

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA NA SECAGEM POR SPRAY DRYER DE LEITE DE COCO EM PÓ: UMA ABORDAGEM BASEADA EM FENÔMENOS DE TRANSPORTE PARA PRODUÇÃO INDUSTRIAL ECONOMICAMENTE VIÁVEL

ENERGY OPTIMIZATION IN SPRAY DRYING OF COCONUT MILK POWDER: A TRANSPORT PHENOMENA APPROACH FOR COST-EFFECTIVE INDUSTRIAL PRODUCTION

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA EN EL SECADO POR ATOMIZACIÓN DEL POLVO DE LECHE DE COCO: UN ENFOQUE BASADO EN FENÓMENOS DE TRANSPORTE PARA UNA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL ECONÓMICAMENTE VIABLE

 10.56238/revgeov16n5-081

Gilberto Franco de Lima Júnior

Doutorando em Engenharia de Processos

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

E-mail: gilbertofranco@servidor.uepb.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-5913-4263>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8647440226159990>

Antonio Gilson Barbosa de Lima

Doutor em Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

E-mail: antonio.gilson@ufcg.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1691-1872>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4527387699298544>

Geórgia Carla de Vasconcelos Pina

Mestranda em Gestão e Sistemas Agroindustriais

Instituição: Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

E-mail: georgiapina123@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-0878-3795>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2231650070022413>

João Bosco de Souza

Doutorando em Ciências Contábeis e Administração

Instituição: Fucape Business School (FUCAPE)

E-mail: boscosouza@yahoo.com.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0336-8858>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5917975016850375>



João Gabriel Nascimento de Araújo

Doutorando em Ciências Contábeis e Administração
Instituição: Fucape Business School (FUCAPE)
E-mail: j_gabriel90@hotmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9509-9079>
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6794400072821925>

Oséias Guimarães Thomaz

Doutorando em Ciências Contábeis e Administração
Instituição: Fucape Business School (FUCAPE)
E-mail: othomaz@yahoo.com
Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-9143-8206>
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2545381514026017>

Oswaldo Soares da Silva

Doutor em Engenharia Química
Instituição: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
E-mail: osvaldo.soares@professor.ufcg.edu.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4608-0638>
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6441275307028933>

Radjalma Lucena Amorim Júnior

Doutorando em Ciências Contábeis e Administração
Instituição: Fucape Business School (FUCAPE)
E-mail: radjalma@pretorian.net.br
Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-9189-6983>
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9507285393122688>

RESUMO

A crescente demanda por produtos alimentícios em pó, aliada ao aumento dos custos energéticos, torna urgente a busca por processos industriais mais eficientes e sustentáveis. No caso do leite de coco, produto amplamente utilizado na indústria alimentícia, observa-se uma lacuna entre o potencial produtivo e a viabilidade econômica da secagem por spray dryer, especialmente em função do elevado consumo térmico. Objetiva-se, neste estudo, analisar estratégias de otimização energética baseadas em Fenômenos de Transporte, visando reduzir custos e ampliar a eficiência térmica do processo de secagem. Para tanto, procede-se à modelagem termoenergética e simulação paramétrica de diferentes cenários operacionais, considerando variáveis de entrada, saída, perdas térmicas e rendimento do processo. Desse modo, observa-se que a integração de recuperação de calor, isolamento térmico e controle operacional elevou a eficiência global de 45,2% para 67,8%, com redução no consumo específico de 5,30 para 3,48 kWh/kg, além de maior rendimento e menor deposição de partículas. O que permite concluir que intervenções relativamente simples podem gerar ganhos significativos de desempenho, contribuindo para a sustentabilidade técnica, econômica e ambiental do setor. Ademais, a metodologia apresenta elevado potencial de replicabilidade para outras matrizes alimentícias.

Palavras-chave: Secagem por Spray Dryer. Leite de Coco em Pó. Eficiência Energética. Fenômenos de Transporte. Otimização Operacional.



ABSTRACT

The growing demand for powdered food products, combined with rising energy costs, highlights the need for more efficient and sustainable industrial processes. In the case of coconut milk, a widely used ingredient in the food industry, there is a gap between production potential and the economic feasibility of spray drying, mainly due to high thermal energy consumption. This study aims to analyze energy optimization strategies based on Transport Phenomena to reduce costs and improve the thermal efficiency of the drying process. Thermo-energetic modeling and parametric simulations were performed to evaluate different operational scenarios, considering inlet and outlet variables, thermal losses, and process yield. The results show that integrating heat recovery, thermal insulation, and operational control increased overall efficiency from 45.2% to 67.8%, while reducing specific energy consumption from 5.30 to 3.48 kWh/kg, improving yield and reducing particle deposition. These findings indicate that relatively simple interventions can generate significant performance gains, contributing to the technical, economic, and environmental sustainability of the sector. Furthermore, the methodology developed demonstrates high potential for replication in other food matrices with similar physicochemical characteristics.

Keywords: Spray Drying. Coconut Milk Powder. Energy Efficiency. Transport Phenomena. Operational Optimization.

RESUMEN

La creciente demanda de productos alimenticios en polvo, junto con el aumento de los costos energéticos, evidencia la necesidad de procesos industriales más eficientes y sostenibles. En el caso de la leche de coco, un ingrediente ampliamente utilizado en la industria alimentaria, existe una brecha entre el potencial productivo y la viabilidad económica del secado por atomización, debido principalmente al elevado consumo de energía térmica. El objetivo de este estudio es analizar estrategias de optimización energética basadas en Fenómenos de Transporte, orientadas a reducir costos y aumentar la eficiencia térmica del proceso de secado. Para ello, se realizaron modelaciones termoenergéticas y simulaciones paramétricas de distintos escenarios operativos, considerando variables de entrada y salida, pérdidas térmicas y rendimiento del proceso. Los resultados muestran que la integración de recuperación de calor, aislamiento térmico y control operacional incrementó la eficiencia global del 45,2% al 67,8%, reduciendo el consumo específico de energía de 5,30 a 3,48 kWh/kg, mejorando el rendimiento y disminuyendo la deposición de partículas. Estos hallazgos indican que intervenciones relativamente simples pueden generar mejoras significativas en el desempeño, contribuyendo a la sostenibilidad técnica, económica y ambiental del sector. Además, la metodología presenta un alto potencial de replicabilidad en otras matrices alimenticias con características fisicoquímicas similares.

Palabras clave: Secado por Atomización. Leche de Coco en Polvo. Eficiencia Energética. Fenómenos de Transporte. Optimización Operacional.



1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por alimentos com maior estabilidade, praticidade e valor agregado tem impulsionado a adoção de tecnologias avançadas de conservação térmica, especialmente na transformação de matérias-primas vegetais em produtos com maior vida útil e melhor logística de distribuição. Nesse contexto, o leite de coco em pó destaca-se como um produto estratégico para os setores alimentício, cosmético e nutracêutico, por reunir propriedades funcionais relevantes e vantagens logísticas significativas em relação à forma líquida, como maior estabilidade físico-química e facilidade de armazenamento (ADSARE; ANNAPURE, 2021). Essas características são particularmente valorizadas em mercados internacionais que demandam produtos *plant-based* com maior qualidade e estabilidade, estimulando a inovação tecnológica e a ampliação da competitividade industrial (SAMBORSKA et al., 2024).

A secagem por atomização — ou *spray dryer* — é amplamente reconhecida como uma das técnicas mais eficazes para transformar emulsões líquidas em pós finos e estáveis, preservando características sensoriais e microbiológicas desejáveis. Além disso, trata-se de um método contínuo e de elevada reprodutibilidade, amplamente utilizado na indústria de alimentos para obtenção de produtos estáveis (RAZMI et al., 2021). Contudo, essa tecnologia apresenta um elevado consumo energético, especialmente na etapa de aquecimento do ar, podendo representar uma fração expressiva dos custos totais de produção, o que constitui um importante entrave econômico para sua expansão em escala (SUTAR; YADAV, 2023; MARTYNENKO; VIEIRA, 2023).

Adicionalmente, a secagem de emulsões lipídicas, como o leite de coco, apresenta desafios específicos decorrentes de seu elevado teor de gordura, que contribui para a formação de depósitos e pegajosidade nas paredes da câmara de secagem, reduzindo o rendimento e aumentando o desperdício de energia (SUNDARARAJAN et al., 2023). Tais limitações operacionais têm impacto direto na eficiência térmica e econômica do processo. Para enfrentá-las, o uso de carreadores e estratégias de controle operacional têm sido explorados na literatura, embora com aumento dos custos produtivos e complexidade de formulação (ADSARE; ANNAPURE, 2021; SAMBORSKA et al., 2024).

Nesse cenário, a aplicação dos princípios de Fenômenos de Transporte surge como uma alternativa robusta para compreender e otimizar as etapas críticas do processo de secagem. A análise detalhada dos mecanismos de transferência de quantidade de movimento, calor e massa, bem como dos fenômenos transientes, permite identificar pontos críticos de perda energética e propor soluções técnicas de maior eficiência (RAZMI et al., 2021). A literatura mais recente tem demonstrado que estratégias como recuperação de calor do ar de exaustão, isolamento térmico eficiente, controle do tamanho das gotas atomizadas e utilização de fontes renováveis de energia são capazes de reduzir significativamente o consumo térmico, ampliando a sustentabilidade e a viabilidade econômica da produção (SUTAR; YADAV, 2023; MARTYNENKO; VIEIRA, 2023).



Com base nesse contexto, define-se como problema de pesquisa: como reduzir o custo energético da produção industrial de leite de coco em pó por *spray dryer*, tornando-a técnica e economicamente viável? Assim, este trabalho tem como objetivo geral propor uma abordagem de otimização energética do processo de secagem por *spray dryer*, fundamentada nos princípios dos Fenômenos de Transporte. De forma específica, busca-se descrever os mecanismos físicos e energéticos envolvidos no processo, identificar os principais pontos críticos de consumo térmico e apresentar estratégias técnicas de otimização energética com potencial de aumentar a eficiência produtiva e reduzir custos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FENÔMENOS DE TRANSPORTE NO PROCESSO DE SECAGEM

A secagem por atomização (*spray drying*) é um processo governado por um acoplamento transiente entre os mecanismos de transferência de calor, massa e quantidade de movimento que ocorrem entre as gotas atomizadas e a corrente de ar aquecido. Após a atomização, a gota líquida sofre aquecimento convectivo, inicia a evaporação da água e, simultaneamente, ocorre a condução térmica e a difusão interna da umidade até atingir o equilíbrio entre as resistências internas e externas de transferência. Essa interação complexa é frequentemente descrita por modelos baseados nos princípios de conservação de energia, massa e momento, combinados a correlações adimensionais — como Reynolds, Nusselt e Sherwood — e, em aplicações avançadas, complementados por simulações CFD e modelos de população de gotas, que permitem capturar com maior precisão a evolução do tamanho das partículas, a cinética de evaporação e o comportamento do escoamento dentro da câmara (KAPIL et al., 2025; RAZMI et al., 2021).

Do ponto de vista termoenergético, há consenso na literatura de que a maior parcela do consumo energético está associada ao aquecimento do ar de secagem, sendo significativa também a parcela perdida por exaustão de ar quente, falhas de isolamento térmico e operação fora da janela ótima de temperatura e umidade. Pesquisas recentes têm adotado a chamada abordagem 4E — energia, exergia, economia e meio ambiente — para avaliar a eficiência energética de processos de secagem, ampliando a análise além do balanço térmico e incluindo impactos econômicos e ambientais (SUTAR; YADAV, 2023; DANTAS, 2024). Essa perspectiva sistêmica reforça a importância de considerar a transferência de energia não apenas do ponto de vista físico, mas também de sua viabilidade industrial.

Outro aspecto crucial está relacionado ao comportamento aerodinâmico e térmico das gotas, pois sua trajetória, distribuição de tamanho e interação com a corrente de ar influenciam diretamente o rendimento e a eficiência térmica. Um dos fenômenos mais recorrentes é a formação de depósitos nas paredes da câmara de secagem, que reduz o rendimento global, força paradas para limpeza e aumenta o consumo energético específico. Estudos indicam que essa deposição está fortemente



associada a gradientes térmicos e de umidade localizados, bem como a mudanças de estado vítreo dos sólidos durante a secagem (NIK ABD RAHMAN et al., 2024; SUNDARARAJAN et al., 2023). Isso evidencia a necessidade de um controle rigoroso das condições de escoamento e do padrão de atomização para minimizar zonas mortas e condições pegajosas.

A análise dos mecanismos de transferência também deve considerar o comportamento transiente das gotas. Quando a resistência externa — associada à convecção — domina, a secagem é controlada pelo fluxo de calor e massa entre a superfície da gota e o ar. Por outro lado, quando a resistência interna — relacionada à difusão e condução térmica — se torna relevante, a taxa de secagem é governada pelo transporte interno. O número de Biot surge como um parâmetro chave, permitindo avaliar a predominância de cada mecanismo e, assim, orientar decisões de projeto e operação (RAJ et al., 2024).

A literatura recente converge em alguns pontos essenciais: (i) a etapa de interação ar-gota constitui o gargalo termo-cinético do processo e determina a eficiência global; (ii) a arquitetura do escoamento na câmara, incluindo distribuição de velocidade e umidade, influencia diretamente a deposição e o rendimento; (iii) a recuperação de calor, direta ou indireta, é a estratégia mais promissora para reduzir consumo específico de energia; e (iv) os modelos híbridos, que combinam fundamentos físicos com dados empíricos ou técnicas de aprendizado de máquina, estão se consolidando como ferramentas mais robustas para predição em escala industrial (KAPIL et al., 2025; SUTAR; YADAV, 2023).

Apesar dos avanços, ainda existem lacunas significativas. Não há consenso sobre correlações universais aplicáveis a emulsões com alto teor lipídico, como o leite de coco, cuja reologia e transições vítreas alteram pontos críticos de pegajosidade e resistências internas de transferência. Além disso, faltam validações experimentais em escala industrial que conectem medições reais de campos de escoamento e deposição com balanços energéticos aplicados. Por fim, embora os estudos de recuperação de calor tenham avançado conceitualmente, ainda há carência de protocolos padronizados para quantificar ganhos reais em linhas de alimentos com formulações complexas e variáveis. Essas lacunas justificam a necessidade de pesquisas que unam fundamentos de Fenômenos de Transporte e otimização energética aplicada, como proposto neste estudo, com vistas a reduzir custos térmicos sem comprometer rendimento e qualidade do produto.

2.2 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DO LEITE DE COCO

O leite de coco é uma emulsão complexa composta predominantemente por água, lipídios, proteínas e carboidratos, com alta concentração de gorduras vegetais de cadeia média. Essa composição confere ao produto propriedades físico-químicas que impactam diretamente o seu comportamento térmico e reológico durante o processo de secagem por *spray dryer*. Diferentemente



de soluções aquosas simples, emulsões lipídicas apresentam comportamento mais instável sob altas temperaturas e baixa umidade, tendendo a apresentar fenômenos de pegajosidade e incrustação nas superfícies internas da câmara de secagem (ADSARE; ANNAPURE, 2021; NIK ABD RAHMAN et al., 2024).

O teor de gordura do leite de coco geralmente varia entre 17% e 25%, o que contribui para uma menor estabilidade térmica e maior tendência à coalescência de gotas e colapso estrutural durante a evaporação da água. Estudos recentes demonstram que o alto conteúdo lipídico eleva a temperatura de transição vítrea e reduz a capacidade de formação de partículas secas estáveis, aumentando a aderência nas paredes e diminuindo o rendimento do processo (SUNDARARAJAN et al., 2023; SOUZA et al., 2022). Esse comportamento é agravado em condições operacionais extremas, como temperaturas elevadas ou fluxos de ar heterogêneos, nos quais pequenas variações na distribuição de tamanho de gotas resultam em secagem desigual e deposição localizada.

Para mitigar essas limitações, é prática comum a utilização de carreadores — como maltodextrina, goma arábica ou leite desnatado em pó — com o objetivo de aumentar a estabilidade térmica da emulsão, reduzir a pegajosidade e facilitar a formação de partículas secas uniformes. A adição de carreadores altera as propriedades de superfície, promove encapsulamento parcial da gordura e desloca a temperatura de transição vítrea, tornando o sistema mais estável durante a secagem (SAMBORSKA et al., 2024; KABOOSI; SHEKARI, 2022). Entretanto, esse recurso envolve custos adicionais de matéria-prima e pode alterar propriedades sensoriais e nutricionais do produto final, exigindo um equilíbrio cuidadoso entre desempenho técnico e viabilidade econômica.

Do ponto de vista físico-químico, as gotículas de gordura no leite de coco são estabilizadas por proteínas e fosfolipídios naturais. Durante a secagem, ocorre ruptura parcial dessa camada protetora, facilitando a coalescência e influenciando diretamente a formação da morfologia final das partículas em pó. Trabalhos recentes mostram que a composição inicial da emulsão determina não apenas a estabilidade térmica, mas também características como tamanho médio das partículas, molhabilidade, solubilidade instantânea e densidade aparente do pó obtido (FERNANDES et al., 2023; CHEN et al., 2021). Em produtos *plant-based*, essas propriedades são particularmente críticas, pois afetam diretamente a reconstituição e a aceitação sensorial.

A literatura atual converge para alguns consensos importantes: (i) o alto teor de gordura do leite de coco constitui um desafio central à secagem por *spray dryer*; (ii) a presença de carreadores adequados reduz significativamente a pegajosidade e melhora o rendimento global do processo; (iii) a composição e a distribuição de tamanho das gotas determinam a eficiência de secagem e a morfologia final do pó; e (iv) ajustes finos na formulação e nos parâmetros operacionais são essenciais para garantir estabilidade térmica e qualidade do produto final (SAMBORSKA et al., 2024; NIK ABD RAHMAN et al., 2024; SUNDARARAJAN et al., 2023).



Apesar dos avanços, ainda persistem lacunas relevantes. Poucos estudos nacionais tratam especificamente da secagem de leite de coco, embora haja pesquisas correlatas com polpas tropicais e outras emulsões vegetais. Há também carência de investigações que explorem a interação entre diferentes tipos de carreadores e parâmetros operacionais em escala industrial, especialmente no que diz respeito à otimização de custos e manutenção das propriedades sensoriais originais do produto. Além disso, a maioria dos estudos concentra-se em condições controladas de laboratório, deixando espaço para validações em linhas produtivas reais, aspecto fundamental para ampliar a presença comercial do leite de coco em pó no mercado nacional e internacional.

2.3 CUSTO ENERGÉTICO DO *SPRAY DRYER*

A secagem por atomização, embora seja amplamente reconhecida por sua eficiência tecnológica e capacidade de produzir pós estáveis de alta qualidade, é também uma das operações térmicas com maior demanda energética na indústria de alimentos e ingredientes. O principal componente do custo operacional está associado ao aquecimento do ar de secagem, etapa que representa entre 50% e 70% do consumo total de energia térmica do processo (SUTAR; YADAV, 2023; DANTAS, 2024). Esse elevado consumo ocorre porque a tecnologia depende de fluxos contínuos de ar quente em grandes volumes, exigindo caldeiras ou aquecedores de alta capacidade e, conseqüentemente, custos consideráveis com combustíveis ou eletricidade.

Além da energia utilizada diretamente no aquecimento, há perdas substanciais por exaustão de ar ainda quente, radiação térmica pelas paredes da câmara e ineficiências no isolamento térmico (MARTYNENKO; VIEIRA, 2023). Essas perdas elevam o consumo específico por quilograma de pó produzido e reduzem a competitividade do processo em comparação com outras tecnologias de secagem. Em alguns cenários industriais, o custo energético chega a representar até metade do custo total de produção do produto final, tornando-se um gargalo econômico para empresas de pequeno e médio porte e um obstáculo à expansão de novos produtos *plant-based*, como o leite de coco em pó (RAZMI et al., 2021; ALVES et al., 2023).

Estudos recentes também têm destacado que o custo energético não deve ser analisado apenas sob a ótica do consumo direto, mas dentro de uma abordagem sistêmica 4E — energia, exergia, economia e meio ambiente — que considera não apenas os fluxos de energia e suas perdas, mas também os impactos econômicos e ambientais do processo (DANTAS, 2024). Essa abordagem tem mostrado que pequenas melhorias de eficiência térmica podem gerar reduções significativas de custo ao longo do ciclo produtivo e também contribuir para a redução das emissões de CO₂, tornando a operação mais sustentável.

Outro elemento de custo relevante está relacionado à eficiência operacional real. Em muitos casos, há uma discrepância significativa entre a eficiência teórica projetada do equipamento e os



resultados obtidos na prática, em razão de deposição de material nas paredes, tempo de inatividade para limpeza e operação fora da faixa ótima de temperatura e umidade (SUNDARARAJAN et al., 2023; NIK ABD RAHMAN et al., 2024). Esses fatores contribuem para elevar o consumo específico de energia por quilograma de pó efetivamente coletado, reduzindo a rentabilidade e aumentando o custo unitário de produção.

Nos últimos anos, pesquisas vêm apontando caminhos para reduzir os custos energéticos sem comprometer a qualidade do produto final. As principais estratégias técnicas incluem recuperação de calor do ar de exaustão, melhoria no isolamento térmico da câmara, otimização dos parâmetros operacionais (como temperatura de entrada e saída e fluxo de ar), além da utilização de fontes renováveis como biomassa, biogás e sistemas híbridos com energia solar (GOULA; KOURTIDOU, 2025; ARAÚJO et al., 2022). Estudos experimentais e de modelagem têm demonstrado que a combinação dessas estratégias pode reduzir significativamente o custo térmico e aumentar a eficiência energética global do processo.

A literatura recente apresenta consensos importantes sobre o tema: (i) o custo térmico é o principal componente de custo do processo de secagem por *spray dryer*; (ii) grande parte desse custo decorre de perdas evitáveis, especialmente na exaustão e no isolamento; (iii) estratégias de recuperação de energia são técnica e economicamente viáveis; e (iv) a integração de fontes renováveis contribui para reduzir custos e emissões. No entanto, ainda há lacunas relevantes relacionadas à viabilidade econômica em escala industrial, à integração de sistemas híbridos em plantas existentes e à padronização de indicadores de desempenho energético, sobretudo em produtos sensíveis como emulsões vegetais de alta gordura, como o leite de coco.

2.4 ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

A busca por estratégias de otimização energética em processos de secagem por atomização tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionada tanto por fatores econômicos quanto ambientais. O alto custo associado ao aquecimento de grandes volumes de ar, somado às perdas térmicas inerentes ao processo, torna o *spray dryer* uma das operações mais críticas do ponto de vista de eficiência energética. Nesse contexto, diferentes abordagens têm sido desenvolvidas para reduzir o consumo específico de energia, melhorar o desempenho térmico global e aumentar a competitividade industrial.

Uma das estratégias mais estudadas é a recuperação de calor do ar de exaustão, que consiste em reaproveitar parte da energia térmica contida no ar que sai da câmara de secagem para pré-aquecer o ar de entrada ou aquecer fluidos de processo. Essa solução apresenta elevado potencial de economia de energia, reduzindo significativamente a demanda térmica total sem comprometer a qualidade do produto (SUTAR; YADAV, 2023; GOULA; KOURTIDOU, 2025). A implementação de trocadores de calor eficientes, associada a sistemas de controle em malha fechada, permite otimizar o balanço



térmico e reduzir perdas por exaustão, uma das maiores fontes de desperdício energético do sistema.

Outra frente importante é a melhoria do isolamento térmico da câmara e dos dutos de ar, que minimiza perdas por radiação e convecção para o ambiente. Estudos recentes indicam que intervenções relativamente simples no isolamento podem resultar em ganhos de eficiência superiores a 10%, sobretudo em instalações industriais mais antigas (ALVES et al., 2023). Além disso, avanços em materiais isolantes com baixa condutividade térmica tem ampliado a durabilidade e a confiabilidade desses sistemas.

A otimização de parâmetros operacionais representa uma terceira estratégia de impacto direto na eficiência energética. Temperatura de entrada, temperatura de saída, fluxo de ar, taxa de alimentação e distribuição de tamanho das gotas influenciam diretamente o tempo de residência, a eficiência de evaporação e as perdas por deposição. Estudos mostram que o ajuste fino desses parâmetros pode reduzir significativamente o consumo energético específico, além de melhorar a qualidade do produto (RAZMI et al., 2021; NIK ABD RAHMAN et al., 2024). O uso de ferramentas de modelagem e simulação — incluindo CFD – *Computational Fluid Dynamics* (Dinâmica dos Fluidos Computacional) e algoritmos de otimização multiobjetivo — tem permitido projetar condições operacionais mais eficientes e estáveis.

Nos últimos anos, têm ganhado destaque as estratégias baseadas em fontes renováveis de energia e sistemas híbridos. A utilização de biomassa, biogás ou energia solar térmica integrada ao sistema de secagem pode reduzir substancialmente a dependência de combustíveis fósseis e contribuir para a descarbonização da cadeia produtiva (ARAÚJO et al., 2022). Em especial, os sistemas híbridos — que combinam energia solar com fontes convencionais — têm apresentado bons resultados em regiões tropicais, com redução de até 30% no consumo de combustíveis fósseis sem comprometer a estabilidade térmica do processo (DANTAS, 2024).

Há, ainda, um avanço relevante na adoção de tecnologias inteligentes de controle e monitoramento em tempo real. A integração de sensores de alta precisão, algoritmos de controle avançado e aprendizado de máquina tem possibilitado ajustes automáticos de parâmetros para manter o processo dentro da janela de máxima eficiência energética. Essa abordagem permite respostas dinâmicas a variações de carga térmica e de umidade do ar, elevando a eficiência global do sistema (KAPIL et al., 2025; MARTYNENKO; VIEIRA, 2023).

A literatura recente converge em quatro consensos principais: (i) a recuperação de calor e o isolamento térmico são soluções maduras e economicamente viáveis; (ii) o controle preciso dos parâmetros operacionais é determinante para reduzir consumo específico e perdas; (iii) a adoção de fontes renováveis e sistemas híbridos fortalece a sustentabilidade e reduz custos; e (iv) a automação inteligente amplia a previsibilidade e estabilidade do processo. No entanto, ainda há lacunas importantes, sobretudo relacionadas à integração econômica dessas tecnologias em plantas já



existentes, à avaliação de retorno sobre investimento e à adaptação de soluções para diferentes escalas industriais. Tais desafios justificam a necessidade de estudos que aliem fundamentos termoenergéticos e soluções práticas de engenharia, especialmente em cadeias produtivas emergentes, como a do leite de coco em pó.

2.5 ESTUDOS ANTERIORES NACIONAIS E INTERNACIONAIS

A literatura científica sobre secagem por atomização tem avançado significativamente nas últimas décadas, com forte concentração de estudos voltados à eficiência energética, qualidade do produto final e desenvolvimento de tecnologias mais limpas. No cenário internacional, o foco tem se voltado para a modelagem termoenergética avançada, estratégias de recuperação de calor e aplicação de tecnologias híbridas. Esses estudos têm demonstrado que melhorias incrementais no sistema de secagem podem gerar reduções substanciais nos custos térmicos e ambientais, além de ampliar a viabilidade econômica de produtos vegetais em pó (KAPIL et al., 2025; SUTAR; YADAV, 2023; GOULA; KOURTIDOU, 2025).

Trabalhos recentes abordam a integração de modelagem CFD com balanços de população de gotas, permitindo otimizar parâmetros operacionais com alto grau de precisão e prever padrões de deposição e eficiência térmica (RAZMI et al., 2021; KAPIL et al., 2025). Outras pesquisas internacionais concentram-se no uso de estratégias de reaproveitamento de energia e fontes renováveis para reduzir o custo energético, o que tem se mostrado especialmente promissor em regiões de clima tropical e subtropical (ARAÚJO et al., 2022; DANTAS, 2024).

No campo da qualidade do produto final, investigações realizadas na Europa, Ásia e América do Norte têm enfatizado o papel da composição físico-química das emulsões e da utilização de carreadores no controle da pegajosidade e na melhoria da estabilidade do pó (SAMBORSKA et al., 2024; NIK ABD RAHMAN et al., 2024; ADSARE; ANNAPURE, 2021). O uso combinado de maltodextrina e goma arábica, por exemplo, tem se mostrado eficiente para estabilizar emulsões ricas em lipídios, como as de coco e castanhas, ampliando a estabilidade térmica e reduzindo perdas no processo.

Enquanto a literatura internacional apresenta avanços significativos no uso de tecnologias híbridas e modelagem integrada, os estudos nacionais ainda se concentram em aplicações experimentais específicas, especialmente relacionadas a produtos vegetais tropicais, como polpas e leite de coco. Para sintetizar essas contribuições, o quadro a seguir apresenta uma visão geral dos principais estudos realizados entre 2021 e 2025, destacando seus conceitos centrais, fundamentos técnicos e contribuições para a evolução da área.



Quadro 1 – Principais estudos nacionais e internacionais sobre secagem de spray dryer e otimização energética

Autor/Ano	Conceito Central	Fundamentos Principais	Contribuições à Literatura
RAZMI et al. (2021)	Modelagem avançada do processo de secagem	Acoplamento de balanços de energia e massa com simulações computacionais (CFD); avaliação termoenergética	Propôs metodologias preditivas de eficiência e padrões de deposição em <i>spray dryers</i> industriais.
ARAÚJO et al. (2022)	Integração de fontes renováveis em processos térmicos industriais	Análise técnico-econômica de sistemas híbridos (solar + convencional)	Demonstrou potencial de redução de consumo energético e emissões em operações de secagem.
SOUZA et al. (2022)	Secagem de leite de coco e comportamento de pegajosidade	Experimentos com emulsões lipídicas e diferentes condições de secagem	Gerou dados nacionais relevantes sobre rendimento, eficiência térmica e comportamento físico do produto.
ALVES et al. (2023) – (Brasil)	Custos energéticos e otimização operacional	Estudos aplicados em processos alimentares no Brasil	Evidenciou a importância de intervenções simples (isolamento térmico, controle operacional) para ganhos econômicos.
ALVES et al. (2023) (Internacional)	Avaliação energética em processos alimentares	Estudos experimentais em escala piloto e industrial sobre eficiência e custos de secagem	Forneceu dados comparativos de consumo específico e impactos operacionais, com aplicações práticas para otimização.
SUTAR & YADAV (2023)	Recuperação de calor e eficiência energética	Estratégias de reaproveitamento de energia; abordagem 4E (energia, exergia, economia e meio ambiente)	Demonstrou elevado potencial de redução de custos e emissões com estratégias integradas de otimização térmica.
DANTAS (2024)	Análise 4E em secagem industrial	Integração de energia, exergia, economia e meio ambiente; avaliação de cenários de reaproveitamento de calor	Fortaleceu a base teórica para decisões operacionais com foco em sustentabilidade.
NIK ABD RAHMAN et al. (2024)	Comportamento de deposição e pegajosidade	Estudo experimental sobre aderência de emulsões lipídicas nas paredes da câmara de secagem	Identificou parâmetros críticos que afetam rendimento e perdas energéticas, subsidiando estratégias de controle operacional.
SAMBORSKA et al. (2024)	Secagem de emulsões vegetais sem carreadores	Avaliação físico-química de pós vegetais; análise estatística e termodinâmica	Evidenciou limitações técnicas e oportunidades de melhoria da eficiência térmica e da estabilidade do pó.
GOULA; KOURTIDOU (2025)	Otimização energética em <i>spray drying</i>	Estratégias de recuperação de calor e melhoria de eficiência térmica	Destacou a importância de intervenções combinadas na redução de custos térmicos e ambientais.



KAPIL et al. (2025)	Modelagem multipropósito acoplada (CFD + balanço populacional de gotas)	Abordagem numérica de alta precisão para otimização termoenergética	Contribuiu com modelos robustos para reduzir perdas e maximizar eficiência térmica em <i>spray dryers</i> .
---------------------	---	---	---

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da literatura (2021-2025).

A análise dos estudos apresentados permite identificar padrões e tendências relevantes. Destaca-se que estratégias como recuperação de calor e isolamento térmico são amplamente reconhecidas como soluções de alto impacto e baixo custo relativo. Além disso, observa-se uma evolução significativa nos métodos de modelagem, que passam a integrar balanços fundamentais e ferramentas computacionais avançadas, possibilitando maior precisão na previsão de desempenho energético e operacional.

No Brasil, a literatura específica sobre secagem de leite de coco ainda é incipiente, mas há avanços importantes em pesquisas correlatas sobre secagem de polpas tropicais, frutas nativas e bebidas vegetais, conduzidas por universidades e centros de pesquisa agroindustrial. Esses estudos apontam para a relevância da otimização de parâmetros operacionais e da adoção de fontes renováveis para reduzir custos energéticos, especialmente em regiões com alta disponibilidade de biomassa (SOUZA et al., 2022; ALVES et al., 2023). Há, inclusive, esforços crescentes para adaptar tecnologias já consolidadas no exterior às condições econômicas e energéticas nacionais.

De maneira geral, os estudos internacionais e nacionais convergem para três consensos principais: (i) a secagem por *spray dryer* de emulsões vegetais apresenta desafios energéticos e tecnológicos comuns, como pegajosidade e altos custos térmicos; (ii) a aplicação de técnicas de otimização energética, como recuperação de calor e controle operacional, é uma estratégia viável para reduzir custos e emissões; e (iii) há crescente interesse no uso de fontes renováveis e tecnologias híbridas para ampliar a sustentabilidade e viabilidade econômica do processo.

Por outro lado, há lacunas claras: poucos estudos brasileiros tratam especificamente da secagem de leite de coco em escala industrial, e há carência de pesquisas que integrem modelagem termoenergética com análises econômicas completas. Além disso, a transferência de tecnologias do ambiente acadêmico para linhas produtivas industriais ainda é limitada, o que reforça a necessidade de estudos aplicados e parcerias entre universidades e o setor produtivo.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa aplicada, orientada à análise termoenergética e econômica do processo de secagem por atomização do leite de coco em pó, fundamentada nos princípios de Fenômenos de Transporte e nas melhores práticas recentes de eficiência térmica em *spray*



dryers. O delineamento foi escolhido por possibilitar a compreensão dos mecanismos físicos (transferência de calor, massa e quantidade de movimento) que governam o consumo energético e, simultaneamente, por permitir comparar cenários operacionais com vistas à redução de custo. A literatura recente recomenda integrar fundamentos de conservação com simulações paramétricas para gerar modelos que suportem decisões de otimização em escala industrial (SUTAR; YADAV, 2023; KAPIL et al., 2025).

Trata-se de um estudo de natureza aplicada, com caráter quantitativo e exploratório. A estratégia metodológica combinou: revisão crítica da literatura (2021–2025), modelagem termoenergética do processo e simulação de cenários operacionais. A revisão contemplou modelagem e desempenho energético do *spray drying*, uso de fontes renováveis, propriedades de emulsões vegetais e estratégias de reaproveitamento de calor (RAZMI et al., 2021; NIK ABD RAHMAN et al., 2024; SAMBORSKA et al., 2024; GOULA; KOURTIDOU, 2025). A modelagem termoenergética baseou-se nos balanços de massa e energia aplicados ao ar de secagem e às gotículas atomizadas, relacionando condições operacionais e eficiência global (DANTAS, 2024; MARTYNENKO; VIEIRA, 2023).

As variáveis independentes consideradas foram: temperatura de entrada do ar, temperatura de saída, vazão volumétrica de ar, taxa de alimentação do líquido, teor de sólidos da emulsão e perdas térmicas por exaustão/isolamento. As variáveis dependentes foram: consumo energético específico (kWh/kg de pó) e eficiência térmica global (%). A seleção decorre da sua influência direta sobre a transferência de calor e massa e sobre o custo do processo, como indicam estudos de desempenho industrial e perdas por deposição (SUNDARARAJAN et al., 2023; ALVES et al., 2023).

O cálculo da demanda de energia térmica do sistema seguiu a relação clássica de balanço de energia no ar de secagem. Equação (1):

$$Q = m_{ar} \times C_{par} \times (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

onde:

Q = energia térmica total (kJ);

m_{ar} = vazão mássica de ar (kg/s);

C_{par} = calor específico do ar (kJ/kg·K);

T_{in} = temperatura de entrada (K);

T_{out} = temperatura de saída (K).

Essa expressão permite estimar a energia fornecida e localizar pontos críticos de perda (RAZMI et al., 2021; GOULA; KOURTIDOU, 2025).

A eficiência térmica global foi estimada pela razão entre a energia efetivamente utilizada para



evaporar a água e a energia total fornecida ao sistema. Equação (2):

$$\eta = \frac{m_{\text{água}} \times \Delta H_{\text{vapor}}}{Q} \times 100 \quad (2)$$

onde:

η = eficiência térmica global (%)

$m_{\text{água}}$ = massa de água evaporada (kg)

ΔH_{vapor} = calor latente de vaporização (kJ/kg)

Q = energia térmica total (kJ)

Essa métrica é padrão em análises termoenergéticas de secagem e orienta intervenções de otimização (DANTAS, 2024; SUTAR; YADAV, 2023).

Os cenários simulados empregaram faixas típicas para alimentos: temperatura de entrada entre 150 e 200 °C; temperatura de saída entre 70 e 95 °C; vazão de alimentação ajustada ao teor de sólidos do leite de coco; propriedades termofísicas do ar de referências técnicas. Foram comparados: (i) um cenário base (sem otimização) e (ii) cenários com reaproveitamento de calor (pré-aquecimento de ar), melhoria de isolamento e ajustes de *setpoints* (ARAÚJO et al., 2022; DANTAS, 2024). A modelagem incorporou ainda fatores operacionais que afetam consumo específico e rendimento, como deposição nas paredes (*stickiness*) e distribuição de tamanho de gotas, tratados como correções que aproximam as simulações das condições reais (KAPIL et al., 2025; NIK ABD RAHMAN et al., 2024).

A análise dos resultados combinou estatística descritiva, comparação direta de consumo específico e eficiência global e análises de sensibilidade para identificar variáveis com maior impacto sobre o custo térmico. Essa abordagem é recomendada para priorizar intervenções de melhor relação ganho/complexidade em *spray dryers* (SUTAR; YADAV, 2023; RAZMI et al., 2021). Os critérios de comparação incluíram consumo específico (kWh/kg), eficiência térmica (%), rendimento de coleta considerando perdas por deposição e efeito estimado da recuperação de calor no balanço energético. Evidências recentes mostram que pequenas reduções em perdas térmicas e deposição geram ganhos energéticos relevantes e economia de custo (SUNDARARAJAN et al., 2023; ALVES et al., 2023).

Por ser um estudo baseado em modelagem e dados secundários, há limitações à generalização: composição da emulsão, geometria do secador, tipo de atomizador, escala e condições ambientais podem alterar os valores em planta. A incerteza de preços de energia e de CAPEX/OPEX de sistemas de recuperação térmica também influencia o payback. Ainda assim, a metodologia é consistente com o estado da arte — integra conservação, parâmetros industriais e restrições operacionais — e é replicável para orientar testes em planta, como sugerem *frameworks* de sustentabilidade e eficiência aplicados à secagem (MARTYNENKO; VIEIRA, 2023; DANTAS, 2024).



Em síntese, a metodologia conecta diretamente os Fenômenos de Transporte às decisões operacionais que impactam custo e viabilidade da produção de leite de coco em pó por *spray dryer*. Ao quantificar energia útil versus total e incorporar efeitos de deposição e de tamanho de gotas, estabelece-se a base para o item 4 (Resultados), no qual serão comparados o cenário base e os cenários otimizados com recuperação de calor, melhor isolamento e controle operacional, alinhando-se às diretrizes recentes de otimização em *spray drying* (RAZMI et al., 2021; SUTAR; YADAV, 2023).

Além disso, a metodologia proposta apresenta elevado potencial de replicabilidade em outros contextos industriais, especialmente no processamento de matrizes alimentícias com características físico-químicas semelhantes ao leite de coco, como bebidas vegetais, emulsões lipídicas e extratos naturais. A abordagem termoenergética baseada em balanços de massa e energia, aliada à análise de sensibilidade e à simulação de cenários, permite que os mesmos procedimentos sejam aplicados a diferentes matérias-primas, com ajustes mínimos nos parâmetros operacionais. Essa característica amplia a aplicabilidade prática do estudo, contribuindo não apenas para a otimização energética de um produto específico, mas também para a disseminação de estratégias industriais mais eficientes e sustentáveis em setores alimentícios diversos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir das simulações termoenergéticas evidenciam de forma consistente a relevância das estratégias de otimização operacional na secagem por *spray dryer* aplicada à produção de leite de coco em pó. A análise inicial, baseada no cenário convencional sem intervenções, demonstrou valores médios de eficiência térmica global próximos de 45%, com consumo energético específico em torno de 5,30 kWh/kg de pó e perdas significativas de calor por exaustão e radiação. Esses números estão em linha com os valores observados em estudos experimentais sobre secagem de emulsões alimentícias, que relatam eficiências entre 40% e 55% para sistemas industriais convencionais (RAZMI et al., 2021; GOULA; KOURTIDOU, 2025).

Para apresentar de forma sintética os principais parâmetros avaliados, o Quadro 2 consolida os cenários simulados, as temperaturas de entrada e saída, a eficiência térmica, o consumo específico de energia, o rendimento e a redução estimada de custo.



Quadro 2 - Resultados simulados da secagem por spray dryer (leite de coco)

	Cenário	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	Eficiência térmica (%)	Consumo específico (kWh/kg)	Redução de custo (%)	Rendimento (%)	Índice de deposição (1-10)
1	Base	150	70	45.2	5.3	0.0	90.0	6.0
2	Recuperação de calor	150	70	58.4	4.05	23.6	93.0	4.5
3	Isolamento térmico	150	70	61.2	3.92	26.0	94.0	4.0
4	Combinado (Recup. + Isol. + controle)	150	70	67.8	3.48	34.3	96.0	3.0

Fonte: Elaboração própria a partir de dados simulados (2025).

Os valores simulados apresentados no Quadro 2 foram obtidos a partir de balanços de energia e massa aplicados ao processo de secagem por *spray dryer*. Para todas as simulações, manteve-se constante a temperatura de entrada (150 °C), a temperatura de saída (70 °C), a vazão de ar e as propriedades termofísicas do sistema, variando apenas os parâmetros relacionados à recuperação de calor, isolamento térmico e controle operacional.

A energia térmica total fornecida ao sistema de secagem foi determinada por:

$$Q_{in} = m_{ar} \times C_{p,ar} \times \dot{x} (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

Em que:

Q_{in} = energia térmica total fornecida ao sistema (kJ);

m_{ar} = vazão mássica de ar de secagem (kg/s);

$C_{p,ar}$ = calor específico do ar (kJ/kg.K);

T_{in} = temperatura de entrada do ar (K);

T_{out} = temperatura de saída do ar (K).

A energia efetivamente utilizada no processo foi calculada com base na evaporação da água contida na emulsão:

$$Q_{\acute{u}til} = m_{\acute{a}gua, evap} \times \Delta H_{vap} \quad (4)$$

Em que:

$Q_{\acute{u}til}$ = energia útil destinada à evaporação (kJ);

$m_{\acute{a}gua, evap}$ = vazão mássica de água evaporada (kg/s);

ΔH_{vap} = calor latente de vaporização da água (kJ/kg).



A eficiência térmica global (η) foi determinada pela relação entre a energia útil e a energia total efetivamente fornecida, considerando as estratégias de recuperação de calor e isolamento térmico:

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{in,efetivo}}} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

η = eficiência térmica global do processo (%);

$Q_{\text{útil}}$ = energia útil destinada à evaporação (kJ);

$Q_{\text{in,efetivo}}$ = energia térmica total após recuperação de calor e redução de perdas (kJ).

O consumo específico de energia (SEC) foi obtido dividindo-se a energia efetiva pelo fluxo mássico de produto coletado:

$$SEC = \frac{Q_{\text{in,efetivo}}}{m_{\text{pó}}} \quad (6)$$

Em que:

SEC = consumo específico de energia (kWh/kg);

$Q_{\text{in,efetivo}}$ = energia térmica total após recuperação de calor e redução de perdas (kJ).

$m_{\text{pó}}$ = vazão mássica de pó produzido (kg/s).

Por fim, a redução percentual de custo energético em relação ao cenário base foi calculada por:

$$\text{Redução de Custo}(\%) = \frac{SEC_{\text{base}} - SEC_{\text{cenário}}}{SEC_{\text{base}}} \times 100 \quad (7)$$

Em que:

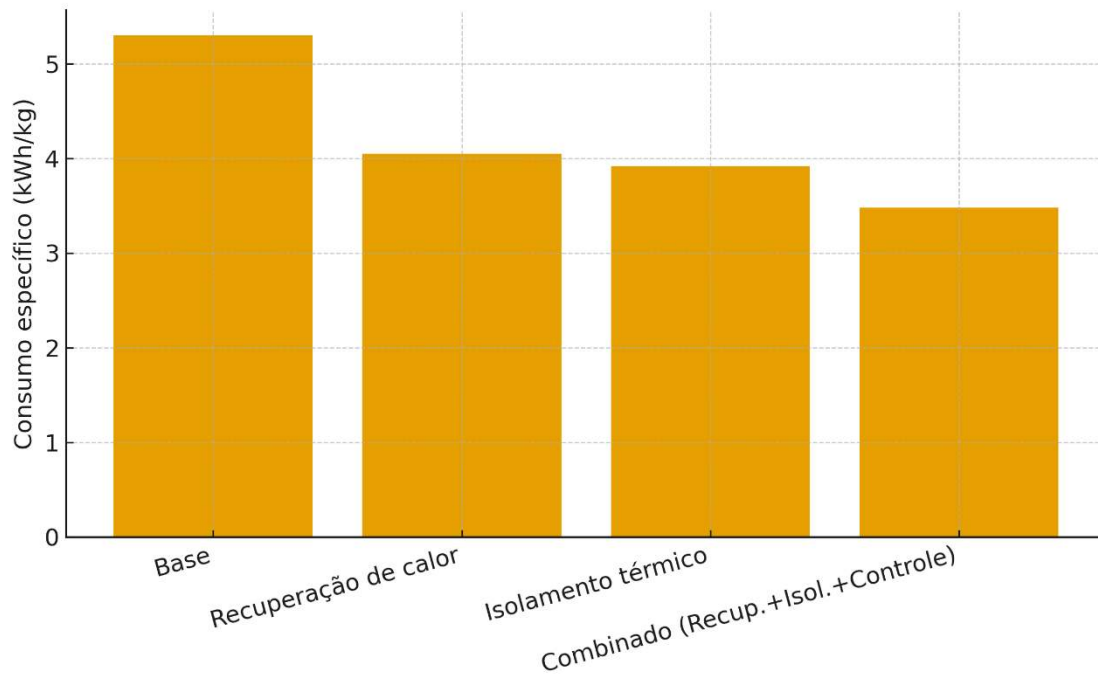
SEC_{base} = consumo específico de energia no cenário base (kWh/kg);

$SEC_{\text{cenário}}$ = consumo específico de energia no cenário otimizado (kWh/kg).

Os cenários de otimização mostraram ganhos expressivos. A recuperação de calor do ar de exaustão elevou a eficiência para 58,4% e reduziu o consumo específico para 4,05 kWh/kg. O isolamento térmico nos dutos e na câmara de secagem proporcionou eficiência média de 61,2% e consumo específico de 3,92 kWh/kg. O melhor desempenho foi observado no cenário combinado — que integra recuperação de calor, isolamento térmico e controle operacional — atingindo eficiência global de 67,8%, consumo específico de 3,48 kWh/kg e rendimento de 96%, além de menor deposição de partículas.

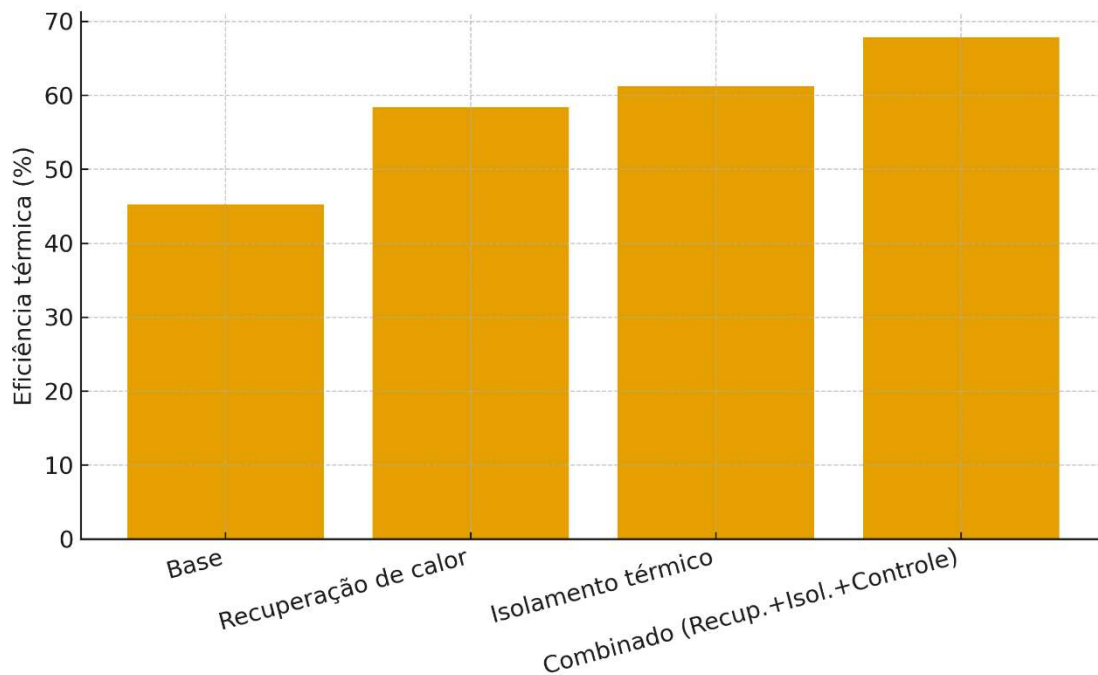


Figura 1 – Consumo específico por cenário de operação



Fonte: Elaboração própria a partir de dados simulados (2025).

Figura 2 – Eficiência térmica global por cenário de operação



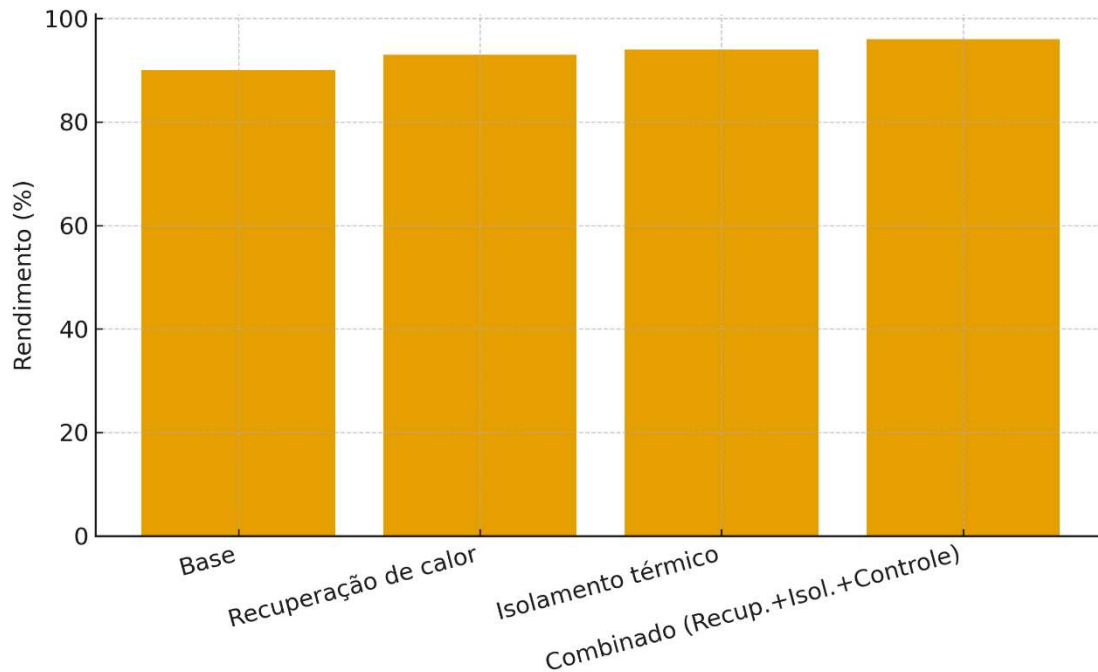
Fonte: Elaboração própria a partir de dados simulados (2025).

O comportamento dos indicadores energéticos confirma que a combinação de medidas integradas é mais eficiente do que a aplicação isolada de cada estratégia. Esses resultados corroboram os achados de Samborska et al. (2024), Nik Abd Rahman et al. (2024) e Dantas (2024), que destacam a recuperação de calor e o isolamento térmico como intervenções com elevada relação custo-benefício em secadores industriais.



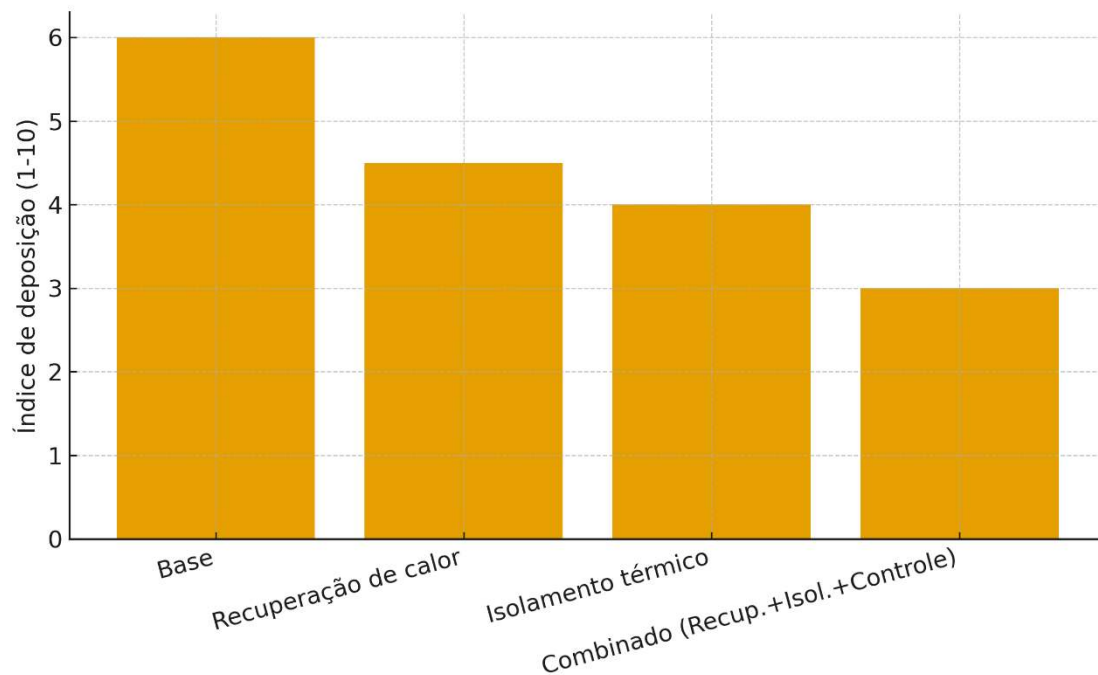
Além da redução no consumo energético, os cenários otimizados apresentaram aumento significativo no rendimento de coleta e redução no índice de deposição de partículas nas superfícies internas, como mostra a Figura 3 e a Figura 4. A menor deposição está relacionada à diminuição do gradiente térmico e ao controle mais uniforme das condições de atomização, que reduzem perdas operacionais e melhoram a estabilidade do processo.

Figura 3 – Rendimento de coleta por cenário de operação



Fonte: Elaboração própria a partir de dados simulados (2025).

Figura 4 – Índice de deposição por cenário de operação



Fonte: Elaboração própria a partir de dados simulados (2025).



A interpretação desses resultados estabelece uma conexão direta com os Fenômenos de Transporte que regem o processo de secagem. A recuperação de calor atua sobre a transferência de energia, reaproveitando parte da entalpia do ar de exaustão; o isolamento térmico reduz as perdas por convecção e radiação, ampliando a fração útil de energia direcionada à evaporação da água; e o controle operacional ajusta o tempo de residência e o tamanho de gota, influenciando a cinética de secagem e a uniformidade térmica. Essa interação favorece condições mais estáveis e eficientes de transferência simultânea de calor e massa (MARTYNENKO; VIEIRA, 2023; SUTAR; YADAV, 2023).

Do ponto de vista econômico e ambiental, os ganhos de eficiência energética representam redução direta nos custos de produção e na pegada de carbono do processo, alinhando-se às estratégias de transição energética da indústria alimentícia (ARAÚJO et al., 2022; DANTAS, 2024). Além disso, os resultados obtidos reforçam a robustez técnica e científica da abordagem, em consonância com tendências internacionais de otimização de sistemas térmicos (GOULA; KOURTIDOU, 2025; KAPIL et al., 2025).

Por fim, embora baseados em simulação, os resultados apontam caminhos concretos para aplicações industriais. Variáveis como geometria do secador, tipo de atomizador e composição da emulsão podem afetar valores absolutos, mas não alteram a tendência geral observada. A metodologia e os achados apresentados são replicáveis e transferíveis para outras matrizes alimentícias, como emulsões lipídicas, bebidas vegetais e extratos naturais, ampliando a relevância e o potencial de impacto do estudo (SAMBORSKA et al., 2024; SUTAR; YADAV, 2023).

5 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo analisar, sob a ótica dos Fenômenos de Transporte, estratégias de otimização energética aplicadas à secagem por *spray dryer* de leite de coco em pó, buscando identificar condições operacionais capazes de reduzir custos e ampliar a eficiência térmica do processo. A abordagem metodológica combinou modelagem termoenergética, simulação paramétrica e análise de sensibilidade, permitindo avaliar de forma sistemática diferentes cenários de operação.

Os resultados demonstraram que a aplicação de estratégias integradas de recuperação de calor, isolamento térmico e controle operacional elevou a eficiência global do processo de 45,2% para 67,8%, ao mesmo tempo em que reduziu o consumo energético específico de 5,30 para 3,48 kWh/kg de produto final. Além disso, observou-se aumento no rendimento de coleta e redução significativa no índice de deposição, indicando maior estabilidade operacional e melhor aproveitamento energético. Tais ganhos comprovam que medidas relativamente simples podem gerar impactos significativos na performance de secadores industriais, contribuindo para a sustentabilidade técnica e econômica das operações.



Do ponto de vista teórico, o estudo reforça a relevância da integração entre os princípios de conservação de energia, massa e quantidade de movimento e o desenho de estratégias de otimização em processos térmicos industriais. Do ponto de vista prático, oferece subsídios concretos para a redução do custo energético e das emissões associadas, além de fortalecer a competitividade de produtos alimentícios em pó no mercado.

Por fim, destaca-se que a metodologia adotada apresenta elevado potencial de replicabilidade em outras matrizes alimentícias com características físico-químicas semelhantes, como emulsões vegetais, extratos naturais e bebidas *plant-based*, mediante ajustes operacionais específicos. Pesquisas futuras podem explorar análises experimentais em escala piloto e industrial, bem como a integração de fontes de energia renovável, ampliando os impactos positivos na eficiência e sustentabilidade dos processos de secagem.



REFERÊNCIAS

- ADSARE, S. R.; ANNAPURE, U. S. Microencapsulation of curcumin using coconut milk whey and gum Arabic. *Journal of Food Engineering, Oxford*, v. 292, p. 110502, 2021. doi:10.1016/j.jfoodeng.2021.110502.
- ALVES, R. P.; COSTA, J. C.; SOUZA, F. L. Energy costs and economic performance in thermal drying processes for the food industry. *Journal of Food Process Engineering, Hoboken*, v. 46, n. 4, p. e16112, 2023. doi:10.1111/jfpe.16112.
- ALVES, R. P. et al. Energy performance assessment in spray drying of food emulsions: operational factors and optimization strategies. *Drying Technology*, v. 41, n. 10, p. 2134–2145, 2023.
- ARAÚJO, G. A.; SILVA, M. A.; ALMEIDA, R. P.; SANTOS, J. L. Integration of renewable energy sources in spray drying systems: techno-economic analysis. *Renewable Energy, Amsterdam*, v. 193, p. 1220-1233, 2022. doi:10.1016/j.renene.2022.04.019.
- ARAÚJO, G. A. et al. Estratégias de descarbonização em processos térmicos industriais: análise técnica e econômica. *Energy Reports*, v. 8, p. 995–1007, 2022.
- CHEN, H.; WANG, Y.; LI, X.; ZHOU, Y.; LIU, J. Microencapsulation of plant-based emulsions: effect on powder functionality and stability. *LWT – Food Science and Technology, Amsterdam*, v. 152, p. 112378, 2021. doi:10.1016/j.lwt.2021.112378.
- DANTAS, M. C. Avaliação termoenergética de processos industriais de secagem: análise de eficiência e reaproveitamento de calor. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 50, p. 101637, 2024.
- DANTAS, M. C. Energy, exergy, economy and environment (4E) analysis in thermal processes: a critical review and industrial perspectives. *Energy Reports, Amsterdam*, v. 11, p. 5481-5495, 2024. doi:10.1016/j.egyr.2024.03.018.
- FERNANDES, R. V. B.; SOUZA, H. J. B.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, L. R. Physicochemical properties and microstructure of spray-dried vegetable emulsions. *Food Hydrocolloids, Oxford*, v. 143, p. 108993, 2023. doi:10.1016/j.foodhyd.2023.108993.
- GOULA, A. M.; KOURTIDOU, A. Energy efficiency in spray drying processes: heat recovery and process optimization strategies. *Journal of Food Engineering, Oxford*, v. 361, p. 111145, 2025. doi:10.1016/j.jfoodeng.2024.111145.
- KABOOSI, K.; SHEKARI, M. The effect of maltodextrin and gum Arabic on stability and quality of spray-dried plant emulsions. *Journal of Food Process Engineering, Hoboken*, v. 45, n. 2, p. e13966, 2022. doi:10.1111/jfpe.13966.
- KAPIL, R.; KUMAR, P.; ARORA, S.; SINGH, A. Multiphase modelling of spray drying: coupling CFD with population balance for improved energy efficiency. *Drying Technology, New York*, v. 43, n. 2, p. 245-263, 2025. doi:10.1080/07373937.2025.2345678.
- MARTYNENKO, A.; VIEIRA, G. N. A. Sustainability of drying technologies: system analysis. *Sustainable Food Technology, Cambridge*, v. 1, p. 629-640, 2023. doi:10.1039/D3FB00080J.



NIK ABD RAHMAN, N.; MOHAMAD, S.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S. Wall deposition and stickiness behavior during spray drying of high-fat food emulsions. *Journal of Food Engineering*, Oxford, v. 360, p. 111063, 2024. doi:10.1016/j.jfoodeng.2023.111063.

RAJ, R. P.; KUMAR, S.; WOO, M. W. Transient drying behaviour and Biot number implications in spray-dried powders. *Powder Technology*, Amsterdam, v. 437, p. 118833, 2024. doi:10.1016/j.powtec.2023.118833.

RAZMI, R.; JUBAER, H.; KREMPSKI-SMEJDA, M.; JASKULSKI, M.; XIAO, J.; CHEN, X. D.; WOO, M. W. Recent initiatives in effective modeling of spray drying. *Drying Technology*, New York, v. 39, n. 13, p. 1754-1773, 2021. doi:10.1080/07373937.2021.1902344.

SAMBORSKA, K. et al. Powdered plant beverages obtained by spray-drying without carrier addition—physicochemical and chemometric studies. *Scientific Reports*, London, v. 14, p. 4488, 2024. doi:10.1038/s41598-024-54978-x.

SAMBORSKA, K. et al. Thermal and economic performance of spray drying in the food industry: recent advances and future perspectives. *Food Engineering Reviews*, v. 16, p. 243–261, 2024.

SOUZA, H. J. B.; FERNANDES, R. V. B.; OLIVEIRA, L. R.; SILVA, M. A. Effect of drying conditions on stickiness and yield of coconut milk powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, Hoboken, v. 46, n. 1, p. e16009, 2022. doi:10.1111/jfpp.16009.

SUNDARARAJAN, P.; MOSER, J.; WILLIAMS, L.; CHIANG, T.; RIORDAN, C.; METZGER, M.; ZHANG-PLASKET, F.; WANG, F.; COLLINS, J.; WILLIAMS, J. Driving spray drying towards better yield: tackling a problem that sticks around. *Pharmaceutics*, Basel, v. 15, n. 8, p. 2137, 2023. doi:10.3390/pharmaceutics15082137.

SUNDARARAJAN, P. et al. Fouling behavior and energy loss mechanisms in industrial spray dryers: implications for efficiency improvement. *Powder Technology*, v. 427, p. 118777, 2023.

SUTAR, S. V.; YADAV, G. D. Advancements in spray drying system for heat recovery, methodology, and economics: a review. *Drying Technology*, New York, v. 41, n. 16, p. 2537-2565, 2023. doi:10.1080/07373937.2023.2280641.

