- **Recepções e Liberações** mensais.
- **Status** dos Lotes (Aprovado, Abertos, Falha) por categoria (Matéria-Prima, Material de Embalagem, PA/Granel), frequentemente apresentados em percentuais e com meta de *Falha* próxima a 0%.

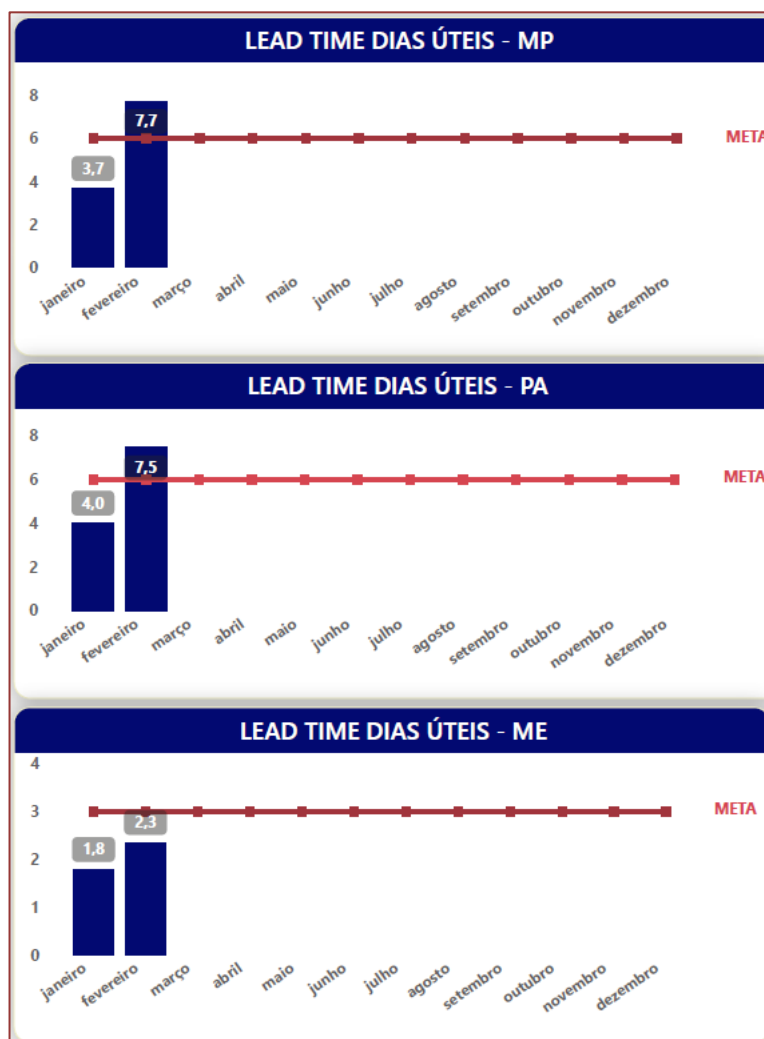
A visualização imediata desses indicadores permite ao gestor identificar gargalos e planejar a alocação de recursos (analistas, equipamentos) de forma preditiva.

Figura 1: Número de recepções e status dos itens

2.2. KPIS DE TEMPO DE RESPOSTA (LEAD TIME)

O Lead Time (LT) Dias Úteis é um dos KPIs mais estratégicos, pois afeta diretamente a cadeia de suprimentos e o lançamento de produtos. O *dashboard* exibe o LT para as diferentes linhas de frente: MP (Matéria-Prima), PA (Produto Acabado) e ME (Material de Embalagem).

A comparação gráfica do LT atual com a META permite uma gestão pró-ativa. A rejeição da META aciona imediatamente planos de ação para otimizar os tempos de amostragem, análise e liberação, reduzindo o capital de giro parado.

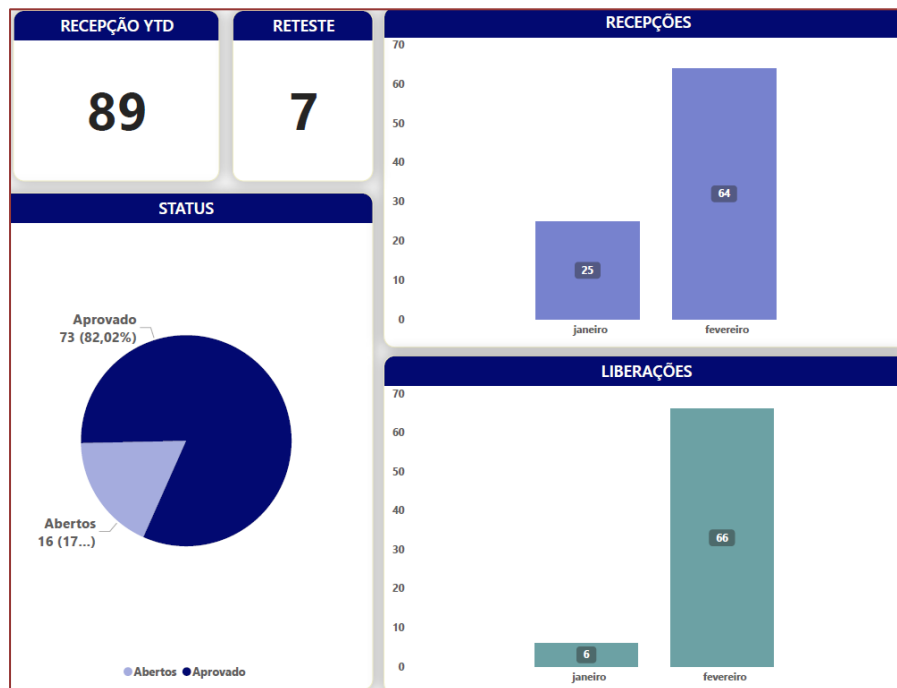
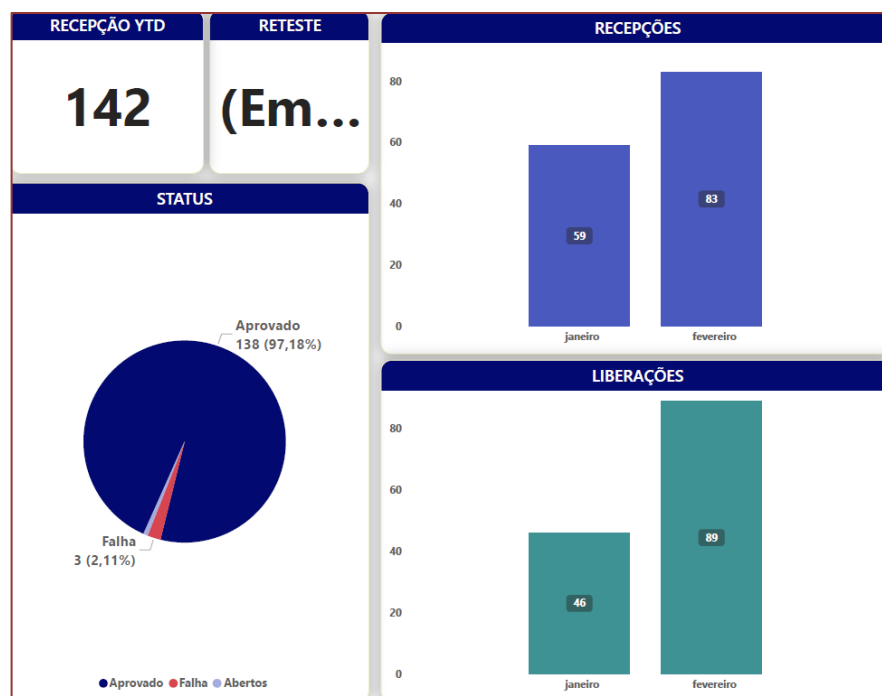
Figura 2: Lead-Time por linha de frente

2.3. KPIS DE QUALIDADE DO PROCESSO

O monitoramento da estabilidade do processo de CQ é feito por meio de:

- **Reteste:** Frequência e volume de lotes que exigem reanálise, indicando problemas na estabilidade dos materiais ou no próprio processo analítico.
- **Falhas/Reprovações:** Rastreamento da proporção de lotes rejeitados, correlacionando-a com as fontes de entrada para identificar fornecedores ou processos de fabricação problemáticos.

A capacidade do Power BI de criar filtros dinâmicos e drill-downs permite que o usuário identifique rapidamente as causas-raiz de uma alta taxa de Reteste ou Falha.

Figura 3: Dashboard de Reteste e Status Matéria-Prima**Figura 4:** Dashboard de Reteste e Status Material de Embalagem

3. CONCLUSÃO

A implementação do Power BI na construção de um *dashboard* de KPI para o Controle de Qualidade de uma empresa é uma decisão estratégica que alinha a gestão analítica à visão

do negócio. A plataforma transforma dados complexos e dispersos em informações claras e visuais, habilitando uma gestão proativa, data-driven e focada em resultados.

Ao fornecer visibilidade em tempo real sobre a eficiência (Lead Time, Liberações) e a qualidade (Taxa de Reprovação, Reteste), o Power BI não apenas atende às exigências de rastreabilidade de um setor regulamentado, mas também se torna uma vantagem competitiva crucial para o cumprimento de metas de *throughput* e o aumento da satisfação do cliente.

REFERÊNCIAS

- [1] ANVISA. Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 166, de 24 de julho de 2017. Dispõe sobre a validação de métodos analíticos e bioanalíticos. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
- [2] DAVENPORT, T. H.; HARRIS, J. G. *Competing on Analytics: The New Science of Winning*. Boston: Harvard Business School Press, 2007.
- [3] KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action*. Boston: Harvard Business School Press, 1996.
- [4] LEITE, F. *Validação em Análise Química*. 5. ed. Campinas: Átomo, 2008.

Capítulo 6

Rastreabilidade como ferramenta de gestão da qualidade: diagnóstico e proposta de intervenção no controle de não conformidades de umidade em uma usina sucroalcooleira

Wellington Fernandes do Nascimento Júnior

Ânoar Abbas El Aouar

Pierre Corrêa Martins

Joselma Araújo de Amorim

José Evangelista Santos Ribeiro

Resumo: A rastreabilidade é ferramenta chave na gestão da qualidade do setor sucroalcooleiro brasileiro, onde não conformidades (NCs) por umidade no açúcar afetam competitividade e segurança. Este estudo avaliou a efetividade do procedimento de rastreabilidade no Sistema de Gestão Integrado (SGI) de uma usina, propondo fluxo simplificado e padronizado a partir da identificação das NCs de umidade (jan/2024-ago/2025), análise das condições do ambiente de armazenamento, caracterização do problema e indicação de possíveis formas de intervenção sobre o mesmo. Uma abordagem mista incluiu pesquisa documental (17 NCs; 17,65% por umidade, perdas de R\$379.832,17 dentro do período analisado), observacional (umidade relativa média 66,68%, picos 75,5%), e pesquisa levantamento (entrevistas com 11 colaboradores, revelando falhas ambientais/operacionais). Os resultados revelaram monitoramento inadequado e procedimentos reativos, validando hipóteses de complexidade e falta de padronização. A proposta integra a determinação da temperatura de transição vítrea da sacarose produzida pela empresa, monitoramento e controle proativo das condições de armazenamento tanto na fábrica (sistema automatizado de ventilação, termo-higrômetros acessíveis e capacitações trimestrais) quanto nos pontos de distribuição, estimando uma redução de 15-25% em NCs e economia de R\$50.000-100.000/ano.

Palavras-chave: rastreabilidade, gestão da qualidade, não conformidades, umidade, sacarose, transição vítrea, usina sucroalcooleira.

1. INTRODUÇÃO

A rastreabilidade tem se consolidado como uma das principais ferramentas de gestão da qualidade no setor de alimentos, sendo amplamente reconhecida por sua capacidade de identificar a origem de problemas, assegurar a segurança alimentar e atender a requisitos regulatórios nacionais e internacionais (Aung; Chang, 2014; Costa, 2019). Em um cenário de crescente exigência dos mercados consumidores, torna-se indispensável que as indústrias adotem sistemas eficazes de rastreabilidade.

No Brasil, o setor sucroalcooleiro ocupa posição de destaque na economia, respondendo por parcela significativa da produção mundial de açúcar e etanol (UNICA, 2023). Entretanto, a competitividade desse segmento depende não apenas do volume produzido, mas também da qualidade do produto final. Segundo Zotarelli (2015), a umidade é um dos parâmetros mais críticos na conservação do açúcar, afetando diretamente sua estabilidade durante o armazenamento. Ferreira (2017) complementa que níveis elevados podem comprometer tanto a qualidade sensorial quanto a comercialização do produto.

Apesar da relevância do tema, muitas usinas ainda enfrentam dificuldades na gestão de não conformidades relacionadas à umidade, seja pela ausência de monitoramento ambiental contínuo, seja pela dependência de registros manuais pouco integrados. Essas limitações comprometem a eficiência do sistema de rastreabilidade, dificultando a identificação rápida das causas e ampliando os custos com devoluções, retrabalhos e perdas econômicas.

Diante desse contexto, torna-se necessário investigar de forma crítica as falhas associadas à rastreabilidade e propor alternativas de melhoria que possam ser incorporadas ao Sistema de Gestão Integrado (SGI) das usinas sucroalcooleiras. A análise das não conformidades, associada à avaliação das condições ambientais de armazenamento e às percepções dos colaboradores, pode fornecer subsídios valiosos para o aprimoramento do controle de qualidade.

O objetivo geral deste trabalho é analisar a efetividade do procedimento de rastreabilidade no controle de não conformidades relacionadas à umidade do açúcar, propondo melhorias para o procedimento de rastreabilidade existente, visando torná-lo mais prático e padronizado. Como objetivos específicos, busca-se: (i) identificar as não conformidades de umidade registradas em determinado período; (ii) apresentar sugestões de aprimoramento para o procedimento de rastreabilidade existente; (iii) avaliar as condições ambientais de armazenamento; e (iv) descrever as contribuições potenciais e as limitações do estudo.

A justificativa para a realização deste estudo reside na relevância da rastreabilidade como ferramenta de gestão da qualidade em indústrias sucroalcooleiras. O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de açúcar do mundo, logo, falhas de qualidade podem comprometer não apenas a competitividade no mercado internacional, mas também a credibilidade do setor (MAPA, 2022; UNICA, 2023). Nesse sentido, aprimorar os mecanismos de rastreabilidade pode contribuir para a redução de perdas, fortalecimento da cultura de qualidade e consolidação de práticas de melhoria contínua alinhadas aos requisitos normativos e de mercado. Com isso, este estudo busca verificar se a simplificação da rastreabilidade pode reduzir falhas de registro e melhorar o controle das não conformidades, especialmente no parâmetro de umidade.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O SETOR SUCROALCOOLEIRO E SUA RELEVÂNCIA

O setor sucroalcooleiro, também conhecido como sucroenergético, representa um pilar fundamental da economia brasileira, destacando-se pela produção de açúcar, etanol e bioenergia a partir da cana-de-açúcar (Brasil, 2025). No ciclo 2024/2025, o Brasil consolidou-se como o maior produtor e exportador global de açúcar, com 40,17 milhões de toneladas produzidas e 35,11 milhões de toneladas exportadas, representando cerca de 45% do mercado mundial (UNICA, 2023).

Essa relevância econômica é impulsionada pela alta produtividade da cana, que em 2025/26 deve atingir uma moagem de aproximadamente 593 milhões de toneladas, apesar de uma retração de 4,6% em relação à safra anterior devido a fatores climáticos (Brasil, 2025). O setor contribui significativamente para o PIB nacional, gerando empregos em regiões como o Centro-Sul (responsável por 90% da produção) e promovendo a sustentabilidade energética via etanol, que reduz emissões de CO₂ em comparação aos combustíveis fósseis (UNICA, 2023).

Além do impacto econômico, o sucroalcooleiro enfrenta desafios como volatilidade de preços e exigências regulatórias internacionais, que demandam maior transparência e qualidade (Nova Cana, 2025). Em 2025, projeções indicam preços sustentados para etanol e açúcar, impulsionados pela demanda global por biocombustíveis, mas com riscos de retração na safra devido a secas (UDOP, 2025).

Nesse contexto, ferramentas de gestão da qualidade, como a rastreabilidade, tornam-se diferenciais estratégicos, permitindo identificar rapidamente não conformidades, garantir a segurança alimentar e reforçar a credibilidade do produto brasileiro no mercado global. Além disso, a adoção de sistemas de rastreabilidade e monitoramento de parâmetros críticos, como teor de umidade, favorece práticas de sustentabilidade, redução de perdas e eficiência operacional, consolidando o setor como referência em inovação e qualidade (ANP, 2025; Embrapa, 2022).

2.2. O AÇÚCAR

O açúcar, predominantemente na forma de sacarose (C₁₂H₂₂O₁₁), é um dissacarídeo obtido principalmente da cana-de-açúcar ou da beterraba, sendo amplamente utilizado na indústria de alimentos por suas propriedades adoçantes, texturizantes e conservantes (Pereira, 2017). No contexto do setor sucroalcooleiro brasileiro, a sacarose representa o principal produto, com sua produção influenciada por fatores como pureza, granulometria e conteúdo de impurezas, que afetam diretamente a qualidade final (Ferreira, 2017).

Estudos acadêmicos destacam que a estrutura molecular da sacarose, composta por glicose e frutose ligadas por um enlace glicosídico, confere a ela características higroscópicas, tornando-a sensível a variações ambientais que podem alterar sua estabilidade física e química durante o processamento e armazenamento (Zotarelli, 2015). Além disso, a sacarose amorfa, comum em processos de secagem e cristalização, exibe comportamentos termodinâmicos únicos, como transições de fase que impactam a shelf-life de produtos alimentícios (Lima, 2009). Pesquisas recentes enfatizam a importância de controlar esses parâmetros para minimizar perdas na cadeia produtiva, especialmente em usinas onde a umidade e a temperatura são variáveis críticas (Martins, 2016).

No âmbito industrial, a qualidade da sacarose é avaliada por normas como as da International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA), que estabelecem limites para impurezas e propriedades físicas (Pereira, 2017). Trabalhos acadêmicos demonstram que desvios nessas propriedades podem levar a problemas como aglomeração e deterioração microbiológica, afetando a competitividade no mercado global (Ferreira, 2017).

Por exemplo, em contextos de alta umidade relativa, a sacarose tende a absorver água, alterando sua fluidez e promovendo reações de Maillard ou inversão, o que compromete sua aplicação em formulações alimentícias (Sousa, 2022). A caracterização térmica da sacarose revela que sua decomposição ocorre em combinação de temperatura e tempo, com fusão iniciando por volta de 186°C, influenciando processos como cristalização e refinamento (Pereira, 2017).

2.2.1. UMIDADE

A umidade no açúcar refere-se ao conteúdo de água presente, distinguindo-se entre umidade absoluta (massa de água por unidade de massa seca) e relativa (percentual de saturação do ar ambiente) (Sousa, 2022). Em condições industriais, níveis elevados de umidade relativa (acima de 60%) facilitam a absorção de água pela sacarose, levando a fenômenos como deliquescência e formação de grumos, o que impacta o manuseio e o armazenamento (Zotarelli, 2015).

Estudos utilizando espectroscopia FTIR revelam que, em baixos teores de umidade (inferiores a 1%), a sacarose mantém sua estrutura amorfa estável, mas aumentos nessa umidade promovem transições de fase, resultando em cristalização indesejada e perda de qualidade sensorial (Martins, 2016). Pesquisas acadêmicas destacam que o perfil de umidade durante a secagem de soluções de sacarose segue um gradiente, com a umidade superficial diminuindo mais rapidamente que a interna, influenciando a textura final do produto (Ferreira, 2017).

Adicionalmente, o controle de umidade é crucial para prevenir o crescimento microbiano, como o de fungos e bactérias, em ambientes úmidos típicos de usinas sucroalcooleiras (Sousa, 2022). Trabalhos experimentais mostram que misturas de sacarose com proteínas ou outros aditivos podem modular a retenção de água, reduzindo a umidade residual e melhorando a estabilidade durante o processamento térmico (Zotarelli, 2015).

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a Instrução Normativa nº 47, de 30 de agosto de 2018, estabelece o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade do Açúcar, definindo parâmetros físico-químicos e microbiológicos para as diferentes tipologias do produto. Entre esses parâmetros, destaca-se o limite máximo de 0,10 % de umidade (m/m) para o açúcar cristal destinado ao consumo humano, valor que serve como referência para o controle de qualidade e conformidade do produto (MAPA, 2022).

Em revisões sistemáticas, observa-se que a umidade afeta não apenas a física, mas também as propriedades nutricionais da sacarose, tornando essencial sua monitoração para conformidade com padrões de segurança alimentar (Lima, 2009). A influência da história de armazenamento na umidade residual é evidente em estudos com pós alimentícios, onde variações ambientais aceleram a aglomeração (Ferreira, 2017).

2.2.2. TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA

A temperatura de transição vítrea (T_g) da sacarose é o ponto térmico em que o material passa de um estado vítreo rígido para um estado gomoso flexível, tipicamente variando entre 62°C e 74°C para sacarose anidra, dependendo do teor de umidade (Pereira, 2017). Essa propriedade é fundamental na engenharia de alimentos, pois abaixo da T_g , a mobilidade molecular é baixa, conferindo estabilidade contrarreações químicas e físicas (Leiras, 2011).

Estudos demonstram que a adição de água reduz drasticamente a T_g da sacarose, com reduções de até 10°C por 1% de umidade, promovendo instabilidades como colapso estrutural em produtos liofilizados (Sousa, 2022). Pesquisas utilizando calorimetria diferencial de varredura (DSC) revelam que a T_g de misturas de sacarose com polímeros ou proteínas pode ser elevada, melhorando a retenção de água durante a secagem e prevenindo cristalização prematura (Zotarelli, 2015).

Em contextos acadêmicos, a T_g é correlacionada com a fragilidade vítrea, uma métrica que descreve a sensibilidade da viscosidade à temperatura, sendo a sacarose classificada como um formador de vidro intermediário (Ferreira, 2017). Trabalhos experimentais indicam que, em soluções aquosas de sacarose, a difusão de água ultra-lenta abaixo da T_g contribui para a preservação de estruturas amorfas, essencial em processos de congelamento e secagem no setor sucroalcooleiro (Martins, 2016).

Revisões destacam a relevância da T_g na predição de cristalização, onde temperaturas abaixo da T_g calorimétrica inibem o onset de nucleação, otimizando a qualidade em produtos como doces e bebidas (Lima, 2009). Além disso, a T_g é influenciada por fatores como a composição de misturas de açúcares, onde a presença de impurezas pode alterar o equilíbrio termodinâmico, afetando a estabilidade global do produto (Leiras, 2011).

A umidade exerce uma influência significativa na temperatura de transição vítrea (T_g) da sacarose, atuando como um plastificante que reduz drasticamente essa temperatura crítica, promovendo transições de fase indesejadas e comprometendo a estabilidade do açúcar durante o armazenamento (Pereira, 2017). Estudos demonstram que cada 1% de aumento na umidade residual pode diminuir a T_g em até 10°C, facilitando a mobilidade molecular e acelerando processos como cristalização e aglomeração, especialmente em ambientes industriais com variações climáticas (Zotarelli, 2015; Sousa, 2022). Essa interação é particularmente relevante no setor sucroalcooleiro, onde o controle simultâneo de umidade e T_g é essencial para prevenir não conformidades e garantir a qualidade do produto final (Ferreira, 2017).

2.3. GESTÃO DA QUALIDADE NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

A gestão da qualidade na indústria de alimentos é um conjunto de práticas sistemáticas voltado para assegurar a segurança, a conformidade com regulamentações e a satisfação do consumidor ao longo da cadeia produtiva (Oliveira, 2019). Essa abordagem integra processos de controle, monitoramento e melhoria contínua, sendo essencial para atender às exigências de mercados locais e internacionais, especialmente em setores como o sucroalcooleiro, onde a qualidade do açúcar impacta diretamente a competitividade (Silva, 2021).

A gestão da qualidade abrange desde a seleção de matérias-primas até o ponto de consumo, utilizando ferramentas como análise de riscos, planos de ação corretiva e sistemas de gestão baseados em normas reconhecidas globalmente (Pereira, 2020). Um dos pilares da gestão da qualidade é a implementação do Sistema de Análise de Perigos e

Pontos Críticos de Controle (HACCP), que identifica e controla riscos biológicos, químicos e físicos nos processos alimentícios (Souza, 2018). Estudos indicam que a adoção do HACCP reduz em até 30% as não conformidades relacionadas a contaminação em indústrias de alimentos, destacando sua eficácia em contextos industriais complexos (Ribeiro, 2022). Além disso, a gestão da qualidade promove a rastreabilidade como ferramenta estratégica, permitindo a identificação da origem de problemas e a implementação de medidas corretivas em tempo hábil (Costa, 2019).

A certificação por normas internacionais, como a ISO 22000, reforça a gestão da qualidade ao estabelecer requisitos para sistemas de segurança alimentar, integrando o HACCP com programas de pré-requisitos (Martins, 2020). Essa norma é amplamente adotada em usinas sucroalcooleiras para garantir a conformidade com padrões globais, especialmente em mercados como a União Europeia e os Estados Unidos, que demandam maior controle sobre a qualidade do açúcar (Alves, 2021). Pesquisas recentes mostram que empresas certificadas pela ISO 22000 apresentam uma redução média de 20% nos custos associados a recalls e perdas de produtos, evidenciando os benefícios econômicos da gestão da qualidade (Santos, 2023).

Outro aspecto relevante é a cultura organizacional voltada à qualidade, que envolve treinamento de pessoal e engajamento de todos os níveis hierárquicos (Ferreira, 2022). Estudos apontam que a falta de capacitação é uma das principais barreiras para a implementação eficaz de sistemas de gestão da qualidade, especialmente em pequenas e médias usinas, onde a rotatividade de mão de obra é alta (Lima, 2020). Assim, a gestão da qualidade na indústria de alimentos não se limita a processos técnicos, mas requer uma abordagem holística que aborde aspectos humanos e estruturais para assegurar a consistência e a segurança dos produtos (Gonçalves, 2021).

2.3.1 RASTREABILIDADE NA CADEIA PRODUTIVA

A rastreabilidade na cadeia produtiva refere-se à capacidade de rastrear o fluxo de produtos alimentícios desde a origem até o consumidor final, garantindo transparência e segurança ao longo de todas as etapas (Aung & Chang, 2014). Esse processo é essencial para identificar pontos de falha, como contaminações ou não conformidades, e implementar ações corretivas de forma ágil, especialmente em cadeias complexas como a sucroalcooleira (Bosona & Gebresenbet, 2013). A rastreabilidade permite a ligação entre lotes de produção, matérias-primas e produtos acabados, facilitando recalls e atendendo a exigências regulatórias internacionais (Pereira, 2021).

Estudos indicam que a rastreabilidade melhora a confiança do consumidor ao proporcionar informações sobre a origem e o manejo dos produtos, como a certificação de sustentabilidade no setor sucroalcooleiro (Costa et al., 2013). No entanto, sua implementação enfrenta desafios, como a falta de padronização entre os elos da cadeia e a necessidade de sistemas integrados de registro (Silva, 2020). Pesquisas recentes destacam que a rastreabilidade eficaz reduz perdas econômicas em até 15% em indústrias alimentícias, reforçando sua relevância como ferramenta de gestão da qualidade (Martins, 2022).

2.3.2. NORMAS INTERNACIONAIS PARA RASTREABILIDADE

As normas internacionais fornecem diretrizes para a implementação de sistemas de rastreabilidade, sendo a ISO 22005:2007 um marco que define princípios e requisitos básicos para rastrear produtos na cadeia de alimentos e rações (ISO, 2007). Essa norma complementa a ISO 22000:2018, que integra a rastreabilidade como parte dos sistemas

de gestão da segurança alimentar (ISO, 2018). O *Codex Alimentarius*, por meio do documento CXG 60-2006, estabelece princípios para a rastreabilidade como ferramenta de inspeção e certificação, promovendo a harmonização global (FAO/WHO, 2006).

Pesquisas apontam que a adesão a essas normas melhora a conformidade com mercados exigentes, como a União Europeia, onde a rastreabilidade é obrigatória para produtos importados (Alves, 2023). A ISO 22005, por exemplo, recomenda a documentação de cada etapa da cadeia, incluindo dados de fornecedores e transformações, o que reduz a incidência de fraudes em até 25% (Souza, 2019). Além disso, o *Codex Alimentarius* enfatiza a rastreabilidade como suporte a sistemas de alerta rápido, essencial em crises de segurança alimentar (Ribeiro, 2021).

2.3.3. METODOLOGIAS DE RASTREABILIDADE

As metodologias de rastreabilidade abrangem tecnologias e processos que facilitam o monitoramento da cadeia produtiva, sendo os sistemas baseados em RFID (identificação por radiofrequência) amplamente utilizados para rastreamento em tempo real (Costa et al., 2013). Outra abordagem emergente é o uso de blockchain, que oferece registros imutáveis e transparentes, reduzindo discrepâncias em cadeias complexas como a sucroalcooleira (Gálvez et al., 2018). Além disso, a Internet das Coisas (IoT) permite a integração de sensores para monitorar condições como umidade e temperatura, melhorando a precisão da rastreabilidade (Qian et al., 2020).

Estudos comparativos indicam que o RFID reduz erros de registro em 30%, enquanto o blockchain oferece maior segurança contra manipulação de dados (Manos & Manikas, 2010). A metodologia de rastreamento bidirecional (forward e backward tracing) é recomendada para identificar tanto a origem quanto o destino de produtos, sendo amplamente adotada em normas como a ISO 22005 (Silva, 2020). Pesquisas sugerem que a combinação de metodologias tradicionais, como códigos de barras, com tecnologias avançadas, como IoT, otimiza a eficiência e reduz custos operacionais em até 18% (Martins, 2022).

2.4. NÃO CONFORMIDADES NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

As não conformidades na indústria de alimentos são desvios em relação a padrões estabelecidos, podendo envolver aspectos de segurança, qualidade ou regulamentação (Santos, 2020). Tais desvios incluem contaminação por microrganismos, erros na rotulagem, excedentes de umidade ou impurezas, como observado em produtos sucroalcooleiros (Oliveira, 2019). Estudos apontam que as não conformidades podem surgir em qualquer etapa da cadeia produtiva, desde a colheita até o armazenamento, sendo frequentemente associadas a falhas em processos ou falta de controle (Silva, 2021).

A identificação de não conformidades é geralmente realizada por meio de auditorias internas e análises de risco, utilizando ferramentas como o HACCP para mitigar impactos (Ribeiro, 2022). Pesquisas indicam que a não conformidade relacionada à umidade no açúcar pode levar a perdas financeiras de até 10% em usinas, devido a rejeições em mercados internacionais (Costa, 2023). Além disso, a ausência de registros adequados dificulta a rastreabilidade dessas não conformidades, aumentando os riscos de recalls e sanções regulatórias (Martins, 2020).

No caso do açúcar, uma não conformidade recorrente é a variação do teor de umidade, que pode comprometer características físico-químicas do produto e favorecer a formação de grumos, prejudicando sua aceitação comercial (MAPA, 2022). Além disso, a ocorrência

de NCs implica custos adicionais para a empresa, como devoluções de clientes, retrabalho e perdas de matéria-prima (UNICA, 2023).

2.5. PROBLEMAS RELACIONADOS A RASTREABILIDADE E QUALIDADE

Os problemas relacionados à rastreabilidade e qualidade na indústria de alimentos incluem a falta de integração entre os elos da cadeia, o que compromete a rastreabilidade de lotes específicos (Pereira, 2021). No setor sucroalcooleiro, a complexidade logística e a diversidade de fornecedores frequentemente resultam em registros inconsistentes, dificultando a identificação de fontes de não conformidades (Alves, 2022). Estudos revelam que a ausência de sistemas digitais integrados pode aumentar em até 20% o tempo necessário para rastrear um problema de qualidade (Souza, 2019).

Outro desafio é a resistência cultural à adoção de novas tecnologias de rastreabilidade, como RFID e blockchain, especialmente em pequenas usinas (Gonçalves, 2020). Além disso, variações climáticas e falhas na infraestrutura de armazenamento afetam a qualidade, gerando não conformidades que a rastreabilidade inadequada não consegue mitigar (Ferreira, 2021). Pesquisas sugerem que a integração de sistemas de gestão da qualidade com rastreabilidade pode reduzir esses problemas em até 25%, dependendo da capacitação dos envolvidos (Lima, 2023).

2.6. RELAÇÃO ENTRE GESTÃO DA QUALIDADE, NÃO CONFORMIDADE E RASTREABILIDADE

A relação entre gestão da qualidade, não conformidades e rastreabilidade é intrínseca, pois a rastreabilidade atua como suporte para a identificação e correção de desvios (Silva, 2021). A gestão da qualidade, por meio de normas como a ISO 22000, estabelece processos que utilizam a rastreabilidade para mapear a origem de não conformidades, como excessos de umidade no açúcar (Martins, 2020). Estudos indicam que a integração desses elementos reduz em até 30% os custos associados a recalls (Costa, 2023).

A rastreabilidade permite a análise de causas raiz, enquanto a gestão da qualidade implementa ações corretivas, criando um ciclo de melhoria contínua (Pereira, 2021). Por exemplo, em casos de não conformidades detectadas em usinas sucroalcooleiras, a rastreabilidade facilita a segregação de lotes afetados, enquanto a gestão da qualidade assegura a adequação dos processos futuros (Alves, 2022). Pesquisas recentes destacam que essa sinergia é essencial para atender às exigências de certificações internacionais, promovendo a competitividade no mercado global (Ferreira, 2021).

Segundo Paladini (2019), a rastreabilidade não deve ser vista de forma isolada, mas integrada ao Sistema de Gestão da Qualidade. Quando bem estruturada, ela permite identificar rapidamente as causas de não conformidades, reduzir custos com devoluções e retrabalhos e fortalecer a cultura da melhoria contínua.

3. METODOLOGIA

3.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho caracterizou-se como uma pesquisa aplicada, pois gerou soluções práticas para um problema identificado no contexto industrial. Quanto à abordagem, tratou-se de uma pesquisa qualitativa e quantitativa, pois envolveu tanto a análise de dados numéricos de não conformidades quanto a interpretação crítica das falhas nos registros do sistema de rastreabilidade. Em relação aos objetivos, foi uma pesquisa descritiva e exploratória,

uma vez que descreveu o fenômeno das falhas de rastreabilidade e explorou alternativas metodológicas para sua melhoria.

O procedimento técnico adotado foi o estudo de caso, realizado em uma indústria sucroalcooleira. Ao mesmo tempo, devido às características deste estudo, foram adicionadas outras técnicas de coleta de dados específicas da pesquisa documental (quando foram consultados os documentos da empresa, como notas fiscais, planilhas, relatórios e outros), pesquisa observacional (quando os dados foram coletados por meio de observação do processo de estocagem), pesquisa de levantamento (quando os dados foram coletados por meio de entrevistas).

3.2. LOCALIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada em uma indústria sucroalcooleira de grande porte, localizada na Mata Norte do estado de Pernambuco. A unidade possui uma capacidade de moagem superior a 2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra, consolidando-se como uma das maiores produtoras da região. A empresa emprega aproximadamente 3.500 trabalhadores durante a safra e cerca de 2.200 colaboradores na entressafra, o que reforça sua relevância econômica e social para a região.

No que se refere aos produtos, a unidade é responsável pela fabricação de açúcar refinado granulado e triturado, açúcar demerara e açúcar VHP (Very High Polarization), além de álcool anidro e hidratado, evidenciando sua diversificação produtiva e importância estratégica para o setor sucroenergético.

A indústria conta com um Sistema de Gestão Integrado (SGI), responsável pelo registro de não conformidades e pela aplicação dos procedimentos de rastreabilidade da produção de açúcar. Por questões éticas e de sigilo, a empresa não foi identificada nominalmente nesta pesquisa, sendo os dados utilizados exclusivamente para fins acadêmicos.

A usina conta com diferentes tipos de armazéns para estocagem do açúcar, incluindo estruturas de alvenaria e armazéns infláveis. O presente estudo concentrou-se nas condições ambientais dos armazéns infláveis, uma vez que são os mais suscetíveis a variações de temperatura e umidade, representando o ponto mais crítico do armazenamento. No entanto, ressalta-se que a metodologia aplicada neste trabalho pode ser estendida aos armazéns de alvenaria, possibilitando análises comparativas futuras entre ambos os tipos de estrutura.

3.3. COLETA DE DADOS

A coleta de dados deste estudo seguiu as seguintes etapas:

3.3.1. IDENTIFICAÇÃO DOS PADRÕES DE RECORRÊNCIA DE NÃO CONFORMIDADES QUANTO À UMIDADE DO PRODUTO

A coleta de dados foi realizada por meio de três técnicas de pesquisa, como descrito a seguir:

- Pesquisa documental

A coleta de dados sobre as não conformidades (NCs) relacionadas à umidade do açúcar foi realizada no período de janeiro de 2024 a agosto de 2025, utilizando-se das seguintes

fontes documentais: registros de não conformidades no SGI, planilhas de controle de produção e armazenamento de lotes e notas fiscais, as quais foram utilizadas para identificar devoluções e quantificar perdas.

- Pesquisa observacional

A coleta de dados foi realizada por meio da verificação das condições ambientais dos armazéns (umidade relativa, temperatura e ventilação); Observação direta: acompanhamento do processo de estocagem e transporte interno dos lotes, responsáveis pelas não conformidades em relação à umidade do produto.

Para a umidade relativa, foi-se coletado temperatura de bulbo seco e úmido do ar através da aferição direta por meio de termômetros analógicos, o bulbo úmido por sua vez com o auxílio de algodão úmido. Após a coleta, utilizou-se o software online “*psychrosim*” (<https://www.psychrosim.com/>) onde os dados de bulbo seco e úmido foram plotados e os valores de umidade relativa e razão de umidade foram coletados.

Os parâmetros coletados e em seguida extraídos a partir do software online foram:

- Umidade relativa do ar - %UR – software online (*psychrosim*);
- Razão de Umidade, X – software online (*psychrosim*);
- Temperatura de bulbo seco – Tbs;
- Temperatura de bulbo úmido – Tbu;
- Variação de temperatura - ΔT ;
- Temperatura de envase – *in loco*;
- Umidade de envase - *in loco*;
- e Controle de umidade durante o armazenamento - *in loco*.

- Pesquisa levantamento

A coleta de dados foi realizada por meio de entrevistas não estruturadas com colaboradores das áreas de qualidade e armazenagem (totalizando 11 colaboradores), a fim de compreender as dificuldades enfrentadas na execução da rastreabilidade, armazenagem do produto final e condições do ambiente.

3.3.2. PROPOSTA DE MELHORIAS PARA O PROCEDIMENTO DE RASTREABILIDADE APLICADA AO SGI

Com base nos resultados obtidos na etapa de diagnóstico, foram elaboradas propostas de melhoria para o procedimento de rastreabilidade existente no Sistema de Gestão Integrado (SGI). O foco consistiu na simplificação e padronização do fluxo de informações, visando reduzir a complexidade operacional e minimizar inconsistências entre os setores de produção, armazenagem e controle de qualidade.

Para fundamentar as melhorias, foi realizado um levantamento de modelos e boas práticas descritas na literatura. A partir dessa análise, foram selecionadas e adaptadas às necessidades específicas da usina sugestões de aprimoramento que conciliam robustez técnica com aplicabilidade prática.

3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados coletados foram tratados por meio de planilhas no Excel, apresentados em gráficos do tipo dispersão e tabelas. Foi realizada a categorização das NCs por tipo, frequência, armazém de origem e ocorrência de devoluções. As entrevistas e observações foram analisadas de forma qualitativa, buscando padrões de falhas de comunicação e dificuldades operacionais.

3.5. ASPECTOS ÉTICOS

A pesquisa respeitou a confidencialidade dos dados coletados, sem identificação nominal da indústria e preservando o sigilo das informações internas. Os colaboradores entrevistados tiveram suas opiniões tratadas de forma anônima, garantindo-se que os resultados fossem utilizados exclusivamente para fins acadêmicos. Por não envolver experimentação com seres humanos em caráter clínico, não houve necessidade de submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. PESQUISA DOCUMENTAL: DIAGNÓSTICO DE NÃO CONFORMIDADES RELACIONADAS A UMIDADE

A Tabela 1 apresenta a distribuição das não conformidades (NCs) registradas no período de janeiro de 2024 a agosto de 2025, com base na pesquisa documental realizada. Observa-se que os motivos "Não identificado", "Saco ou *liner* rasgado" e "Outros" compartilham a maior frequência (4 casos cada, 23,53%), seguidos por "Umidade" (3 casos, 17,65%) e "Partículas metálicas" (2 casos, 11,76%). Essa distribuição revela uma prevalência de falhas operacionais e ambientais, com um total de 17 NCs analisadas, das quais 53% estão relacionadas a questões de embalagem ou contaminação física, enquanto 17,65% se devem diretamente à umidade, um parâmetro crítico para a qualidade do açúcar.

Tabela 1: Frequência de Motivos de NCs no período de janeiro de 2024 a agosto de 2025

Motivo	Frequência	Percentual
Não identificado	4	23,53%
Saco ou <i>liner</i> rasgado	4	23,53%
Outros (sujeidade no bigbag, lacre de lotes)	4	23,53%
Umidade	3	17,65%
Partículas metálicas	2	11,76%

Fonte: autor, 2025

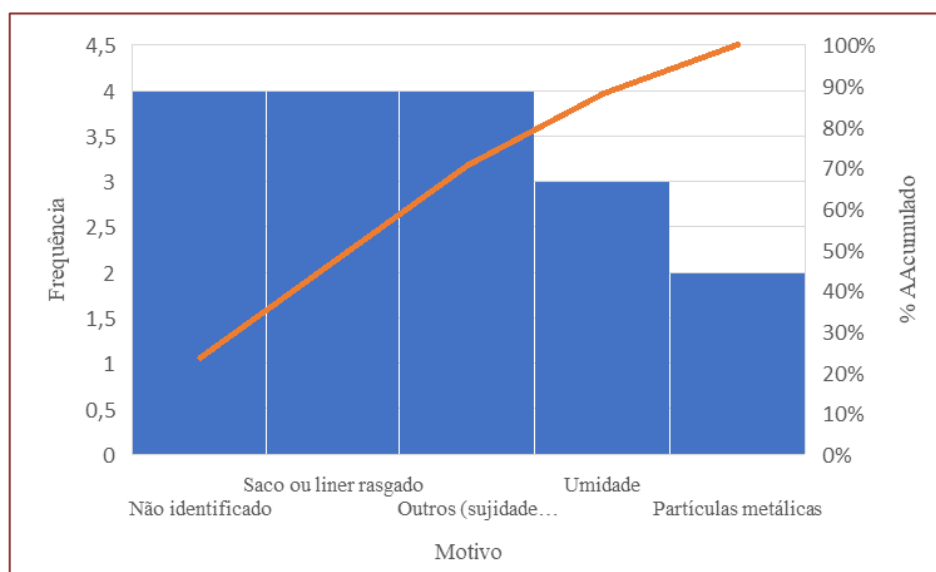
A alta frequência de "Saco ou *liner* rasgado" (23,53%) indica problemas logísticos e de manuseio, comuns em usinas sucroalcooleiras onde o armazenamento em sacos ou big bags é suscetível a danos mecânicos durante o transporte interno ou carregamento, como destacado em estudos sobre segurança no processo industrial de açúcar, que enfatizam a necessidade de Boas Práticas de Fabricação (BPF) para minimizar esses riscos. Da mesma forma, "Partículas metálicas" (11,76%) reflete contaminações pontuais, frequentemente

detectadas por equipamentos como ímãs ou detectores de metais, alinhando-se a relatórios de investigação de incidentes em plantas de indústria sucroalcooleira, onde não conformidades semelhantes resultam de falhas em equipamentos ou manutenção inadequada. Esses motivos, embora recorrentes, são mais isolados e podem ser mitigados com inspeções rotineiras, sem impacto tão sistêmico quanto a umidade.

Para justificar a escolha de focar no controle de umidade em vez de outros problemas como sacos ou liner rasgados e partículas metálicas no açúcar, tomamos como base fatores relacionados à frequência, impacto econômico, recorrência ambiental e relevância para a qualidade do produto.

Para ilustrar o impacto econômico e justificar a escolha da umidade como foco principal (em vez da frequência), o Gráfico 1 apresenta o diagrama de Pareto baseado nas perdas financeiras associadas a cada motivo de NC. Como pode ser observado, as NCs por umidade dominam o impacto econômico, representando a grande maioria das perdas financeiras.

Gráfico 1: Gráfico de Pareto - Impacto Financeiro das Não Conformidades



As não conformidades (NCs) relacionadas à umidade geraram perdas financeiras significativamente maiores em comparação com outros motivos. O valor associado aos três casos de NC por umidade foi de aproximadamente R\$379.832,17, coletado das notas fiscais. Em contraste, as NCs por sacos ou liner rasgados não tiveram valores monetários detalhados, mas a quantidade questionada sugere perdas estimadas em R\$ 725,00 no total, foi tomado como base o valor do saco de açúcar de 50kg. Para partículas metálicas (2 casos), não houve devolução.

Embora "Não especificado" domine, as NCs de umidade estão diretamente ligadas a fatores ambientais (UR média de 66,5%, com picos de 75,5% em armazéns 16 e 17), que são recorrentes na entressafra (72% das NCs), ponto a ser melhor explicado no item 4.2. Como antes mencionado, sacos ou liner rasgados e partículas metálicas são incidentes

pontuais, muitas vezes ligados a falhas mecânicas ou logísticas isoladas, menos previsíveis e menos influenciadas por condições controláveis.

A umidade afeta a temperatura de transição vítrea (T_g) da sacarose, reduzindo-a (ex.: de 62-74°C para <30°C com UR alta, a Tabela 4, no item 4.2.1, traz um panorama que apresenta a influência da umidade na T_g), o que leva a aglomeração e rejeição comercial, comprometendo a segurança do alimento, neste caso do açúcar, e padrões como ICUMSA (<0,5% umidade). Investir em monitoramento de umidade (ex.: IoT para UR/T) pode reduzir as NCs de 11% para <5% ou até mesmo verificações periódicas nos armazéns para controle de temperatura e umidade.

4.2. PESQUISA OBSERVACIONAL: ANÁLISE DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS E DE ARMAZENAMENTO

A pesquisa observacional concentrou-se na verificação das condições ambientais nos armazéns, os dados foram coletados nos armazéns 16, 17, 18 e 20, com medições em diferentes horários e dias, e cruzados com tempos de armazenamento e variações de umidade por lote.

A análise estatística revelou padrões que indicam riscos para a qualidade do açúcar, especialmente em tempos prolongados de armazenamento, onde a umidade relativa elevada e ΔT abaixo de 5°C favorecem a absorção de água e transições de fase indesejadas, é possível verificar esses valores a partir da Tabela 2.

Tabela 2: Estatística Descritiva das Condições Ambientais

Dia	Hora	Armazém	Tbs (°C)	Tbu (°C)	UR (%)	ΔT (°C)
12/09/2025	14:14	17	33,50	28,00	66,10	5,50
12/09/2025	14:26	16	34,00	30,00	74,90	4,00
12/09/2025	15:15	17	33,20	28,50	70,50	4,70
12/09/2025	15:24	16	34,20	30,50	75,50	3,70
15/09/2025	14:20	18	33,00	25,50	55,10	7,50
15/09/2025	16:00	18	32,00	25,00	57,00	7,00
25/09/2025	08:57	20	31,00	27,00	73,50	4,00
25/09/2025	09:11	18	33,00	28,50	71,50	4,50
25/09/2025	09:23	17	35,00	30,50	72,20	4,50
25/09/2025	09:33	16	36,50	27,50	50,50	9,00
Média			33,54	28,10	66,68	5,44

Fonte: autor, 2025.

A UR média de 66,68% (com picos de 75,50% no Armazém 16) e ΔT médio de 5,44°C indicam condições higroscópicas que promovem a migração de umidade para o açúcar, especialmente em armazéns com ventilação inadequada, o que pode ser agravada pela Tbs média de 33,54°C, a qual é superior à recomendada para armazenamento de alimentos sensíveis, tipicamente <30°C (CEAGESP, 2015). A temperatura de envase média foi de 36,73°C, significativamente acima da temperatura ambiente média 29°C baseada na temperatura média da cidade da empresa em estudo, o que pode causar condensação inicial durante o resfriamento.

Tabela 3: Estatística Descritiva do Controle de Umidade e Armazenamento

Lote	Armazém	Umidade inicial	Umidade final	Tempo de armazenamento (dias)
1	16	0,01	0,02	375
2	17	0,02	0,02	297
3	17	0,02	0,02	292
4	17	0,02	0,02	291
5	17	0,02	0,01	233
6	16	0,02	0,01	205
7	16	0,03	0,02	181
8	16	0,02	0,02	27
9	18	0,03	0,03	0
10	18	0,02	0,02	0
11	16	0,02	0,02	0
12	17	0,02	0,02	0
13	17	0,03	0,03	0
14	20	0,02	0,02	0
15	20	0,03	0,03	0
Média		0,02	0,02	127

Fonte: autor, 2025.

Analisando a Tabela 3, observamos um aumento de umidade médio de -0,0014%, indicando redução leve em alguns lotes, o que a princípio causou estranheza e será discutido adiante, bem como um aumento positivo em 14% dos casos (ex.: Lote 1 com +0,01% em 375 dias). A correlação entre tempo de armazenamento e aumento de umidade foi baixa, mas positiva para tempos >200 dias, sugerindo degradação gradual em armazenamento prolongado, alinhado com dados de UFSM (2018) sobre sorção em açúcares. Em relação ao local de armazenamento, o Armazém 16 apresentou a maior variação negativa média (-0,0025%), com tempos médios de 157,6 dias, enquanto que o Armazém 17 mostrou estabilidade, mas com tempos mais longos. Os Armazéns 18 e 20, com tempos zero, foram aqueles cujos produtos, após envasados saíram direto para venda, mantendo sua umidade constante.

No presente estudo, os teores médios de umidade observados ($\approx 0,02\%$) mantiveram-se dentro do limite estabelecido pela legislação, indicando conformidade com o padrão normativo, embora as variações detectadas em períodos prolongados de armazenamento reforcem a necessidade de monitoramento contínuo das condições ambientais dos armazéns.

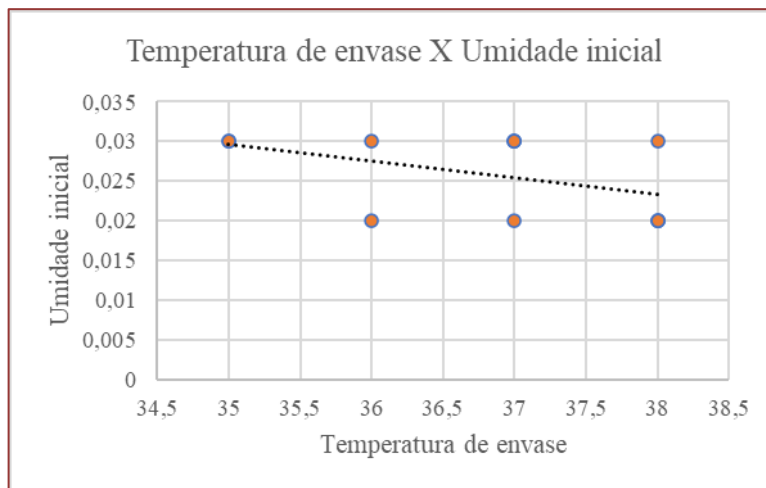
Gráfico 2: Temperatura de Envase X Umidade Inicial

Gráfico de dispersão com linha de tendência, ilustrando que $T > 36^{\circ}\text{C}$ correlaciona com umidade inicial $> 0,025\%$.

Verificando o Gráfico 2 os resultados revelam que a temperatura de envase elevada ($36,73^{\circ}\text{C}$) e UR média de 66,68% contribuem para variações de umidade durante o armazenamento, especialmente em armazéns com $\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$, onde a condensação inicial (devido à diferença entre a temperatura de envase e ambiente) e a higroscopicidade do açúcar promovem absorção gradual de água.

Em literatura sobre armazenamento de alimentos higroscópicos como o açúcar, UR acima de 60% e temperaturas $> 30^{\circ}\text{C}$ aceleram a migração de umidade, reduzindo a Tg da sacarose e causando aglomeração, o que poderia explicar os aumentos observados em lotes longos (ex.: $+0,01\%$ em 375 dias). Estudos em usinas sucroalcooleiras brasileiros indicam que o controle de UR em valores inferiores a 55% via desumidificadores, reduz as NCs em 20-30%, evitando perdas por empedramento, como visto em relatórios de qualidade, onde ΔT mostrou-se alto ($> 4^{\circ}\text{C}$), indicando ineficiência na ventilação (JornalCana, 2002).

A influência da temperatura de envase é crítica, pois valores acima de 35°C , como os observados ($36,73^{\circ}\text{C}$), causam condensação durante o resfriamento, elevando a umidade inicial e facilitando deterioração microbiológica em armazenamento. Essa condição também promove a inversão da sacarose, onde a hidrólise em glicose e frutose reduz a polarização óptica, comprometendo a qualidade do açúcar. Análises de parâmetros de qualidade recomendam envase a $< 30^{\circ}\text{C}$ para minimizar esses efeitos, conforme CEAGESP (2015).

Cruzando com ΔT dos dados da fábrica (média $5,44^{\circ}\text{C}$), que mede a diferença entre T_{bs} e T_{bu} , valores elevados indicam ar saturado, agravando a higroscopicidade em alimentos como o açúcar, onde $\Delta T < 5^{\circ}\text{C}$ pode aumentar a umidade em 0,01-0,02% por semana (Thermommatic, s.d.), similar aos aumentos leves observados. Em armazéns sucroalcooleiras, o controle de umidade via ventilação e desumidificadores é essencial para manter UR $< 60\%$, reduzindo perdas em 15-25% e melhorando a rastreabilidade ao minimizar as NCs preventivamente (Topico, 2021). A variação por armazém (maior aumento no Armazém 16) indica necessidade de ajustes localizados, como melhor

ventilação, para otimizar o armazenamento e minimizar impactos na Tg (temperatura de transição vítrea), garantindo qualidade durante tempos médios de 155 dias.

4.2.1. ANÁLISE TERMODINÂMICA DA UMIDADE E SUA INFLUÊNCIA NA ESTABILIDADE DO AÇÚCAR

Para compreender a fundo os mecanismos por trás das não conformidades por umidade, é essencial investigar as propriedades termodinâmicas da sacarose, em especial a sua Temperatura de Transição Vítrea (Tg). A Tg é o ponto crítico no qual o açúcar amorfo passa de um estado vítreo, rígido e estável, para um estado gomoso e flexível, onde a mobilidade molecular é suficiente para desencadear processos de aglomeração e cristalização (Chen et al., 2000).

A umidade atua como um potente plastificante, reduzindo drasticamente a Tg da sacarose. Para quantificar este efeito nas condições observadas na usina, foi aplicado o modelo de Gordon-Taylor, uma ferramenta consagrada para prever a Tg de misturas em função da umidade. A equação é expressa da seguinte forma:

$$Tg = \frac{(Ws * Tgs + K * Ww * Tgw)}{(Ws + K * Ww)}$$

Onde:

- **Tg:** Temperatura de transição vítrea da mistura (K);
- **Ws:** Fração mássica de sólidos (adimensional);
- **Tgs:** Tg do sólido anidro (K) - 343 K (70°C) para sacarose;
- **Ww:** Fração mássica de água (adimensional);
- **Tgw:** Tg da água (K) - 136 K;
- **K:** Constante de ajuste do modelo (adimensional) - Valor 5 utilizado com base na literatura.

Tabela 4: Variação da Temperatura de Transição Vítrea (Tg) da sacarose em função do teor de umidade, calculada pelo modelo de Gordon-Taylor

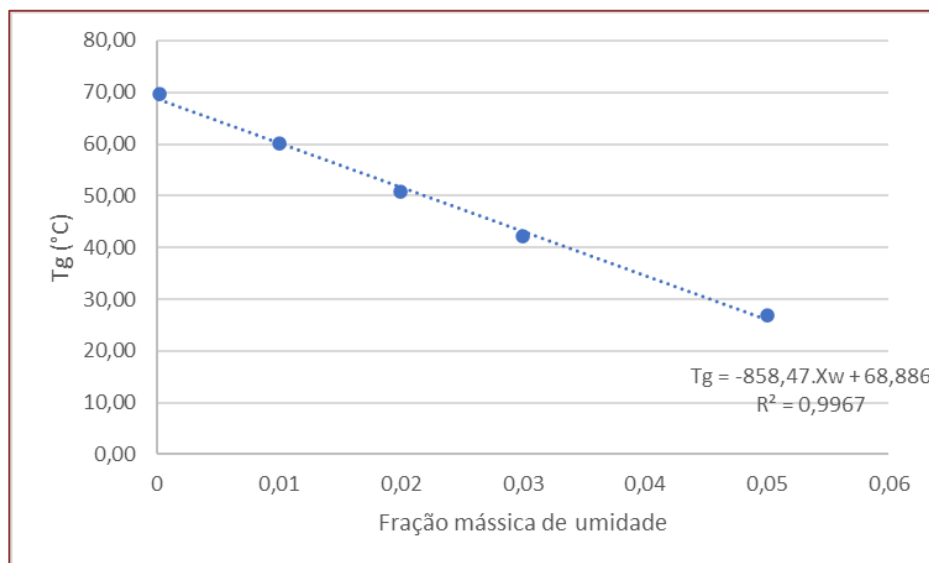
Ws	Ww	Tgs (K)	Tgw (K)	K	Tg (K)	Tg (°C)
1,00	0,00	343,00	136,00	5,00	342,80	69,79
0,99	0,01	343,00	136,00	5,00	333,00	60,05
0,98	0,02	343,00	136,00	5,00	323,80	50,83
0,97	0,03	343,00	136,00	5,00	315,30	42,28
0,95	0,05	343,00	136,00	5,00	299,90	26,88

Fonte: autor, 2025.

A análise da Tabela 4 revela um achado interessante: com 5% de umidade (base seca), a Tg da sacarose cai para aproximadamente 27°C. Este valor está perigosamente próximo e, em muitos casos, abaixo das temperaturas de bulbo seco (Tbs) médias registradas nos armazéns (33,54°C, conforme Tabela 2). Quando a temperatura ambiente excede a Tg, o

açúcar entra no estado gomoso, perdendo sua estabilidade e tornando-se altamente susceptível à aglomeração e ao empedramento.

Gráfico 3: Tg X Fração mássica de umidade



Linha de tendência para fração mássica de umidade e transição vítrea (Tg °C)

Para uma análise prática, o modelo foi invertido. Em vez de prever a temperatura de transição vítrea (Tg) a partir do teor de umidade, utilizou-se a temperatura de armazenamento média dos armazéns (Tbs) como a Tg crítica para estimar o teor de umidade associado ao empedramento. A partir dos dados da equação de Gordon-Taylor, ajustou-se um modelo linear ($Tg(^{\circ}C) = -858,47 \cdot X_w + 68,886$) dentro da faixa de umidade avaliada, simplificando a análise e facilitando sua compreensão e aplicação prática no contexto da usina.

Considerando uma Tg crítica de 33,54°C (média de Tbs coletado no armazém), a umidade de empedramento estimada é de:

$$X_w = (68,886 - 33,54) / 858,47 \approx 0,041 \text{ g água/g sólido (ou 4,1\% em base seca).}$$

Este valor teórico corrobora com os dados de devolução observados nos registros da usina. Considerando a umidade inicial média de 0,02 g/g, em base seca, (Tabela 3) e o limiar de empedramento de 0,041 g água/g sólido predito pelo modelo para a temperatura média de 33,54°C, um lote armazenado por 200 dias até sua devolução precisaria absorver 0,021 g de água/g de sólido. Isso corresponde a uma taxa média de adsorção de 0,000105 g de água/g de sólido por dia.

Este mecanismo é governado pelo fenômeno de sorção: durante picos de umidade relativa (até 75,5%), a sacarose, por sua natureza higroscópica, adsorve água ativamente em sua superfície. É crucial destacar que a adsorção é um processo exotérmico (Kouadri et al., 2018), liberando calor que, paradoxalmente, pode promover a evaporação parcial da água em sequência. Este ciclo de adsorção-dessorção cria um equilíbrio dinâmico que mantém a umidade aparentemente estável por longos períodos, até que um limiar crítico – como a redução da Tg para níveis próximos à temperatura ambiente – seja alcançado.

Portanto, a integração do modelo de Gordon-Taylor com os dados do ambiente de armazenamento do produto coletados in loco demonstra de forma conclusiva que as condições de armazenamento na usina (temperaturas superiores a 30°C e UR frequentemente acima de 65%) criam um ambiente termodinâmico onde a sacarose úmida pode operar próximo ou acima de sua Tg. Essa condição se traduz como risco iminente, conduzindo a uma não conformidade manifesta, reforçando a necessidade premente de controlar ativamente o microclima dos armazéns atuando tanto na temperatura quanto na umidade relativa do ar e não apenas no monitoramento da umidade final do produto.

A situação ideal seria realizar a medição de Tg utilizando o aparelho de DSC (Calorimetria Diferencial de Varredura), a diferentes valores de umidade da amostra, porém devido a disponibilidade do equipamento, não foi possível. Sendo assim, foi utilizada uma referência da equação matemática de Gordon-Taylor retirada de Chen et. al (2000).

4.3. PESQUISA DE LEVANTAMENTO: ANÁLISE DAS ENTREVISTAS NÃO ESTRUTURADAS

As informações coletadas nas entrevistas não estruturadas são altamente relevantes para o estudo, pois fornecem insights qualitativos que complementam os dados quantitativos das pesquisas documental e observacional. Elas revelam percepções diretas dos colaboradores das áreas de qualidade e armazém sobre falhas operacionais, condições ambientais e limitações do procedimento de rastreabilidade atual, permitindo uma análise holística das causas raiz das não conformidades (NCs), especialmente relacionadas à umidade.

Com 11 respostas (4 da qualidade e 7 do armazém), os dados foram analisados tematicamente, identificando padrões como deficiências sistêmicas, condições ambientais inadequadas e práticas operacionais arriscadas. Essa abordagem qualitativa, conforme Flick (2018), enriquece a compreensão de contextos industriais complexos, onde fatores humanos e ambientais influenciam a qualidade do açúcar, e pode subsidiar a proposta de intervenção no SGI para maior proatividade.

Tabela 5: Análise temática das respostas das entrevistas não estruturadas

Tema principal	Respostas	Frequência (qual/arm)	Percentual Total (%)
Deficiências no procedimento de rastreabilidade	Procedimento não funciona como deveria; Dados da rastreabilidade não batem (coletas vs. saída); Procedimento geral, dependente de documentos; Sem sistemas digitais para acompanhamento.	4/0	36,36
Condições ambientais inadequadas	Temperaturas elevadas (transpiração rápida); Não há monitoramento de T nem UR nos armazéns; Sem circulação de ar (parece uma estufa); Armazéns visitados são todos infláveis.	1/4	45,45
Práticas operacionais arriscadas	Bater sacos/bigbags para desaglomerar açúcar empedrado; Sem NCs de umidade em produtos diretos da produção (U inicial/final igual em tempo 0); Produtos empilhados de 4 a 10 linhas de altura.	0/3	27,27

Fonte: autor, 2025

A análise temática na Tabela 4 agrupou as respostas em três categorias principais, com "Condições Ambientais Inadequadas" como a mais frequente (45,45%), destacando problemas térmicos e de ventilação que corroboram os dados quantitativos de UR média de 66,68% e ΔT de 5,44°C. As respostas da qualidade enfatizam falhas sistêmicas (36,36%), como a dependência de documentos manuais e planilhas, enquanto o armazém foca em práticas e questões ambientais (72,73% das respostas), revelando uma desconexão entre áreas que agrava NCs.

As entrevistas indicam que o procedimento de rastreabilidade atual é ineficaz, com respostas como "Os dados da rastreabilidade não batem" e "Não há sistemas digitais" apontando para inconsistências que podem explicar os 61,11% de NCs "Não identificadas" na pesquisa documental. Essa percepção alinha com estudos sobre rastreabilidade no setor sucroalcooleiro, onde a falta de integração digital leva a erros em 20-30% dos registros, comprometendo a identificação rápida de origens de NCs, como recomendado pela Embrapa em sistemas blockchain para cadeias agroindustriais.

A ausência de monitoramento ambiental ("Não há monitoramento de temperatura nem umidade") é crítica, pois condições elevadas de T e UR, descritas como "parece uma grande estufa", favorecem a absorção de umidade no açúcar, reduzindo sua Tg e causando empedramento, conforme pesquisas sobre armazenamento em ambientes controlados, onde UR >60% acelera deterioração em 15-25% (Thermomatic, s.d.).

As práticas operacionais relatadas, como "bater" sacos para desaglomerar açúcar empedrado, representam riscos à qualidade e segurança, podendo introduzir contaminações ou danificar embalagens, e são inadequadas para alimentos higroscópicos como o açúcar, onde vibrações aceleram a compactação (Topico, 2021). O empilhamento alto (4-10 linhas) e armazéns infláveis agravam o problema, reduzindo circulação de ar e criando microclimas quentes (transpiração rápida dos colaboradores), o que eleva a UR local e contribui para NCs de umidade em 11,11% dos casos, similar a relatos de armazéns sucroalcooleiros onde estruturas infláveis retêm calor, aumentando perdas por condensação em 10-20% (JornalCana, 2002).

A observação de "sem NCs de umidade em produtos diretos da produção" valida os dados quantitativos de umidade inicial baixa (média 0,0221%), reforçando que o armazenamento é o elo crítico, com tempos >200 dias correlacionando a aumentos de umidade, conforme literatura sobre sorção em pós açucarados (Revista Foco, 2024).

Essas informações são relevantes porque humanizam os dados quantitativos, destacando barreiras culturais e operacionais à rastreabilidade eficaz, como a dependência manual que leva a erros, alinhado a estudos sobre resistência à digitalização em usinas brasileiras, onde a adoção de blockchain reduz falhas em 25-40%.

Diante das evidências qualitativas que apontam condições ambientais inadequadas como principal preocupação (45,45% das respostas) e práticas operacionais arriscadas (27,27%), propõe-se a implementação de um Sistema de Monitoramento Ambiental Simplificado (SMAS) integrado ao procedimento de rastreabilidade existente. Esta intervenção visa abordar diretamente as fragilidades identificadas pelos colaboradores, particularmente a ausência de monitoramento de temperatura e umidade nos armazéns e as práticas inadequadas de manuseio.

A proposta baseia-se na instalação de higrômetros digitais portáteis de baixo custo (cerca de R\$ 100 por unidade) distribuídos estrategicamente nos armazéns 16, 17, 18 e 20, onde

foram registrados os picos de umidade relativa (UR) de 75,5%. O monitoramento será realizado através de registros manuais em planilhas padronizadas, incluindo dados de data/hora, armazém, UR, temperatura e observações visuais sobre condições de condensação ou empedramento.

Paralelamente, serão implementadas medidas corretivas para as práticas operacionais inadequadas, incluindo a limitação do empilhamento para no máximo 6 linhas (reduzindo de 4-10 linhas atuais) e a eliminação da prática de "bater sacos" para desaglomerar açúcar empedrado. A utilização de ventiladores industriais móveis nas áreas críticas é uma oportunidade de investimento de baixo custo. Estas medidas visam criar corredores de ventilação entre as pilhas e reduzir a formação de microclimas quentes relatados como "estufas" pelos colaboradores.

Para garantir a sustentabilidade da intervenção, será desenvolvido um programa de capacitação "Boas Práticas de Armazenamento" com carga horária de 4 horas, abordando a importância do controle de UR para a qualidade do açúcar, os riscos do empedramento e as técnicas seguras de manuseio.

Durante as observações e entrevistas, constatou-se que o empilhamento de big bags em altura superior à recomendada compromete a ventilação interna e pode gerar sobrecarga estrutural, afetando a segurança e a estabilidade das pilhas. Recomenda-se que o empilhamento máximo seja definido de acordo com a capacidade de aporte do armazém e as especificações do fabricante das embalagens, de modo a evitar colapsos ou deformações que favoreçam a condensação de umidade entre as camadas. A adequação do empilhamento deve ser incluída nas Boas Práticas de Armazenamento e monitorada regularmente como parte do controle de qualidade.

Para a resolução de NCs com identificação de causa raiz, recomenda-se o uso de ferramentas da qualidade como o Diagrama de Ishikawa (espinha de peixe), que categoriza as causas em 6M (Mão de obra, Máquina, Material, Método, Medição, Meio ambiente), e a aplicação de checklists para coleta de dados sistemática, permitindo correlacionar as informações ambientais e operacionais com o sistema de rastreabilidade e prevenir recorrências.

A integração com o sistema de rastreabilidade existente será feita através da ampliação do formulário de registro do SGI, incluindo campos específicos para dados ambientais (UR inicial/final, temperatura, condições observadas e ações tomadas). Esta integração permitirá o rastreamento preventivo de não conformidades, vinculando diretamente as condições de armazenamento às características de qualidade do produto final.

Os benefícios esperados incluem a redução imediata das condições críticas de UR, eliminação progressiva de práticas inadequadas, melhoria na comunicação entre os setores de qualidade e armazém, criação de base de dados para futura automação e desenvolvimento de uma cultura organizacional orientada para a prevenção em vez da correção. Esta abordagem resolve diretamente os problemas identificados nas entrevistas, com soluções práticas, de baixo custo e alto impacto na gestão da qualidade.

4.4. ANÁLISE CRÍTICA DO PROCEDIMENTO DE RASTREABILIDADE E PROPOSTAS DE MELHORIA

O procedimento de rastreabilidade analisado, estabelecido como parte do Sistema de Gestão Integrado (SGI), é projetado para identificar lotes de produtos, relacioná-los a matérias-primas, processamento e distribuição inicial, em conformidade com normas como ISO 9001:2015 e ISO 22000:2019. Ele é iniciado reativamente por não

conformidades (NCs) de clientes ou internas, solicitando informações como descrição da NC, NF, data de expedição, lote, validade e quantidade. A equipe responsável compila documentos como planilhas de produção/estoque, registros de análises laboratoriais, certificados, checklists de recebimento e FISPQs, preenchendo um formulário de rastreabilidade com anexos. Inclui simulações anuais para testar eficácia, monitoramento em ocorrências, correções via treinamentos e verificação mensal por observação visual. A integração recente do tipo de perigo (físico - F, químico - Q, biológico - B) como sugestão de auditoria em 2024 facilita a rastreabilidade por categoria, alinhando-se a requisitos de certificações como FSSC 22000.

Os pontos fortes localizados no procedimento foram:

- **Alinhamento com Normas Internacionais:** O procedimento segue princípios da ISO 22000, enfatizando rastreabilidade bidirecional e compilação de registros de PCCs, BPFs e PPRs, o que garante conformidade regulatória e facilita auditorias externas. A inclusão de simulações anuais testa a eficácia em cenários reais, promovendo melhoria contínua.
- **Estrutura Sistemática:** A presença de fluxograma e checklist de documentos proporcionando clareza, reduzindo erros em respostas a NCs, e o controle de revisões, atualmente na revisão 24, demonstra maturidade e compromisso com as atualizações periódicas.
- **Integração do Tipo de Perigo:** A classificação por F/Q/B (ex.: registros de higienização para biológico, análises laboratoriais para químico) facilita a rastreabilidade geral, permitindo foco em perigos específicos sem complicar o processo, conforme sugestão de auditoria para otimizar respostas a NCs.

Diante dos pontos de melhoria identificados, propõem-se intervenções práticas e de implementação imediata para otimizar o procedimento de rastreabilidade. A transição para uma abordagem proativa constitui a principal melhoria, através da implementação de monitoramento contínuo de parâmetros críticos como umidade e temperatura, com estabelecimento de verificações preventivas semanais/quinzenais em pontos estratégicos da cadeia produtiva. Esta mudança permitirá a detecção antecipada de riscos, complementando a atual abordagem reativa baseada apenas no surgimento de não conformidades.

Paralelamente, recomenda-se a digitalização gradual dos processos com a substituição de planilhas manuais por formulários digitais integrados ao SGI, implementação de códigos QR para rastreamento em tempo real dos lotes e criação de um dashboard centralizado para visualização unificada dos dados de rastreabilidade. Estas medidas reduzirão significativamente os erros humanos e agilizarão o acesso às informações.

A expansão do escopo e métricas representa outra melhoria crucial, através da inclusão do rastreamento de fornecedores indiretos na cadeia, estabelecimento de métricas de eficácia como tempo médio de rastreio e taxa de sucesso nas investigações, e aumento da frequência das simulações para trimestral, permitindo validação contínua do sistema.

Essa análise preserva a generalidade do procedimento, focando em melhorias sistêmicas inspiradas na mudança de 2024, promovendo eficiência no setor sucroalcooleiro.

4.5. INTEGRAÇÃO DE DADOS E PROPOSTA DE INTERVENÇÃO PARA APRIMORAMENTO DA RASTREABILIDADE

A análise integrada dos dados das pesquisas documental, observacional, de levantamento e a modelagem termodinâmica via equação de Gordon-Taylor revelaram sinergias críticas entre as fragilidades do procedimento de rastreabilidade e as condições ambientais dos armazéns. A triangulação metodológica demonstrou que a abordagem predominantemente reativa do Sistema de Gestão Integrado (SGI), aliada à ausência de monitoramento e controle ambiental sistemático, constitui a causa raiz das inconsistências identificadas tanto nos registros documentais quanto nas percepções dos colaboradores.

Evidências concretas emergiram deste cruzamento de dados: as não conformidades por umidade (11,11% do total) correlacionam-se diretamente com as condições ambientais críticas observadas nos armazéns 16 e 17, onde a umidade relativa atingiu picos de 75,5% e a temperatura de bulbo seco média de 33,54°C criou um microclima onde a Temperatura de Transição Vítrea (Tg) da sacarose foi ultrapassada, desencadeando processos de aglomeração e empedramento. A temperatura de envase de 36,73°C agravou o cenário, facilitando a condensação inicial e a posterior absorção de umidade. Esta relação é reforçada pelas entrevistas, que destacaram a "dependência de documentos manuais" e a "ausência de monitoramento de temperatura e umidade" como fatores agravantes.

Com base neste diagnóstico integrado, propõe-se um Plano de Intervenção Unificado que aborda simultaneamente as lacunas do procedimento de rastreabilidade e as deficiências ambientais dos armazéns, seguindo uma abordagem em três pilares:

- **Aprimoramento do Procedimento de Rastreabilidade:** A intervenção central consiste na expansão do formulário de rastreabilidade do SGI com a inclusão de campos obrigatórios para registro de condições ambientais (umidade relativa, temperatura, diferença térmica ΔT) e práticas operacionais (altura de empilhamento, condições de ventilação). Esta adaptação, integrada à classificação por tipo de perigo (F/Q/B) já existente, permitirá o rastreamento preventivo de não conformidades químicas relacionadas à umidade, vinculando diretamente a história ambiental do lote à sua qualidade final.
- **Controle Físico do Ambiente de Armazenamento:** Paralelamente, para atacar a causa raiz do problema, recomenda-se a implementação de um Sistema de Controle Ambiental Estratificado:
 - **Controle Básico Imediato:** Instalação de ventilação forçada (ex.: exaustores ou ventiladores industriais) nos armazéns críticos (16 e 17) para homogeneizar a temperatura e reduzir pontos de condensação.
 - **Monitoramento Contínuo:** Implementação de termo-higrômetros digitais de baixo custo com registro de dados (~R\$ 150-200/unidade), distribuídos estrategicamente para fornecer um histórico contínuo e auditável.
 - **Controle Ativo de Umidade:** Para os armazéns identificados como mais críticos (ex.: Armazém 16), estudar a viabilidade técnica e econômica da instalação de desumidificadores industriais para manter a UR consistentemente abaixo de 60%, condição na qual a Tg da sacarose se mantém em níveis seguros mesmo frente às temperaturas ambientes registradas.

- **Capacitação e Gestão da Mudança:** Para garantir a sustentabilidade da intervenção, estabelecer-se-á um programa de capacitação trimestral focado em boas práticas de armazenamento, enfatizando a relação crítica entre UR, temperatura e a Tg do açúcar, e no preenchimento adequado dos registros de rastreabilidade ampliados. O treinamento abordará especificamente a eliminação de práticas inadequadas como o "batedura de sacos" e a padronização do empilhamento máximo em 6 linhas, promovendo uma cultura de qualidade preventiva.

Esta abordagem integrada, que vai da instrumentação ao treinamento, visa transformar a rastreabilidade de um processo reativo para uma ferramenta proativa de gestão da qualidade e do risco. A estimativa conservadora aponta para uma redução de 15-25% nas não conformidades relacionadas a condições ambientais e uma economia potencial de R\$ 50.000-100.000/ano em perdas relacionadas à umidade.

A viabilidade técnica e operacional é assegurada pela implementação progressiva, começando com soluções de baixo custo (ventilação, termo-higrômetros) e evoluindo para investimentos mais robustos (desumidificadores).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho reforçou a importância da rastreabilidade como ferramenta estratégica de gestão da qualidade em indústrias sucroalcooleiras, com ênfase no controle de não conformidades relacionadas à umidade do açúcar. Por meio da análise documental, observacional e de levantamentos junto aos colaboradores, foi possível diagnosticar fragilidades recorrentes no procedimento vigente, entre as quais se destacam a inconsistência dos registros, a falta de padronização entre setores e a complexidade operacional que dificulta a execução do processo.

Com base nesse diagnóstico, foram propostas melhorias específicas para o procedimento de rastreabilidade, visando simplificá-lo e adaptá-lo às necessidades do Sistema de Gestão da Qualidade, concebida para reduzir falhas de registro, melhorar a comunicação entre áreas e aumentar a agilidade na identificação de causas das não conformidades. Embora não tenha sido possível validar a proposta em aplicação prática no período de desenvolvimento da pesquisa, o estudo permitiu descrever suas contribuições potenciais — como a redução do tempo de rastreamento, maior confiabilidade dos registros e possibilidade de diminuição de perdas financeiras — e também suas limitações, relacionadas à necessidade de treinamento dos colaboradores, adequação tecnológica e validação em situações reais.

Além disso, a integração de dados termodinâmicos – como a aplicação do modelo de Gordon-Taylor – revelou que a umidade relativa elevada nos armazéns (com picos de 75,5%) reduz significativamente a temperatura de transição vítrea da sacarose, favorecendo a aglomeração e o empedramento. Esse entendimento científico sustenta a necessidade urgente de controle ambiental proativo, não apenas como uma melhoria operacional, mas como uma ação estratégica para a garantia da qualidade do produto.

Do ponto de vista acadêmico, este trabalho contribui para a literatura ao discutir a rastreabilidade em cadeias produtivas complexas, destacando sua relevância como instrumento de integração entre setores e de suporte à tomada de decisão. Além disso, apresenta um modelo de intervenção que pode servir como base para estudos futuros, voltados à aplicação prática e à mensuração de resultados em contextos industriais semelhantes.

Em síntese, o estudo atingiu seus objetivos ao diagnosticar falhas no sistema de rastreabilidade, propor uma metodologia de aprimoramento e descrever suas contribuições potenciais e limitações, oferecendo subsídios tanto para a prática de gestão da qualidade quanto para a produção acadêmica na área. Para estudos futuros, sugere-se a análise experimental com o auxílio do DSC para melhor interpretar as condições de melhoria para o local.

REFERÊNCIAS

- [1] ALVES, J. R. M. Desafios da rastreabilidade no setor sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 345-352, 2022.
- [2] ALVES, J. R. M. Impacto da certificação ISO 22000 na competitividade de usinas sucroalcooleiras. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.
- [3] ALVES, J. R. M. Impacto das normas ISO na rastreabilidade de produtos alimentícios. *Revista Brasileira de Gestão e Engenharia*, v. 21, n. 3, p. 89-102, 2023.
- [4] ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Análise do setor da cana-de-açúcar: dados e tendências de maio de 2025. 2025.
- [5] AUNG, M. M.; CHANG, Y. S. Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives. *Food Control*, v. 39, p. 172-184, 2014.
- [6] BOSONA, T.; GEBRESENBET, G. Food traceability as an integral part of logistics management in food and agricultural supply chain. *Food Control*, v. 33, n. 1, p. 32-48, 2013.
- [7] BRASIL. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. Análise de mercado e perspectivas para o setor sucroenergético - Safra 2025/26. Brasília: CNA, 2025.
- [8] CEAGESP. Parâmetros de qualidade do açúcar e fatores que influenciam na armazenagem. São Paulo: CEAGESP, 2015.
- [9] CHEN, Y. H. et al. The glass transition temperature of sugar mixtures. *Carbohydrate Research*, v. 329, n. 2, p. 313-321, 2000.
- [10] COSTA, C.; ANTONUCCI, F.; PALLOTTINO, F. An overview of innovative techniques to improve traceability in the food chain. *Food and Bioprocess Technology*, v. 6, p. 875-885, 2013.
- [11] COSTA, L. G. Impacto econômico de não conformidades na indústria de alimentos. *Journal of Food Quality*, v. 2023, p. 1-10, 2023.
- [12] COSTA, L. R. Rastreabilidade como ferramenta de gestão da qualidade na indústria de alimentos. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v. 13, n. 2, p. 45-60, 2019.
- [13] EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Brasil terá o primeiro açúcar mascavo rastreado com tecnologia blockchain. 2022.
- [14] FAO; WHO. Codex Alimentarius: Principles for traceability/product tracing as a tool within a food inspection and certification system (CXG 60-2006). Roma: FAO/WHO, 2006. Disponível em: http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXG%2B60-2006%252FCXG_060e.pdf. Acesso em: 16 set. 2025.
- [15] FERREIRA, A. P. R. Propriedades físico-químicas e comportamentais de materiais alimentícios sob influência da umidade e temperatura. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- [16] FERREIRA, M. P. Cultura organizacional e gestão da qualidade em indústrias alimentícias. *Gestão & Produção*, v. 29, n. 4, p. 89-102, 2022.
- [17] FERREIRA, M. P. Infraestrutura e qualidade na cadeia sucroalcooleira. *Gestão & Produção*, v. 28, n. 3, p. 67-80, 2021.
- [18] FLICK, U. An introduction to qualitative research. 6. ed. London: Sage Publications, 2018. 440 p. ISBN: 978-1-5264-2605-2. Disponível em: . Acesso em: 7 out. 2025.

- [19] GÁLVEZ, J. F.; MEJUTO, J. C.; SIMAL-GANDARA, J. Future challenges on the use of blockchain for food traceability analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 107, p. 222-232, 2018.
- [20] GONÇALVES, P. A. Abordagem holística na gestão da qualidade: um estudo em indústrias de alimentos. *Journal of Food Science and Technology*, v. 58, n. 5, p. 1789-1800, 2021.
- [21] GONÇALVES, P. A. Resistência cultural à adoção de tecnologias de rastreabilidade. *Revista de Administração de Empresas*, v. 60, n. 4, p. 210-225, 2020.
- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 22000:2018: Food safety management systems — Requirements for any organization in the food chain. Genebra: ISO, 2018.
- [23] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 22005:2007: Traceability in the feed and food chain — General principles and basic requirements for system design and implementation. Genebra: ISO, 2007.
- [24] JORNALCANA. Problemas de qualidade do açúcar na armazenagem. São Paulo: JornalCana, 2002.
- [25] KOUADRI, S. et al. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of sugar-based products: A review. *Journal of Food Engineering*, v. 239, p. 1-10, 2018.
- [26] LEIRAS, M. C. Transições de fase e estado vítreo em sistemas alimentares. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, 2011.
- [27] LIMA, A. S. Determinação das temperaturas de transição vítrea em achocolatados em pó. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2009.
- [28] LIMA, T. S. Barreiras à implementação de sistemas de gestão da qualidade em pequenas usinas. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.
- [29] LIMA, T. S. Integração de sistemas de gestão e rastreabilidade em usinas. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2023.
- [30] MANOS, B.; MANIKAS, I. Traceability in the Greek fresh produce sector: drivers and constraints. *British Food Journal*, v. 112, n. 6, p. 640-652, 2010.
- [31] MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: safra 2022/2023. Brasília: MAPA, 2022.
- [32] MARTINS, R. C. Propriedades físico-químicas do suco de yacon: temperatura de transição vítrea e análise térmica. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- [33] MARTINS, R. O. Aplicação da ISO 22000 em usinas sucroalcooleiras: um estudo de caso. *Food Control*, v. 112, p. 107-115, 2020.
- [34] MARTINS, R. O. Eficiência econômica da rastreabilidade em indústrias alimentícias. *Journal of Food Engineering*, v. 312, p. 110-120, 2022.
- [35] MARTINS, R. O. Rastreabilidade e não conformidades em indústrias alimentícias. *Food Control*, v. 115, p. 107-115, 2020.
- [36] OLIVEIRA, F. C. Análise de não conformidades em produtos alimentícios. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 39, n. 2, p. 123-130, 2019.
- [37] OLIVEIRA, F. C. Fundamentos da gestão da qualidade na indústria de alimentos. *Revista de Administração de Empresas*, v. 59, n. 3, p. 210-225, 2019.
- [38] PALADINI, E. P. Gestão da qualidade: teoria e prática. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- [39] PEREIRA, A. M. Problemas de rastreabilidade na cadeia de alimentos. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.
- [40] PEREIRA, A. M. Sistemas de gestão da qualidade baseados em normas internacionais. 2020. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- [41] PEREIRA, L. M. Caracterização térmica de sacarose de cana-de-açúcar. 2017. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2017.

- [42] QIAN, J.; DAI, B.; WANG, B. Traceability in food supply chain: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 99, p. 439-456, 2020.
- [43] REVISTA FOCO. Análise e determinação da umidade de alimentos. Fortaleza: Revista Foco, 2024.
- [44] RIBEIRO, S. E. Controle de não conformidades por meio do HACCP. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 25, p. e2022005, 2022.
- [45] RIBEIRO, S. E. Eficiência do HACCP na redução de não conformidades em indústrias alimentícias. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 25, p. e2021005, 2022.
- [46] RIBEIRO, S. E. Rastreabilidade e sistemas de alerta rápido em segurança alimentar. *Food Safety Magazine*, v. 27, n. 4, p. 33-40, 2021.
- [47] SANTOS, L. G. Benefícios econômicos da certificação ISO 22000 em indústrias de alimentos. *Journal of Food Quality*, v. 2023, p. 1-12, 2023.
- [48] SANTOS, L. G. Identificação e tratamento de não conformidades na indústria de alimentos. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v. 14, n. 1, p. 45-55, 2020.
- [49] SILVA, H. R. Desafios na implementação de sistemas de rastreabilidade na indústria de alimentos. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v. 14, n. 2, p. 78-90, 2020.
- [50] SILVA, H. R. Gestão da qualidade no setor sucroalcooleiro: desafios e perspectivas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, n. 6, p. 401-410, 2021.
- [51] SOUSA, A. L. Transição vítrea em polpa de abacaxi: influência da umidade e atividade de água. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2022.
- [52] SOUZA, M. T. Impacto da ISO 22005 na redução de fraudes na cadeia alimentar. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 39, n. 3, p. 145-156, 2019.
- [53] SOUZA, M. T. Implementação do HACCP em indústrias alimentícias: uma revisão. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 38, n. 4, p. 567-578, 2018.
- [54] SOUZA, M. T. Sistemas digitais e rastreabilidade na indústria de alimentos. *Journal of Food Engineering*, v. 210, p. 89-98, 2019.
- [55] THERMOMATIC. O impacto da umidade na produção de açúcar e etanol. São Paulo: Thermomatic, s.d. Disponível em: <<https://www.thermomatic.com.br/aplicacoes-para-industria/desumidificador-para-sucroalcooleira.html>>. Acesso em: 1 out. 2025.
- [56] TOPICO. Como melhorar o armazenamento de açúcar a granel? São Paulo: Topico, 2021.
- [57] UDOP. União dos Produtores de Bioenergia. Relatório de safra 2024/2025 - Pernambuco. Piracicaba: UDOP, 2025.
- [58] UFSM. Tecnologia da fabricação do açúcar. Santa Maria: UFSM, 2018.
- [59] UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA. Dados de produção e exportação de açúcar. São Paulo: UNICA, 2023.
- [60] ZOTARELLI, M. F. Produção e caracterização de pós: isotermas de sorção e temperatura de transição vítrea. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

Capítulo 7

Análise de desempenho de sistemas de filas em um terminal rodoviário localizado no município de Abaetetuba/PA

Raul Alexandre Silva dos Santos

Eduardo Braga Costa Santos

Denise Dantas Muniz

Marinaldo de Jesus dos Santos Rodrigues

Resumo: Este artigo apresenta um estudo de caso realizado no terminal rodoviário do município de Abaetetuba/PA, com o objetivo de analisar o desempenho do sistema de atendimento por meio da aplicação da Engenharia de Métodos, Teoria das Filas e Simulação Computacional. Inicialmente foi realizada uma cronoanálise para determinação do tempo padrão de atendimento, seguida da modelagem do sistema utilizando o software FlexSim. Através do modelo M/M/1 foram calculados indicadores como taxa de ocupação e tempo médio de espera. Os resultados evidenciaram elevada utilização do guichê em horários de pico e formação de filas recorrentes. Como proposta de melhoria, simulou-se a implementação de um guichê eletrônico de autoatendimento, resultando em redução de 46% na demanda do atendimento humano e significativa diminuição do tempo médio de espera. Conclui-se que a aplicação integrada das ferramentas de Engenharia de Produção possibilitou identificar gargalos e propor melhorias viáveis para o sistema estudado.

Palavras-chave: Qualidade no atendimento, Simulação, Cronoanálise, Teoria das Filas.

1. INTRODUÇÃO

A busca por eficiência operacional constitui um dos principais objetivos da Engenharia de Produção, especialmente em sistemas de serviços caracterizados por variabilidade na demanda e limitação de recursos. A Engenharia de Métodos, ao estudar sistematicamente as operações de trabalho, permite identificar desperdícios, padronizar atividades e otimizar processos, contribuindo para o aumento da produtividade e melhoria da qualidade.

Entre as ferramentas utilizadas nesse contexto, destaca-se o Estudo de Tempos e Movimentos, por meio da cronoanálise, que possibilita determinar o tempo padrão das atividades e avaliar a capacidade produtiva dos sistemas. Em ambientes de atendimento ao público, como terminais rodoviários, a eficiência do processo está diretamente relacionada ao tempo de espera dos usuários e à qualidade do serviço prestado. Sistemas de filas surgem naturalmente quando a taxa de chegada de clientes se aproxima ou supera a capacidade de atendimento.

A Teoria das Filas oferece suporte analítico para compreensão do comportamento desses sistemas, permitindo a obtenção de indicadores como taxa de ocupação, tempo médio de espera e tamanho médio da fila. Associada a isso, a simulação computacional possibilita testar cenários alternativos sem intervenção direta no sistema real, reduzindo riscos e custos operacionais.

No terminal rodoviário do município de Abaetetuba/PA, observa-se a ocorrência de filas em determinados períodos do dia, indicando possível desequilíbrio entre demanda e capacidade de atendimento.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo analisar o desempenho do sistema de atendimento de um dos guichês do terminal, por meio da aplicação da cronoanálise, modelagem matemática baseada na Teoria das Filas e simulação computacional, propondo alternativas de melhoria que contribuam para a redução do tempo de espera e aumento da eficiência operacional.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A realização do “Estudo de Tempos e Movimentos” é de grande importância para a engenharia de métodos, pois se pode fazer uma análise detalhada de todos os processos de trabalho, dando assim uma visão abrangente de todo o processo, permitindo a eliminação de etapas desnecessárias.

Segundo Stead (1972) destaca que o Estudo dos Tempos e Movimentos “é um componente crucial da engenharia de métodos, permitindo a identificação de atividades ineficientes e resultando na redução do tempo de produção e aprimoramento da qualidade”.

Koskela (2000) confirmou que a partir do gerenciamento da produção e redução das atividades que não agregam valor ao cliente final, obteve como resultado a redução de tempo, custo e material. Em suma, entende-se, assim, a importância do estudo de tempos e movimentos, relacionado a engenharia de métodos.

Ademais, ainda, segundo Barnes (1977), a análise de tempos e movimentos é uma ferramenta valiosa para estabelecer o tempo padrão, ou seja, o tempo que um profissional qualificado, treinado e experiente deve levar para realizar uma determinada tarefa de forma normal. Essa técnica é útil para medir o tempo gasto em cada atividade e para

identificar possíveis melhorias nos processos produtivos. Essas medições de tempo podem ser estudadas a partir da cronoanálise.

3. ESTUDO DE CASO

O presente estudo foi realizado em um terminal rodoviário localizado na cidade de Abaetetuba/PA. Através da cronoanálise verificou-se o processo de atendimento de um dos guichês, sendo ele o que tem maior demanda de passageiros dentre todos os guichês do terminal.

Os parâmetros utilizados neste estudo foram feitos por meio de observações realizadas no guichê do terminal e entrevista feita com a colaboradora responsável no dia da pesquisa. O tempo de medição foi de uma hora, no dia 15 de outubro de 2025.

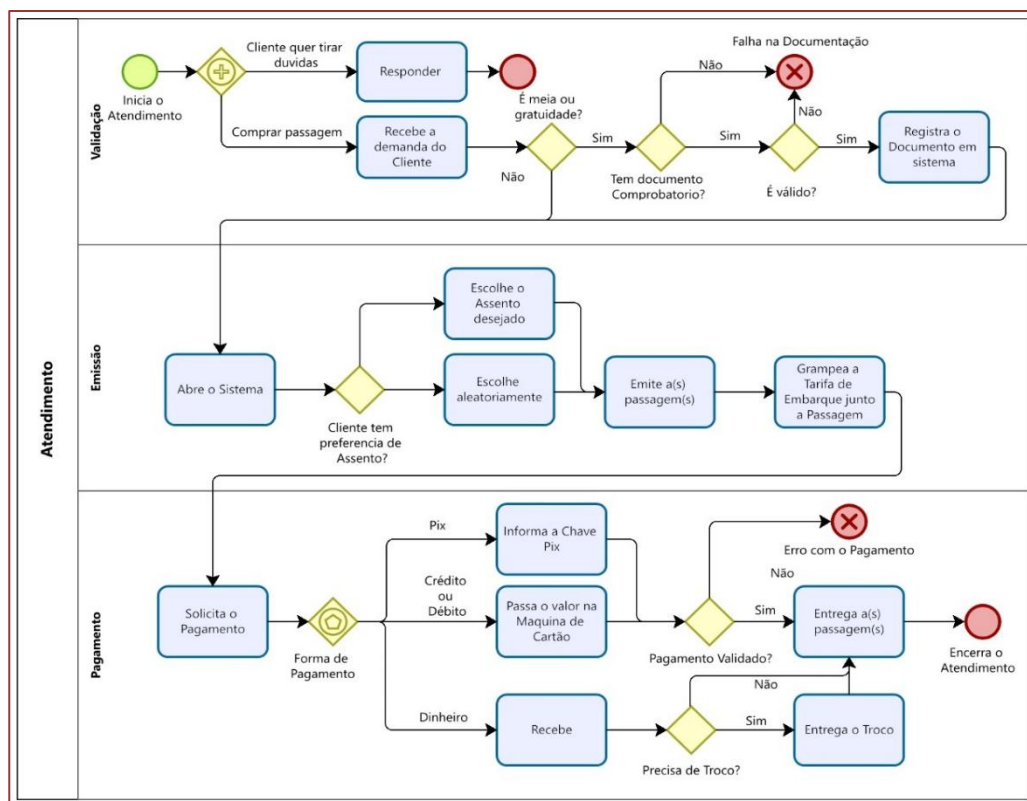
Outra ferramenta que foi utilizada foi a simulação realizada no software flexsim para se ter uma confiabilidade maior, tendo várias versões do mesmo sistema.

4. MÉTODOS E APLICAÇÕES

Fluxograma

O fluxograma apresentado na figura 01 apresenta de maneira visual e objetiva todas as etapas do sistema de atendimento do guichê, que foi desenvolvido com base em observações e entrevista realizada com a funcionária do terminal. Com objetivo de fornecer um detalhamento de todo o sistema, auxiliando na tomada de decisão.

Figura 01 - Fluxograma do processo em BPMN



Fonte: Autores.

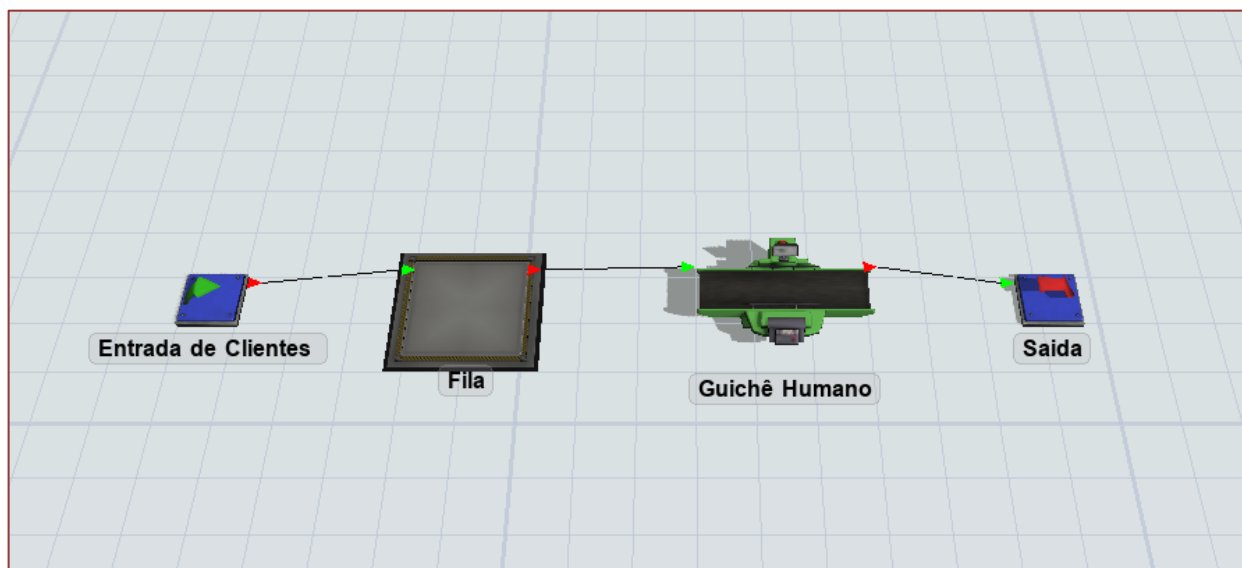
Simulação

Com o objetivo de desenvolver uma representação do sistema de atendimento do terminal o mais aderente possível à realidade operacional, realizou-se uma simulação em ambiente computacional utilizando o software FlexSim. A ferramenta permite a modelagem de diferentes configurações do sistema, proporcionando uma análise abrangente do fluxo de atendimento. Além disso, possibilita a avaliação de cenários alternativos sem a necessidade de intervenções no sistema real, contribuindo para a redução de custos operacionais e apoiando a identificação das melhorias mais adequadas ao contexto analisado.

No presente estudo foram conduzidas duas simulações distintas. O primeiro modelo, representado na Figura 02, corresponde ao sistema de atendimento atualmente em operação no terminal, caracterizado pela atuação de uma única atendente no guichê durante todo o período de funcionamento. Os dados utilizados para a construção do modelo foram coletados ao longo de uma hora de observação, no dia 15 de outubro de 2025.

A partir dos dados coletados, realizou-se o tratamento estatístico para adequação às distribuições probabilísticas necessárias à simulação. Para esse procedimento, utilizou-se o software Stat::Fit, responsável pelo ajuste das distribuições aos dados empíricos observados. Como resultado, identificou-se que o processo de chegada de clientes pode ser representado por uma distribuição de Poisson (0,767), enquanto o tempo de atendimento apresentou melhor aderência à distribuição Weibull (18; 2,15; 14,3), parâmetros utilizados na modelagem do sistema no ambiente FlexSim.

Figura 02 - Modelo de Simulação do Software FlexSim

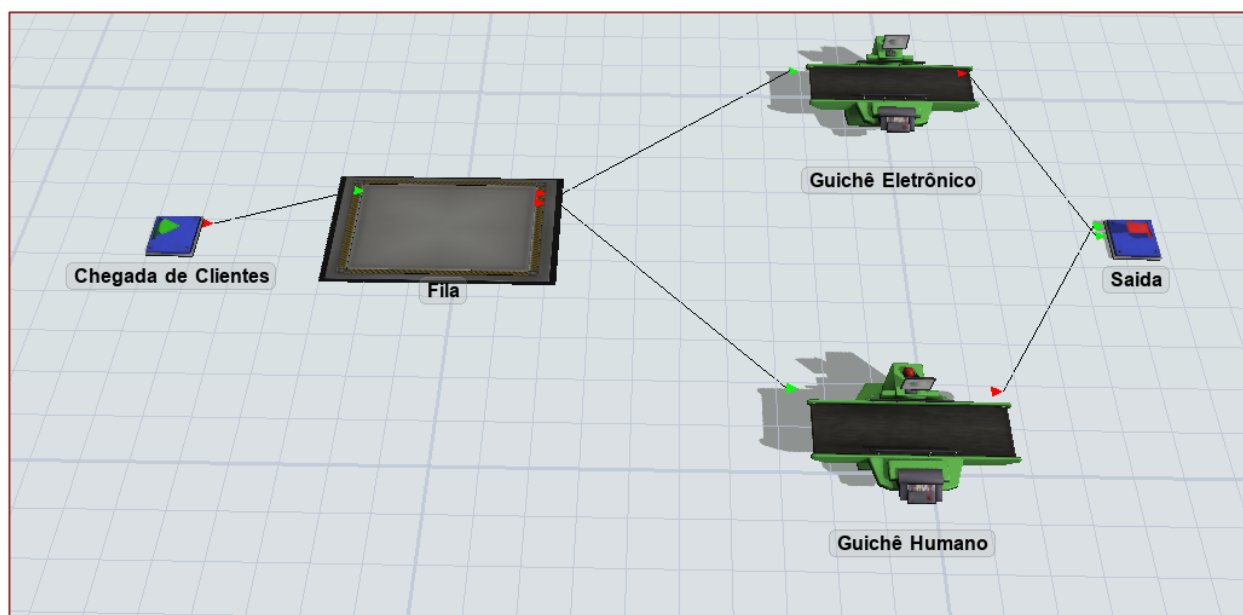


Fonte: Autores.

Com base no sistema real de atendimento do terminal, foi proposta uma série de simulações para ver qual as alterações que seriam mais viáveis e que iriam melhorar o sistema do terminal. Então foi proposto a implementação de um guichê eletrônico, similar aos que já são utilizados em grandes centros urbanos, mais especificamente em cinemas,

bancos e terminais rodoviários. Os parâmetros de auto atendimento utilizados na simulação tiveram como base tempos de atendimento em terminais rodoviários da cidade do Rio Grande do Sul, ao realizar o tratamento dos dados obtidos chegou se a uma distribuição probabilística representada por weibull (1.5, 2.0, 0.33). A imagem abaixo representa o sistema de atendimento já com as melhorias propostas.

Figura 03 - Simulação da melhoria no software FlexSim



Fonte: Autores.

Cronoanálise

A cronoanálise constitui uma ferramenta fundamental na gestão e melhoria de processos, voltada ao estudo sistemático dos tempos de execução das atividades. Seu enfoque abrange desde a análise de micromovimentos até a avaliação de etapas estruturadas de um processo, compostas por diferentes operações. O principal objetivo consiste na otimização do desempenho operacional, por meio da eliminação de movimentos desnecessários, reconfiguração de layouts e padronização de procedimentos, visando ao aumento da eficiência e da produtividade.

As aplicações da cronoanálise são amplas e adaptáveis a diferentes contextos organizacionais. Em ambientes industriais, pode ser empregada para aprimorar linhas de produção, identificar gargalos, reduzir tempos de ciclo e elevar a capacidade produtiva. Em setores administrativos, contribui para a racionalização de atividades como processamento de documentos e atendimento ao público, reduzindo o tempo despendido em tarefas repetitivas e aumentando a eficiência global. Além disso, a cronoanálise apresenta relevância em setores como saúde, logística e serviços, nos quais a gestão eficiente do tempo impacta diretamente a qualidade do atendimento e a satisfação dos usuários. Ao permitir a identificação de desperdícios e oportunidades de melhoria, a ferramenta auxilia na redução de custos operacionais e na elevação do desempenho organizacional.

Em síntese, a cronoanálise configura-se como um instrumento técnico de elevada importância para organizações que buscam aprimorar seus processos e alcançar melhores resultados por meio de decisões fundamentadas em dados e análise sistemática do trabalho.

No presente estudo, ao analisar o guichê de atendimento de uma empresa situada no terminal rodoviário do município de Abaetetuba, identificaram-se três etapas principais no macroprocesso de atendimento, conforme representado nas Figuras 01 e 02.

Figura 02 - Etapas descritas

1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa
Recepção do cliente	Abertura do Sistema	Solicita o Pagamento
Receber a demanda	Escolha do assento	Escolha da forma de pagamento
Validação	Emissão da passagem	Validação
Registro da documentação	Anexar a tarifa de embarque	Entrega da passagem

Fonte: Autores.

E para que fosse possível estimar a quantidade mínima de amostras necessárias à pesquisa, utilizou-se a fórmula proposta por Gil (2008) para determinação do tamanho amostra em populações finitas, conforme apresentado na Figura 03

$$n = \frac{Z^2 \times (p.q) \times N}{e^2 \times (N - 1) + Z^2 \times (p.q)}$$

Fonte: A. C. Gil, Métodos e Técnicas de Pesquisa Social.

onde:

Z = Grau de Confiança

e = Erro relativo Aceitável

N = Número de elementos no Universo

n = Número de elementos na amostragem

(p.q) = grau de homogeneidade das opiniões da população ("split") / probabilidade de ocorrência do evento "respostas iguais"

Amostragem

Para encontrar o N = quantidade mínima de amostras necessária para atender os critérios exigidos, como o percentual de erro, grau de confiança, e o coeficiente de homogeneidade adotando um universo estimado informado pela empresa em questão de 400 pessoas por dia, e utilizando os parâmetros conforme figura 04.

Figura 04 - Coeficientes

Erro %	7%
P	10%
Z ou GC = 93%	1,81
(p.q)	0,05
N	400

Fonte: Autores

Foi obtido um valor de N de 31 conforme figura 05.

Figura 05 - Cálculo da Amostragem

Tamanho da Amostragem	
n	n arredondado
30,9225756	31

Fonte: Autores

Tempo Normal

Com o objetivo de garantir uma margem de segurança nos dados, foi coletado 41 amostras, com os seguintes tempos como demonstrado na figura 06, assim como o TN que representa a soma das etapas, também foi estipulado a fila com base na figura xx e calculado a média do tempo de atendimento representado pela fórmula abaixo:

$$Tempo\ Total = Tempo\ Normal\ Wait\ (Fila).$$

Figura 05 – Dados coletados

Nº	1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa	TN	Wait
1	18,04 Sec	5,75 Sec	9,08 Sec	32,87 Sec	0,00 Sec
2	19,03 Sec	2,51 Sec	9,10 Sec	30,64 Sec	32,87 Sec
3	12,28 Sec	7,64 Sec	4,91 Sec	24,83 Sec	0,00 Sec
4	18,24 Sec	4,64 Sec	5,32 Sec	28,20 Sec	24,83 Sec
5	16,22 Sec	3,06 Sec	12,24 Sec	31,52 Sec	28,20 Sec
6	12,89 Sec	5,55 Sec	4,63 Sec	23,07 Sec	0,00 Sec
7	13,46 Sec	6,00 Sec	14,57 Sec	34,03 Sec	23,07 Sec
8	16,84 Sec	5,59 Sec	8,65 Sec	31,08 Sec	34,03 Sec
9	19,36 Sec	3,28 Sec	6,29 Sec	28,93 Sec	0,00 Sec
10	19,60 Sec	3,33 Sec	10,42 Sec	33,35 Sec	0,00 Sec
11	15,91 Sec	3,70 Sec	6,93 Sec	26,54 Sec	33,35 Sec
12	17,39 Sec	4,97 Sec	5,32 Sec	27,67 Sec	26,54 Sec
13	15,69 Sec	3,17 Sec	10,27 Sec	29,13 Sec	27,67 Sec
14	14,33 Sec	2,50 Sec	12,42 Sec	29,25 Sec	29,13 Sec
15	16,86 Sec	4,67 Sec	11,14 Sec	32,67 Sec	0,00 Sec
16	16,09 Sec	5,67 Sec	7,91 Sec	29,67 Sec	32,67 Sec
17	26,80 Sec	9,25 Sec	6,20 Sec	42,25 Sec	29,67 Sec
18	19,05 Sec	4,76 Sec	3,83 Sec	27,64 Sec	0,00 Sec
19	21,20 Sec	4,59 Sec	4,77 Sec	30,56 Sec	27,64 Sec
20	20,07 Sec	3,90 Sec	9,65 Sec	33,62 Sec	30,56 Sec
21	10,92 Sec	11,00 Sec	8,48 Sec	30,39 Sec	33,62 Sec
22	10,01 Sec	8,27 Sec	3,59 Sec	21,86 Sec	0,00 Sec
23	16,47 Sec	6,48 Sec	5,87 Sec	28,82 Sec	0,00 Sec
24	17,66 Sec	2,70 Sec	3,53 Sec	23,89 Sec	0,00 Sec
25	22,62 Sec	4,58 Sec	7,39 Sec	34,59 Sec	23,89 Sec
26	8,64 Sec	4,25 Sec	5,19 Sec	18,08 Sec	34,59 Sec
27	18,45 Sec	2,51 Sec	11,56 Sec	32,51 Sec	18,08 Sec
28	26,33 Sec	7,50 Sec	6,67 Sec	40,50 Sec	32,51 Sec
29	11,30 Sec	7,17 Sec	4,58 Sec	23,05 Sec	0,00 Sec
30	24,33 Sec	3,33 Sec	2,33 Sec	30,00 Sec	0,00 Sec
31	19,15 Sec	6,54 Sec	6,75 Sec	32,44 Sec	30,00 Sec
32	16,02 Sec	2,92 Sec	10,90 Sec	29,83 Sec	32,44 Sec
33	17,93 Sec	6,33 Sec	6,40 Sec	30,67 Sec	0,00 Sec
34	15,45 Sec	5,18 Sec	3,68 Sec	24,31 Sec	30,67 Sec
35	16,84 Sec	6,65 Sec	3,36 Sec	26,85 Sec	24,31 Sec
36	20,81 Sec	11,33 Sec	4,43 Sec	36,56 Sec	26,85 Sec
37	24,29 Sec	5,74 Sec	7,30 Sec	37,33 Sec	0,00 Sec
38	14,54 Sec	4,77 Sec	10,08 Sec	29,39 Sec	0,00 Sec
39	22,48 Sec	4,83 Sec	7,16 Sec	34,47 Sec	29,39 Sec
40	23,78 Sec	3,67 Sec	12,04 Sec	39,49 Sec	34,47 Sec
41	23,33 Sec	10,77 Sec	7,11 Sec	41,22 Sec	39,49 Sec

Fonte: Autores.

Figura 06 - Chegadas

Intervalo/Min	Amostra
1	2
2	1
3	0
4	1
5	1
6	0
7	1
8	1
9	0
10	0
11	2
12	0
13	0
14	1
15	0
16	1
17	1
18	0
19	2
20	1
21	1
22	0
23	0
24	0
25	2
26	2
27	2
28	1
29	0
30	0
31	1
32	2
33	0
34	1
35	2
36	1
37	0
38	0
39	1
40	3
41	2
42	1
43	1
44	0
45	2
46	1

Fonte: Autores.

Com os dados da figura 05, foi obtido as médias para cada coluna seguindo a fórmula: $\mu = \frac{\sum x}{n}$, onde x é os valores de cada coluna e n é a quantidade de valores, conforme resultados na figura 07.

Figura 07 - Médias Calculadas

Nº	1º tempo	2º tempo	3º Tempo	TN total	Fila	Tempo Total
Média ou TC	17,82 Sec	5,39 Sec	7,37 Sec	30,58 Sec	18,79 Sec	49,37 Sec

Fonte: Autores.

Fator de tolerância e tempo padrão

Consequente, por meio da fórmula $FT = \frac{1}{1-P}$, onde P representa a proporção da atividade estudada no conjunto de todas as atividades, com isso, foi obtido o Fator de tolerância e Tempo Padrão (em segundos e minutos), conforme figura 08.

Figura 08 - Fator de Tolerância e Tempo Padrão

FT	111,11%
Tempo Padrão	54,86 Sec
Tempo Padrão (Min)	0,914295393
Info: 8 horas de trabalho e 7 dias por semana	

Fonte: Autores.

Capacidade produtiva

Com base nos dados obtidos do tempo padrão, foi calculada a capacidade diária, mensal e anual respectivamente.

$$Diária = \frac{(8 \times 60)}{Tempo\ Padrão\ (Min)}$$

$$Mensal = Diária \times 30$$

$$Anual = Mensal \times 12$$

Figura 09 - Capacidade de Atendimento

Capacidade de Atendimento	Diária	Mensal	Anual
1 funcionário	524	15720	188640

Fonte: Autores

Por fim, foi constatado o percentual de utilização do guichê conforme figura 10.

Figura 10 - Utilização

Utilização		Percentual
Ocioso	11,08	16,79%
Ocupado	54,92	83,21%

Fonte: Autores.

5. PROPOSTA DE MELHORIA

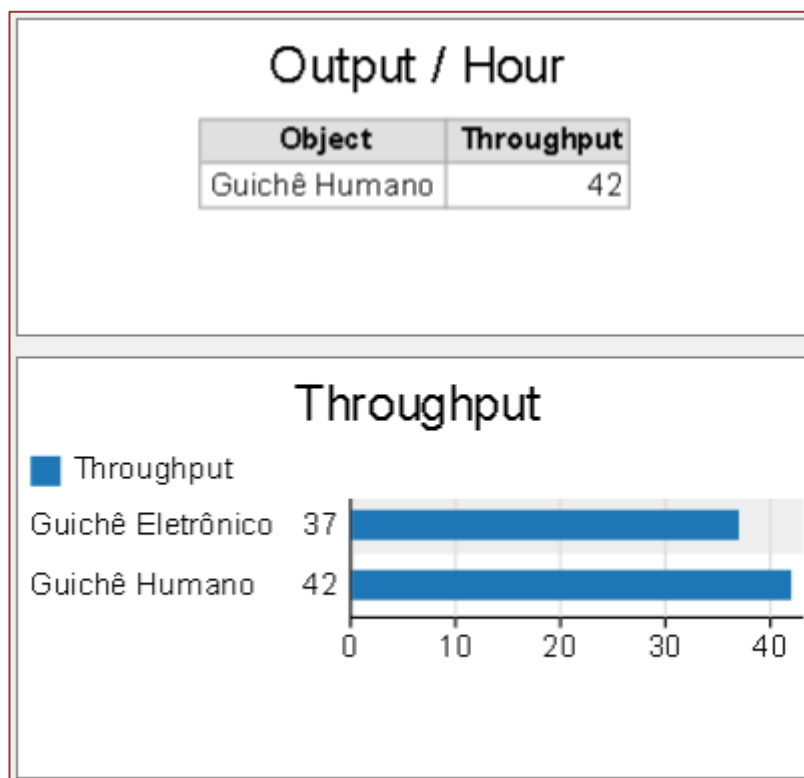
Para a elaboração da proposta de melhoria no sistema de atendimento do terminal rodoviário, foram considerados os parâmetros obtidos por meio da simulação computacional e da cronoanálise, os quais forneceram subsídios quantitativos para a identificação dos principais pontos críticos do processo. A integração dessas ferramentas permitiu avaliar o desempenho operacional do sistema e fundamentar tecnicamente a proposição de intervenções estruturadas.

A análise dos dados evidenciou ineficiências no atendimento, especialmente em horários de pico, nos quais se observou aumento significativo no tempo de espera e formação de filas recorrentes ao longo do dia. Diante desse cenário, propõe-se a modernização dos guichês por meio da implementação de tecnologias de autoatendimento com interface touch screen, visando à automatização parcial do processo de compra de passagens e à redistribuição da demanda atualmente concentrada no atendimento presencial.

Estudos em ambientes como cinemas e restaurantes demonstram que a adoção de quiosques de autoatendimento contribui para a redução do tempo de processamento das transações, maior precisão nos pedidos e melhoria da experiência do usuário. De forma análoga, em terminais rodoviários, a introdução de guichês eletrônicos e aplicativos móveis para aquisição de passagens tende a otimizar o fluxo de passageiros, reduzir filas e tornar o processo de embarque mais ágil e organizado.

Os resultados da simulação indicaram que a implementação dessa solução pode reduzir o tempo médio de compra para aproximadamente 1 a 3 minutos, a depender da rota e da forma de pagamento selecionada. Observou-se ainda uma redução estimada de 46% na demanda direcionada ao guichê convencional, refletindo em menor sobrecarga operacional e melhor distribuição do atendimento.

Adicionalmente, a automação do processo de bilhetagem possibilita que os colaboradores sejam realocados para atividades de maior complexidade e suporte ao usuário, aumentando a eficiência global do sistema. As imagens apresentadas a seguir ilustram o fluxo de passageiros por hora, com base nos cenários simulados, evidenciando a diminuição percentual de 46% na utilização do guichê humano após a implementação da proposta.

Figura 11 - Relatório do Software FlexSim

Fonte: Autores.

Concluimos que através da implementação de telas touch screen em guichês de terminais rodoviários pode trazer inúmeros benefícios, incluindo a redução do tempo de espera, aumento da satisfação do cliente e maior eficiência operacional. Adotar essa tecnologia é um passo importante para modernizar os serviços e atender melhor às necessidades dos usuários.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo analisar o desempenho do sistema de atendimento de um terminal rodoviário localizado no município de Abaetetuba/PA, por meio da aplicação integrada de ferramentas da Engenharia de Produção, com destaque para a cronoanálise, a modelagem baseada na Teoria das Filas e a simulação computacional. A utilização dessas metodologias permitiu uma avaliação quantitativa consistente do sistema, possibilitando a identificação de gargalos operacionais e limitações estruturais no processo de atendimento. Os resultados evidenciaram que o modelo atual, caracterizado pela atuação de um único guichê convencional, apresenta elevada taxa de ocupação em determinados períodos do dia, especialmente nos horários de pico, ocasionando aumento no tempo médio de espera e formação recorrente de filas. Tal cenário demonstra um desequilíbrio entre a taxa de chegada de usuários e a capacidade de atendimento disponível, comprometendo a eficiência operacional e a qualidade do serviço prestado. A aplicação da simulação computacional mostrou-se fundamental para a análise de cenários alternativos, permitindo testar intervenções sem a necessidade de modificações imediatas no sistema real. A proposta de implementação de um guichê

eletrônico de autoatendimento revelou-se tecnicamente viável e capaz de reduzir significativamente a demanda direcionada ao atendimento humano, com estimativa de redução de 46% na utilização do guichê convencional, além da diminuição expressiva no tempo médio de atendimento. Dessa forma, conclui-se que a adoção de tecnologias de autoatendimento, aliada a uma abordagem sistemática baseada em dados reais e modelos matemáticos, constitui uma estratégia eficaz para a modernização e otimização de sistemas de serviço em terminais rodoviários. Além de contribuir para a redução do tempo de espera e melhoria da experiência do usuário, a proposta possibilita melhor alocação de recursos humanos e aumento da eficiência global do sistema. Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de análises de custo-benefício da implementação da solução proposta, bem como a ampliação do estudo para diferentes períodos do ano, considerando variações sazonais na demanda. Sugere-se, ainda, a avaliação da percepção dos usuários quanto à qualidade do atendimento após a implementação das melhorias, a fim de mensurar impactos qualitativos complementares aos resultados quantitativos apresentados.

REFERÊNCIAS

- [1] ANDRADE, L. B. A. **A cronoanálise e suas aplicabilidades na indústria têxtil**. Monografia (Engenharia de Produção), Centro Universitário Fametro – UNIFAMETRO, Fortaleza, 2021.
- [2] BARNES, R.M. **Estudo de tempos e movimentos: projeto e medida do trabalho**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.
- [3] CHAGAS, M. G. O.; SABÓIA, D. L.; SILVA, E. F.; CAVALCANTE, M. E. N.; LORDELO, S. A. V. **Aplicação da cronoanálise em uma panificadora localizada no interior do Estado do Ceará**. In: Encontro nacional de engenharia de produção. 43, 2023. Fortaleza. Ceará. Anais. [...] Fortaleza, Ceará, 2023. p. 2- 15
- [4] Costa, E. L.; Teixeira, E. C. **Cronoanálise: estudo de caso na construção civil para controle de produção**. In: Encontro nacional de engenharia de produção. 43, 2023. Fortaleza. Anais. [...] Fortaleza, Ceará, 2023. p. 1- 11
- [5] FERNANDES, F. C.; MELO, V. A. NASCIMENTO E. M.; COSTA L. M. G. COSTA M. M. F. **Balanceamento de linha de montagem utilizando-se cronoanálise: estudo de caso em uma fábrica de peças metálicas**. In: Encontro nacional de engenharia de produção. 43, 2023. Fortaleza. Ceará. Anais. [...] Fortaleza, Ceará, 2023. p. 1- 15
- [6] HIN, N. D.; TEIXEIRA, E.P. **Cronoanálise: estudo em uma indústria química no segmento de materiais**. In: Encontro nacional de engenharia de produção. 43, 2023. Fortaleza, Ceará. Anais. [...] Fortaleza, 2023. p. 1- 12.
- [7] JUNIOR, B. D. et al. **Os Benefícios da Implantação da Cronoanálise**, XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Fortaleza-CE, 2015, Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_206_221_28073.pdf
- [8] LIMA, A. A. F; SAMPAIO, A. A. R.; XISTO, A. H. P.; GOMES, T. A. **Aplicação da cronoanálise para determinar o tempo padrão no processo de descarregamento de manganês no setor de armazenagem de uma empresa em Vila do Conde, Barcarena-Pa**. In: Encontro nacional de engenharia de produção. 43, 2023. Fortaleza. Ceará. Anais. [...] Fortaleza, Ceará, 2023. p. 2- 13.
- [9] MARTINS, V. W. B.; SANTOS, N. C. B.; SILVA, N. C. L.; SOARES, D. C. JÚNIOR, P. S. L. **Análise da capacidade produtiva de uma indústria de blocos pré-moldados utilizando o estudo de tempos cronometrados**. Iberoamerican Journal of Industrial Engineering, Florianópolis, SC, Brasil, 2014, v. 6, n. 11, p. 311-327.
- [10] MORI, V. V et al. **Productivity Improvement by use of Time Study, Motion Study, Lean Tool's and Different Strategy for Assembly of Automobile Vehicles**. International Journal for Scientific Research & Development, v. 3, n. 2, p. 2321-613, 2015
- [11] MOKTADIR, M. A. et al. **Productivity Improvement by Work Study Technique : A Case on**

Leather Products Industry of Bangladesh. Industrial Engineering Management, v. 6, n. 6, p. 1–11, 2017.

[12] PINHEIRO, E. F.; SANTO, F. L.; TRINDADE, F.S; LOPES, H. S; DIAS, M. V. V. **Aplicação da Engenharia de Métodos para determinação de possíveis melhorias na capacidade produtiva de cepas em uma empresa do ramo de confecção de vassouras no Município de Abaetetuba/pa.** In: Encontro nacional de engenharia de produção. 43, 2023. Fortaleza, Ceará. Anais. [...] Fortaleza, Ceará, 2023. p. 2- 14.

[13] GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

Capítulo 8

Estudo de filas de caminhões na recepção de leite em indústria de laticínio usando métodos estocásticos

*Marina Ester Magrini Antônio
Yung-Chin Shih*

Resumo: A necessidade de otimizar processos em indústria de processamento de leite é um dos maiores desafios enfrentados pelo setor devido ao produto ser de alta perecibilidade. Como sua matéria prima é de validade curta, tanto a logística quanto o gerenciamento do processo operacional devem ser integradamente estudados. Tipicamente, o silo do processo é alimentado por caminhões que descarregam leite vindo do produtor. Assim, quando ocorre o desajuste de chegada de caminhões no processo, tanto o leite remanescente no silo quanto no caminhão acaba permanecendo mais tempo que o necessário gerando desperdício, além de requerer higienização. Para lidar com problemas de produtividade e desperdício, esse estudo propõe melhorar esse sistema que forma fila de caminhões com o uso de ferramentas de Cadeias de Markov e de Simulação de Monte Carlo. O objetivo é prover mudanças operacionais, propondo quatro sugestões de melhoria, que envolvem alteração da chegada de cada tipo de caminhão (melhorias 1 e 2), alocação de caminhões em períodos de ociosidade (melhoria 3) e limitação de chegada de caminhões por período (melhoria 4), sendo que esta última foi que apresentou melhores resultados, possibilitando reduzir a fila de caminhões em 83,3% e 93,75% de espera em fila.

Palavras-chave: Simulação de Monte Carlo, Cadeia de Markov, Indústria leiteira, Aplicação de teoria das filas.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil o valor de venda da produção de laticínios gera uma riqueza importante, embora inferior que a de soja. Em especial o leite é considerado um alimento fundamental, presente em quase todas as cestas básicas e em mais de 90% dos lares (Milkpoint, 2011).

Diversos são os problemas enfrentados pelo setor leiteiro, desde a competitividade entre as indústrias produtoras e, até mesmo, a programação de produção e estocagem. Jonsson & Ivert (2015) entendem que para que haja uma boa gestão da demanda, é necessário ter a programação da produção funcionando corretamente.

Nesta toada, o que se nota é que, embora tenha ocorrido uma diminuição do número de produtores e do número de vacas ordenhadas, uma vez que ocorreu o aumento do custo de transporte, a produção de leite aumentou (De Camargo).

O fator principal que levou a este resultado foi o aumento da produtividade do animal, tendo em vista que houve o aumento da escala de produção por dia, bem como, a evolução tecnológica com automatização, o melhoramento genético, a nutrição, e a melhoria na gestão das fazendas. De forma que, a produção que antes era de 1.000 litros de leite por vaca ao ano, passou a ser de 2.621 litros de leite por vaca ao ano e um dos fatores principais que levou a este “salto” na produção foi o melhoramento genético, segundo a revista ABCZ (2014). Porém, com o aumento da produção deve-se pensar também em inovar a produção, pois o recebimento contínuo do leite na indústria, gera uma desarmonização entre as variáveis de recebimento, capacidade e demanda.

O ciclo do leite se inicia na ordenha nos produtores, onde é tirada a matéria prima dos animais, podendo ser feito por grandes e pequenos produtores, por maquinários ou manualmente e é carregado até as fabricas por meio de caminhões tanque resfriados. Alguns caminhões contêm compartimentos para recolher de diferentes produtores por vez, porém a principal restrição é que seja caminhão fechado, sem contato nenhum com o ambiente externo para não ocorrer contaminação.

A falta de leite nos silos das grandes indústrias leiteiras prejudica não somente a produtividade, como também impacta no seu lucro final. Isto ocorre não pela falta de matéria prima, mas sim pelo atraso/demora no carregamento dos silos, uma vez que os caminhões que chegam às fábricas com a matéria prima, precisam aguardar um tempo indeterminado.

Segundo o Decreto nº 9.013 de 2017, o leite cru precisa ser conservado em temperaturas de no máximo 4°C por no máximo 48h. Se for inserido no silo de armazenagem, deve atingir essa temperatura em 3h para estarem próprios para consumo.

Segundo reclamações sobre uma marca de leite, os três maiores problemas, vindos de fábrica, encontrados pelos consumidores finais são leite talhado, sabor/gosto ruim e cor estranha. Já os maiores problemas encontrados pela indústria segundo a resolução Resolução-RDC nº 216/2004, se os micróbios encontrarem nutrientes, umidade e temperatura adequados, pode acarretar em proliferação de microrganismos no produto, gerando um grande prejuízo.

O presente estudo tem por objetivo propor a melhoria do processo de recepção do leite em uma indústria de laticínios aplicando a teoria das filas. Com a utilização da cadeia de Markov e da simulação de monte Carlo, determinar o tipo de caminhão mais adequado, a quantidade de cada tipo de caminhão e o instante que este deva chegar visando reduzir

desperdício em silo e em caminhão, além de proporcionar leite em bom estado para o consumo.

2. METODOLOGIA DE PESQUISA

Diante da problemática, utilizar ferramentas para estudar e prever o comportamento de um sistema real torna-se crucial. Entre as ferramentas que permitem fazer uma análise dessa natureza antes que qualquer alteração real seja feita na empresa, são a Cadeia de Markov e a simulação de Monte Carlo. Com isso, pode-se obter desempenho desejado de um sistema e até prover alternativas mais apropriadas. Essas são as ferramentas escolhidas para conduzir a pesquisa.

As principais abordagens, de acordo com Bryman (1989) são: causalidade, mensurabilidade, replicação e generalização. Assim, a simulação utilizada nesse estudo se encaixa nesse caráter de metodologia, por utilizar dados de simulação para chegar as possíveis alternativas operacionais para um determinado problema.

Esse estudo é classificado como pesquisa de caráter quantitativo, visa recolher dados e informações de uma empresa de laticínios que se pretende estudar para solução de problema específico, fazendo análises e hipóteses da situação.

Com a simulação, os resultados a serem coletados são de natureza quantitativa, os quais são tamanho da fila e o tempo de espera e o tempo de ociosidade da fábrica. Subtende-se que se a fila não for otimizada, bem como se a fábrica estiver desabastecida, em ambos os casos, haverá desperdício de leite.

Os passos para conduzir o estudo são: 1) Levantar o processo de recepção do leite; 2) Coletar dados: capacidade de cada caminhão, capacidade dos silos e tempos de descarregamento; 3) Desenvolver um modelo de simulação; 4) Aplicar simulação de Markov e Monte Carlo para estimar os dados; 5) Calcular medidores de desempenho da situação atual; 6) Propor melhorias no processo de recepção do leite; 7) Analisar os impactos das melhorias propostas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. TEORIA DAS FILAS

Em um sistema típico que forma fila, de um lado está a chegada de entidade buscando atendimento (receber serviço), e de outro, prestador de serviço (servidor).

Quando uma entidade chega e encontra um servidor disponível, recebe serviço caso contrário, se acumula formando fila.

O número de entidades que chega pode ser tanto limitado quanto ilimitado. As diferenças entre os instantes de chegadas sucessivas de entidades podem ser constantes, ou então variados. O mesmo ocorre com a duração do atendimento.

O regime de serviço diz respeito à disponibilidade do serviço (se os servidores funcionam o tempo todo ou apenas um tempo determinado) e à capacidade do sistema (quantos servidores estão disponíveis atendendo ao mesmo tempo). Por fim, a disciplina da fila compreende a regra de atendimento, podendo ser aleatória, por ordem de chegada, prioritária, entre outras.

As filas podem ser organizadas mediante um único servidor ou por múltiplos servidores, no qual o primeiro apresenta apenas um canal de atendimento e o segundo, quando há “divisão” das filas (Torres, 1996).

Os medidores de desempenho têm como objetivo avaliar e comparar se o sistema opera de forma eficiente. Os cálculos mais utilizados, citados anteriormente, e dispostos nesse estudo são o comprimento da fila e a espera em fila.

A Tabela 1 mostra exemplos de ordens de chegada, instantes e durações - em segundos - em um sistema de atendimento, que possui dois atendentes (servidores).

Tabela 1: Ritmo de chegada de pessoas

Ordem de chegada	1º	2º	3º	4º	5º
Instante de chegada (s)	3	6	6	7	9
Duração do atendimento (s)	2	5	2	4	3

Com a tabela rearranjada, ver Tabela 2, é possível calcular os medidores desejados de desempenho desejados.

De acordo com a Tabela 2, a espera da primeira pessoa é zero, pois assim que ela chegou no instante 3 os dois servidores encontram-se disponíveis. Ou seja, assim que ela chega já é atendida, ficando apenas um servidor ocupado, e o número de servidores disponíveis é um até o instante 5.

As pessoas (segunda e a terceira) chegam juntas no instante 6, encontrando os dois servidores disponíveis, e são imediatamente atendidas. Uma recebendo atendimento até o instante 11, e outra até o instante 8, o que significa que o número de servidores é nulo do instante 6 ao 7. Desse modo, ainda não tivemos situação de pessoa em espera.

A quarta pessoa chega no instante 7 e como não encontra nenhum servidor disponível, terá que esperar em fila, aguardando por 1s para liberar um servidor.

A quinta pessoa chega no instante 9 e não é imediatamente atendida. Somente no instante 11 é que o servidor ocupado pela segunda pessoa será liberado. A espera é de 2 segundos. Com todas as pessoas incluídas na Tabela 2, podemos calcular a espera média que resultou em 0,6 s, calculada a partir de $[(0+0+0+1s+2s)/5\text{pessoas} = 0,6s/\text{pessoa}]$. A espera máxima identificada, portanto, é de 2s. A fila média é 0,21 pessoa/instante, calculada a partir de $[(11 \times 0) + (3 \times 1) / 14] = 0,21\text{fila/instante}$. A fila máxima é uma pessoa, e ocorre nos instantes 7, 9 e 10.

Tabela 2: Dinâmica de formação de fila, e de variação de número de servidores disponíveis conforme as chegadas de pessoas para atendimento

Cliente	Tempo (s)	Chegada	Ch. Ac.	Atendimento	At. Ac.	Fila	Servidores Disponíveis
	0	0	0	0	0	0	2
	1	0	0	0	0	0	2
	2	0	0	0	0	0	2
1º cliente libera o servidor no instante 5	3	1	1	1	1	0	1
	4	0	1	0	1	0	1
	5	0	1	0	1	0	2
2º cliente libera no instante 11 e o 3º cliente libera no instante 8	6	2	3	2	3	0	0
4º cliente aguarda ser atendido no instante 8 e libera no instante 12	7	1	4	0	3	1	0
	8	0	4	1	4	0	0
5º cliente atendido no instante 11 e libera no 14	9	1	5	0	4	1	0
	10	0	5	0	4	1	0
	11	0	5	1	5	0	0
	12	0	5	0	5	0	1
	13	0	5	0	5	0	1
	14	0	5	0	5	0	2

Em estudo de filas, as informações no tocante ao tipo de entidade que chega, o instante que isso ocorre, e a duração de atendimento variam constantemente. Essas variações são comportamentos típicos de um processo estocástico.

Assim, com base em dados históricos, é possível projetar essas informações futuras para serem usadas em estudo de filas. A entidade nesse estudo corresponde aos tipos de caminhões, e o atendimento que ocorre na baía.

O trabalho aborda dois métodos encontrados dentro do processo estocástico: a Cadeia de Markov e a Simulação de Monte Carlo.

3.2. CADEIAS DE MARKOV

De uma forma geral, o processo Markoviano pode ser definido como um método utilizado para modelar eventos em que o futuro depende apenas do presente ou passado mais recentes. Segundo Van Ravenzwaaij *et al.* (2016), este método se mostra viável para a aplicação de simulações.

Considere $(X_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ um processo estocástico discreto em tempo discreto e homogêneo no tempo. Se a propriedade $P(X_{n+1} = r | X_n = q_n, \dots, X_0 = q_0) = P(X_{n+1} = r | X_n = q) = p(r|q)$ é satisfeita para qualquer $n \geq 0$ e quaisquer escolhas de $r, q_0, \dots, q_n \in E$, então esse processo é chamado cadeia de Markov. De forma que, um processo aleatório que satisfaça a propriedade Markov possui a seguinte característica interessante: previsões em seu futuro com base somente em seu estado atual.

Os elementos básicos de uma cadeia de Markov são o estado (variável de interesse) e a matriz de transição (onde estão as probabilidades de um estado ao outro). Esses, juntamente com as informações contidas em vetor de probabilidades iniciais, permitirão determinar qual será a chance de ocorrência de cada estado em um futuro próximo. Para determinar as probabilidades de um futuro distante, as probabilidades P de cada estado i entram em equilíbrio (π_i), e são essas probabilidades em equilíbrio que correspondem a probabilidade de ocorrência de um evento de um futuro qualquer, usadas em simulação de Monte Carlo (Tópico 3.4 seguinte).

A cadeia de Markov em conjunto com a simulação de Monte Carlo, que utiliza um processo de aleatoriedade como um sorteio de números, permite eleger os valores das variáveis em cada seleção (Nascimento, 2009).

3.3. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

Shamblim & Stevens (1974), apontam seis passos a serem apreciados:

1. Definição das variáveis envolvidas na análise, fundamentadas a partir de dados passados ou estimativas subjetivas do pesquisador;
2. Avaliação do comportamento das distribuições de probabilidade das variáveis pré-determinadas;
3. Definição dos intervalos de incidências dos números aleatórios;
4. Geração de números aleatórios utilizados na simulação;
5. Utilização dos números obtidos nos intervalos de classe de cada variável selecionada previamente;
6. Simulação do experimento a fim de que seja obtida resultados.

Para compreender esses seis passos, imagine um exemplo prático em que se deseja simular a sequência de carregamento de determinados carros dentre todos 30 estacionados em um pátio para completar um caminhão-cegonha que comporta 8 veículos. Primeiramente é necessário identificar a porcentagem dos tipos de carros que estão estacionados: 30% carro A; 20% carro B e 50% carro C. A Tabela 3 mostra a frequência relativa e acumulada de cada tipo de carro, onde se a bola sorteada for 1 a 30 significa que o carro correspondente é do tipo A; de 31 a 50 corresponde ao carro tipo B, e o restante o carro tipo C.

Tabela 3: Frequência de carro

TIPO DE CARRO	FREQ RELATIVA	FREQ RELATIVA AC.	NUMERO DE BOLAS
A	0,3	0,3	1--30
B	0,2	0,5	31--50
C	0,5	1	51--100

O próximo passo a ser feito, é um sorteio aleatório onde mostrará quais tipos de carros foram selecionados. Usando a simulação de Monte Carlo, conforme as probabilidades de cada estado, na ocasião gerou-se a seguinte sequência de carregamento:

B – C – C – A – C – B – C – C

Conclui-se que, o primeiro carro a ser carregado é do tipo B, o segundo é do tipo C, o terceiro é do tipo C e assim por diante até completar o caminhão-cegonha.

Nesse exemplo, o tipo de carro é o estado, e a frequência relativa a ser usada em cada estado corresponderia ao π , obtida da cadeia de Markov.

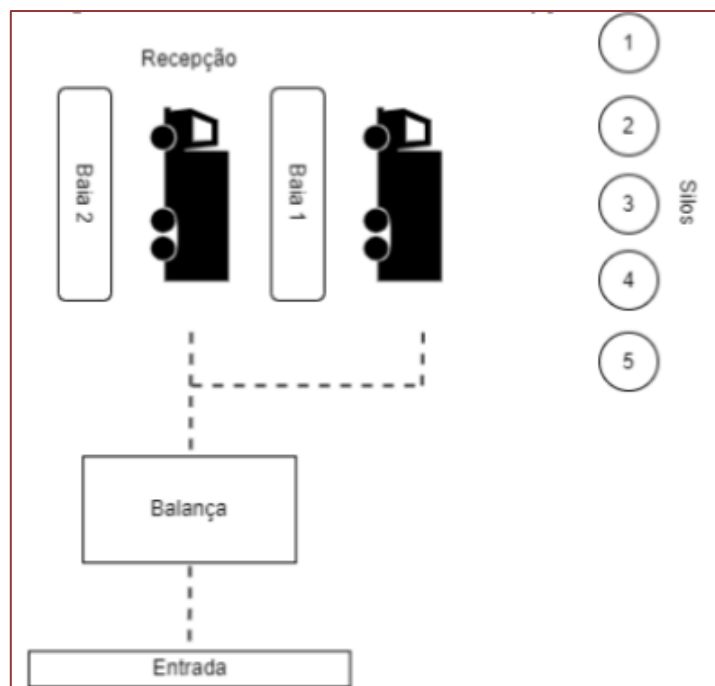
4. ESTUDO DE CASO

A indústria de beneficiamento de leite tem como atividades principais: o beneficiamento do leite para expedição a granel para outras unidades e clientes e a produção de bebidas e alimentos UHT.

A fábrica escolhida para esse estudo encontra-se no Sul do Brasil, localizada no estado do Paraná, operando 24h por dia, todos os dias da semana. O que foi analisado nesse estudo é a recepção à granel (descarregamento) do leite de vaca cru nos silos.

Os caminhões acessam o pátio da fábrica pela portaria, e ficam aproximadamente 10 minutos na balança para a inspeção do peso, como mostrada na Figura 1.

Figura 1: Planta externa da fábrica – Recepção



Assim que o laboratório liberar a análise da amostra (aproximadamente 10 minutos) o caminhão já pode se dirigir a uma das baias para descarregamento do leite cru ao silo (caso houver baia disponível). Na Figura 1 estão mostradas cinco dos nove silos existentes. Os outros quatro silos servem à expedição, que não será abordada neste estudo. Quanto à recepção, dada a complexidade, optou-se por limitar a estudar apenas um dos silos, que tem capacidade de 100.000 litros.

O trabalho dos operadores é fazer com que o leite chegue no silo; eles utilizam o encaixe de mangotes e controlam as tubulações e bombas para realizar essa operação e controlar em qual silo será enchido por leite.

Os problemas observados atualmente incluem a perecibilidade da matéria prima, que pode ser perdida se aguardar muito tempo dentro do caminhão para ser descarregado.

4.1. MODELAGEM USANDO A CADEIA DE MARKOV E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A modelagem é realizada em duas etapas. Inicialmente a validação do modelo, verificando o desempenho do modelo se está condizente com que acontece na empresa; em seguida serão propostas algumas mudanças operacionais.

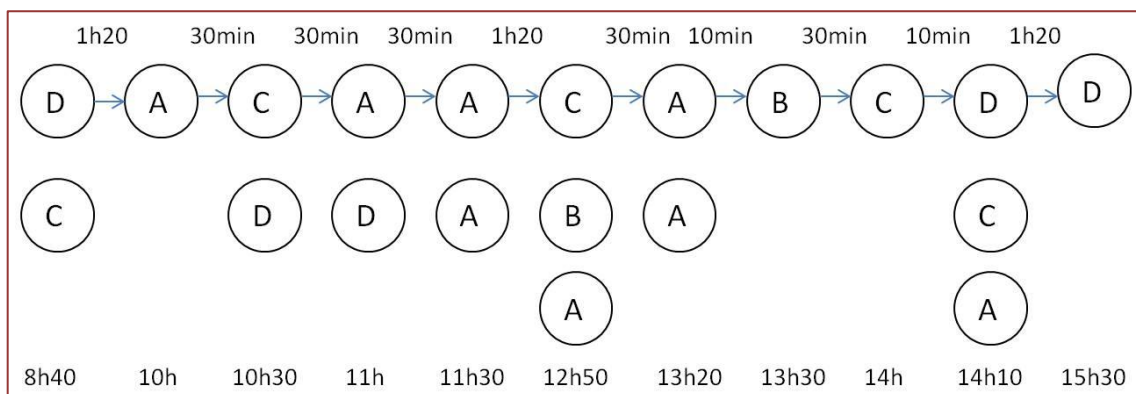
Para a validação do modelo, foram coletados dados reais como instante de chegada, tipo de caminhão que chega, quantidade de caminhão que chega no mesmo instante, tempo de descarregamento e a capacidade do silo.

A demanda da fábrica foi analisada dentro de um período fixado de 8h e feito um cálculo médio por hora de quantos litros de leite eram puxados para o beneficiamento, chegando num resultado de 30.000 litros a cada 1h, ou seja, em um turno de 8h são necessários 240.000 litros de leite. Os caminhões que abastecem a indústria são A, B, C e D, respectivamente.

As capacidades dos caminhões tipo A, B, C e D são 15.000L, 25.000L, 30.000L e 35.000L, respectivamente. Devido ao acesso restrito para conduzir o estudo, foi possível visitar a empresa apenas em um dia, por um período de 8h para fazer a análise.

Os dados históricos coletados foram que os caminhões chegam em instantes de $X=10\text{min}$, $Y=30\text{min}$ e $Z=1\text{h}20\text{min}$, sendo possível a chegada de até 3 caminhões no mesmo instante ($M=1\text{caminhão/instante}$, $N=2\text{caminhões/instante}$ e $O=3\text{caminhões/instante}$). Aplicando a cadeia de Markov, encontramos os seguintes dados na Figura 2.

Figura 2: Modelo de cadeia de Markov para os dados históricos



Entre os círculos (tipos de caminhões), temos os intervalos de tempo. A chegada do terceiro caminhão, do tipo A, é uma hora e vinte minutos depois da chegada dos caminhões tipo D e C que chegaram as 8h40 da manhã, ou seja, ele chegou as 10h da

manhã, e assim sucessivamente. O último caminhão a chegar foi o do tipo D as 15h30 da tarde, 1h20 após a chegada de 3 caminhões, sendo eles tipo D, C e A as 14h10 da tarde.

Devido à baixa previsibilidade de caminhões, foi necessário usar cadeia de Markov e simulação Monte Carlo para prever as chegadas de caminhões. Apenas os tempos de descarregamento bem como as capacidades dos silos são fixos.

Para isso, a matriz de transição foi montada para cada estado: tipo de caminhão, instante de chegada e quantidade de caminhão por instante. Inicialmente foi feito para os tipos de caminhões.

A-A=6	B-A=2	C-A=5	D-A=4
A-B=4	B-B=0	C-B=0	D-B=0
A-C=3	B-C=1	C-C=1	D-C=0
A-D=2	B-D=0	C-D=3	D-D=2

Onde o estado A para A aparece seis vezes no fluxograma, A para B aparece quatro vezes e assim por diante. O estado A para outro estado aparece 15 vezes, o estado B para outro estado aparece 3 vezes, o estado C para outro aparece 9 e o estado D para outro aparece 6 vezes. Assim foi possível montar a matriz:

$$\begin{pmatrix}
 \begin{matrix}
 A & B & C & D \\
 6/15 & 4/15 & 1/5 & 2/15 \\
 2/3 & 0 & 1/3 & 0 \\
 5/9 & 0 & 1/9 & 1/3 \\
 2/3 & 0 & 0 & 1/3
 \end{matrix}
 \end{pmatrix}$$

Com a matriz de transição definida, foi possível calcular os π dos tipos de caminhões, que resultou em:

$$\pi_A=0,512$$

$$\pi_B=0,139$$

$$\pi_C=0,167$$

$$\pi_D=0,182$$

Com o π pronto, calculou-se a frequência relativa acumulada, para saber os intervalos das bolas a serem sorteadas indicados na Tabela 4.

Tabela 4: Frequencia relativa acumulada

TIPO DE CAMINHÃO	FREQ RELATIVA	FREQ RELATIVA AC.	NUMERO DE BOLAS
A	0,512	0,512	1 -- 51
B	0,139	0,651	52 -- 65
C	0,167	0,818	66 -- 82
D	0,182	1	83 -- 100

Para o tipo de caminhão A, adotou-se os números de bolas de 1 a 51, oriundos do cálculo do pi para o sorteio seguinte. Para o tipo de caminhão B adotou-se as bolas de 52 a 65. O caminhão tipo C representam as bolas de 66 a 82 e o tipo D as bolas de 83 a 100.

O mesmo método foi utilizado para os instantes usando-se os elementos X, Y e Z. Como os instantes são os tempos, e são uma variável contínua, foram necessários fazer uma série de agrupamentos (classes) para conseguirmos trabalhar adequadamente com os estados. Nesse estudo, se um caminhão chega 28 minutos após o caminhão anterior, assume-se que ele chega 30 minutos após o caminhão anterior e assim sucessivamente. Essa adaptação foi utilizada somente para a montagem da Cadeia de Markov e para fazer a simulação de Monte Carlo. No entanto, quando for montada a tabela para obtenção das filas, os instantes voltam às informações originais.

X-X=0	Y-X=2	Z-X=0
X-Y=1	Y-Y=2	Z-Y=2
X-Z=1	Y-Z=1	Z-Z=0

Onde o estado X para X não aparece nenhuma vez no fluxograma, X para Y aparece uma vez e assim por diante. O estado X para outro estado aparece duas vezes, o estado Y para outro estado aparece 5 vezes e o estado Z para outro aparece duas vezes, levou-se a matriz de transição a seguir:

X	Y	Z
0	1/2	1/2
2/5	2/5	1/5
0	1	0

Com a matriz de transição definida, foi possível calcular os π dos instantes.

$$\pi_X=0,22$$

$$\pi_Y=0,56$$

$$\pi_Z=0,22$$

Calculou-se a frequência relativa acumulada indicada na Tabela 5.

Tabela 5: Frequencia relativa acumulada após cálculo do π

INTERVALO DE CHEGADA	FREQ RELATIVA	FREQ RELATIVA AC.	NUMERO DE BOLAS
X	0,22	0,22	1 – 22
Y	0,56	0,78	23 – 78
Z	0,22	1	79 – 100

Para o instante X, adotou-se os números de bolas de 1 a 22, para o instante Y adotou-se as bolas de 23 a 78 e para o instante Z representam as bolas de 79 a 100.

E por fim foi montada a matriz de transição com os elementos M, N e O representando a quantidade por instante.

M-M=1	N-M=2	O-M=1
M-N=1	N-N=2	O-N=1
M-O=1	N-O=1	O-O=0

Onde o estado M para M aparece uma vez no fluxograma, M para N aparece uma vez e assim por diante. O estado M para outro estado aparece três vezes, o estado N para outro estado aparece 5 vezes e o estado O para outro aparece duas vezes, levou-se a matriz a seguir.

M	N	O
1/3	1/3	1/3
2/5	2/5	1/5
1/2	1/2	0

Com a matriz de transição definida, foi possível calcular os π das quantidades/instantes.

$$\pi_M=0,39$$

$$\pi_N=0,40$$

$$\pi_O=0,21$$

A frequência relativa acumulada é como mostrada na Tabela 6.

Tabela 6: Frequencia relativa acumulada após cálculo do π

QNTD/ INSTANTE	FREQ RELATIVA	FREQ RELATIVA AC.	NUMERO DE BOLAS
M	0,39	0,39	1 – 39
N	0,4	0,79	40 – 79
O	0,21	1	80 – 100

Para o instante M, adotou-se os números de bolas de 1 a 39, para o instante N adotou-se as bolas de 40 a 79 e para o instante Z representam as bolas de 80 a 100.

Pela ferramenta Excel, foi realizado o sorteio das bolas para a recepção pela fórmula *Randon*, que faz o sorteio de números aleatórios, com intervalos de 1 a 100 representando as bolas. O resultado do sorteio pode ser visto na Tabela 7. A restrição utilizada foi o período de 8h, assim que completou o período foi cessado o sorteio.

Tabela 7: Recepção – Monte Carlo

SORTEIO		Nº ALEATÓRIO	TIPO
1)	1º instante de chegada	47,0	Y
	Quantos chegaram nesse instante	59,7	2
	Quais tipos	50,9	A
		14,3	A
2)	2º instante de chegada	67,4	Y
	Qts chegaram nesse instante	11,1	1
	Qual tipo	14,3	A
3)	3º instante de chegada	82,5	Z
	Qts chegaram nesse instante	4,1	1
	Qual tipo	71,7	C
4)	4º instante de chegada	98,2	Z
	Qts chegaram nesse instante	82,5	3
	Quais tipos	76,5	C
		59,5	B
5)	5º instante de chegada	56,4	Y
	Qts chegaram nesse instante	41,7	2
	Quais tipos	80,9	C
		24,7	A
6)	6º instante de chegada	59,5	Y
	Qts chegaram nesse instante	47,6	2
	Quais tipos	59,8	B
		14,1	A
7)	7º instante de chegada	98,8	Z
	Qts chegaram nesse instante	20,8	1
	Qual tipo	89,3	D
8)	8º instante de chegada	46,1	Y
	Qts chegaram nesse instante	62,7	2
	Quais tipos	48,1	A
		47,2	A
9)	9º instante de chegada	2,9	X
	Qts chegaram nesse instante	17,3	1
	Qual tipo	97,9	D
10)	10º instante de chegada	20,4	X
	Qts chegaram nesse instante	72,4	2
	Quais tipos	20,9	A
		65,2	B
11)	11º instante de chegada	36,6	Y
	Qts chegaram nesse instante	88,2	3
	Quais tipos	89,2	D
		19,7	A
		74,5	C
12)	12º instante de chegada	98,3	Z

Inicialmente, pela lógica, foi definido os instantes de chegada, para depois definir quantos caminhões chegariam naquele instante para depois saber quais tipos de caminhão seriam.

No primeiro sorteio, foi retirada a bola 47, que está dentro do intervalo Y (chegada no instante 8h30 -30 minutos depois do início do turno). No segundo sorteio, foi retirada a bola 60, que está dentro do intervalo N, representando a chegada de 2 caminhões no

instante sorteado anteriormente. No terceiro sorteio, foi sorteado duas bolas, representando os dois caminhões do sorteio anterior, foi retirado as bolas 51 e 14, ambas dentro do intervalo A, ou seja, as 8h30 chegou dois caminhões de capacidade 15.000L. Assim por diante, até completar 8h do turno. O 12º instante de chegada não entrou na conta, pois ultrapassava o tempo de 8h, ou seja, encontramos 11 instantes de chegada.

Iniciando as 8h da manhã, o primeiro instante sorteado é 30 minutos após o início do turno, onde chegam dois caminhões do tipo A. O próximo evento acontece 30 minutos, também, depois do último instante, onde chega apenas um caminhão do tipo A. O próximo instante de chegada aparece 1h20 depois do último instante, com um caminhão do tipo C e assim ordenadamente até finalizar o turno.

Concluiu-se que 20 caminhões chegam para descarregar leite na fábrica durante as 8h estudadas; em 11 instantes, sendo 4 instantes com um caminhão, 4 instantes com 2 caminhões e 2 instantes com 3 caminhões chegando no mesmo tempo.

A capacidade de carregamento de leite é de 60.000 litros/h, ou seja, 1.000 litros por minuto. Pela cadeia de Markov e Simulação de Monte Carlo, a Tabela 8 pôde ser montada, em que mostra a chegada, chegada acumulada, atendimento, atendimento acumulado, fila, baia (situação: livre ou ocupado) e a capacidade do silo.

Tabela 8: Chegada acumulada

t	Ch. Caminhões	Ch. Acumulada	At. Caminhões	At. Acumulado	Nº servidores disp.	Fila
8h	0	0	0	0	2	0
8h30	2	2	2	2	0	0
9h	1	3	1	3	1	0
10h	0	3	0	3	0	0
10h20	1	4	1	4	1	0
11h	0	4	0	4	2	0
11h40	3	7	0	4	2	3
12h	0	7	0	4	2	3
12h10	2	9	0	4	2	5
12h40	2	11	0	4	2	7
13h	0	11	0	4	2	7
14h	1	12	0	4	2	8
14h30	2	14	0	4	2	10
14h40	1	15	0	4	2	11
14h50	2	17	0	4	2	13
15h	0	17	0	4	2	13
15h20	3	20	0	4	2	16
16h	0	20	0	4	2	16

Na recepção, dos 20 caminhões (cheg. acum. = 20) que chegam, apenas 4 são atendidos (atend. acum.=4). Observe que basicamente a partir das 10h45 não conseguiria atender mais nenhum caminhão pois o silo estaria com 75.000L e o próximo caminhão a descarregar estaria com 30.000L, não cabendo em sua capacidade máxima (105k litros>100k litros). Assim a fila de caminhões começa a se formar até o final do turno estudado.

4.2. CALCULO DO DESEMPENHO ATUAL

Como o leite também é descarregado do silo para ser usado pela fábrica, isso requer adaptação da Tabela 8. Sabendo que a demanda da fábrica acontece a cada 1h puxando um total de 30.000L, se a fábrica encontrar o silo com menos de 30.000L, ela puxa apenas o que encontra, e o restante puxa quando o silo encher. Então se um silo tiver com 90.000L e o caminhão que chegar for de 30.000L ele aguarda até sua capacidade total caber no silo. Segue a Tabela 9 já considerando as demandas da fábrica, e já considerando todas as esperas de caminhões até que tudo seja descarregado.

Tabela 9: Comportamento atual da chegada dos caminhões

t	Ch. Caminhões	Ch. Acumulada	At. Caminhões	At. Acumulada	Nº servidores disp.	Fila
8h	0	0	0	0	2	0
8h30	2	2	2	2	0	0
9h	1	3	1	3	1	0
10h	0	3	0	3	2	0
10h20	1	4	1	4	1	0
11h	0	4	0	4	2	0
11h40	3	7	2	6	0	1
12h	0	7	0	6	0	1
12h10	2	9	2	8	0	1
12h35	0	9	1	9	0	0
12h40	2	11	1	10	0	1
12h50	0	11	1	11	0	0
13h	0	11	0	11	1	0
14h	1	12	1	12	1	0
14h30	2	14	1	13	0	1
14h40	1	15	0	13	1	2
14h50	2	17	0	13	2	4
15h	0	17	1	14	2	3
15h20	3	20	0	14	2	6
16h	0	20	1	15	1	5

Quando analisamos a fila de recepção alinhada com a demanda da fábrica, vemos que a maior fila formada é de 6 caminhões no instante 15h20. Os primeiros caminhões chegam no instante 8h30 e já são atendidos. A fila se inicia as 11h40 quando no instante 11h40 chegam 3 caminhões, como a fábrica suporta apenas dois atendimentos, sempre que chegarem mais do que dois caminhões, há formação de fila, assim como no instante 15h20.

O maior tempo de espera é do caminhão D que chega 14h40 e só é atendido as 16h, ficando 1h20 na fila.

Há déficit de leite no silo a partir das 9h, quando a fábrica precisa puxar 30.000 litros e tem apenas 15.000 litros do caminhão tipo A que chegou às 9h. As 10h, também persiste o déficit de leite, pois o próximo caminhão só chega as 10h20. O último instante que encontramos falta de matéria prima é as 12h, faltando 15.000 litros.

4.3. PROPOSTAS DE MELHORIA

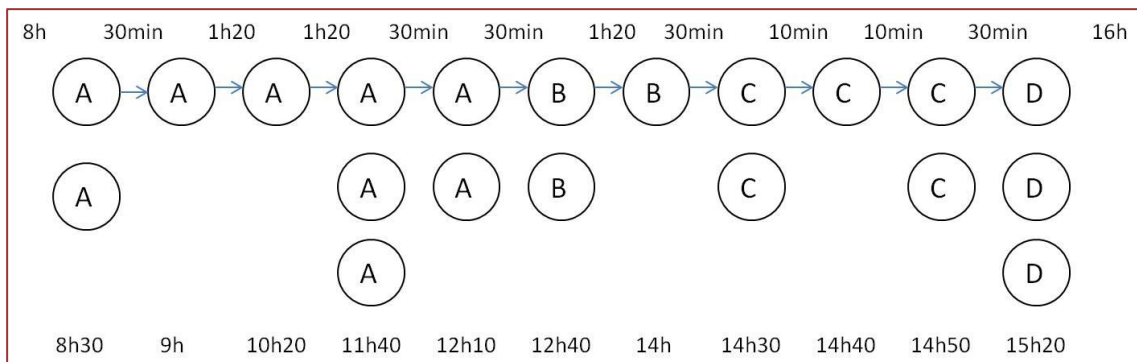
As propostas de melhoria foram sugeridas com base na percepção de que, se há *gap* de leite, é porque há falta de sincronia entre a chegada dos caminhões, o que nos leva a assumir que alguma alteração nesse viés de chegada de tipos de caminhões, bem como os instantes de chegada de cada tipo de caminhão, possa melhorar a produtividade. Sendo assim, as seguintes propostas foram analisadas:

- Melhoria 1: Priorizar a chegada dos caminhões por tamanho menores;
- Melhoria 2: Priorizar a chegada dos caminhões por tamanho maiores;
- Melhoria 3: Identificar horários de déficit e realocar os caminhões maiores em horários ociosos;
- Melhoria 4: Limitar a o instante de chegada dos caminhões em no máximo 2 instantes por hora;

4.3.1. MELHORIA 1 – PRIORIZAÇÃO MENOR-MAIOR

A primeira melhoria foi baseada na priorização de capacidade de caminhões, simulando como o sistema se comportaria se os caminhões menores chegassem antes mantendo os instantes de chegada apenas trocando a ordem. O modelo de cadeia de Markov fica como mostrado na Figura 3.

Figura 3: Priorização menor-maior



Simulando a chegada dos caminhões tipo A primeiro, encontramos 9 caminhões chegando nos primeiros 5 instantes, no 6º instante começou a chegar os caminhões tipo B – 3 caminhões no total – e assim por diante até terminar os 20 caminhões do turno, ver Tabela 10.

Tabela 10: Ordem de chegada menor para o maior

t	Ch. Caminhões	Ch. Acumulada	At. Caminhões	At. Acumulado	Nº servidores disp.	Fila
8h	0	0	0	0	0	0
8h30	2	2	2	2	0	0
9h	1	3	1	3	1	0
10h	0	3	0	3	2	0
10h20	1	4	1	4	1	0
11h	0	4	0	4	2	0
11h40	3	7	2	6	0	1
12h	0	7	1	7	1	0
12h10	2	9	1	8	0	1
12h15	0	9	1	9	1	0
12h40	2	11	2	11	0	0
13h	0	11	0	11	0	0
14h	1	12	1	12	1	0
14h30	2	14	2	14	0	0
14h40	1	15	0	14	0	1
14h50	2	17	0	14	0	3
15h	0	17	2	16	0	1
15h20	3	20	0	16	0	4
16h	0	20	1	17	1	3

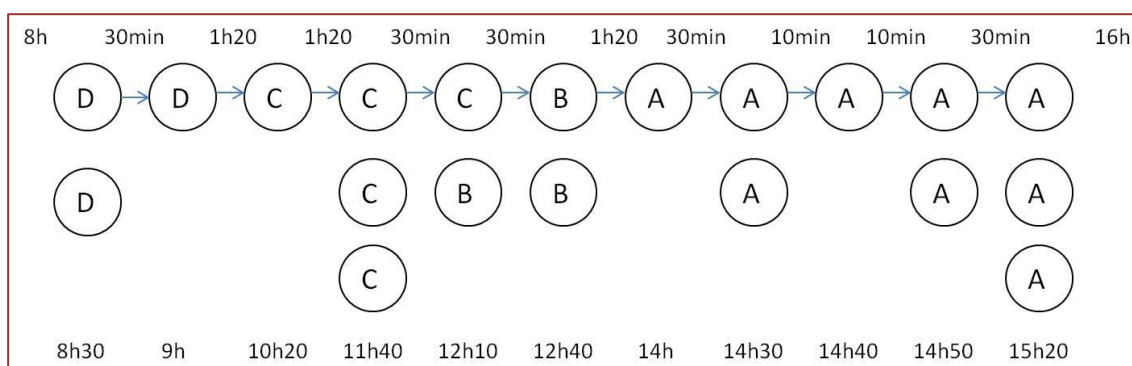
Fonte: autoria própria.

Os primeiros dois caminhões a chegarem são do tipo A no instante 8h30, atendendo a demanda da fábrica das 8h.

Às 9h não tem leite no silo para suprir a demanda assim como às 10h, e sempre há falta até as 12h. A maior fila formada nesse sistema foi as 15h20 também, mas com 2 caminhões a menos e com 1h10 de espera na fila, dez minutos a menos que o atual, não sendo uma melhoria considerável sendo que ainda há déficit na demanda da fábrica no início do turno e fila no final do turno.

4.3.2. MELHORIA 2 - PRIORIZAÇÃO MAIOR-MENOR

A segunda melhoria visa priorizar a chegada de caminhões maiores primeiro, como se pode ver na Figura 4.

Figura 4: Priorização maior-menor

Simulando a chegada dos caminhões tipo D primeiro, encontramos 3 caminhões chegando nos primeiros 2 instantes, no 3º instante começou a chegar os caminhões tipo C – 5 caminhões no total – e assim por diante também até terminar os 20 caminhões do turno, ver Tabela 11.

Tabela 11: Ordem de chegada maior para o menor

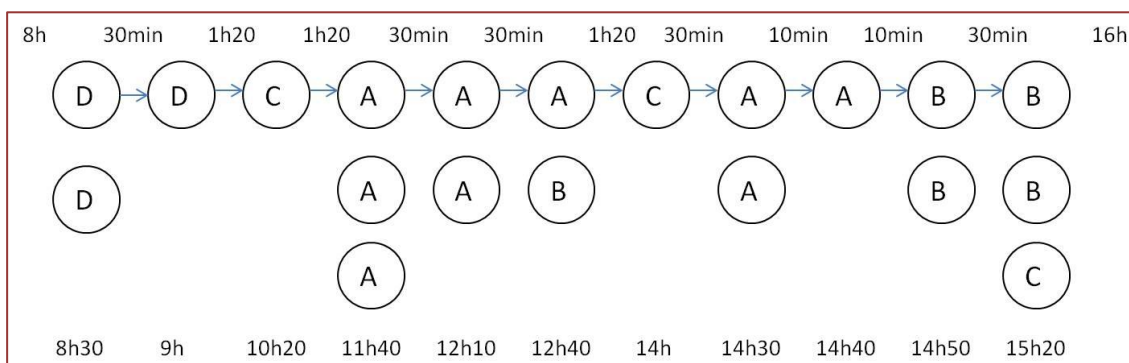
<i>t</i>	<i>Ch. Caminhões</i>	<i>Ch. Acumulada</i>	<i>At. Caminhões</i>	<i>At. Acumulado</i>	<i>Nº servidores disp.</i>	<i>Fila</i>
8h	0	0	0	0	2	0
8h30	2	2	2	2	0	0
9h	1	3	0	2	0	1
9h05	0	3	1	3	1	0
10h	0	3	0	3	2	0
10h20	1	4	1	4	1	0
11h	0	4	0	4	2	0
11h40	3	7	2	6	0	1
12h	0	7	0	6	0	1
12h10	2	9	1	7	1	2
12h40	2	11	0	7	2	4
13h	0	11	2	9	0	2
14h	1	12	1	10	0	2
14h30	2	14	0	10	2	4
14h40	1	15	0	10	2	5
14h50	2	17	0	10	2	7
15h	0	17	1	11	1	6
15h20	3	20	0	11	2	9
16h	0	20	2	13	0	7

Fonte: autoria própria.

Os primeiros dois caminhões a chegarem são do tipo D no instante 8h30, atendendo a demanda da fábrica das 8h. As 9h chega mais um caminhão tipo D e tem “sobra” de leite no silo para suprir a demanda. Às 10h também a fábrica ainda consegue o leite do silo e em momento algum há falta de suprimento. A maior fila formada nesse sistema foi as 15h20, com 9 caminhões. A espera máxima será de 2h, correspondente ao 12º caminhão, do tipo A, que chegou as 14h e só descarregaria as 16h, vinte minutos a mais que o atual desempenho. Embora não tenha apresentado melhoria na fila, em momento algum deixou de atender a demanda.

4.3.3. MELHORIA 3 – REAJUSTE DA CHEGADA DE CAMINHÕES PARA PERÍODOS EM QUE A FÁBRICA FICOU OCIOSA

A terceira melhoria identificou os *gaps* nos instantes de chegada, e realocou os caminhões para instantes mais ociosos, conforme a Figura 5.

Figura 5: Horários ociosos

A simulação descrita na Tabela 12 mostra que no horário das 8h às 11h chegam apenas quatro caminhões, e para suprir a demanda de 4h seriam necessários 120.000 litros. Por isso foi dimensionado caminhões tipo D e C para esse início, três do tipo D e 1 do tipo C totalizando 135.000 litros. Após esse horário, no quarto instante em que chega três caminhões, (ou seja, o quinto, o sexto e o sétimo caminhão), foi utilizado os caminhões tipo A para que o descarregamento no silo demore menos (assim o sétimo caminhão esperaria menos). Como os instantes 5 e 6 chegam mais quatro caminhões perto uns dos outros, continuou-se com os caminhões tipo A e o último tipo B para completar o silo e uma unidade de caminhão C para suprir o tempo das 13h às 14h. Após as 14h30, como o silo estava cheio, foram chegando os caminhões de menor capacidade antes e os de maior depois.

Tabela 12: Gaps no instante de chegada

<i>t</i>	<i>Ch. Caminhões</i>	<i>Ch. Acumulada</i>	<i>At. Caminhões</i>	<i>At. Acumulado</i>	<i>Nº servidores disp.</i>	<i>Fila</i>
8h	0	0	0	0	2	0
8h30	2	2	2	2	0	0
9h	1	3	1	3	1	0
10h	0	3	0	3	0	0
10h20	1	4	1	4	1	0
11h	0	4	0	4	2	0
11h40	3	7	2	6	0	1
11h55	0	7	1	7	1	0
12h	0	7	0	7	1	0
12h10	2	9	2	9	0	0
12h40	2	11	2	11	0	0
13h	0	11	0	11	2	0
14h	1	12	1	12	1	0
14h30	2	14	2	14	0	0
14h40	1	15	0	14	0	1
14h50	2	17	0	14	0	3
15h	0	17	1	15	1	2
15h20	3	20	0	15	0	5
16h	0	20	1	16	1	4

A maior fila formada é no instante 15h20, com um total de 5 caminhões e uma espera máxima identificada de 1h10, correspondente ao caminhão tipo B (este caminhão chegou no instante 10 às 14h50 e só será descarregado às 16h). Essa melhoria atendeu toda a demanda, porém não mostrou diferente das outras em fila e espera.

4.3.4. MELHORIA 4 - LIMITAÇÃO DE CHEGADA DE CAMINHÕES

A quarta melhoria se fundamentou na ideia de que, quando há chegada de vários caminhões de uma só vez, isso inevitavelmente geraria fila de caminhões. Assim, essa melhoria visa limitar a chegada no máximo 2 caminhões por instante. Para fazer isso acontecer no modelo desenvolvido, se no novo sorteio das bolas for sorteado mais de 2 instantes por hora seria realizado mais sorteio até atender a restrição. Foi necessário voltar aos cálculos, calculando-se novamente os pí's pela cadeia de Markov, e utilizar da ferramenta Excel para o sorteio aleatório, ver Tabela 13.

Tabela 13: Recepção com limitação por hora

SORTEIO		Nº ALEATÓRIO	TIPO
1)	1º instante de chegada	74,1	Y
	Quantos chegaram nesse instante	38,8	1
	Qual tipo	97,5	D
2)	2º instante de chegada	39,1	Y
	Qts chegaram nesse instante	41,8	2
	Qual tipo	14,3	A
3)	3º instante de chegada	83,7	D
	Qts chegaram nesse instante	29,6	Y
	Qual tipo	37,8	1
4)	4º instante de chegada	58,6	B
	Qts chegaram nesse instante	95,6	Z
	Quais tipos	45,1	2
5)	5º instante de chegada	71,2	C
	Qts chegaram nesse instante	15,1	A
	Qual tipo	56,4	Y
6)	6º instante de chegada	22,3	1
	Qts chegaram nesse instante	80,8	C
	Qual tipo	91,2	Z
7)	7º instante de chegada	0,0	1
	Qts chegaram nesse instante	62,6	B
	Qual tipo	12,7	X
8)	8º instante de chegada	20,2	1
	Qts chegaram nesse instante	14,7	A
	Qual tipo	95,6	Z
9)	9º instante de chegada	81,5	3
	Qts chegaram nesse instante	55,6	B
	Qual tipo	76,5	C
10)	10º instante de chegada	79,7	Z
	Qts chegaram nesse instante	19,3	1
	Qual tipo	96,1	D
11)	11º instante de chegada	5,9	X
	Qts chegaram nesse instante	37,1	1
	Qual tipo	95,2	D

A Tabela 13 mostra o sorteio realizado com a fórmula *Randon* no Excel, que gerou um novo cenário de chegada dos caminhões. A simulação apresentou dez instantes de chegada. A partir da nova simulação de chegada dos caminhões, ver Figura 6, foi possível calcular a fila com os novos instantes, tipos de caminhão e quantidade por instante. A Tabela 14 mostra a fila formada.

Figura 6: Limitação por hora

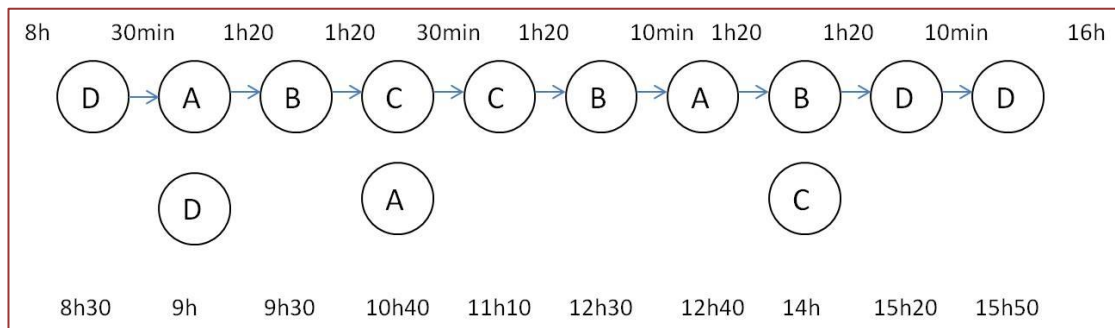


Tabela 14: Limitação no horário

t	Ch. Caminhões	Ch. Acumulada	At. Caminhões	At. Acumulado	Nº servidores disp.	Fila
8h	0	0	0	0	2	0
8h 30	1	1	1	1	1	0
9h	2	3	1	2	0	1
9h05	0	3	1	3	1	0
9h30	1	4	1	4	1	0
10h	0	4	0	4	2	0
10h40	2	6	2	6	0	0
11h	0	6	0	6	1	0
11h10	1	7	1	7	1	0
12h	0	7	0	7	2	0
12h30	1	8	1	8	1	0
12h40	1	9	1	9	0	0
13h	0	9	0	9	2	0
14h	2	11	2	11	0	0
14h25	0	11	0	11	2	0
15h	0	11	0	11	2	0
15h20	1	12	1	12	1	0
15h50	1	13	0	13	1	0

Essa nova simulação, gerou fila somente no instante 9h. Essa fila é resultado de tempo de descarregamento do primeiro caminhão, tipo D, que chegou 8h30 e ocupou a primeira baia até descarregamento total 9h05. O segundo caminhão a chegar foi o tipo A as 9h e ocupou a segunda baia, fazendo o terceiro caminhão (cheg. ac. = 3) aguardar cinco minutos para entrar na baia.

4.4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Verificou-se durante a análise da Tabela 10 que houve situações em que a fábrica inclusive ficaria sem suprimento de leite para continuar suas atividades, resultando ociosidade bem como presença de leite residual no silo e consequentemente, desperdício indesejado.

Esperava-se que a alteração prática de ordem de chegada de caminhões nas melhorias 1, 2 e 3 pudesse reduzir as filas, mas o que se observa é que praticamente não houve alteração em relação ao desempenho atual.

A motivação de se propor a melhoria 4 foi que, a partir das melhorias anteriores verificou muitos caminhões chegando perto do mesmo horário para uma demanda menor do que a oferta. Então a ideia foi limitar essa quantidade de chegada de caminhões.

De fato, com os resultados obtidos na Tabela 14, pode-se perceber melhoria na redução de fila e de espera de caminhões, além de não resultar em ociosidade da fábrica por falta de suprimento de leite.

A Tabela 15 mostra a síntese dos resultados do atual e das melhorias sugeridas e a Tabela 16 mostra o progresso percentual de cada uma em relação ao atual.

Tabela 15: Comparativo dos desempenhos

	Desempenho Atual	Melhoria 1	Melhoria 2	Melhoria 3	Melhoria 4
Fila Máx	6	4	9	5	1
Espera Máx	80min	70min	120min	70min	5min
Instantes Fábrica Ociosa	5	4	0	0	0

Tabela 16: Melhoria percentual

	Melhoria 1	Melhoria 2	Melhoria 3	Melhoria 4
% melhoria Fila máx	33,20%	-50%	16,60%	83,33%
% melhoria Espera Máx	12,50%	-50%	12,50%	93,75%
% melhoria Instantes Fábrica Ociosa	20%	100%	100%	100%

5. CONCLUSÃO

A teoria das filas e simulação utilizada nesse estudo buscou resolver os problemas de forma objetiva, com o intuito de diminuir o tempo de espera dos caminhões de descarregamento de leite, não deixando a matéria prima aguardar muito tempo e visando a otimização das filas para atender a demanda da fábrica.

Nesse trabalho foram avaliados os pontos mais importantes na indústria do leite e escolhido o tempo de espera. As temáticas levantadas foram Markov e Monte Carlo complementando a teoria das filas. Para o encaminhamento das melhorias, foi necessário entender a teoria e entender o processo real como um todo identificando suas falhas e melhorias. À partir das informações, prover soluções viáveis de baixo custo apenas com simples ajustes na rotina.

Analisando a fila no turno final (8h) no cenário atual, é notável que o volume de espera tende a aumentar para os próximos turnos, o que significa que a fila só tende a aumentar. Isso acontece porque a demanda é menor que a quantidade de leite que chega por turno.

Ao propôr a última melhoria, limitando a chegada de caminhões, notou-se uma melhoria significativa em toda cadeia.

O estudo pode nortear a empresa no sentido de que uma simples melhoria no planejamento de horário dos caminhões, seguindo de forma mais regrada a limitação por horário, já é possível colher os benefícios.

REFERÊNCIAS

- [1] ABCZ (2014) – Pecuária do Brasil - https://zebu.org.br/PortalUploads/Revistas/ABCZ/2014_Maio-Junho/revista.pdf#:~:text=gens%20gen%C3%A9ticas%2C%20j%C3%A1%20provadas%2C%20do%20Gir%20Leiteiro%2C,do%20Brasil%20vai%20transformar%20a%20pecu%C3%A1ria%20da.
- [2] Bryman, A. (1989) - Research methods and organization studies. Londres: Unwin Hyman.
- [3] De Camargo, A. C. – Desafios da produção de leite. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1092917/1/DesafiosnaProducaoDeLeite.pdf>
- [4] Decreto nº 9.013, de 2017 - RIISPOA - Regulamento de Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal.
- [5] Jonsson, P. & Ivert, L. K. (2015) - Improving performance with sophisticated master production scheduling, International Journal of Production Economics, vol. 168, p. 118-130.
- [6] Milkpoint- 2011 - <https://www.milkpoint.com.br/noticias-e-mercado/giro-noticias/consumo-de-leite-longa-vida-cresce-e-alcanca-89-dos-lares-brasileiros-aponta-kantar-worldpanel-77041/>
- [7] Nascimento, M. (2009) – O uso de simulação de Monte Carlo via cadeias de Markov no melhoramento genético, dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Estatística Aplicada e Biometria.
- [8] Resolução-RDC nº 216/2004 - Cartilha sobre Boas Práticas para Serviços de Alimentação, 3ª edição, Brasília.
- [9] Shamblyn, J. E.; Stevens, G. T. Operations research: a fundamental approach. New York: McGraw-Hill, 1974.
- [10] TORRES, Oswaldo Fadigas. Elementos da teoria das filas. Revista de Administração de Empresas, v. 6, p. 111-127, 1966.
- [11] Van Ravenzwaaij D.; Cassey, P. & Brown, S. D. (2016) A simple introduction to Markov Chain Monte-Carlo sampling. *Psychon Bull Rev* 25, 143–154 (2018). <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1015-8>.

Capítulo 9

Abordagem multimodal para auxílio à detecção de tumores cerebrais utilizando redes neurais totalmente convolucionais

Alan Marques da Rocha

Antonia Alana Claudino Sousa

Resumo: O diagnóstico precoce e preciso de tumores cerebrais constitui um dos principais desafios da prática clínica, dada a influência dessas lesões na morbidade e na mortalidade dos pacientes. Métodos tradicionais, baseados exclusivamente na avaliação visual de exames de tomografia computadorizada (TC) e de ressonância magnética (RM), podem estar sujeitos à variabilidade interobservador e a limitações inerentes ao volume e à complexidade dos dados médicos. Nesse contexto, o desenvolvimento de ferramentas computacionais para auxiliar especialistas surge como uma necessidade relevante para aumentar a acurácia diagnóstica e otimizar fluxos de trabalho em neuroimagem. Diante desse cenário, o presente trabalho propõe e avalia uma metodologia baseada em aprendizado profundo, do inglês deep learning (DL) para a detecção automática de tumores cerebrais em imagens multimodais de TC e RM. A abordagem fundamenta-se na integração de dados dessas diferentes modalidades, explorando suas características complementares por meio de fusão multimodal e técnicas avançadas de processamento de imagens. A sequência metodológica integra as etapas de pré-processamento, aumento de dados e adaptação da arquitetura de rede neural convolucional VGG16 para classificação binária entre cérebros saudáveis e com tumor. O modelo foi treinado e validado com uma base de dados disponível na literatura, utilizando validação cruzada por k-fold ($k = 5$) e conduzindo dois experimentos de classificação. No primeiro experimento, a rede proposta foi treinada utilizando a base original, sem etapas de pré-processamento. No segundo experimento, por sua vez, foi aplicada a sequência metodológica completa, visando melhorar significativamente o desempenho do modelo. Os resultados demonstraram índices satisfatórios de acurácia, sensibilidade e especificidade, evidenciando o potencial do método como ferramenta auxiliar ao diagnóstico clínico.

Palavras-chave: Tumor cerebral, Imagem multimodal, Tomografia computadorizada, Ressonância magnética, Aprendizado profundo, Redes totalmente convolucionais.

1. INTRODUÇÃO

Tumores do encéfalo e do sistema nervoso central constituem um problema de saúde pública global, com impacto significativo na morbidade e na mortalidade. Essas neoplasias são classificadas como a décima principal causa de morte por câncer em países desenvolvidos [1]. Em escala mundial, estima-se que 322.000 novos casos de tumores cerebrais tenham ocorrido somente em 2023, com uma projeção preocupante de aproximadamente 474.000 novos casos anuais até 2045 [1]. Esse aumento projetado de 47% é atribuído, em grande parte, ao envelhecimento populacional e ao crescimento da população mundial. No Brasil, estima-se que cerca de 90.000 indivíduos recebam, a cada ano, o diagnóstico de tumor cerebral primário [2]. Essas estatísticas evidenciam a crescente magnitude do desafio que os tumores cerebrais impõem aos sistemas de saúde em todo o mundo, reforçando a necessidade urgente de avanços em métodos diagnósticos e terapêuticos.

A complexidade do manejo clínico dos tumores cerebrais é ampliada por sua notável heterogeneidade. Existem mais de 100 a 120 tipos distintos de tumores cerebrais primários, cada um com características biológicas e comportamentos clínicos específicos [3]. A Organização Mundial da Saúde (OMS) classifica esses tumores em graus, de I a IV, com base na agressividade, na taxa de crescimento e nas características celulares observadas histologicamente [3]. Tumores de Grau I são tipicamente de crescimento lento, com células que se assemelham às células normais, e podem ser curados quando completamente removidos cirurgicamente. Em contraste, tumores de Grau IV, como o glioblastoma, são altamente malignos, de crescimento rápido, com células de aspecto atípico, e geralmente são considerados incuráveis, apresentando prognóstico reservado [4]. Essa diversidade tumoral e a variabilidade prognóstica associada impõem desafios relevantes para o diagnóstico acurado e o planejamento terapêutico efetivo, demandando ferramentas diagnósticas capazes de diferenciar tais variações com elevada precisão.

A confluência entre o aumento da incidência de tumores cerebrais, a ampla diversidade de tipos tumorais e as limitações inerentes ao diagnóstico tradicional configura um cenário que demanda inovação tecnológica. Paralelamente, a heterogeneidade tumoral implica que abordagens diagnósticas genéricas são insuficientes, exigindo métodos capazes de captar nuances específicas de cada tipo de tumor. As limitações e os riscos associados à biópsia em determinadas situações resultam em uma lacuna diagnóstica que precisa ser preenchida por alternativas não invasivas [4, 5]. Consequentemente, a busca por soluções diagnósticas mais rápidas, precisas e menos invasivas, como aquelas baseadas em inteligência artificial (IA) e em técnicas avançadas de imagem, transcende uma melhoria incremental, posicionando-se como uma necessidade crítica para enfrentar a crescente carga da doença. Embora a análise histopatológica seja o padrão-ouro para o diagnóstico definitivo [5], ela não está isenta de desafios. A interpretação de lâminas histológicas envolve um componente subjetivo e pode estar sujeita à variabilidade interobservador, especialmente em casos raros, limítrofes ou com características atípicas [3, 5]. Esse aspecto sugere a introdução de métodos quantitativos e objetivos, como os proporcionados por aprendizado profundo (deep learning, DL), na análise de imagens médicas. O avanço das técnicas de diagnóstico por imagem desempenha papel fundamental na identificação precoce e acurada de tumores cerebrais, contribuindo de forma significativa para aumentar as chances de sucesso terapêutico e a qualidade de vida dos pacientes. Contudo, a análise manual de imagens médicas, como as provenientes de tomografia computadorizada (TC) e ressonância magnética (RM), pode ser subjetiva e demorada, além de demandar elevada expertise dos profissionais de saúde.

Nesse contexto, este trabalho propõe uma metodologia completa para o desenvolvimento de um sistema automatizado, baseado em DL, para detecção de tumores cerebrais, utilizando uma abordagem multimodal que combina informações de imagens de TC e RM. Ao fundir dados de diferentes modalidades de imagem, busca-se explorar características complementares que elevem a acurácia na classificação entre encéfalos saudáveis e com tumor, promovendo maior robustez e confiabilidade no diagnóstico assistido por computador.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 discute o estado da arte e aborda as principais pesquisas que serviram de fundamentação teórica para este trabalho, destacando as abordagens mais relevantes para detecção de tumores cerebrais por meio de DL e técnicas de fusão multimodal de imagens médicas. A Seção 3 descreve a metodologia adotada, incluindo a preparação e organização da base de dados, as etapas de aumento de dados e pré-processamento das imagens, a arquitetura de rede profunda utilizada e os procedimentos de construção, compilação e treinamento do modelo proposto. A Seção 5 apresenta os resultados obtidos nos experimentos de classificação com e sem aumento de dados (DA), além de comparar os resultados alcançados com o estado da arte na área. Por fim, a Seção 6 conclui o trabalho e sugere direções para pesquisas futuras.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

A detecção e a classificação de tumores cerebrais são fundamentais para o planejamento terapêutico e para o prognóstico do paciente. O uso de imagens médicas, como TC e RM, fornece informações valiosas sobre a estrutura tumoral e suas características. A RM, em particular, oferece excelente contraste de tecidos moles, enquanto a TC é útil para a visualização de estruturas ósseas e calcificações. A combinação de múltiplas modalidades de imagem (imagem multimodal) pode proporcionar uma visão mais abrangente e robusta para a análise tumoral. Nesse contexto, o DL emergiu como uma ferramenta poderosa para a análise dessas imagens complexas, automatizando tarefas como segmentação, classificação e predição de características moleculares ou de sobrevida.

Nos últimos anos, a pesquisa em neuro-oncologia tem explorado extensivamente abordagens baseadas em DL para a análise de tumores cerebrais, frequentemente utilizando dados multimodais. Esta seção revisa alguns trabalhos recentes nessa área, destacando as metodologias empregadas e os resultados alcançados.

Um desafio relevante no campo é a necessidade de grandes bases de dados anotadas para treinar modelos de DL robustos. Iniciativas como a disponibilização de bases públicas, por exemplo, a Brain Tumor Multimodal Image (CT & MRI) [6], que agrega imagens de TC e RM provenientes de diferentes fontes, são fundamentais para impulsionar a pesquisa e o desenvolvimento de novos algoritmos. Essa base específica visa apoiar o desenvolvimento de modelos de IA para a detecção, classificação e segmentação automáticas de tumores cerebrais, como gliomas e meningiomas, explorando as forças complementares da TC e da RM.

Em [7], é apresentada uma revisão abrangente sobre o uso de DL na análise de tumores cerebrais em RM. Os autores discutem como modelos de DL, especialmente redes neurais convolucionais (convolutional neural networks, CNNs), possibilitam a segmentação automática e precisa de tumores, viabilizando medições objetivas e reprodutíveis essenciais para diagnóstico, planejamento do tratamento e monitoramento da doença.

Além disso, destacam o potencial do DL para prever tipo tumoral, grau, mutações genéticas e sobrevida do paciente, apontando para o futuro da medicina personalizada em neuro-oncologia. Em síntese, os trabalhos analisados nessa revisão reportaram métricas robustas, com acurácia variando de 0,94 a 0,96, sensibilidade e F1-score na faixa de 0,93 a 0,95, e precisão e especificidade em torno de 0,92 a 0,95, evidenciando avanços relevantes na área.

Com foco em detecção e classificação, [8] propõem um modelo baseado na arquitetura YOLOv7 para detectar meningiomas, gliomas e tumores hipofisários em imagens de RM. Para melhorar o desempenho, os autores utilizaram técnicas de realce de imagem, aumento de dados (data augmentation, DA) e incorporaram mecanismos de atenção, especificamente o Convolutional Block Attention Module (CBAM), além de camadas adicionais como Spatial Pyramid Pooling Fast+ (SPPF+) e Bi-directional Feature Pyramid Network (BiFPN), a fim de otimizar a extração e a fusão de características em múltiplas escalas. O modelo obteve acurácia de 95,5% na base utilizada, demonstrando o potencial de arquiteturas de detecção de objetos adaptadas a tarefas médicas, embora os autores reconheçam a necessidade de investigações adicionais para a detecção de tumores pequenos. Outras métricas reportadas incluem precisão de 0,95, sensibilidade de 0,94, especificidade de 0,95 e F1-score de 0,95.

Em [9], também se explora a detecção e a classificação de tumores cerebrais em TC e RM, porém utilizando um arcabouço híbrido que combina uma CNN customizada com otimização via algoritmo de colônia de formigas para seleção de características e uma máquina de vetores de suporte (SVM) como classificador. O objetivo é melhorar a acurácia na classificação entre diferentes tipos de tumores (glioma, meningioma, pituitário) e imagens normais. O uso de técnicas de otimização para selecionar as características mais discriminativas extraídas pela CNN visa aumentar a eficiência e a acurácia do modelo. Os autores reportam acurácia de 0,95, sensibilidade de 0,94, especificidade de 0,93, precisão de 0,92 e F1-score de 0,94, indicando alto desempenho.

Explorando explicitamente a multimodalidade, [10] propõe um método que utiliza a fusão de imagens multimodais, combinando diferentes sequências de RM e a integração entre TC e RM para classificação e segmentação de tumores cerebrais via DL. A fusão de informações de diferentes modalidades antes ou durante o processo de aprendizado apresentou resultados satisfatórios, com acurácia reportada em torno de 0,96, precisão e F1-score de 0,95, sensibilidade de 0,95 e especificidade de 0,94.

Outros trabalhos recentes, como a revisão sistemática de [11], confirmam a tendência bem-sucedida de algoritmos de DL, especialmente CNNs, na automação da detecção e classificação de tumores cerebrais, analisando tanto RM quanto outras modalidades. Em [12], também se destaca o progresso considerável na área, apesar de limitações no uso de DL em alguns contextos específicos, e são propostas abordagens combinadas de DL para aprimoramento do diagnóstico, apresentando resultados que variam de acurácia entre 0,94 e 0,96, precisão de 0,93 a 0,95, sensibilidade de 0,94, especificidade de 0,94 e F1-score de 0,94.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

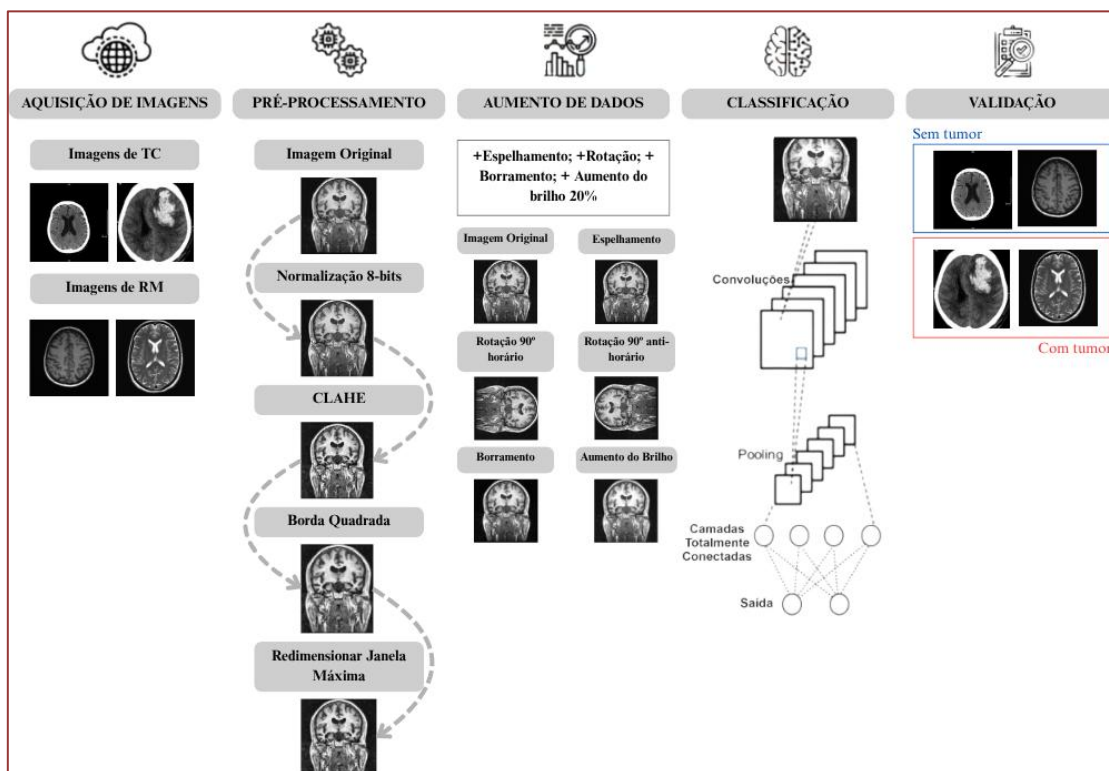
Esta seção apresenta a metodologia empregada para a detecção de tumores cerebrais em imagens multimodais de TC e RM. Serão detalhados os conjuntos de imagens utilizados no trabalho, as etapas de pré-processamento para realçar as características relevantes das imagens, o AD para reduzir o desbalanceamento entre classes, a arquitetura da CNN adotada para a classificação das imagens, além da técnica de aprendizado por transferência (transfer learning) empregada para melhorar os resultados do modelo proposto e as métricas de avaliação utilizadas. A Figura 1 ilustra o pipeline metodológico proposto.

3.1. BASE DE DADOS

Neste trabalho, utilizou-se a base Brain Tumor Multimodal Image: CT and MRI [6], disponibilizada publicamente na plataforma Kaggle [6]. Essa base foi desenvolvida especificamente para fomentar pesquisas relacionadas à detecção automática de tumores cerebrais, oferecendo um conjunto de imagens multimodais, isto é, composto por exames de TC e RM do cérebro. A base reúne imagens organizadas em duas categorias principais: Saudável e Tumor. Para cada categoria, há imagens correspondentes tanto de TC quanto de RM: 2300 e 2318 imagens de TC Saudável e Tumor, respectivamente, e 2000 e 3000 imagens de RM Saudável e Tumor, respectivamente. Isso viabiliza estudos de fusão de dados multimodais, ampliando o potencial diagnóstico ao explorar as características complementares de cada modalidade de imagem.

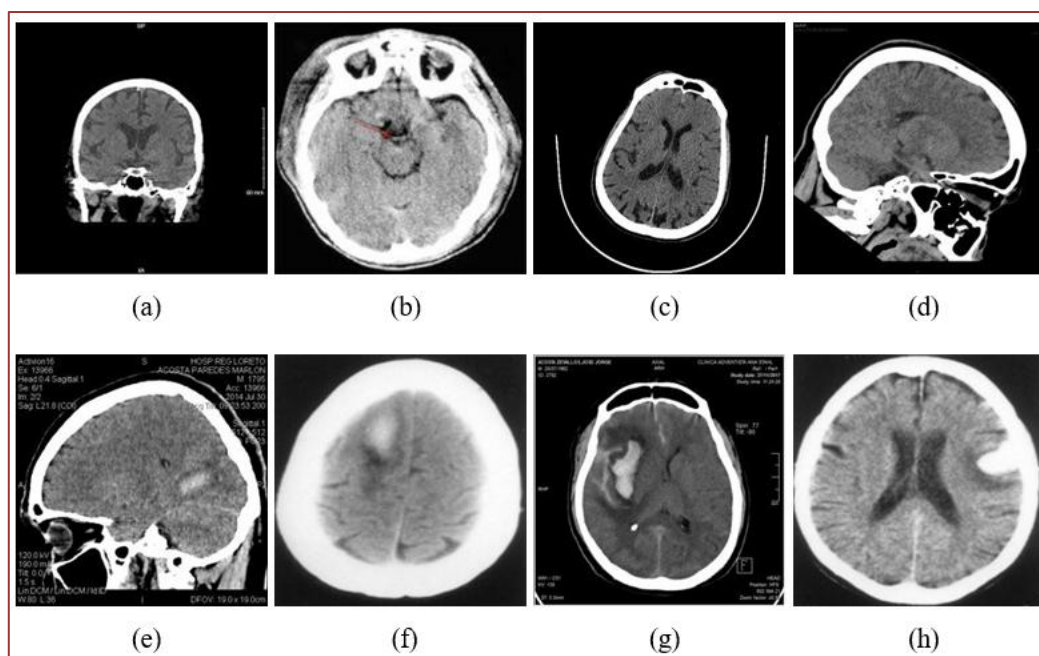
As imagens apresentam diferentes dimensões, resoluções e intensidades de contraste, refletindo a variabilidade real encontrada na prática clínica. Além disso, a curadoria da base buscou assegurar pares correspondentes entre exames de TC e RM para os mesmos grupos (saudável e com tumor), permitindo o desenvolvimento de modelos capazes de combinar e comparar informações provenientes de diferentes fontes. Essa característica é fundamental para pesquisas envolvendo fusão de imagens médicas e para o aprimoramento de sistemas automatizados de detecção. A Figura 2 apresenta amostras das imagens disponíveis na base utilizada neste trabalho.

Figura 1: Pipeline do método proposto: (1) aquisição das imagens; (2) etapas de pré-processamento; (3) aumento de dados; (4) classificação; e (5) validação



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 2: Exemplos de imagens cerebrais de TC e RM, abrangendo diferentes condições clínicas. As subfiguras (a) a (d) apresentam imagens de TC de encéfalos sem tumor; (e) a (h) mostram imagens de TC com tumor



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.2. AUMENTO DE DADOS

Em problemas que envolvem análise de imagens, técnicas de AD são frequentemente indispensáveis para ampliar o volume de amostras disponíveis para o treinamento de redes neurais [13]. Entretanto, é necessário discernir quais metodologias de AD são mais adequadas ao problema em questão, bem como os intervalos paramétricos aceitáveis para as transformações aplicadas. Uma compreensão aprofundada do problema a ser resolvido e uma análise criteriosa das imagens geradas por esse processo desempenham papel central. A aplicação estocástica de técnicas elementares de AD possibilita a geração de um volume significativo de amostras de imagens distintas, uma vez que cada imagem original pode produzir k novas imagens, sendo essa quantidade limitada predominantemente pela variedade de funções de aumento empregadas e pelos respectivos intervalos de seus parâmetros [14].

No presente estudo, foram empregadas quatro técnicas específicas de AD: (1) rotação da imagem, com variações angulares de 90° no sentido horário e anti-horário, valores selecionados para preservar as características intrínsecas da imagem original; (2) espelhamento (flipping); (3) desfoque (blurring); e (4) aumento de 20% no brilho da imagem. As duas primeiras abordagens (rotação e espelhamento) foram implementadas manualmente, isto é, as novas imagens foram produzidas offline, sem o uso de software especializado. Em contraste, as técnicas de desfoque e ajuste de brilho foram operacionalizadas por meio da biblioteca Python Albumentations [15]. O conjunto de dados resultante dessa etapa foi expandido de acordo com os dados apresentados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 10: Número de imagens por classe antes e após o aumento de dados

Categoria	Imagens Originais	Imagens após o AD
CT sem tumor	2.300	13.800
CT com tumor	2.318	13.908
RM sem tumor	2.000	12.000
RM com tumor	3.000	18.000

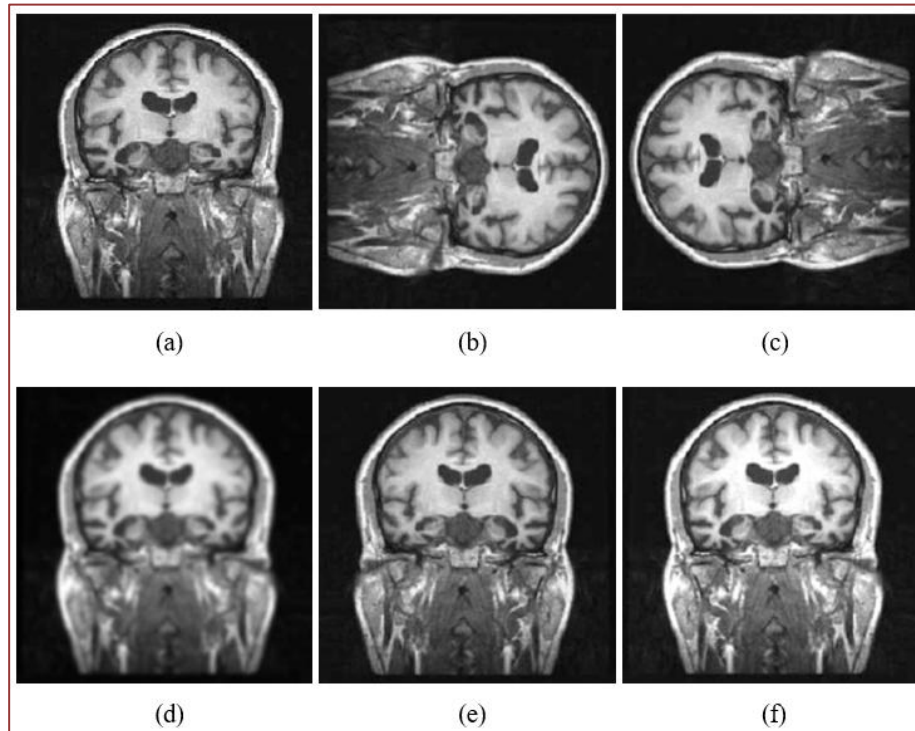
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 3 apresenta os resultados da aplicação das diferentes técnicas de AD ao conjunto base. A imagem original, ilustrada na Figura 3a, é submetida a uma série de transformações: rotação de 90° no sentido horário (Figura 3b), rotação de 90° no sentido anti-horário (Figura 3c), espelhamento (Figura 3d), desfoque (Figura 3e) e aumento de 20% no brilho (Figura 3f).

3.3. PRÉ-PROCESSAMENTO

A heterogeneidade intrínseca das imagens de TC e RM podem impactar significativamente a qualidade e a padronização das amostras utilizadas na detecção e classificação automáticas de tumores cerebrais. Para minimizar variações e melhorar o desempenho dos algoritmos de classificação, adotam-se técnicas específicas de pré-processamento, conforme ilustrado no pipeline da Figura 1, assegurando maior uniformidade e relevância das características extraídas.

Figura 3: Resultado das térmicas de AD aplicadas à base de imagens. (a) Original. (b) Rotação de 90° no sentido horário. (c) Rotação de 90° no sentido anti-horário. (d) Espelhamento (flipping). (e) Desfoque (blurring). (f) Aumento de 20% no brilho



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

de ambas as modalidades de imagem. Considerando que a base utilizada neste estudo reúne imagens de TC e RM provenientes de diferentes equipamentos, protocolos e resoluções, tornou-se fundamental padronizar o formato das amostras. Todas as imagens, independentemente de sua origem, foram convertidas para escala de cinza e normalizadas para o padrão de 8 bits por pixel. Essa estratégia assegura não apenas compatibilidade com a arquitetura de CNN empregada, mas também a redução de variabilidade indesejada decorrente de diferenças no processo original de aquisição.

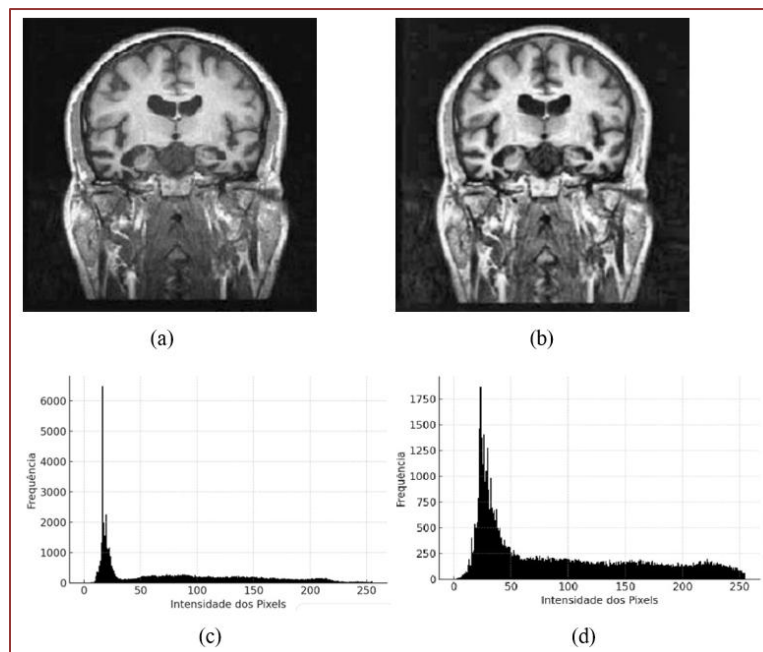
No que se refere ao contraste das imagens, empregou-se o método de equalização adaptativa do histograma com limitação de contraste (contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE). O CLAHE segmenta a imagem em blocos menores e realiza a equalização do histograma de forma local, intensificando o realce de detalhes em diferentes regiões e mitigando a amplificação de ruído. No pré-processamento adotado, o tamanho do bloco foi fixado em 8×8 pixels, com limite de recorte (clipping limit) de 2,0, o que contribui para preservar detalhes relevantes, como as margens tumorais.

As dimensões das imagens na base variam amplamente, tanto em altura quanto em largura, refletindo a diversidade de equipamentos e protocolos clínicos. Para tornar as amostras compatíveis com a entrada padrão de CNNs, cada imagem foi redimensionada para 224×224 pixels. Entretanto, o redimensionamento direto pode distorcer proporções anatômicas, prejudicando a representação espacial de estruturas tumorais. Para contornar essa limitação, implementou-se uma técnica de enquadramento (framing), na

qual a menor dimensão da imagem é centralizada em uma matriz quadrada, preenchida com zeros (preto), preservando as proporções originais da região de interesse.

Além disso, utilizou-se um método de redimensionamento baseado em maximum window, em substituição à interpolação bilinear convencional [16]. Enquanto a interpolação bilinear calcula médias ponderadas de pixels vizinhos o que pode levar à suavização de detalhes críticos, como bordas tumorais ou regiões de alto contraste, o maximum window assegura a preservação dos pixels de maior intensidade ao longo do processo de redimensionamento [16]. Essa abordagem é particularmente relevante em imagens tumorais, nas quais áreas de alta intensidade pode estar diretamente associadas à presença e à delimitação de lesões. Assim, o uso de maximum window contribui para manter informações discriminativas, ampliando a capacidade do modelo em diferenciar encéfalos saudáveis e com tumor em imagens de TC e RM. O resultado dessa aplicação é exemplificado na Figura 4 a seguir.

Figura 4: (a) Imagem original de RM. (b) Imagem resultante da aplicação da técnica CLAHE. (c) Histograma de intensidade dos pixels da imagem original. (d) Histograma de intensidade dos pixels após a aplicação da técnica CLAHE



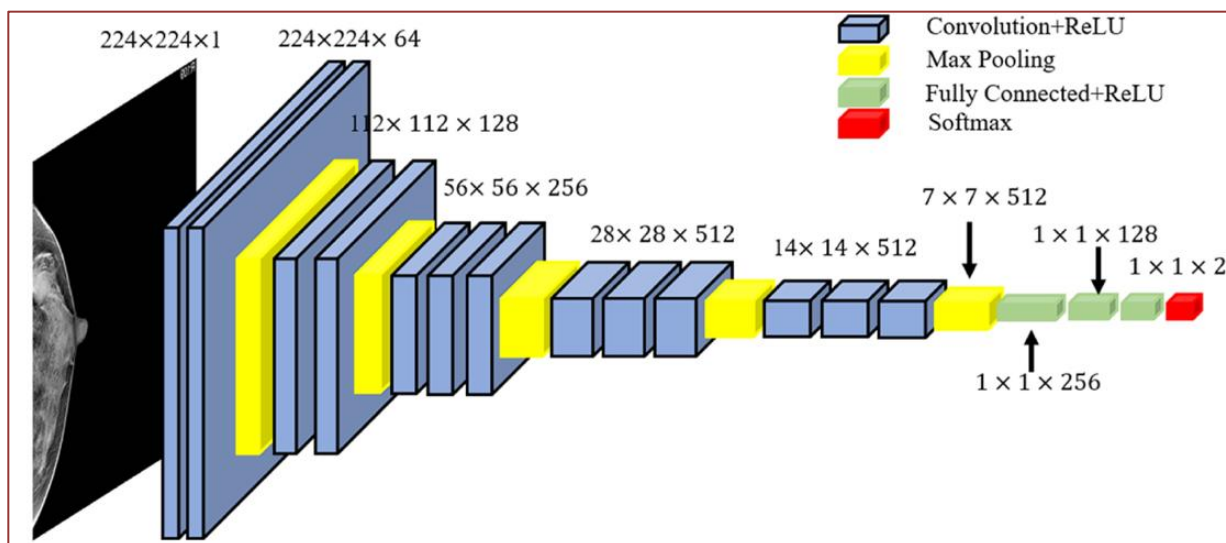
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4. ARQUITETURA DA REDE NEURAL PROFUNDA

A seleção de uma arquitetura adequada de rede neural profunda é um determinante crítico de desempenho em tarefas de aprendizado de máquina. Neste trabalho, após uma análise empírica, optou-se pela arquitetura VGG16. A VGG16 é caracterizada por sua profundidade, compreendendo 16 camadas com pesos aprendidos, e pelo uso sistemático de filtros convolucionais de pequena dimensão (3×3). Essa configuração permite o aprendizado de uma hierarquia complexa de características visuais, desde atributos de baixo nível, como bordas e texturas, até conceitos de alto nível. A capacidade comprovada

da VGG16 em extrair características robustas para uma ampla gama de problemas de visão computacional fundamentou sua escolha nesta pesquisa. A Figura 5 ilustra a arquitetura de rede utilizada neste trabalho, evidenciando o número de camadas convolucionais, operações de pooling, funções de ativação e camadas totalmente conectadas.

Figura 5: Topologia da rede neural profunda VGG16



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 2 sintetiza os principais hiperparâmetros da arquitetura VGG16. Observa-se que essa topologia é composta por 16 camadas, predominantemente convolucionais, empilhadas de modo a aprofundar a extração de características a partir das imagens de entrada. O tamanho de entrada de 224×224 pixels é um padrão adotado para assegurar compatibilidade e eficiência no processamento de imagens em redes profundas. A estrutura da rede baseia-se em convoluções empilhadas, seguidas por camadas totalmente conectadas na etapa final, na qual a função softmax [17] é aplicada para produzir as probabilidades das classes preditas. Essa configuração permite que a VGG16 alcance alto desempenho em desafios de visão computacional, razão pela qual é frequentemente utilizada como base para transfer learning em problemas biomédicos, como a classificação de imagens médicas.

Tabela 2: Hiperparâmetros da rede VGG16

Hiperparâmetro	Informações
Número de camadas	16
Função de ativação	ReLU
Parâmetros treináveis	138.4 milhões
Tamanho da entrada	224×224
Camada final	Totalmente conectada + Softmax

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.5. CRIAÇÃO COMPILAÇÃO E TREINAMENTO DO MODELO

Para a construção do modelo, adotou-se a estratégia de aprendizado por transferência (transfer learning), utilizando a arquitetura VGG16 pré-treinada no conjunto de dados ImageNet [18]. Essa abordagem explora o conhecimento generalizado de características visuais previamente assimilado pela rede.

Especificamente, instanciou-se a base convolucional da VGG16, com pesos provenientes do treinamento no ImageNet. As camadas originais do classificador da VGG16, projetadas para as 1000 classes do ImageNet, foram removidas. Em seu lugar, adicionou-se uma nova sequência de camadas densas (totalmente conectadas) sobre a base convolucional, constituindo um classificador customizado para as classes específicas do problema proposto neste trabalho. Essa nova região da VGG16 é composta pelos seguintes elementos:

- **Camada Flatten**, responsável por converter os mapas de características multidimensionais da base convolucional em um vetor unidimensional.
- **Sequências de camadas Dense**, com funções de ativação ReLU, para introduzir não linearidades e modelar relações complexas entre as características.
- **Uma ou mais camadas Dropout**, implementadas como técnica de regularização para mitigar overfitting, melhorando a capacidade de generalização do modelo.
- **Camada densa de saída**, com função de ativação softmax para classificação e número de neurônios correspondente ao número de classes-alvo.

Durante a fase inicial de treinamento, os pesos das camadas da base convolucional da VGG16 foram mantidos congelados (frozen). Essa medida visa preservar as características aprendidas no ImageNet e permitir que apenas os pesos do novo bloco classificador sejam ajustados, promovendo uma adaptação mais estável do modelo ao novo conjunto de dados.

Após a definição da arquitetura, o modelo foi compilado, etapa que configura formalmente o processo de aprendizagem. Na compilação, foram especificados três componentes principais:

1. **Otimizador**: foi selecionado o otimizador Adaptive Moment Estimation (Adam). Esse algoritmo é amplamente utilizado devido à sua eficiência computacional e à capacidade de ajustar adaptativamente as taxas de aprendizado para cada parâmetro, frequentemente resultando em convergência robusta. Uma taxa de aprendizado inicial foi configurada empiricamente.
2. **Função de perda**: foi utilizada a entropia cruzada binária (binary cross-entropy), uma vez que se trata de um problema de classificação binária. A função de perda quantifica a discrepância entre as previsões do modelo e os valores verdadeiros, e sua minimização constitui o objetivo do otimizador.
3. **Métricas de avaliação**: definiram-se métricas apropriadas para acompanhar o desempenho durante o treinamento e a validação, tais como acurácia e, quando pertinente, sensibilidade e especificidade, permitindo monitorar o comportamento do modelo ao longo das épocas.

O treinamento do modelo foi conduzido utilizando os conjuntos de dados de treinamento e validação previamente estabelecidos. O processo ocorreu ao longo de um número predefinido de 130 épocas (epochs), com os dados de treinamento processados em 30

lotes (batches). Em cada iteração, o modelo processa um lote de dados, calcula a perda e o otimizador ajusta os pesos da rede de modo a reduzir essa perda.

Ao final de cada época, o desempenho do modelo foi avaliado no conjunto de validação, com o objetivo de monitorar a capacidade de generalização e identificar possíveis ocorrências de overfitting. Para otimizar o treinamento, podem ser empregados callbacks como EarlyStopping, para interromper o treinamento caso o desempenho no conjunto de validação não apresente melhoria ao longo das épocas, e ModelCheckpoint, para salvar a melhor configuração de pesos do modelo com base na métrica de validação monitorada.

3.6. MÉTRICAS DE VALIDAÇÃO

A implementação de diferentes algoritmos de classificação em DL requer um mecanismo de avaliação apropriado. Para assegurar efetividade e acurácia na mensuração das características de cada algoritmo, é essencial uma seleção criteriosa das amostras utilizadas tanto para treinamento quanto para teste.

A avaliação de desempenho do modelo proposto foi realizada por meio de validação cruzada 5-fold [19]. A validação cruzada é fundamental em algoritmos de DL para a obtenção de resultados confiáveis e robustos. Essa abordagem permite avaliar o desempenho do modelo em diferentes particionamentos do conjunto de dados, minimizando o impacto de variações decorrentes da divisão entre treinamento e teste. Além disso, a validação cruzada fornece uma estimativa mais realista do desempenho do modelo em dados não vistos, ampliando sua capacidade de generalização.

No problema de classificação binária abordado neste estudo, a avaliação do conjunto de teste é decomposta em quatro possíveis desfechos: verdadeiro positivo (VP), verdadeiro negativo (VN), falso positivo (FP) e falso negativo (FN), onde:

- **VP:** representa uma imagem de encéfalo com tumor corretamente classificada como tal.
- **VN:** representa uma imagem de encéfalo saudável corretamente classificada como tal.
- **FP:** representa uma imagem de encéfalo saudável incorretamente classificada como contendo tumor.
- **FN:** representa uma imagem de encéfalo com tumor incorretamente classificada como saudável.

As métricas adicionais avaliadas na análise do modelo incluem acurácia, recall (sensibilidade), precisão, especificidade e F-Score, cujas definições formais são sumarizadas na Tabela 3.

Tabela 3: Métricas de desempenho utilizadas para avaliação do modelo

Métrica	Equação	Definição
Acurácia (Acc)	$\frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}$	Proporção de predições corretas em relação ao total de predições realizadas. Mede o desempenho global do modelo.
Recall (R)	$\frac{VP}{VP + FN}$	Proporção de VPs entre todos os positivos preditos. Indica o quão confiáveis são as predições positivas.
Precisão (P)	$\frac{VP}{VP + FP}$	Proporção de VPs entre todos os positivos reais. Mede a capacidade do modelo de identificar todas as instâncias relevantes.
Especificidade (S)	$\frac{VN}{VN + FP}$	Proporção de VNs entre todos os negativos reais. Avalia a capacidade do modelo de identificar corretamente os casos negativos.
F-Score	$2 \times \frac{P \times R}{P + R}$	Média harmônica entre P e R. Útil quando se deseja um equilíbrio entre precisão e recall.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos em cada experimento de classificação deste trabalho. Além disso, o modelo proposto é comparado em duas situações: (i) utilizando a base de dados original, isto é, sem empregar quaisquer das técnicas propostas no pipeline ilustrado na Figura 1; e (ii) seguindo integralmente o pipeline proposto na metodologia principal. Por fim, a efetividade da metodologia proposta é verificada com base nos resultados disponíveis no estado da arte, além da apresentação de resultados visuais das classificações do modelo, concluindo com a discussão dos desafios e limitações encontrados.

4.1. EXPERIMENTOS DE CLASSIFICAÇÃO SEM AUMENTO DE DADOS

Este experimento teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo VGG16, pré-treinado na base ImageNet, na tarefa de classificação de tumores cerebrais utilizando a base multimodal de imagens de TC e RM. O modelo foi selecionado devido à sua ampla aceitação em trabalhos recentes na literatura de processamento de imagens médicas, destacando-se pela robustez e facilidade de implementação.

O processo de treinamento utilizou a base original, conforme ilustrado na Tabela 1. Para validação, empregou-se o método de validação cruzada. A Tabela 4 apresenta os resultados das métricas de avaliação ao longo dos cinco folds da validação cruzada. A análise das métricas revela resultados expressivos e consistentes entre os diferentes folds. A acurácia média de 92,4% indica que o modelo é capaz de distinguir, com elevada confiabilidade, imagens com e sem presença de tumor, tanto em exames de TC quanto de RM.

A sensibilidade média obtida, de 93,4%, demonstra que a VGG16 apresenta excelente capacidade de identificar corretamente os casos positivos para tumor, minimizando a ocorrência de FNs. Essa métrica é particularmente relevante em contextos clínicos, pois assegura que a maior parte dos pacientes com alterações relevantes seja corretamente triada para acompanhamento ou diagnóstico complementar.

Tabela 4: Métricas de desempenho do modelo VGG16 na classificação de tumores cerebrais em imagens de TC e RM, considerando validação cruzada

Fold	Acc	R	P	S	F-Score
1	0.927±0.03	0.931±0.04	0.916±0.05	0.923±0.02	0.923±0.03
2	0.920±0.02	0.936±0.03	0.915±0.06	0.915±0.03	0.925±0.04
3	0.930±0.02	0.929±0.02	0.925±0.04	0.921±0.01	0.927±0.02
4	0.928±0.01	0.944±0.05	0.930±0.03	0.928±0.03	0.937±0.03
5	0.917±0.04	0.930±0.04	0.926±0.03	0.912±0.04	0.928±0.03
Média	0.924±0.02	0.934±0.04	0.922±0.04	0.920±0.03	0.928±0.03

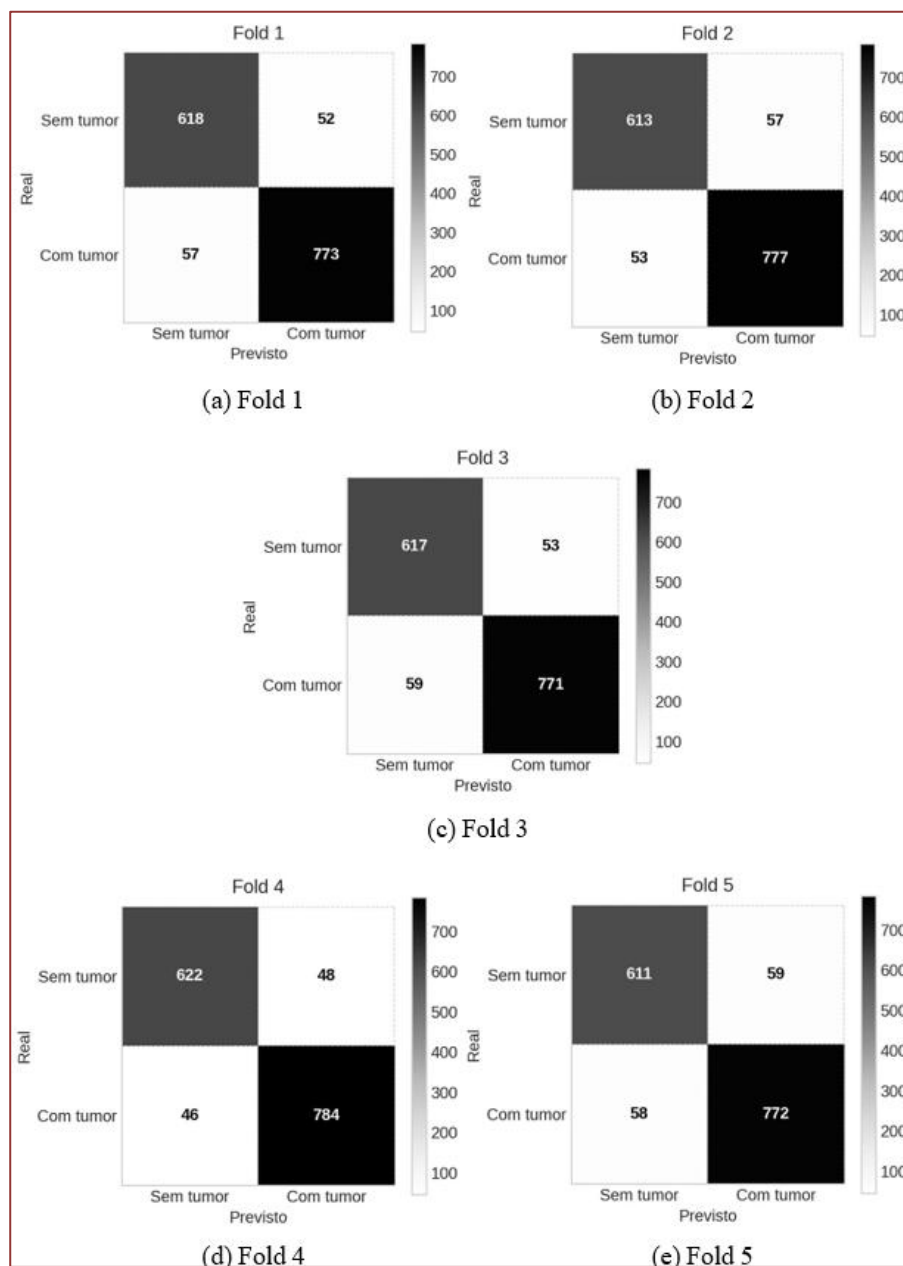
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação à precisão, o valor médio de 92,2% evidencia que o modelo atua de forma eficaz na redução de FPs, isto é, as imagens classificadas como tumor correspondem, em sua maioria, a casos verdadeiros. Essa característica é importante para reduzir procedimentos diagnósticos desnecessários e ansiedades indevidas.

A especificidade, com média de 92,0%, reforça a capacidade do modelo em reconhecer corretamente exames de pacientes saudáveis, complementando a análise de sensibilidade e contribuindo para a confiabilidade do sistema na prática clínica. Por fim, o F1-score médio de 92,8% sintetiza o equilíbrio entre sensibilidade e precisão, evidenciando a robustez da VGG16 na tarefa de classificação, mesmo diante de possíveis variações entre imagens de diferentes modalidades. A baixa variabilidade das métricas entre os folds reforça a estabilidade do modelo frente a diferentes particionamentos dos dados.

As matrizes de confusão apresentadas na Figura 6 evidenciam o desempenho do modelo de classificação em cada fold da validação cruzada, considerando as classes “Sem tumor” e “Com tumor”. Observa-se que, em todos os folds, os valores na diagonal (células que representam classificações corretas para ambas as classes) apresentam os maiores números, indicando que a maioria dos exames foi corretamente classificada pelo modelo. As classes “Sem tumor” e “Com tumor” mantiveram elevadas taxas de acerto ao longo dos diferentes folds, refletindo a consistência do método proposto e a capacidade do classificador de generalizar para diferentes subconjuntos de dados. Os erros de classificação (FPs e FNs) foram relativamente baixos, conforme observado nas células fora da diagonal, sugerindo boa sensibilidade e especificidade. A variação sutil entre os resultados dos diferentes folds reforça a robustez da abordagem, ao mesmo tempo em que evidencia a influência da segmentação dos dados no desempenho do classificador. Esse comportamento é esperado em cenários com validação cruzada e ressalta a importância da avaliação em múltiplos folds para assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 6: Matrizes de confusão obtidas em cada fold da validação cruzada, considerando as classes “Sem tumor” e “Com tumor”. As anotações numéricas são exibidas com cores contrastantes para garantir melhor legibilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2. EXPERIMENTOS DE CLASSIFICAÇÃO SEGUINDO O PIPELINE METODOLÓGICO

Nesta etapa do trabalho, os experimentos de classificação foram realizados seguindo o pipeline metodológico ilustrado na Figura 1. A base de dados foi submetida à normalização em 8 bits, ao pré-processamento com CLAHE e, adicionalmente, às etapas de AD propostas, resultando no quantitativo de imagens apresentado na Tabela 1. A CNN VGG16 foi utilizada com pré-treinamento na base ImageNet, com o objetivo de reduzir o tempo de treinamento do modelo.

A análise dos resultados obtidos nos experimentos de classificação realizados sobre o conjunto de dados aumentado evidencia o impacto positivo das técnicas de AD no desempenho do modelo. Conforme detalhado na Tabela 1, após a aplicação das estratégias de AD, o número de imagens em cada classe foi substancialmente ampliado, promovendo maior balanceamento entre as categorias e permitindo um treinamento mais robusto da VGG16.

A Tabela 5 apresenta as métricas de desempenho obtidas pelo modelo VGG16 na tarefa de classificação de tumores cerebrais em imagens de TC e RM, também considerando validação cruzada 5-fold após a etapa de DA. Observa-se que todas as métricas avaliadas permaneceram consistentemente elevadas, situando-se entre 0,95 e 0,98.

Tabela 5: Métricas de desempenho do modelo VGG16 na classificação de tumores cerebrais em imagens de TC e RM, considerando validação cruzada 5-fold após o aumento de dados

Fold	Acc	R	P	S	F1-Score
1	0.971±0.01	0.976±0.01	0.968±0.02	0.963±0.02	0.972±0.01
2	0.965±0.02	0.957±0.02	0.963±0.02	0.961±0.01	0.960±0.02
3	0.978±0.01	0.981±0.01	0.970±0.01	0.973±0.01	0.975±0.01
4	0.974±0.01	0.983±0.01	0.978±0.01	0.969±0.01	0.980±0.01
5	0.959±0.02	0.963±0.02	0.955±0.03	0.956±0.02	0.959±0.02
Média	0.969±0.01	0.972±0.01	0.967±0.02	0.964±0.01	0.969±0.01

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O valor médio de acurácia atingiu 0,969 (96,90%), indicando que o modelo foi capaz de classificar corretamente a grande maioria das imagens. De modo semelhante, a sensibilidade (0,972) e o F1-score (0,969) demonstram a efetividade do classificador na identificação de casos de tumor cerebral, com elevada taxa de acerto tanto para VPs quanto para VNs. A precisão (0,967) e a especificidade (0,964) também apresentaram valores expressivos, evidenciando baixos índices de FPs e FNs.

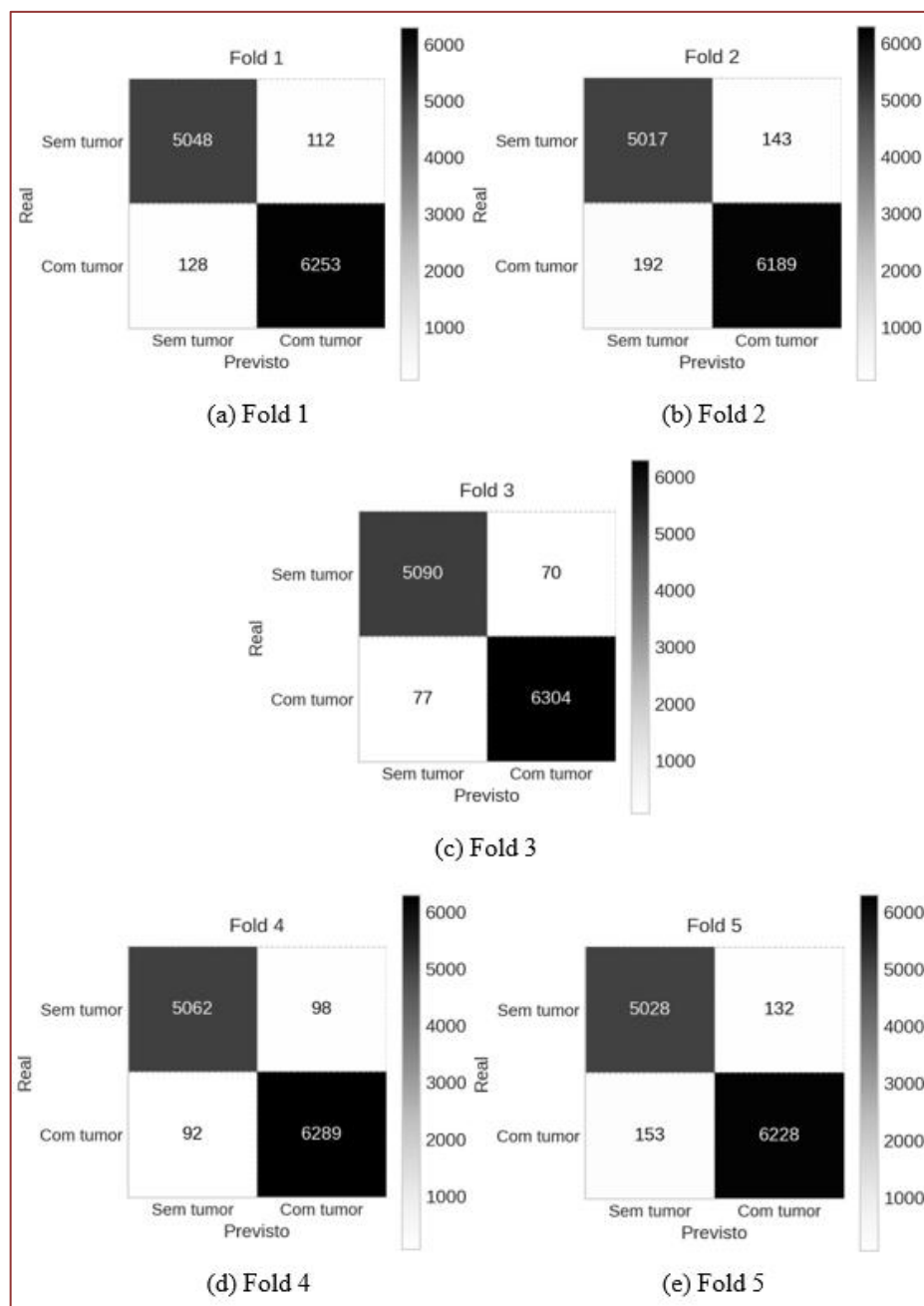
A baixa variabilidade entre os folds, refletida nos desvios-padrão reduzidos, reforça a robustez do modelo e sua capacidade de generalização frente a diferentes particionamentos do conjunto de dados. Esses resultados destacam o impacto positivo das técnicas implementadas no pipeline metodológico adotado, tornando o sistema desenvolvido eficiente como ferramenta de auxílio ao diagnóstico automatizado de tumores cerebrais em imagens médicas multimodais.

A análise das matrizes de confusão apresentadas na Figura 7, referentes aos cinco folds da validação cruzada, reforça a efetividade e a robustez do modelo VGG16 na classificação de imagens de TC e RM para detecção de tumores cerebrais. Em todos os folds, observa-se predominância de valores na diagonal principal das matrizes, o que indica elevada taxa de acerto para as classes “Sem tumor” e “Com tumor”.

No fold 1, o modelo proposto classificou corretamente 5.048 imagens como “Sem tumor” e 6.253 imagens como “Com tumor”, com apenas 112 FP e 128 FN, refletindo uma taxa de erro reduzida. Esse padrão se repete nos demais folds, nos quais o número de VP e VN

permanece elevado, enquanto as classificações incorretas (FP e FN) são pontuais e não comprometem significativamente o desempenho global.

Figura 7: Matrizes de confusão obtidas em cada fold da validação cruzada, considerando as classes “Sem tumor” e “Com tumor”. As anotações numéricas são exibidas com cores contrastantes para garantir melhor legibilidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

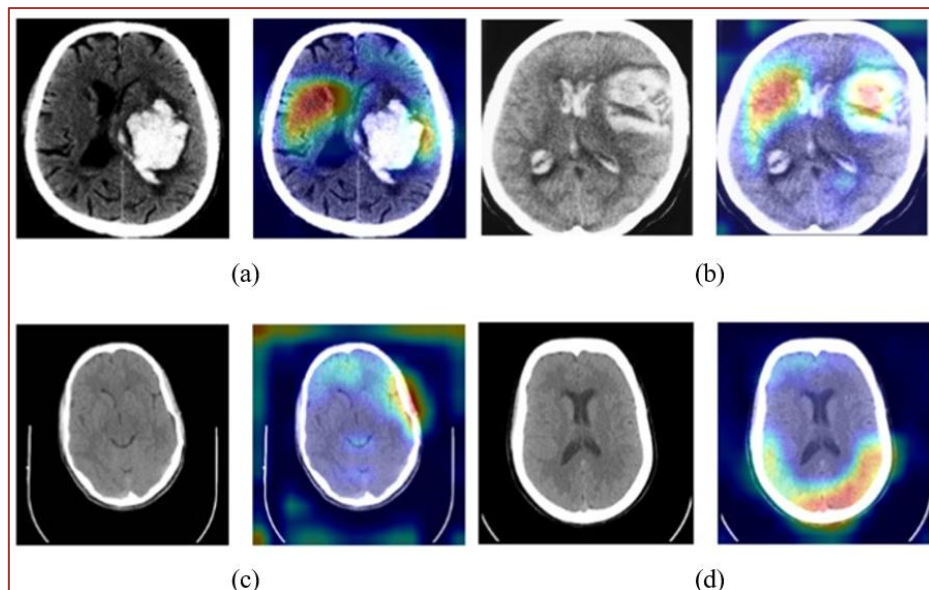
4.3. RESULTADO DAS CLASSIFICAÇÕES VISUAIS

A avaliação visual das classificações realizadas pelo modelo, por meio da análise das Figuras 8 e 9, evidencia aspectos fundamentais sobre o comportamento da rede e sua

capacidade de identificar as regiões mais relevantes para a decisão diagnóstica. Cada figura apresenta exemplos de imagens originais de TC e RM, provenientes tanto de encéfalos com tumor quanto de encéfalos saudáveis, acompanhadas de seus respectivos mapas de ativação gerados pelo Grad-CAM. Nessas visualizações, as regiões destacadas em vermelho e branco indicam áreas de maior relevância para a classificação, enquanto as regiões em azul representam menor contribuição para a decisão do modelo.

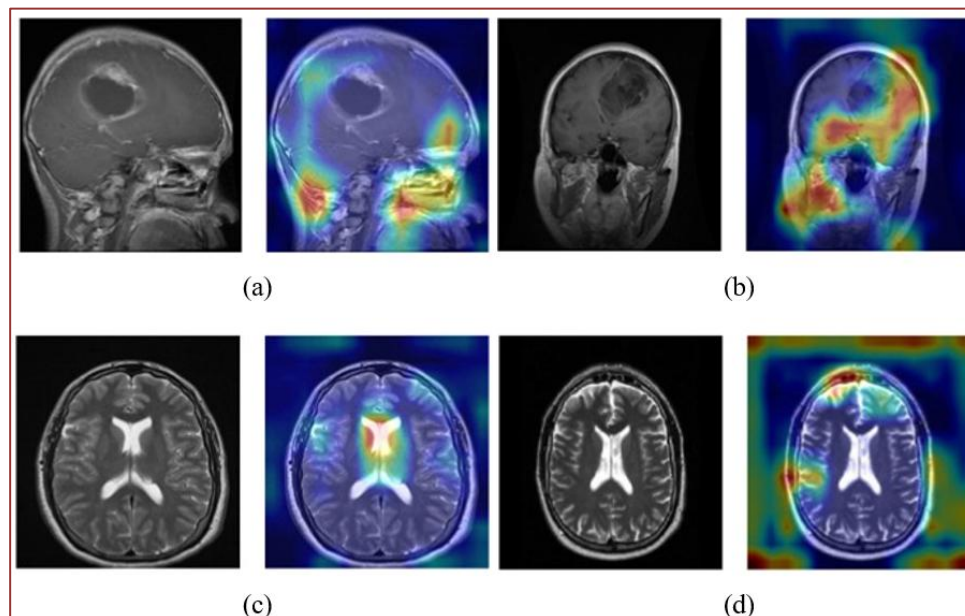
Observa-se que, nos exemplos de casos com tumor (Figuras 8a-b e 9a-b), o Grad-CAM apresenta ativações intensas precisamente nas regiões correspondentes às lesões neoplásicas. Esse comportamento sugere que o modelo foi capaz de aprender representações discriminativas, direcionando sua atenção para áreas compatíveis com a localização anatômica dos tumores, o que é essencial para a robustez clínica do sistema. Além disso, a ativação localizada reforça a interpretabilidade do método, permitindo que especialistas compreendam quais características visuais influenciaram o resultado da classificação. Já nos exemplos de encéfalos saudáveis (Figuras 8c-d e 9c-d), nota-se uma ativação menos concentrada, frequentemente distribuída em regiões não patológicas da imagem. Esse padrão é consistente com o esperado, pois a ausência de lesões relevantes tende a levar o modelo a distribuir sua atenção sobre estruturas anatômicas normais, sem focalizar anomalias específicas. Em conjunto, os resultados visuais demonstram que o sistema proposto foi capaz de identificar corretamente regiões tumorais em exames de TC e RM, destacando as principais características discriminativas.

Figura 3 Exemplos de resultados de classificação para imagens de TC. As subfiguras (a)–(b) apresentam casos com tumor e (c)–(d) apresentam casos saudáveis. Cada imagem é acompanhada do respectivo mapa de características Grad-CAM, no qual as regiões em vermelho



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 9: Exemplos de resultados de classificação para imagens de RM. As subfiguras (a)–(b) apresentam casos com tumor e (c)–(d) apresentam casos saudáveis. Cada imagem é acompanhada do respectivo mapa de características Grad-CAM, no qual as regiões em vermelho



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.4. DESAFIOS E LIMITAÇÕES

Apesar dos resultados expressivos obtidos pelo modelo proposto, alguns desafios e limitações merecem ser destacados. A heterogeneidade inerente às imagens de TC e RM, provenientes de diferentes equipamentos, protocolos e resoluções, impõe a necessidade de uma padronização rigorosa durante o pré-processamento, a qual pode não capturar todas as nuances clínicas relevantes.

Além disso, embora as técnicas de AD tenham contribuído para reduzir o desbalanceamento e melhorar a capacidade de generalização do modelo, a introdução artificial de variações pode, em determinados casos, gerar amostras pouco representativas do contexto real. Outro desafio significativo refere-se à disponibilidade limitada de bases públicas multimodais, de grande escala e com anotação rigorosa, o que restringe a validação do método em cenários mais diversos e realistas.

A arquitetura VGG16, embora robusta, pode apresentar limitações na extração de características altamente específicas associadas a padrões tumorais sutis, especialmente em casos de tumores pequenos ou com apresentação atípica. Por fim, ressalta-se que o desempenho do sistema automatizado deve ser interpretado sempre como suporte à tomada de decisão médica, não substituindo a análise clínica e o julgamento do especialista.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs e avaliou um pipeline metodológico robusto para a detecção automática de tumores cerebrais a partir de imagens multimodais de TC e RM. A proposta

contemplou etapas iniciais de padronização e pré-processamento das imagens, seguidas pela aplicação de técnicas de AD, culminando na adaptação e no treinamento da arquitetura VGG16 para a tarefa de classificação binária entre encéfalos saudáveis e com presença de tumor.

Os resultados obtidos foram expressivos e evidenciaram o impacto positivo da metodologia adotada. O pipeline com pré-processamento e AD proporcionou melhoria substancial nas principais métricas de avaliação, alcançando índices elevados em todos os folds da validação cruzada. Esses achados demonstram que a combinação de fusão multimodal, AD e DL permite extrair informações complementares das modalidades de imagem, promovendo maior robustez e capacidade de generalização do sistema desenvolvido. Além disso, o modelo mostrou-se eficiente tanto para imagens de TC quanto de RM, o que reforça sua aplicabilidade em contextos clínicos nos quais diferentes métodos de imagem são rotineiramente empregados no diagnóstico e no monitoramento de tumores cerebrais.

Apesar dos avanços, alguns desafios permaneceram evidentes. A heterogeneidade das imagens disponíveis em bases públicas, a variação de qualidade entre exames provenientes de diferentes equipamentos e a limitação no número de casos raros ou de apresentação atípica são fatores que impactam diretamente a validação externa e a generalização do modelo. Adicionalmente, destaca-se a importância de estratégias para evitar overfitting, especialmente em cenários com dados sintéticos gerados por AD. Como trabalhos futuros, recomenda-se a exploração de arquiteturas ainda mais avançadas, tais como modelos baseados em mecanismos de atenção (transformers) ou redes neurais tridimensionais capazes de processar volumes completos e sequências temporais de exames. Outra direção promissora consiste na incorporação de informações clínicas, laboratoriais e demográficas ao pipeline, promovendo uma abordagem verdadeiramente multimodal e personalizada para o diagnóstico assistido por computador.

Conclui-se, portanto, que o pipeline desenvolvido neste trabalho representa uma contribuição ao estado da arte em detecção assistida de tumores cerebrais, ao mesmo tempo em que abre caminho para inovações e aprimoramentos em pesquisas futuras, com potencial impacto no diagnóstico e no prognóstico de pacientes com doenças neurológicas.

REFERÊNCIAS

- [1] BRAY, F.; LAVERSANNE, M.; SUNG, H. et al. **Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries**. CA: A Cancer Journal for Clinicians, [s.l.], v. 74, n. 3, p. 229-263, 2024. DOI: 10.3322/caac.21834.
- [2] OLIVEIRA, L. L. de; BERGMANN, A.; THULER, L. C. S. **Trends in the incidence of malignant central nervous system tumors in Brazil, 2000–2015**. Neuro-Oncology Practice, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 34-40, 2023. DOI: 10.1093/nop/npac063.
- [3] LOUIS, D. N.; PERRY, A.; WESSELING, P. et al. **The 2021 WHO Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary**. Neuro-Oncology, [s.l.], v. 23, n. 8, p. 1231-1251, 2021. DOI: 10.1093/neuonc/noab106.
- [4] BROWN, N. F.; OTTAVIANI, D.; TAZARE, J. et al. **Survival Outcomes and Prognostic Factors in Glioblastoma**. Cancers, Basel, v. 14, n. 13, e3161, 2022. DOI: 10.3390/cancers14133161.
- [5] SABEGHI, P.; ZARAND, P.; ZARGHAM, S. et al. **Advances in Neuro-Oncological Imaging: An Update on Diagnostic Approach to Brain Tumors**. Cancers, Basel, v. 16, n. 3, e576, 2024. DOI: 10.3390/cancers16030576.

- [6] MURTOZA, G. Brain tumor multimodal image (CT & MRI) [dataset]. Kaggle, 2023. Disponível em: <<https://www.kaggle.com/datasets/murtozalikhon/brain-tumor-multimodal-image-ct-and-mri>>.
- [7] DORFNER, F. J.; PATEL, J. B.; KALPATHY-CRAMER, J. et al. **A review of deep learning for brain tumor analysis in MRI**. NPJ Precision Oncology, [s.l.], v. 9, n. 1, e2, 2025. DOI: 10.1038/s41698-024-00789-2.
- [8] ABDUSALOMOV, A. B.; MUKHIDDINOV, M.; WHANGBO, T. K. **Brain Tumor Detection Based on Deep Learning Approaches and Magnetic Resonance Imaging**. Cancers, Basel, v. 15, n. 16, e4172, 2023. DOI: 10.3390/cancers15164172.
- [9] AHMED, M. M.; ALAM, M. S. **Brain tumor detection and classification in MRI using hybrid deep learning and ant colony optimization based feature selection framework**. Scientific Reports, [s.l.], v. 14, n. 1, e21617, 2024.
- [10] USHA, M. P.; KUMAR, R. S. **Multimodal Brain Tumor Classification Using Convolutional Neural Network and Recurrent Neural Network**. Computational Intelligence and Neuroscience, [s.l.], v. 2024, art. 4678554, 2024. DOI: 10.1155/2024/4678554.
- [11] SATUSHE, V.; KULKARNI, U. V.; HIREMATH, P. **AI in MRI brain tumor diagnosis: A systematic review of machine learning and deep learning advancements**. Artificial Intelligence in Medicine, [s.l.], v. 161, art. 102999, 2025.
- [12] GASMI, K.; OUAHABI, A.; BENOHOUD, M.; TALEB-AHMED, A. **Enhanced brain tumor diagnosis using combined deep learning models on MRI images**. Frontiers in Neuroinformatics, [s.l.], v. 18, art. 1444650, 2024. DOI: 10.3389/fninf.2024.1444650.
- [13] CHLAP, H. M.; MIN, H.; VARDHANABHUTI, V. et al. **A review of medical image data augmentation techniques for deep learning applications**. Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology, [s.l.], v. 65, p. 545-563, 2021. DOI: 10.1111/1754-9485.13261.
- [14] CUBUK, E. D.; ZOPH, B.; SHLENS, J.; LE, Q. V. **RandAugment: Practical data augmentation with no separate search**. arXiv:1909.13719, 2019. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1909.13719>>.
- [15] BUSLAEV, A.; IGLIOVNIKOV, V. I.; KHVEDCHENYA, E. et al. **Albumentations: Fast and Flexible Image Augmentations**. Information, [s.l.], v. 11, n. 2, e125, 2020. DOI: 10.3390/information11020125. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2078-2489/11/2/125>>.
- [16] SMITH, P. **Bilinear interpolation of digital images**. Ultramicroscopy, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 201-204, 1981. DOI: 10.1016/0304-3991(81)90061-9.
- [17] BRIDLE, J. S. **Training stochastic model recognition algorithms as networks can lead to maximum mutual information estimation of parameters**. In: TOURETZKY, D. S. (ed.). Advances in Neural Information Processing Systems 2. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1990. p. 211-217.
- [18] RUSSAKOVSKY, O.; DENG, J.; SU, H. et al. **ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge**. International Journal of Computer Vision, [s.l.], v. 115, p. 211-252, 2015. DOI: 10.1007/s11263-015-0816-y.
- [19] KOHAVI, R. **A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection**. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (IJCAI), 14., 1995, Montréal. Proceedings [...]. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1995. p. 1137-1143.

Capítulo 10

Viscoelastic polyurethane foams from unmodified kraft lignin dispersed into methoxy polyethylene glycol and palm kernel oil as partial substitutes of petroleum-based polyols

Camila Campos Flôres

Thiago C Rufno

Lara Robert Nahra

Isabelle Zavec Rodrigues

Maurício Pinheiro Oliveira

Abstract: Kraft lignin (KL) dispersions in methoxy polyethylene glycol (MPEG) and in a mixture of palm kernel oil (PKO) with MPEG (PKO/MPEG) were evaluated for viscoelastic polyurethane foams (VPFs) production with different contents of KL (0-3.9 pphp) and PKO (0 -15 pphp). The influence of the dispersed KL on the foam structure, foam growth profile, foaming reactivity, mechanical properties, and final properties of VPFs were studied. The appearance of the VPF produced with KL dispersion in MPEG/PKO was similar to the control VPF foam. The addition of KL dispersion (0 to 15 pphp), had a significant effect on the growth profile, foaming reactivity, density and consequently on the foam morphology. VPFs produced with 3.9 pphp of KL presented shrinkage values about 4 times when compared to the control. The presence of the KL and PKO did not improve the burning rate of the foam samples compared to the control foam, without KL and PKO. Thermal stability of the produced foams showed no relevant differences regardless of the contents of KL/MPEG/PKO used in comparison to the control. Mechanical properties of VPF can be adjusted by making changes to the standard formulation. It can be concluded that the dispersion of KL in a mixture of MPEG and PKO represents an alternative for incorporating fractions of KL and PKO into VPF. In addition, this study provides new insights for the production of VPF using renewable resources for packaging applications, as well as in the mattress industry.

Keywords: Kraft lignin, dispersion, polyurethane foam, viscoelastic PU foam, palm kernel oil, industrial waste

STATEMENT OF NOVELTY

Kraft lignin from the black liquor of the paper industry has been treated as waste material and burned for energy recovery in the paper industry. However, many efforts have been made to transform low value KL to high-value products such as polyurethane foams, as a strategy to replace petroleum-based polyols. This study aims to improve the dispersion of KL directly in a commercial polyol (MPEG) and in a mixture of MPEG/PKO for the establishment of cost-effective strategy for the use of unmodified KL as partial substitutes of petroleum-based polyols for viscoelastic polyurethane foam production. The effect of the dispersed KL on the foam structure, foam growth profile, foaming reactivity, flame retardance and mechanical properties were studied. We confirm that no previous study was done to investigate the potential use of MPEG/PKO as dispersing agent for KL. The results obtained in this work created new approaches for the use of unmodified KL and PKO as partial substitutes of petroleum-based polyols for viscoelastic polyurethane foams.

1. INTRODUCTION

Kraft lignin (KL) is considered a promising product from renewable resources and has attracted lots of attention in recent years due to specific application properties, substitution of petroleum-based raw materials for ecological and economic balance [1-3]. KL is an amorphous macromolecule and presents a very complex structure, which differs substantially from native lignin in monomer composition, molar mass distribution, solubility in water and in several organic solvents [5,6]. Usually, KL can be obtained in large quantities from the black liquor of the paper industry via acidification/precipitation methods, such as the LignoBoost process, WestVasco process and the LignoForce System TM [6,7]. Normally, carbon dioxide and sulphuric acid are used, followed by hot filtration. According to Kienberger et al. [7] and Garlapati et al. [8], the annual global production of KL in the paper and cellulose separation processes is ~60 million tons, and approximately 1-2% are used for the production of added-value products. Large part of this KL (~98%) is treated as waste material and burned for energy recovery in the paper and cellulose industry [7-9]. Many efforts have been made to transform low value KL to high-value products such as polyurethane foams, as a strategy to replace petroleum-based polyols [10-18]. However, there are several opportunities associated with the use, dispersion and incorporation of KL, as partial substitutes of petroleum-based polyols for VPF.

Given the industrial and scientific importance of KL to produce new materials from renewable sources, several challenges have been identified for the replacement of petroleum-based polyols with KL that have limited its utility in PU foams. KL obtained from the black liquor offers both aliphatic and aromatic hydroxyl group which, in turn, are suitable to further react with isocyanates to produce polyurethanes [19,20]. The main challenges in the lignin-incorporated PU foams are attributed to the heterogeneous and complex chemical structure, reactivity of hydroxyl groups, poor incorporation into polymer matrix, high molar mass dispersity, poor solubility and dispersion in polyols, that are commonly used for the synthesis of PU foams [10,19,20]. Usually, KL tends to agglomerate and forms heterogeneous mixtures of micro and nanoparticles in common polyols [19-21]. The direct use of KL (up to 64 wt%) under mixing in the petroleum-based polyols has resulted in PU foams with inferior mechanical properties compared to PU foams based solely on petroleum-based polyols [19,20]. Hayati et al. [19] reported a significant improvement in the dispersion of KL (5 wt%) in a polyether polyol mixture with 4wt% glycerol at 120 °C and in the compressive strength of the PU foams. Haridevan et al. [20]

and Li et al. [22] reported the use of lignin solubilized in polyethylene glycol (PEG, 400 g/mol) and glycerol to prepare PU foams. Ahvazi et al. [23] reported enhanced dispersion of lignin in aromatic polyester polyol with formation of ligno-polyols through both physical and chemical linkages.

Vegetable oils, such as palm kernel oil (PKO) can be used as chain extender and substitutes of petroleum-based polyols for bio-based PU foams [18,22,24]. Considering that the homogeneity and stability of KL dispersion is affected by the incorporation approach, lignin structures, the loading levels and polyol structures [20], PKO would be a better choice as a compatibilizer and dispersing agent between the MPEG and KL given it is a low molar mass. However, there are no reports of the combination of MPEG and PKO as dispersing agent for KL. PKO is obtained from the kernel part of the oil palm fruit, which consists of lauric, oleic and myristic acids, and has also been used in the synthesis of bio-polyols to replace petroleum-based polyols [18,22-27]. For example, Lat et al. [18] reported the use of PKO to produce PU-based PKO with flexible characteristics. Pawlik and Prociak [25] reported the use of the bio-polyol based on palm oil on PU foam properties. According to the authors [25], flexible PU foams were obtained by substituting a part of petroleum polyether-polyol with the bio-polyol based on palm oil. However, there are several opportunities to further develop such PU technology towards sustainability. This study looks at an alternative strategy for increasing the dispersion of industrial KL in MPEG with 550 g/mol and in a MPEG/PKO mixtures for VPF production as substitutes of petroleum-based polyols and investigates its influence on the properties of VPF.

Viscoelastic polyurethane foams (VPFs) are widely in several industrial applications, such as airplane seats, headphones, packaging, helmet liners, gym mats, ear plugs, pillows, and toppers for mattresses [27,28], due to their response to a stress stimulus being a strain with enough delay to be remarkably pronounced at macroscopic level. Despite the long response delay (viscous effect), VPF are able to recover their original dimensions (elastic effect) once the stress on the foam is ceased. The behavior of VPF is a result of the underlying polymer structure and is controlled by the formulation that the foam designer uses. Despite of the evident relevance of VPF to the daily basis, there are few reports on VPF using bio-based raw materials as a strategy to reduce the environmental impact of this class of materials [18,22-28]. The present work combined the features from KL and PKO into VPFs as a sustainability strategy to replace part of MPEG, while adding economic feasibility. Hopefully, combining PKO and MPEG would be suitable to produce KL dispersions with superior kinetic stability and KL content, while keeping the viscoelastic properties of the resulting PU foams. Besides, this study provides new insights to production of KL-VPFs for industrial application.

Therefore, this study aims to improve the dispersion of KL directly in a commercial polyol (MPEG 550) and in a mixture of MPEG/PKO for VPF production. KL dispersions in MPEG and in a mixture with PKO were evaluated using different contents of KL, MPEG and PKO, different dispersion temperature and time. The influence of the dispersed KL on the foam structure, foam growth profile, foaming reactivity, flame retardance and mechanical properties were studied. The present work is a continuation of our earlier studies in collaboration with The Dow Chemical Company (Brazil) on the establishment of cost-effective strategy for the use of industrial waste as partial substitutes of petroleum-based polyols for viscoelastic polyurethane foams.

2. EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALS

Kraft lignin (KL) was supplied by Suzano Celulose S.A. from its pilot-plant (LignoBoost process) with a pH of 8.6, total hydroxyl number (nOH) of 185 mgKOH/g, weight-average molar mass (M_w) of 6820 g/mol, number-average molar mass (M_n) of 2930 g/mol and dispersity ($\bar{D}=M_w/M_n$) of 2.33. KL was also found to have 2.0% of sulfur, 0.3% of nitrogen and glass transition temperature (T_g) of 133°C. Details of the KL characterization have been reported previously by Flores et al. [28]. Palm kernel oil (PKO) with 43.8 % of lauric acid, 17.7 % of oleic acid, acid number of 0.95 mgKOH/g, viscosity of 48 mPa.s, hydroxyl number of 1.6 mg KOH/g and molar mass (M_w) of 715 g/mol was supplied by Triângulo Alimentos Ltda (Brazil), and was used as received (Table S2 and S3 in the Supplementary Information). Polyols (propylene-oxide- polyether triol, PEO/PO (Voranol™ CP 1421), propylene-glycol-polyetherdiol, PPG (Voranol™ 2120) and methoxy-poly(ethyleneglycol) - Carbowax™ MPEG 550 were supplied by Dow Chem. (Brazil). The properties of both petroleum-based polyols are summarized in Table S1 (Supplementary Information).

Vorasurf™ 504 from Dow Chem. (Brazil) and Tegostab® B 8228 from Evonik Brazil Ltda were utilized as the surfactants to control the foam and cell morphology. The catalysts for the synthesis of VE-PU foams were composed of bis (2-dimethylaminoethyl) ether (DABCO® BL11, Evonik Brazil Ltda) and triethylenediamine (DABCO® 33-LV, Evonik Brazil Ltda), both solubilized in di-propylene glycol. Methylenediphenyl diisocyanate pre-polymer (Specflex™ NE 134) with 30% NCO groups and viscosity of 98 mPa.s was supplied by Dow Chem. (Brazil). Deionized water (DW) was used throughout the study.

2.2. PREPARATION OF KL DISPERSION (KLD)

The effect of KL dispersion in MPEG and MPEG/PKO at different loading levels on the viscosity and stability of KL dispersion were investigated. The polyol (Carbowax™ MPEG 550) was selected to prepare KL dispersion (KLD) by increasing the KL contents. MPEG/KL and MPEG/KL/PKO dispersions were prepared according to the literature [19,20,29], with slight modifications. Different strategies of KL dispersion were used (KL content, dispersion temperature and time) aiming to elaborate VPFs based on the bio-based materials. KL powder was dried in an oven at 100 °C for 2 h, dispersed in a 2000-mL three- neck round-bottom flask in 1000 g of MPEG 550 under mechanical stirring (Cowles impeller) at 150 rpm for 2.5 to 4.5 h at (55 - 90 ± 2) °C (Table S5 in the Supplementary Information). In the KL/MPEG/PKO dispersion series the amount of KL (30 w%) was kept constant and the dispersions were prepared with PKO and MPEG loading from 0 to 50 wt% and 20 to 70 wt%, respectively. Afterward, the dispersions were filtered through a stainless-steel mesh of 125µm and the dispersibility was evaluated gravimetrically at 180°C for 3 h. The weight fraction of KL soluble/dispersed in MPEG was determined from the initial KL weight. The dispersions were conditioned at (25 ± 2) °C for 7 and any insoluble or aggregated materials were separated by filtration using a stainless-steel mesh of 125µm and the stability was determined gravimetrically. The viscosity of the polyols, PKO and KL dispersions was determined using a Brookfield DV II+ viscosimeter at (40 ± 1) °C, using a spindle n° 21 and a shearing speed of 50 s⁻¹. KL dispersion was evaluated using optical microscopy (FEI

Philips, INSPECT-S50) and a Zehntner-Grindometer ZGR 2020 (Fig. S4 in the Supplementary Information). Hydroxyl number (nOH) of PKO, KL and polyols were determined by titration with 1.0 mol/L KOH standard solution, according to ASTM 2849-69 [30] through acetylation and acid base volumetric titration (Table S1 and S4 in the Supplementary Information).

2.3. VPF FOAM SYNTHESIS

VPFs were synthesized by using the bench mixer with different ratios of KL dispersion, PKO and petroleum-based polyols. Initially, polyether PEO/PO triol (57.5 to 78.0 parts per hundred part of polyol - pphp), PPG diol (12.5 to 15.0 pphp), MPEG (3.7 to 15 pphp), KLD (1.3 to 3.9 pphp of KL), PKO (5.0 to 15.0 pphp), surfactant VorasurfTM 504 (2.4 g), surfactant Tegostab[®] B 8228 (0.9 g), DABCO[®] BL11 (0.1 g), DABCO[®] 33LV (0.5 g) and deionized water (3.4 g) as blowing agent, were mixed for 1 min using a high-torque mixer at 3000 rpm and 25 °C to obtain a uniform mixture. Finally, methylenediphenyl diisocyanate pre-polymer (SpeciflexTM NE 134) was added into the mixture and remained under agitation for 7 s. Immediately after, the mixture was poured into a cardboard mold of 25 cm² for the growth of the foam and then was cured at (25 ± 2) °C for 168 h before further characterization. The foams without KL/PKO mixture were prepared following the same procedure as described above. The isocyanate index used in this study was 1.15 and was calculated according to the desired molar ratio of isocyanate and hydroxyl groups. Table 2 shows experimental design conditions used for the synthesis of VPFs.

Table 1 Experimental conditions used for the synthesis of VPFs with different contents of KL/MPEG/PKO.

Components (pphp)	VPF Formulations						
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>
PEO/PO triol	70.0	70.0	66.0	66.0	66.0	57.5	70.0
PPG diol	15.0	15.0	14.0	14.0	14.0	12.5	15.0
<i>KL dispersion</i>							
MPEG 550	15.0	5.6	7.4	11.1	3.7	11.1	–
KL	–	1.9	2.6	3.9	1.3	3.9	–
PKO	–	7.5	10.0	5.0	15.0	15.0	15.0

2.4. VPF FOAM CHARACTERIZATION

2.4.1. FOAM RISE PROFILE

The foam growth profile and reactivity of VPF formulations were evaluated through the gel time (string time), average speed of growth, shrinkage and tack-free time. The Foammat[®] 285 equipment (Format Messtechnik GmbH) was used to gather several foam parameters, including foam height, core temperature, inner pressure and mixture capacitance. It

consists of a cylindrical reservoir equipped with a thermocouple and a pressure transducer. Moreover, these parameters were tracked over time and the results are expressed as a time profile for each evaluated parameter.

2.4.2. DENSITY

The apparent density of foam samples was determined from the mass-to-volume ratio of foam samples. The samples were dried at 40 °C for 4 h and the analysis was carried out according to Brazilian Association of Technical Standard test method (ABNT NBR 8537-03) [31]. Specimen shape, length, width, and thickness, $(10 \times 10 \times 5) \text{ cm}^3$, were prepared according to ABNT NBR 9429-2003 [32].

2.4.3. MORPHOLOGY

The morphology and uniformity of VPF samples were observed by scanning electron microscopy (SEM, FEI, Inspect S50) at 15 kV. Each samples was cut to, length, width, and thickness, $(5 \times 5 \times 5) \text{ mm}^3$, and was attached to a substrate with an adhesive tape and then coated with a thin gold layer by sputtering. The average cell size of the VPF was determined from the SEM images using the image analysis (ImageJ) software. In order to represent the average diameters, different cells on the SEM micrographs were measured and the average values were presented.

2.4.4. RECOVERY TIME MEASUREMENT

The viscoelastic and recovery testing of VPFs were conducted using a Resimat[®]150 (Format Messtechnik GmbH). The samples of standard dimensions, length, width, and thickness, $(10 \times 10 \times 5) \text{ cm}^3$, were compressed vertically by means of a pressure plate to 50% of the sample's initial thickness. During the test, the force necessary to maintain the deformation was measured. After a pre-determined interval, the sample was uncompressed and left free to gradually recover from the 50% deformation [28,33]. The force and recovery time were measured and reported according to the IOS-MAT-0076.

2.4.5. COMPRESSION SET TEST (Cset)

The compression set test measures the permanent set of the foam after specified conditions of time and temperature. Compression set test of VPFs was measured using a universal testing machine according to the standard ABNT NBR-8797-03 [35]. Samples were cut down to $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}$ blocks. Specimens were stored at $(24 \pm 1) ^\circ\text{C}$ and $(50 \pm 5) \% \text{ RH}$ and were subsequently compressed to $(50 \pm 1) \%$ of their original thickness. The original thickness measurements (i_0) were performed and the Cset values were determined after 22 h at $(70 \pm 2) ^\circ\text{C}$. The temperature was kept constant during the test and, after, the samples were cooled down to $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Finally, the final thickness of samples (i_1) was measured and 50% Cset values of PU foams were calculated according to Eq., where i_0 and i_1 are the original and final thickness of the test specimen, respectively.

$$C_{\text{set}} (\%) = \left(\frac{i_0 - i_1}{i_0} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

2.4.6. RESILIENCE

The resilience of VPF samples was investigated by the ball rebound test method according to the standard ABNT NBR-8619-03 [36]. For this, a graduated tube was positioned vertically over the center of the specimens, length, width, and thickness ($10 \times 10 \times 5$) cm³, and a steel ball of (16.0 ± 0.1) mm diameter was released from the fixed height (0.5 m) and the rebound height was determined.

2.4.7. TEAR STRENGTH

Tear strength measures the VPF samples resistance to tearing and it is related to the durability of the foam. Tear strength of VPF samples were conducted in duplicate on dynamometer (Instron model 1185), according to the standard NBR 8516 [37]. Samples of, length (200 mm) and width (75 mm) were stored at (24 ± 1) °C and (50 ± 5) % RH and were subsequently attached by the ends to the claws of the equipment. The tension was applied evenly distributed in the cross section and the force per unit length (the thickness of the specimen) was measured.

2.4.8. DYNAMIC MECHANICAL THERMAL ANALYSIS (DMTA))

Dynamic mechanical analysis of VPFs was carried out with a DMTA dynamic mechanical thermal analyzer (TA Instruments RSA-G2). The dimensions of specimens were 20 mm × 20 mm × 20 mm (width × length × thickness). Specimens were analyzed in compression mode between two parallel plates with diameter of 25mm. Measurements were recorded at the frequency of 1 Hz in the range of temperatures from -50 to 200 °C at a heating rate of 3 °C/min, under nitrogen atmosphere at a flow rate of 50 mL/min.

3. THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS (TGA)

Thermal stability of VPF was determined by thermogravimetric analysis (TGA, Netzsch 204 F1) at a heating rate of 20 °C/min. The samples were drying in a vacuum oven at (40 ± 2) °C for 4 h and approximately 8-10 mg of each sample were heated from 30 to 800 °C in a nitrogen atmosphere at a flow rate of 90 mL/min.

3.1. FLAMMABILITY TESTING

The horizontal burning tests were conducted according UL-94 [34] and ISO 5660. The specimens ($125 \times 13 \times 10$) mm were conditioned to (23 ± 2) °C and RH (50 ± 5)% for 48 h in an oven. The exposure time in the flame was 30 s according UL-94-2001 [34]. Two markings were made in the direction of the longitudinal axis, at (25 ± 1) mm and (100 ± 1) mm, which determined the useful area to be tested. The foam was placed on a device and firing begins. The time necessary to burn the useful area or the occurrence of flame extinction was measured. The burning rate or flame speed was determined in mm/s after triplicate test.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. CHARACTERIZATION OF KL DISPERSIONS (KLD)

The dispersions of KL in MPEG and in a mixture of KL/MPEG with different loading levels of PKO were evaluated for VPF production. Figure 1(a,b,c) shows the behavior of KL dispersion as a function of dispersion time, dispersion temperature and ratios of KL/MPEG. In order to obtain more accurate results of dispersibility of KL in MPEG, filtration was used for agglomerates solid separation. The dispersion degree of KL in the MPEG at different ratios (10/90, 20/80 and 30/70) increased dramatically with time and temperature increases. These results show that the temperature and dispersion time has a directly effect on the dispersion degree of KL. In the optical microscopic images of KL/MPEG dispersion (Fig 2a,b), which contained brown KL particles with size less than 70 μm and low degree of dispersion at 75 $^{\circ}\text{C}$ and 2.5 h compared at 75 $^{\circ}\text{C}$ and 4.5 h (Fig 2b). However, the dispersion of KL/MPEG with different ratios of KL/MPEG (10:90, 20:80 and 30/70 w/w), conducted at 75 $^{\circ}\text{C}$ and 4.5 h showed high degree of dispersion (Fig 2c). Optical microscopic image with polarized light (Fig 2b) showed KL particles with size less than 60 μm . KL dispersions were also evaluated using a Zehntner- Grindometer (Fig. S1 in the Supplementary Information) and particles with size between 40-60 μm were observed. Data showed that the KL dispersion using a constant 30:70 w/w ratio of MPEG/PKO at 90 $^{\circ}\text{C}$ increased with the PKO contents (Fig. 3), showed good dispersion with little brown microparticles. The degree of dispersion and viscosity of KL dispersion in the MPEG/PKO mixtures at 90 $^{\circ}\text{C}$ were significantly affected by the PKO contents. It is observed that at 90 $^{\circ}\text{C}$ KL has a very high dispersibility (up to 91%), which illustrated that the dramatic increase in the dispersion of KL in the presence of MPEG/PKO mixture, providing a better dispersion of smaller microparticles compared to the KL/MPEG dispersion at same dispersion time (3.5h). This suggests that the degree of dispersion of KL in MPEG/PKO mixtures is affected at the loading levels of PKO, time dispersion temperature, but this does not suggest that KL is completely soluble in a mixture of MPEG/PKO.

The viscosity of the KL dispersions decreased with the addition of PKO (Fig. 3). The dispersion of KL has directly affected the viscosity of KL/MPEG/PKO dispersions. The incorporation of KL into petroleum- based polyols would be expected to be difficult given that KL is highly polar, while polyols are of relatively low polarity. This could be attributed to the good dispersion of KL in the presence of PKO, polarity and better interaction between KL/MPEG/PKO mixtures. Normally, the viscosity of the KL dispersions in polyols depends on the polyol viscosity, hydroxyl groups, molar mass and chemical reaction with lignin [10,19,23]. Ahvazi et al. [23] suggested the formation of ligno-polyol through both physical and chemical linkages between lignin hydroxyl groups with polyester polyol. According to Hayati et al. [19], the differences in particles size, quantity and dissolution of KL in polyols has a directly effect on the viscosity and stability of polyol/lignin dispersions. Pan and Saddler [38] have shown that the addition of KL to polyether triol (Voranol[®] 270) dramatically increased the viscosity only above a 30 wt% loading. Haridevan et al. [20] have shown that the viscosity of the polyols increased with KL loading levels and KL particles with size less than 2.4 μm was observed. In summary, the MPEG/PKO mixtures was a promising dispersant for KL and VPF production. The effects of the PKO without chemical modification with PEG on the KL dispersion and particle size were necessary for further investigation and VPF production.

4.2. FOAM PROPERTIES

VPFs were synthesized with different contents of KL (0-3.9 pphp) and PKO (0 -15 pphp). Table 2 summarizes the observed properties of all VPF formulations, as identified in Table 1. The formulations P1 was established as the baseline to help elucidate the trends of the system as KL and PKO were added.

The differences in degree of dispersion, content of KL/PKO have affected the degree of cross-link with NCO groups, the gel time and density. For instance, the addition of KL increased the gel time from 57 s (P1) to 115 s (F4 and F6) and apparent density of foams from 38.6 Kg/m^3 (P1) to 81.8 Kg/m^3 (P4). The gel time increased as the content of KL increased in the KL/PKO mixtures and the content of PKO and MPEG increased in the VPF formulation, especially for P4 and P6 (Table 2). The incorporation of KL decreases the growth speed from 3.9 mm/s (P1) to 2.0 mm/s (P5). In contrast, the gel time decreased and the growth speed increased when MPEG was changed by PKO in VPF formulation (P7). The apparent density of all foams obtained with KL/PKO mixtures was slightly higher than the reference foam sample (P1). However, the KL content in the formulation had a greater effect than PKO to increase the apparent density of the VPFs, when comparing to the P1 and P7 foams (Table 2). The KL may act as barrier to reactions of polyols with isocyanate, since the hindered hydroxyls from KL are much less reactive than those from the polyols [10]. At the same time, KL at different degrees of dispersion/miscibility can induce distinctly different effects on the microstructure and properties of foams [20]. The self-association of the KL with polyol and poor degree of dispersion limits access to hydroxyl groups to reactions with isocyanate. Similar results were reported by Pawlik and Prociak [25] for PU foams using bio-polyol based on palm oil. Wang et al. [39] described that when KL was used to produce PU foams, the apparent density was higher than the density of PU foams produced with KL modified with PEG2000, suggesting that the modification of KL was beneficial to produce PU foams.

Comparing P4 and P6 formulations, it is possible to observe that the shrinkage values are related to the reaction temperature and micro particles agglomerates, that affect the cellular morphology of the foam. Higher shrinkage values were obtained for 3.9 pphp of KL. The results showed that replacing the petroleum-based polyol (MPEG) with the KL decreased the foaming reactivity. VPFs prepared by directly replacing MPEG 550 with KL presented higher gel time, higher densities, and lower growth speed. In the case of foam produced without KL (P1) and MPEG (P7) there was a relevant difference in the properties (Table 2). The temperature profile of VE-PU with KL was prominently different from the control foam (P1) and the time to obtain maximum temperature showed relevant differences regardless of the amount of KL. The maximum reaction temperature value of VPFs (P2-P7) was lower than the temperature obtained for P1 (Table 2). When KL was used, less reaction temperatures were obtained, which can lead to inadequate curing of the PU foams and open cells. The reaction temperature depends on accessibility of hydroxyl groups in KL, especially aromatic hydroxyl groups [10]. It was found that significant changes in the foam formulation would be required to obtain VPF foams with higher content of KL/PKO.

Table 2 Properties of VPFs obtained with different KL/MPEG/PKO contents.

Properties	Runs						
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>
Gel time (s)	57	111	102	115	97	115	68
Growth speed (mm/s)	3.9	1.8	1.8	1.3	2.0	1.2	3.0
Shrinkage (%)	5.4	4.9	9.8	21.5	4.3	19.2	3.5
Density (kg/m ³)	38.6	46.5	53.3	81.8	45.5	79.9	42.1
Average cell size (mm)	3.8±1.1	6.4±1.9	6.0±1.4	6.2 ±2.0	5.1 ±2.2	3.8±1.8	5.5 ±2.4
Maximum reaction temperature (°C)	97.6	86.0	92.0	91.7	94.5	89.8	92.0
Viscosity of KL dispersions at 40°C (mPa.s)	40.0	200.0	60.0	300.0	60.0	120.0	20.0

Fig. 4 and 5 shows the photograph and SEM images of the cross-section of the VPFs with different KL/MPEG/PKO contents. The addition of KL affects the cell morphology, cell size and color. One can clearly see the change in coloration from white (P1) to dark brown with the addition of KL. The images P2, P3, P4 and P6 (Fig 4a and 5a) revealed different shades of brown proportional to its content in formulation, light for P2 and darker towards P4 and P6. The VPFs (P1, P5 and P7) showed no relevant differences in color, with a light yellow/white coloration (Fig 4a and 5a). The average cell size of the foams increased, and shapeless cells were obtained as the content of KL increased (Fig. 4b and 5b). Interestingly, the reduction of MPEG 550 affects the viscoelastic properties and more opened cells were obtained due to the different microstructure, hydroxyl number and low reactivity of KL with pMDI/polyols. In addition, the inclusion of KL could lead to the formation of urea linkages, which could contribute to obtaining shapeless and opened cells. This behavior may be attributed to the presence of smaller cells

that increase apparent density when KL was used, acting as nucleating agent and resulting in a lower free volume. Wang et al. [39] described that when modified lignin was used to produce PU foams, thicker cells were obtained for higher content of the modified lignin. With these results, we could conclude that KL increases density, affects the morphology and consequently other foam properties, even so, it is worth saying that the amount of each polyol varies between F4 and F6 and could have an effect on properties.

Regarding the VPFs produced without KL (P1 and P7) and with 1.3 pphp of KL (P5), more regular and homogeneous cells were obtained than the samples produced with KL up to 1.3 pphp. SEM images show visually that the cell size of the foams with 3.9 pphp of KL increased than the control foam (Table 2) and more regular cells were obtained with low KL contents (Fig. 5b), especially to P5 (1.3 pphp of KL and 15 pphp of PKO). As observed in previous sections, three factors (particle size of dispersing KL, PKO content, and the viscosity of the mixture) have affected the cellular structure morphology and the stability of the foams. Comparing SEM micrographs of the foams (P1, P2 and P7) with the same polyol polyether composition (PEO/PO), the KL affected the morphology of the foams more when compared to the P2 foam obtained with 1.9 pphp of KL. Pawlik and Prociak [25] described

favorable effects (regular cell structure and closed cell content) of palm oil polyol in flexible PU foams, due to the emulsifying action of PKO. Therefore, despite the use of KL/PKO mixtures to produce VPFs, the standard formulation must be adjusted up to a certain KL concentration in order to obtain VE-PU foams with properties similar to those of the control foam sample (P1). Among the proportions of KL/MPEG/PKO studied, the formulation P5 presented the most promising results for VPF application.

4.3 MECHANICAL PROPERTIES OF VPFs 4.3.1. COMPRESSION SET

The compression set values of all VPF samples are summarized in Fig 6a and expressed the recovery ability of the foams after permanent compression at 70°C for 22 h and 50% of thickness. Figure 6a shows that the compression set (50% for 22 h at 70°C) for VPF samples with KL/MPEG/PKO foams (P2- P6) are about 6.5 times less than VPF reference (P1). Therefore, the addition of KL/PKO mixture decreases the compression set values in comparison to the control foam value (P1). Low compression set values is a good indicator of higher elasticity and durability of VPF. In addition, a large number of aromatic structures led to the increase of the hard segments in the foam [39]. According to Thring et al. [43] at higher unmodified lignin (30 wt % or above), hard and brittle foams were obtained with decreased compression strength. Regarding the VPF produced without KL and MPEG (P7), compression set values decreased in comparison to the control foam value (P1). The use of KL increases the thickness of the cells, observed by the reduction of cell size, and the reaction between hard and flexible segments. The compressive properties of PU foams depend considerably on their densities, crosslinking density and cellular structure morphology. According to Hayati et al. [19], enhanced miscibility of lignin in polyol would lead to a greater cross-link density and improved the compressive strength (by 4%) of the foams compared to the control without lignin. These results are comparable with resilience, tear strength and density results (Fig 6a,b), which showed that the increases are due to the increase in crosslink density of polyurethanes.

The resilience of VPF samples with different contents of KL/MPEG/PKO mixtures increased significantly with the increasing contents of KL (F2-F4) and PKO (F5-F7) in comparison to the control (P1) (Fig 6a). The resilience values increased from 3.0 to 28% with increasing content of KL/PKO mixture. The resiliency in both samples increase with increasing apparent density. For P4 sample, the resilience was higher than that for P1 and relevant differences, regardless of the content of PKO were observed on the resilience values for P4 and P6. Increasing content of PKO from 5 pphp to 15 pphp, decreased the resilience. In addition, more resilient foams recovered in less time [13], which for VE foam applications is considered satisfactory. The resilience is extremely important in the case of VPF for some industrial applications due to its longer delay in strain response after having undergone a stress stimulus. According to Pawlik and Prociak [25], the resilience of modified foams increased with increasing content of palm oil polyol due to the higher closed cell content in the foam. However, the resilience and final height were affected by the morphology of the foams and thickness of the cells, specifically by the ratio between soft and hard segments.

Fig. 6b shows the tear strength value of VPF samples with different contents of KL/MPEG/PKO mixture. The results showed that replacing the petroleum-based polyol (MPEG) with the KL/PKO mixtures increased the tear strength. In the case of P7 sample, a greater tear resistance was obtained (~277 N/mm) compared to the control sample (P1, ~38 N/mm). High tear strength (Fig 6b) and low compression set values (Fig 6a) are a

good indicator of higher elasticity and durability of VPF samples. The results in Fig. 6b indicate that the tear strength is dependent on the amount of KL/PKO mixture, KL content and density of VPF. Density plays a significant role in the mechanical properties of VPF samples. Increasing the density results in higher resilience and elongation at rupture as well as greater tear strength. The tear strength of P4 and P6 samples with KL/PKO (3.9 pphp of KL) are on average 35% greater than their VPF sample (P1 reference). This behavior may be attributed to the presence of smaller cells that increase apparent density when KL was used, resulting in a lower free volume. Thus, density and tear strength have similar behavior, except for P7 sample obtained without MPEG and KL.

The recovery time behavior curves of PU foams indicate that the recovery time could be dependent on the amount of KL/MPEG/PKO mixture, PPG diol content and morphology of the cells. The reduction of PPG diol (foam P6) and the introduction of 3.9 pphp of KL, decreased the final height of the foam P6 and no recovery was observed for foam P4, in comparison to the control foam (P1) (Fig 7). The recovery time and final height of the foams P2, P3 and P7 showed no relevant differences regardless of the contents of KL, MPEG and PKO used in comparison to the reference (P1). However, the resilience and final height were affected by the morphology of foam, cross-link reaction, KL content and thickness of the cells, specifically by the ratio between soft and hard segments [11,25,28]. The results from the foam obtained through P6 presented lower final height (Fig 7) and higher Tg (Fig 8b) and this may be related to the greater density and KL content, revealing a certain morphological instability of P6. To the sample P4, also with 3.9 pphp of KL, no recovery time was obtained and can be explained by the high shrinkage values (Table 2). The samples P4 and P6 produced with 3.9 pphp of KL display higher shrinkage, approximately 4.0 and 3.5 times more in shrinkage values, when compared to P1 foam. These results showed a direct relationship between the recovery time and the shrinkage values of the foams.

4.3.2. DYNAMIC MECHANICAL ANALYSIS (DMA)

DMA has been used as a sensitive technique to measure the glass transition temperature (Tg) and storage modulus of the VPFs containing different amounts of KL/MPEG/PKO mixtures (Fig. 8a,b). The storage and loss modulus were measured as a function of increasing temperature, and the Tg was determined. In the case of VPF obtained without KL and PKO (P1) the Tg was lower than the VPF samples with KL/PKO mixtures. It is clearly that the increase of PKO in VPF formulation gives more regular cell structure. The Tg of the foams obtained with KL/PKO mixture increased from ~17 (P1) to 40°C (P6) with increasing content of PKO. The storage modulus and tan δ curves are dependent on the contents of KL and PKO in the PU formulation and on the distribution of hard and soft segments. Favorable effects of the PKO were also observed in the Tg of VPF samples, especially for P4 and P6 samples (Fig.8b). The presence of PKO acts as an additional surfactant [25] and dispersing agent for KL in the PU formulation [28]. The ratio of soft and hard segments, their distribution and separation in the PU matrix significantly affects viscoelastic properties of VPF and the tan δ values. According to Haridevan et al. [20] slight increase in Tg was observed with incorporation of KL. The differences in degree of dispersity of KL and cell size have affected the cross-link reaction with MDI as observed by the Tg values. Increasing hard segment content result in foams more viscous with increasing hard segment contents [44]. In the case of foams obtained without KL and MPEG (P7), the Tg increased from ~17°C (reference) to 38°C. Therefore, replacing MPEG 550 with

PKO affects not only the T_g , but also the hard and soft segment domains in the polymer matrix as well as the viscoelastic properties of the foams. Ahvazi et al. [23] described that the isocyanate functional group would act as a cross-linking, connecting the KL and polyol. In fact, the efficiency of the MPEG acting as a plasticizer can be evaluated by its impact on the T_g of the foams. Yoshida et al. [40] described that the low NCO/OH ratio and lignin content < 20 wt% usually resulted in the PU foam being rather soft and flexible, while hard and tough PU foams were often obtained at a rather high lignin content or high NCO/OH ratio. However, the replacement of the MPEG with KL and PKO mixtures in VPF formulations increased the T_g value from 17 °C (P1) to 40 °C (P4). It is possible to observe, by the DMA analysis (Fig. 8b), that the T_g of the samples are greater dependent of the PKO content in the formulation.

4.3.3. TGA AND FLAMMABILITY ANALYSIS

The thermal degradation behavior and flammability of VPFs with different contents of KL/MPEG/PKO are shown in Fig 9a,b. TGA analysis were performed under nitrogen atmosphere and the data from the thermal curves appear in Table 3. The thermal stability of the produced foams showed no relevant differences regardless of the contents of KL/MPEG/PKO used in comparison to the reference (P1). Decomposition of the foams was observed in two main steps over a broad temperature range of 230 - 700 °C (Fig 9a,b). The temperatures were defined as $T_{d\text{onset}}$, $T_{d\text{endset}}$ and T_{max} (temperature corresponding to the highest weight loss). Significant decomposition of VPF samples occurred between 220-450 °C. The $T_{d\text{onset}}$ was observed between 220-250 °C, which was probably due to the decomposition of low small molar mass species, urethane bonds [20,25,41,42]. At ≈ 420 °C, decomposition can be considered as being completed and this event corresponds to the major weight loss when compared to the other events (T_{max}). This step is associated with thermal degradation of the soft segments, urethane linkages, polyols and KL [41,42]. As reported in the literature, the three degradation steps of the PU foam are related to the presence of soft and hard segments, internal crosslinking, physical properties and also foam structure [25]. A similar behavior was observed by Pawlik and Prociak [25] for PU foam produced with palm-oil based polyol. After 430 °C slow weight loss was observed, and is related to other remaining structures formed, such as diisocyanate, internal

crosslinking and lignin aromatic rings [41]. The thermal stability of PU generally increases with the increasing intermolecular attraction forces, rigidity of the structure, cross-linking density and presence of thermostable linkages. According to Bernardini et al. [42], the degradation of KL occurs in two phases, at 285 °C and 410 °C, therefore, as the study mentioned, since the lignin content in the different formulations is less than 10 wt% by weight, its loss of mass cannot be easily distinguished in the TGA trends. Septevani et al. [45] related that the thermal properties and dimensional stability of PU foam produced by substituting petroleum-polyether polyols with PKO-based polyester polyol were only comparable to the control PU foam produced with petroleum-polyether polyols at a loading of up to 20 wt% in the polyol mixture.

The residual mass at 800 °C for the foams was similar and between 8.0 to 10.5% (Table 3). Therefore, the addition of KL/PKO mixture did not significantly affect the thermal degradation behavior and stability of PU foams. The residual mass of the produced foams showed no relevant differences regardless of the contents of KL/MPEG/PKO used in

comparison to the control (P1). On the other hand, the flammability decreased with addition of the KL and PKO. According to Haridevan et al. [20] reported an increase of thermal stability, residual mass and flame retardance performance with an increase of KL content.

The flammability behavior of the obtained VPFs were evaluated by means of horizontal burning tests. For further comparison of the burning behavior of VPFs, the burning rates were calculated and presented in the Fig. 9b. The burning time of produced foams reduced with the replacing content of MPEG and with the decreasing addition of the KL. The control sample (P1) exhibits inferior result with average burning rate of 1.4 mm/s as compared to the sample P5. The studies showed that the addition of KL and PKO did not improve significantly the burning rate of foam samples compared to the control foam without KL and PKO. PU foams showed burning behavior strongly linked with foam densities and KL/PKO contents. The residual mass presented in Table 3 of the samples is a substantial parameter for evaluating the degree of combustion under nitrogen atmosphere. However, based on residual mass and flammability results, one can suggest that there are no relevant differences regardless of the contents of KL/PKO used in comparison to the control (P1). Finally, in terms of fire resistance, the standard formulation used in this work must be adjusted with the addition of fire retardants to meet various standards used in the industry.

Table 3. TGA data obtained from the thermal curves.

<i>Properties</i>	<i>VPFs</i>				
	<i>P1</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>	<i>P7</i>
$T_{d_{onset}}$ (°C)	250	239	220	244	250
$T_{d_{max}}$ (°C)	414	417	412	418	422
T_{endset} (°C)	520	534	512	518	545
Residual mass (%)	9.0	10.4	10.5	8.0	8.70

The maximum decomposition temperature (T_{max}) was obtained from the peaks in DTG curves.

5. CONCLUSIONS

In this work, the effect of the different contents of the KL/MPEG/PKO mixture for replacement of petroleum-based polyol on the foaming and final properties of VPF foams was successfully evaluated. It is possible to produce VPFs by replacing petroleum-based polyol (MPEG 550). KL lignin was dispersed into a MPEG/PKO mixture by simple physical mixing at 75 and 90°C for 4.5 h. The viscosity of the KL dispersions decreased with the addition of PKO. The dispersion of KL in a MPEG/PKO mixtures at 90°C increased from 91 wt% to 98 wt% with increasing content of PKO. The standard formulation used in this work must be adjusted up to a certain KL concentration in order to obtain VE-PU foams with properties similar to those of the control foam sample. The use of KL affects foam mixture processability and final properties of VE-PU foams (ie. growth profile, density, reaction

temperature, cell morphology and shrinkage). The reduction of maximum reaction temperature in the synthesis of VE-PU foams, led to densification and a higher degree of shrinkage, especially for foams obtained with 3.9 pphp of KL. The recovery time and final height of the foams P2, P3 and P7 showed no relevant differences regardless of the contents of KL, MPEG and PKO. Replacing the MPEG with the KL/PKO mixtures increased the tear strength and decreased the compression set (50% for 22 h at 70°C). VPF samples with KL/PKO mixture exhibited a 35% increase in tear strength and 6.5 times less in compression set values than the reference (P1). Thermal properties of VE-PU foams showed no relevant differences regardless of the contents of KL and PKO used. The results indicated that the highest affinity between polyols polyether and KL did not necessarily result in obtaining the most homogeneous VPFs. The T_g and resilience of the foams obtained increased with increasing content of KL/PKO mixture. In addition, the results obtained in this work created new approaches for the production of VPFs and should allow these materials to have a wide range of applications, as well as in packaging and in mattresses. Further studies involving the mixture of KL/PKO to replace polyol polyether are in progress and could attract high interest for industrial applications.

6. DECLARATIONS

6.1. ACKNOWLEDGEMENTS AND FUNDING

The authors gratefully acknowledge the financial support of the São Paulo Research Foundation (FAPESP, Brazil, grant 2018/12469-7), National Council for Scientific and Technological Development (CNPq, Brazil, grant 314898/2018-2). We also thank The Dow Company Brazil for technical support and for the reagents used in this work.

6.2. CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the present study.

6.3. SAMPLE CREDIT AUTHOR STATEMENTS

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, investigation, data collection and analysis were performed by Camila Campos Flôres, Lara Robert Nahra, Isabelle C.Z. Rodrigues, Thiago C Rufno and Mauricio Pinheiro Oliveira. The first draft of the manuscript was written by Camila Campos Flôres, Maurício Pinheiro Oliveira and all authors commented on previous versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

6.4. AVAILABILITY OF DATA AND MATERIAL

The datasets generated during and/or analyzed during this study are available from the corresponding author on reasonable request.

REFERENCES

- [1] Duval A, Lawoko M *React Funct Polym* (2014) 85:78-96.
- [2] Gandini AL, Lacerda TM (2014) *Prog Polym Sci* 48:1-39.
- [3] Messmer NR, Guerrini LM, Oliveira MP (2018) *Polym Adv Techn* 29:1094-1106.
- [4] Zhang Q, Zhang G, Xu J, Gao C, Wu Y (2015) *Rev Adv Mater Sci* 40:146-154.
- [5] Crestini C, Crucianelli M, Orlandi M, Saladino R (2010) *Catalysis Today* 156:8-22
- [6] Tomani P, Axegard P, Berglin N, Lovell A, Nordgre D (2011) *Cellul Chem Techn* 45:533-540
- [7] Kienberger M, Maitz S, Pichler T, Demmelmayr P (2021) *Processes* 9:804. <https://doi.org/10.3390/pr9050804>
- [8] Garlapati VK, Chandel, AK, Kumar SPJ, Sharma S, Sevda S, Ingle AP, Pant D (2020) *Renewable Sustainable Energy Rev.* 130, 109977.
- [9] Phanopoulos C, Pans G, Teboul M, Lima Garcia J (2017) Incorporation of lignin in polyurethane products. *EP 3 365 382 B1*.
- [10] Alinejad M, Henry C, Nikafshar S, Gondaliya A, Bagheri S, Chen N, Singh SK, Hodge DB, Nejad M *Polymers* (2019) 11:1202. <https://doi:10.3390/polym11071202>
- [11] Yang L, Wang X, Cui Y, Tian Y, Chen H, Wang Z (2014). *Polym Adv Techn* 25, 1089- 1098. <https://doi:10.1002/pat.3356>
- [12] Cassales A, Ramos LA, Frollini E (2020) *Int J Biol Macromol* 145:28-41.
- [13] Cinelli P, Anguilesi I, Lazzeri A (2013) *Eur Polym J* 49:1174-1184
- [14] Ma X, Chen J, Zhu J, Yan N (2021) *Macromol Rapid Commun* 42:2000492.
- [15] Lang JM, Shrestha UM, Dadmun M (2018) The Effect of Plant Source on the Properties of Lignin-Based Polyurethanes. *Front Energy Res.* <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00004>
- [16] Li HQ, Shao Q, Luo H, Xu J (2016) *J Appl Polym Sci* 133
- [17] Badri KH, Ahmad SH, Zakaria S (2001) *J Appl Polym Sci* 81:384-389
- [18] Lat DC, Bagus I, Jais IBM, Mohammed K, Baharom B, Samat N, Zainuddin AN (2016) *Mal J Fund Appl Sci* 12:126-129
- [19] Hayati AN, Evans DAC, Laycock B, Martin DJ, Annamalai PK (2018) *Ind. Crops Prod.* 117, 149-158.
- [20] Haridevan H, McLaggan MS, Evans DAC, Martin DJ, Seaby T, Zhang Z, Annamalai PK (2021) *ACS Appl Polym Mater* 3:3528-3537
- [21] Paberza A, Cabulis U, Arshanitsa A (2014) *Polimery* 59:477-481. <https://doi:10.14314/polimery.2014.477>
- [22] Shaari NZK, Lye OT, Ahmad S (2004) *J Oil Palm Res* 16:66-71
- [23] Ahvazi B, Wojciechowicz O, Xu P, Ngo TD, Hawari J *BioResources* (2017) 12:6629-6655.
- [24] Septevani AA, Evans DAC, Chaleat C, Martin DJ, Annamalai PK (2015) *Ind Crops Prod* 66:16-26
- [25] Pawlik H, Prociak A (2012) *J Polym Environ* 20:438-445
- [26] Jaratrotkamjorn R, Tanrattanakul V (2020) *J Appl Polym Sci* Bio-based flexible polyurethane foam synthesized from palm oil and natural rubber. <https://doi.org/10.1002/app.49310>
- [27] Sonnenschein MF (2015) *Polyurethane Science, Technology, Markets and Trends* John. Wiley & Sons, New York
- [28] Flôres CC, Rufno TC, Oliveira MP (2021) *J Polym Res* 28:481. <https://doi.org/10.1007/s10965-021-02827-0>
- [29] Nahra LR, Cerqueira MR, Oliveira MP, Guerrini LM (2020) *J Polym Res* 27:1-14
- [30] American Society for Testing and Materials - ASTM D-2849-69 (1980) *Methods of Testing Urethane Foam Polyol Raw Materials*. 913-931, Philadelphia, PA.

- [31] Brazilian Association of Technical Standard test method - ABNT NBR-8537, (2003) Flexible polyurethane foam - Density determination, Rio de Janeiro
- [32] Brazilian Association of Technical Standard test method - ABNT NBR 9429 (2016) Flexible polyurethane foam - Dimensions determination, Rio de Janeiro
- [33] Raimbault C, Laure P, François G, Boyer S, Vincent M, Choquart F, Agassant J (2021) Polym Eng Sci 61:1243-1256
- [34] Standard for Safety of Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances - UL-94, version 6, march 28, (2013)
- [35] Brazilian Association of Technical Standard test method - ABNT NBR-8797 (2003) Flexible polyurethane foam - Determination of compression set, Rio de Janeiro
- [36] Brazilian Association of Technical Standard test method - ABNT NBR-8619 (2003), Flexible polyurethane foam - Determination of Resilience, Rio de Janeiro
- [37] Brazilian Association of Technical Standard test method - ABNT NBR-8516 DE (2015), Flexible polyurethane foam - Determination of tear strength, Rio de Janeiro
- [38] Pan X, Saddler JN (2013) Biotechnol Biofuels 6:12
- [39] Wang S, Liu W, Yang D, Qiu X (2019) Ind Eng Chem Res 58:496-504
- [40] Yoshida H, Mörck R, Kringstad KP, Hatakeyama H (1987) J Appl Polym Sci 34:1187-1198
- [41] Luo S, Gao L, Guo W (2020) J Wood Sci. 66: 23. <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01872-5>
- [42] Bernardini J, Cinelli P, Anguillesi I, Coltelli MB, Lazzeri A (2015) Eur Polym J 64:147-156
- [43] Thring RW, Vanderlaan MN, Griffln SL (1997) Biomass and Bioenergy 13:125-132
- [44] Jeong H, Park J, Kim S, Lee J, Ahn N (2013) Fibers Polym 14:1301-131
- [45] Septevani AA, Evans DAC, Chaleat C, Martin DJ, Annamalai PK (2015) Ind. Crops Prod 66:16-26
- [46]

FIGURES

Figure 1

Dispersion of KL in the MPEG at different ratios of KL/MPEG (10:90, 20:80 and 30:70 w/w) as a function of dispersion time (a,b) and KL content in MPEG (c).

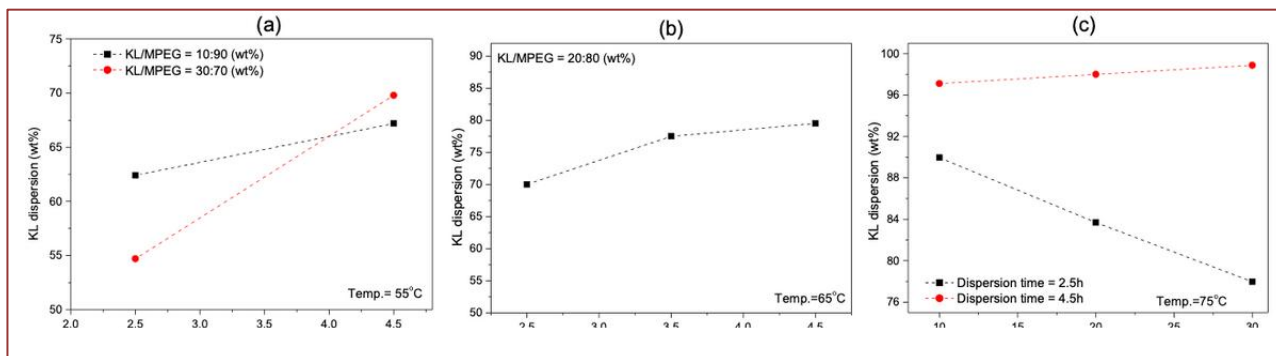


Figure 2

Optical microscopy images of KL/MPEG dispersion with 30:70 w/w ratio of KL/MPEG and dispersion time of 3.5 h at 75 °C. (a,c,d) without and (b) with polarized-light.

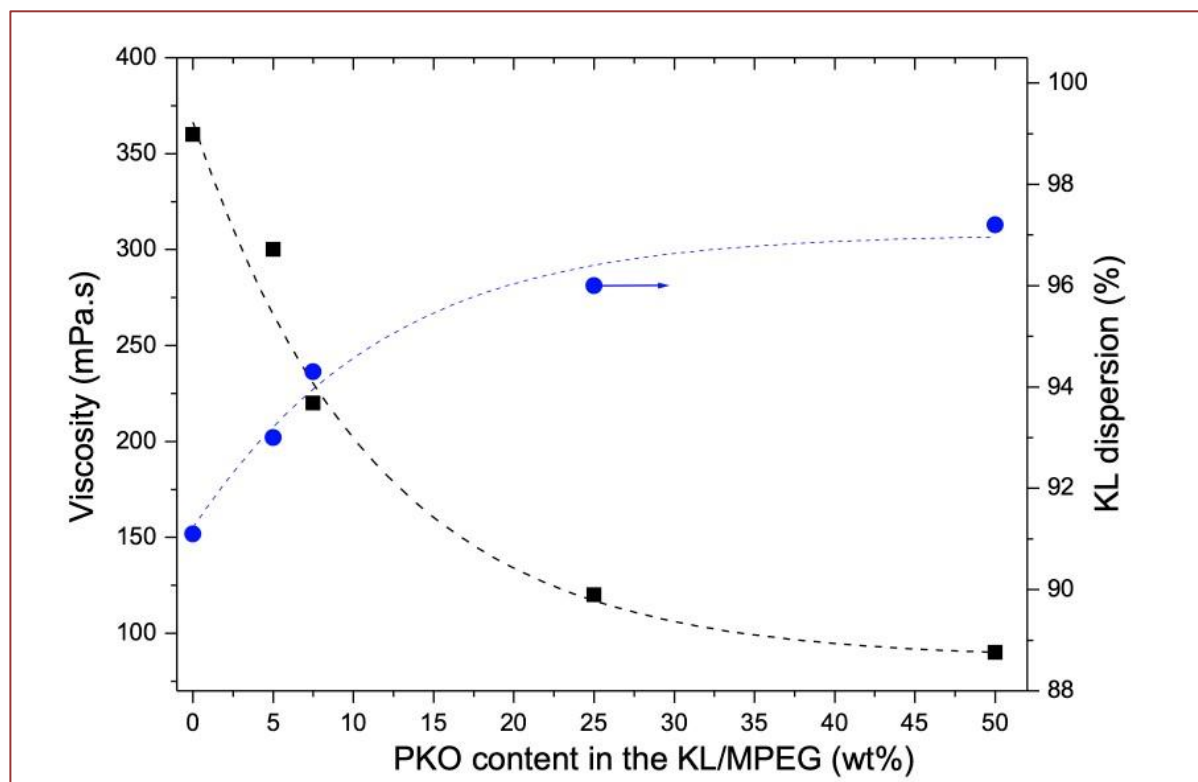


Figure 3

Viscosity and dispersion degree of KL in KL/MPEG with different contents of PKO measured at 40 °C. (KL/PEG = 30:70 w/w, dispersion temperature = 90°C and time = 3.5h)

Figure 4

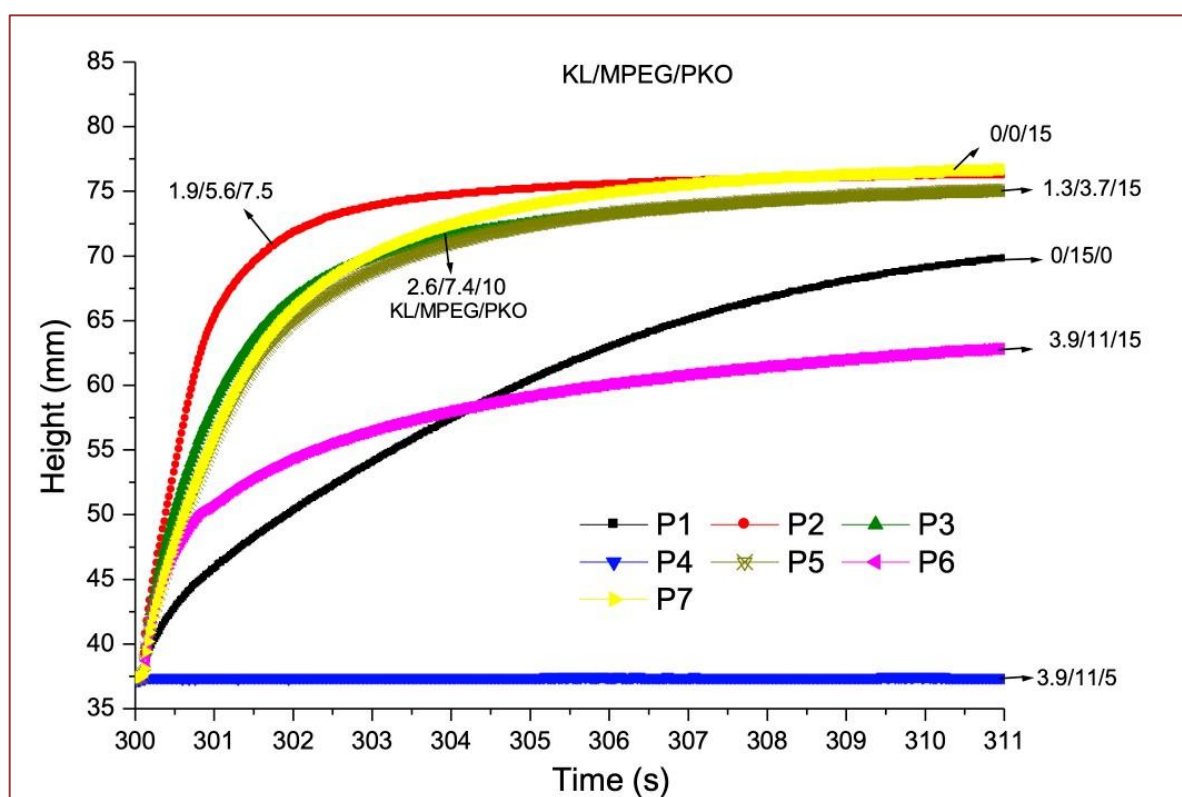
Photographs (a), and SEM images (b), of VPFs with different KL/MPEG/PKO contents. (P1) 0/15/0 pphp, (P2) 1.9/5.6/7.5 pphp and (P3) 2.6/7.4/10 pphp.

Figure 5

Photographs(a),andSEMimages(b),ofVPFswithdifferentKL/MPEG/PKOcontents. (P4) 3.9/11.1/5 pphp, (P5) 1.3/3.7/15 pphp, (P6) 3.9/11.1/15pphp and (P7) 0/15 pphp.

Figure 6

Compression set at 50%, resilience, tear strength and density of VPF samples with different contents of KL/MPEG/PKO and PKO mixture. (a) compression set and resilience; (b) tear strength and density.

**Figure 7**

Recovery time of VPF samples with different contents of KL/MPEG/PKO. DMA analyses of VPFs with KL/MPEG/PKO mixtures (P1-P7). (a) storage modulus and (b) tan delta.

Figure 9

TGA curves (a) and flame retardance (b) of VPFs produced with different contents of KL/MPEG/PKO.

SUPPLEMENTARY FILES

[SupplementaryInformation.doc](#)

[x GraphicalAbstract.png](#)

Autores

ALINE MARA OLIVEIRA (ORGANIZADORA)

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2012). Pós Graduada em Gestão de Projetos (FGV 2014-5015). Ministrou aulas no Centro Universitário do Planalto de Araxá(2015-2016) e no CEFET-MG nos cursos de graduação e técnicos. Tem experiência na área de Automação Industrial, Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, proteção de sistemas elétricos, IEC-61850, automação, instrumentação, sistemas de controle, equacionamento de controladores, sistemas multivariáveis e teoria de controle. Trabalhou na indústria no setor de projetos industriais no período de 2007 a 2015. Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia. (2017-2019). Atualmente doutoranda no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.(2019-2023)

OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

ALAN MARQUES DA ROCHA

Atualmente é doutorando na área de sinais e sistemas com linha de pesquisa em processamento de sinais e imagens pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Teleinformática do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará (PPGETI/UFC). Possui mestrado na linha de pesquisa de algoritmos e computação distribuída em Engenharia Elétrica e Computação (PPGEEC/UFC, 2024), MBA em Data Science e Analytics pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (USP/ESALQ, 2024), Pós-graduação em Inteligência Artificial e Machine Learning pela (UNOPAR, 2023) e bacharelado em Engenharia Elétrica com ênfase em computação (UFC, 2021). cursou o ensino médio integrado em Telecomunicações no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE, 2012). Tem interesse nas seguintes áreas: Aprendizado de máquina, aprendizado profundo, reconhecimento de padrões e visão computacional.

ÂNOAR ABBAS EL AOUAR

Possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (1998), mestrado em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas (2001) e doutorado em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas (2005). Tem experiência na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos, com ênfase em Conservação de Alimentos, atuando principalmente nos seguintes temas: Operações Unitárias (secagem convencional e solar, trituração, moagem, classificação granulométrica, desidratação e impregnação osmótica) para o beneficiamento de produtos de origem vegetal, especialmente aqueles oriundos de resíduos e perdas durante a cadeia produtiva.

ANTONIA ALANA CLAUDINO SOUSA

Possui pós-graduação Lato Sensu em Ensino de Ciências da Natureza e Matemática pelo Instituto Federal do Ceará, Ensino de Matemática pela Faculdade Ibra de Brasília (FABRAS/2022) e graduação em Licenciatura em Matemática pelo Instituto Federal do Ceará - Campus Crateús (IFCE/2021). Atuou como professora no município de Crateús - CE, na Escola de Cidadania de Santana, entre os anos de 2021 e 2023. Atualmente é Servidora Pública Municipal na cidade de Sobral (desde 2024). Em suas pesquisas e publicações as áreas de interesse incluem currículo escolar e teoria musical.

CAMILA CAMPOS FLÔRES

Federal University of Sao Paulo: Universidade Federal de Sao Paulo

DIÊGO RODRIGUES DE RESENDE

Possui graduação em Engenharia Mecatrônica pela Universidade Federal de São João del-Rei (2016), tendo realizado intercâmbio acadêmico na Universidade Técnica de Dresden, Alemanha (2014–2015). Atualmente é consultor na Accenture do Brasil, atuando como Especialista em Sistemas PIMS aplicados ao setor de mineração, com foco em análise de falhas e otimização de desempenho.

FABIANA KARLA DE OLIVEIRA MARTINS VARELLA

Possui graduação em Engenharia Civil - UnP (2001), mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos - UNICAMP (2004) e doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos - UNICAMP (2009). Atualmente é Professor Titular do Curso de Engenharia Elétrica da UFERSA. Tem experiência na área de Energias Alternativas Renováveis e Planejamento de Sistemas Energéticos, atuando principalmente com geração FV distribuída, energia solar térmica, energia solar fotovoltaica, energias alternativas, regulação e eficiência energética.

IGOR PACÍFICO XAVIER DA SILVA

Discente do curso engenharia elétrica da UFERSA.

ISABELLE ZAVECZ RODRIGUES

Federal University of Sao Paulo: Universidade Federal de Sao Paulo

JOSÉ EVANGELISTA SANTOS RIBEIRO

Engenheiro de Alimentos pela Universidade Federal da Paraíba (2011). Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos (UFPB - 2014) e Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos (UFPB - 2018), com período sanduíche na Università di Pisa, Itália (2014-2015). Atuou por oito anos (2016-2024) como Técnico de Laboratório na área de alimentos e laticínios no Laboratório de Cromatografia e Espectrometria (LaCE/UFPB), na Universidade Federal da Paraíba. Tem experiência em pesquisas nas áreas de Ciência, Engenharia e Tecnologia de Alimentos e de Biotecnologia, com ênfase em: ciência e tecnologia de laticínios e bioprocessos para obtenção de moléculas bioativas a partir de microrganismos. Tem ampla experiência com métodos analíticos convencionais e instrumentais para a análise de alimentos, com ênfase em: cromatografia líquida, cromatografia gasosa, espectrofotometria, espectrometria de absorção atômica e reologia. Atualmente, é Professor Adjunto do quadro de efetivo da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA), Centro de Tecnologia (CT).

JOSELMA ARAÚJO DE AMORIM

Possui graduação em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal da Paraíba (2005), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2007) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (2012). Atualmente sou Professora Adjunta no Departamento de Engenharia Alimentos da UFPB, Campus I, ministrando disciplinas na área de transferência de calor e massa. Tenho experiência na área de Transferência de Calor e massa, atuando principalmente nos seguintes temas: Desumidificação por adsorção, secagem de alimentos, refrigeração, bomba de calor, análise térmica (TG, DSC e DTA) aplicada a alimentos, modelagem matemática e simulação numérica computacional, utilizando o método dos volumes finitos.

JÚLIA GIMENEZ IERVOLINO

Universidade SENAI CIMATEC

LARA CARLA FREITAS RODRIGUES

Discente do curso engenharia elétrica da UFERSA.

LEONARDO CARNEIRO ARAÚJO

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2003), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2007) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2013). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal de São João Del-Rei. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Processamento de Sinais, atuando principalmente nos seguintes temas: linguística quantitativa, processamento de sinais, teoria da informação, reconhecimento de padrões, reconhecimento de fala e inteligência artificial.

LUIZA VASCONCELOS SANTOS

Graduanda em Engenharia Química pelo Centro Universitário SENAI CIMATEC, com experiência nas áreas de segurança de processos, monitoramento ambiental e processos industriais. Atualmente estagiando na AP Consultoria e Projetos, atuando com análise de riscos e suporte técnico em segurança de processos. Experiência anterior como bolsista de Iniciação Científica pelo CNPq, com foco em desenvolvimento de biomateriais utilizando impressão 3D. Atuei também em monitoria acadêmica e participou ativamente do Capítulo Estudantil AIChE, exercendo funções de liderança, comunicação e organização de projetos. Possui conhecimentos em Power BI, Excel, Adobe Illustrator e fluência em inglês. Perfil proativo, comunicativo e orientado a resultados.

MARIA HELOISA MEDEIROS DE SOUZA

Formada em engenharia elétrica pela Universidade Federal Rural do Semi-árido.

MÁRIO CUPERTINO DA SILVA JÚNIOR

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2004), mestrado e doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2006 e 2010), com estágio de doutoramento na Universidade de Valladolid, em Valladolid, Espanha (2008-2009). Atualmente, está se especializando em Energias Renováveis pela UFMG e é professor Associado na Universidade Federal de Sergipe. Tem experiência e interesse em Automação de Processos e Energias, atuando principalmente nos seguintes temas: Automação Agrícola, Energias Renováveis e Processamento Digital de Imagens.

MAURÍCIO PINHEIRO OLIVEIRA

Federal University of Sao Paulo: Universidade Federal de Sao Paulo

PAULO DANTON FÉLIX DA COSTA

Discente do curso engenharia elétrica da UFERSA.

PEDRO VICTOR DE SOUSA ALBUQUERQUE

Discente do curso engenharia elétrica da UFERSA.

PIERRE CORRÊA MARTINS

Possui graduação em Engenharia de Alimentos pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande (1998), mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande (2002) e doutorado em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas (2006). Tem experiência em docência na área de Engenharia de Processos, com ênfase em Engenharia de Alimentos. Atua como Professor Titular na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), lotado no Departamento de Engenharia de Alimentos do Centro de Tecnologia.

RONALDO COSTA SANTOS

Químico Bacharel, Mestre em Físico-Química, Doutor em Engenharia Química e Pos Doc em Engenharia Química pela Universidade Federal da Bahia. Junto a Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO) foi coordenador executivo no Projeto de Reforma do Ensino Médio na Bahia. Na Universidade de Tecnologia e Ciências (Rede UNIFTC), como Diretor de Pós-Graduação e Inovação, desenvolveu e coordenou cursos de Graduação e Pós-Graduação nas modalidades presencial, semi-presencial e ensino a distância (EaD). Como docente, lecionou disciplinas na área de Termodinâmica, Físico-Química e Inorgânica. Membro conselheiro do Conselho Regional de Química CRQVII, seção Bahia. Na pesquisa, vem desenvolvendo projetos na área de catálise heterogênea, com ênfase em petróleo, petroquímica, transformação de biomassa e meio ambiente, atuando principalmente nos seguintes temas: reações, catalisadores, combustíveis, biocombustíveis, energia e ambiente

THIAGO C RUFINO

Federal University of Sao Paulo: Universidade Federal de Sao Paulo

WELLINGTON FERNANDES DO NASCIMENTO JÚNIOR

Tem experiência na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos, com ênfase em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Presidente Executivo na ENGAJA (Engenharia de Alimentos Júnior Assessoria da UFPB).

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson



<https://www.facebook.com/editorapoisson>

