



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

KAUAN DINIZ PEREIRA

**Avaliação de Parâmetros em Secador Rotativo Através do Método dos
Elementos Discretos (DEM)**

CARAÚBAS
2025

KAUAN DINIZ PEREIRA

**Avaliação de Parâmetros em Secador Rotativo Através do Método dos
Elementos Discretos (DEM)**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Jackson de Brito Simões, Prof. Dr.

Coorientador: Diego David Silva Diniz, Prof. Dr.

CARAÚBAS
2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

PP436 Pereira, Kauan Diniz.
a Avaliação de parâmetros em secador rotativo
através do método dos elementos discretos (DEM) /
Kauan Diniz Pereira. - 2025.
61 f. : il.

Orientador: Jackson de Brito Simões.
Coorientador: Diego David Silva Diniz.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2025.

1. Engenharia térmica. 2. Transferência de
calor. 3. Eficiência energética. 4. Dinâmica das
partículas. 5. Otimização de sistemas. I. Simões,
Jackson de Brito, orient. II. Diniz, Diego David
Silva, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

KAUAN DINIZ PEREIRA

**Avaliação de Parâmetros em Secador Rotativo Através do Método dos
Elementos Discretos (DEM)**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Defendida em: 18 / 06 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Jackson de Brito Simões, Prof. Dr. (UFERSA)
Orientador

Diego David Silva Diniz, Prof. Dr. (UFERSA)
Coorientador

Carlos Costa de Carvalho, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

Francisco Samuel Chaves, Esp. (UFCG)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por estar sempre ao meu lado, especialmente nos momentos mais difíceis em que pensei em desistir. Obrigado por ser meu auxílio, meu socorro e minha força constante para continuar vencendo cada barreira que surgia nesta caminhada. Sou grato por abrir meus olhos e me mostrar que tudo é possível quando se tem fé, esperança e, acima de tudo, a vontade inabalável de superar as adversidades. Obrigado por me ensinar a fazer tudo com o coração, a me doar integralmente pelos meus sonhos e objetivos. Agradeço a Deus porque Ele é a razão do meu viver, e sem Ele nada teria sentido. Pois Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas.

Agradeço, com todo o meu coração, aos meus pais, Robson Alan Pereira da Silva e Fátima Soares Diniz Pereira, por tudo que fizeram e continuam fazendo por mim. Vocês são a base de tudo que sou e conquistei até aqui. Cada passo que dei na minha vida teve o apoio de vocês dois.

Pai, obrigado por me ensinar, com seu jeito calado e firme, o valor do esforço, da responsabilidade e da honestidade. Suas atitudes sempre falaram mais alto que suas palavras, e foi observando você que aprendi a nunca desisti, mesmo quando parecia impossível. Obrigado por me ensinar que “A vitória é conquistada por quem enfrenta batalhas. Os desafios só chegam ao fim para aqueles que os iniciam”.

Mãe, obrigado por ser força e carinho ao mesmo tempo. Pela sua fé inabalável em mim, mesmo quando eu me sentia perdido. Pelas orações silenciosas, pelas conversas que me acalmaram, pelo amor que me fortaleceu nos dias em que eu quis desistir. Você para mim é abrigo, impulso e consolo.

Agradeço aos meus irmãos, Pedro Lucas Diniz Pereira e Caio Diniz Pereira, por estarem sempre comigo. A presença de vocês na minha vida é uma fonte constante de força e motivação. Sou grato por tê-los como irmãos e por compartilharmos juntos essa caminhada.

Agradeço a toda a minha família, por todo o carinho, apoio e incentivo ao longo da minha caminhada. Em especial, agradeço aos meus avós, Wilson, Edilza e Maria das Dores, por todo o amor, pelas palavras de sabedoria e por estarem sempre presentes. O apoio de vocês foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Agradeço profundamente ao professor Jackson de Brito, orientador e amigo, por acreditar em mim desde 2022, quando iniciei como voluntário na pesquisa. Sua confiança, paciência e firmeza foram fundamentais em minha trajetória. Sou grato pelos ensinamentos no primeiro TCC, pelos puxões de orelha sempre acompanhados de uma verdade necessária,

“deixe de preguiça, você não é assim... já falei diversas vezes” e por todas as oportunidades que me proporcionou no universo acadêmico. Obrigado por me apresentar ao mundo da simulação e, principalmente, por me permitir tê-lo como orientador em mais uma graduação. Levo comigo o aprendizado mais valioso: sempre podemos entregar mais do que imaginamos.

Agradeço de maneira especial os professor Diego David, coorientador e amigo por ser uma presença constante sempre que precisei ao longo da graduação e da vida pessoal. Suas palavras, sempre diretas e em alto e bom som são inesquecíveis. Obrigado pelos conselhos sinceros, por todas as conversas em momentos de dúvidas e por me ensinar com um humor bem peculiar que “nada é tão ruim que não possa piorar”. O seu “tá errado, apague e refaça” se tornou mais que uma correção: virou um lembrete que sempre há espaço para melhorar. Sou grato por contar com sua orientação e amizade nessa caminhada.

Agradeço à Banca Examinadora pela disponibilidade, pelas valiosas contribuições e por dedicarem seu tempo à leitura e avaliação deste trabalho. Suas observações e sugestões certamente enriqueceram ainda mais este estudo e contribuem para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Agradeço à Equipe CaraubajaSAE por todo o companheirismo, pelas trocas de aprendizado e pelos momentos que marcaram minha trajetória acadêmica. Fazer parte desse time foi mais do que uma experiência técnica, foi uma verdadeira escola de vida, onde cresci como profissional e como pessoa. Sou grato por cada desafio enfrentado em conjunto, pelas amizades.

Nunca desista dos seus sonhos. Vá até o fim.
Pereira, Fátima Soares Diniz

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação e otimização do processo de secagem de partículas de sal através do Método dos Elementos Discretos (DEM). A secagem é uma etapa essencial em várias indústrias, utilizada para reduzir a umidade de materiais, aumentando a vida útil, facilitando o transporte e a qualidade do produto. O objetivo deste estudo foi examinar fatores operacionais que afetam a eficiência de secagem de secadores rotativos, como velocidade de rotação do tambor e quantidade de levantadores. Foram simuladas diversas configurações de velocidade e geometria, utilizando partículas padronizadas e esféricas com as propriedades do sal de churrasco. Os resultados indicaram que algumas combinações testadas indicaram um melhor rendimento do processo, resultando em uma maior quantidade de partículas passando pelo volume de controle, consequentemente, uma melhor secagem. A avaliação do comportamento das partículas permitiu identificar condições que resultaram no aprimoramento do processo sem a fabricação do equipamento, reduzindo gastos operacionais. A aplicação do DEM mostrou-se um método essencial para criação de soluções efetivas e sustentáveis no setor industrial.

Palavras-chave: Engenharia térmica. Transferência de calor. Eficiência energética. Dinâmica de partículas. Otimização de sistemas.

ABSTRACT

This work presents an evaluation and optimization of the salt particle drying process using the Discrete Element Method (DEM). Drying is an essential step in various industries, used to reduce the moisture content of materials, thereby increasing shelf life, facilitating transport, and improving product quality. This study aims to examine operational factors that affect the drying efficiency of rotary dryers, such as drum rotation speed and the number of lifters. Various configurations of speed and geometry were simulated using standardized spherical particles with the properties of barbecue salt. The results indicated that some of the tested combinations yielded better process performance, resulting in a greater number of particles passing through the control volume and, consequently, more effective drying. The evaluation of particle behavior made it possible to identify conditions that improved the process without the need to manufacture the equipment, thus reducing operational costs. The application of DEM proved to be an essential method for developing effective and sustainable solutions in the industrial sector.

Keywords: Thermal engineering. Heat transfer. Energy efficiency. Particle dynamics. Systems optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Funcionamento da secagem ao sol.	18
Figura 2 - Secagem do café orgânico.	19
Figura 3 - Classificação de projeto.	20
Figura 4 - Sistema de secagem solar.	21
Figura 5 - Etapas da liofilização.	22
Figura 6 - Secagem em lote: Liofilizador.	22
Figura 7 - Forno de secagem.	23
Figura 8 - Fluxo de ar em um secador indireto.	24
Figura 9 - Secador rotativo de açúcar e biomassa.	25
Figura 10 - Componentes de um secador rotativo direto.	26
Figura 11 - Diferentes geometrias de levantadores.	27
Figura 12 - Ciclo de cálculo DEM.	29
Figura 13 - Fluxograma metodológico.	32
Figura 14 - Dimensões geométricas do secador rotativo.	34
Figura 15 - Vista em perspectiva das geometrias simuladas.	36
Figura 16 - Vista 2D dos levantadores.	36
Figura 17 - Volume de controle projetado.	37
Figura 18 – Pico de desempenho seis levantadores - 17 rpm.	39
Figura 19 - Redução de partículas no VC seis levantadores - 26 rpm.	40
Figura 20 - Movimento em anel seis levantadores - 29 rpm.	40
Figura 21 - Efeito da baixa rotação oito levantadores - 2 rpm.	41
Figura 22 - Pico de desempenho oito levantadores - 14 rpm.	42
Figura 23 - Acúmulo de partículas oito levantadores - 29 rpm.	42
Figura 24 - Pico de desempenho dez levantadores - 14 rpm.	43
Figura 25 - Pico de desempenho doze levantadores - 14 rpm.	45
Figura 26 - Pico de desempenho dezoito levantadores - 17 rpm.	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - P/s no VC de seis levantadores.	38
Gráfico 2 - P/s no VC oito levantadores.	41
Gráfico 3 - Análise de desempenho dez levantadores.	43
Gráfico 4 - P/s no VC doze levantadores.	45
Gráfico 5 - Análise de desempenho dezoito levantadores.	46
Gráfico 6 - Variação de configuração - 2 rpm.	47
Gráfico 7 - Variação de configuração - 5 rpm.	47
Gráfico 8 - Variação de configuração - 8 rpm.	48
Gráfico 9 - Variação de configuração - 11 rpm.	48
Gráfico 10 - Variação de configuração - 14 rpm.	49
Gráfico 11 - Variação de configuração - 17 rpm.	49
Gráfico 12 - Variação de configuração - 20 rpm.	50
Gráfico 13 - Variação de configuração - 23 rpm.	50
Gráfico 14 - Variação de configuração - 26 rpm.	51
Gráfico 15 - Variação de configuração - 29 rpm.	51
Gráfico 16 - Média de p/s X Quantidade de Levantadores.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre secagem e evaporação.	16
Tabela 2 - Definição da quantidade de levantadores.	33
Tabela 3 - Progressão aritmética.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEM – Discret element method

VC – Volume de controle

p/s – Partículas/segundo

CAD – Computer-Aided Desing

CAE – Computer-Aided Engeenering

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos gerais	13
1.2. Objetivos específicos	14
1.3. Justificativa	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. Processo de secagem.....	15
2.1.1. Definição e importância	16
2.1.2. Secagem de particulados	16
2.1.3. Métodos de secagem	17
2.2. Secadores rotativos	23
2.2.1. Secador rotativo indireto	23
2.2.2. Secadores rotativos diretos	24
2.3. Método dos elementos discretos (DEM)	27
2.3.1. Conceito	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. Objeto de estudo	29
3.2. Metodologia computacional	31
3.2.1. Geometria	33
3.2.2. Velocidade.....	34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1. Geometrias	35
4.2. Influência das velocidades nas geometrias	37
4.2.1. Análise da velocidade para a geometria de seis levantadores	38
4.2.2. Análise da velocidade para a geometria de oito levantadores.....	40
4.2.3. Análise da velocidade para a geometria de dez levantadores	42
4.2.4. Análise da velocidade para a geometria de doze levantadores	44

4.2.5.	Análise da velocidade para a geometria de dezoito levantadores	45
4.3.	Influência da geometria com rotação constante.....	46
4.3.1.	Análise do comportamento para a velocidade de rotação de 2 rpm.....	46
4.3.2.	Análise do comportamento para a velocidade de rotação de 5 rpm.....	47
4.3.3.	Análise do comportamento para a velocidade de rotação de 8 rpm.....	48
4.3.4.	Análise do comportamento para a velocidade de rotação 11 rpm.....	48
4.3.5.	Análise do comportamento para a velocidade de rotação 14 rpm.....	49
4.3.6.	Análise do comportamento para a velocidade de rotação 17 rpm.....	49
4.3.7.	Análise do comportamento para a velocidade de rotação 20 rpm.....	50
4.3.8.	Análise do comportamento para a velocidade de rotação 23 rpm.....	50
4.3.9.	Análise do comportamento para a velocidade de rotação de 26 rpm.....	51
4.3.10.	Análise do comportamento para a velocidade de rotação 29 rpm.....	51
4.4.	Análise geral	52
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53

1. INTRODUÇÃO

O processo de secagem é um dos mais antigos observados na indústria química. O objetivo é remover um líquido presente em um sólido, reduzindo o teor de umidade. Na maioria dos casos, o líquido retirado é a água (Rodrigues, 2019).

Existem vários equipamentos que podem ser utilizados para a remoção de umidade, no entanto, a maioria opera, predominantemente, por meio da aplicação de calor. Dentre esses equipamentos destacam-se os secadores rotativos, que atuam tanto no transporte de partículas e sólidos como na transferência de calor e massa. Durante o processo, ocorre a interação entre o material a ser seco e um fluido de forma direta ou indireta. As partículas se deslocam ao longo do secador através de três mecanismos: ação da rotação; ação gravitacional; e movimento conectivo do fluido (Rodrigues, 2019).

O Método dos Elementos Discretos (DEM) é uma técnica amplamente utilizada para analisar o comportamento de materiais granulares e descontínuos, modelando-os como um conjunto de partículas discretas que interagem entre si. Por meio da avaliação das forças de contato e do movimento individual dessas partículas, o DEM permite a inferência do comportamento macroscópico do material, proporcionando uma representação detalhada e realista de sua dinâmica (Oñate *et al.*, 2018).

Nesse contexto, um dos principais desafios consiste em determinar quais parâmetros macroscópicos devem ser empregados para que o comportamento do modelo seja fiel ao material real. A inserção de valores (parâmetros) inadequados pode comprometer a representatividade do modelo, resultando em discrepâncias significativas em relação aos experimentos reais (Machado, 2017).

Portanto, embora a literatura apresente diversos estudos relacionados à análise DEM, não foram identificados, até o momento, trabalhos que abordem especificamente os parâmetros de secagem estudados nesta pesquisa, ressaltando a sua originalidade e relevância científica.

1.1. Objetivos gerais

O objetivo geral deste trabalho é investigar parâmetros que melhorem a eficiência do processo de secagem em secadores rotativos diretos em processos industriais, utilizando simulação computacional pelo método dos elementos discretos (DEM).

1.2. Objetivos específicos

- Revisar a definição e a importância de secagem em contextos industriais e agrícolas.
- Classificar e descrever os métodos de secagem utilizados.
- Avaliar os tipos de equipamentos de secagem e suas aplicações em diferentes indústrias.
- Estudar a modelagem do processo de secagem usando o Método dos Elementos Discretos (DEM) e suas aplicações.
- Examinar o impacto das variáveis operacionais no desempenho do sistema de secagem rotativo, incluindo a velocidade rotacional e a configuração dos levantadores.
- Realizar simulações computacionais para reproduzir o comportamento das partículas na câmara de secagem com o software RockyDEM e analisar os resultados das simulações.
- Selecionar os parâmetros que proporcionem melhor eficiência de secagem e energética.
- Avaliar o impacto da velocidade rotacional na faixa de 2 a 29 rpm.
- Avaliar o impacto da quantidade de levantadores no fluxo de partículas.

1.3. Justificativa

A secagem é um dos métodos mais antigos e amplamente utilizados para a conservação de alimentos e outros materiais em diversas indústrias. A necessidade de (1) preservar a qualidade dos produtos, (2) aumentar a vida útil e (3) garantir a segurança alimentar torna a compreensão e o aprimoramento dos processos de secagem de extrema importância. O aumento da demanda por alimentos processados, a sustentabilidade ambiental e a eficiência econômica exigem que os métodos de secagem evoluam para atender às necessidades contemporâneas.

O crescimento dos impactos das alterações climáticas e a necessidade de práticas industriais mais sustentáveis tornam essencial a busca por técnicas de secagem que utilizem recursos naturais, como a energia do sol, e simultaneamente implementem tecnologias avançadas que ofereçam maior controle e eficiência operacional. Esta pesquisa é justificada pelo potencial de contribuição que a análise crítica e a comparação entre diferentes métodos de secagem e a modelagem computacional podem oferecer na otimização dessas práticas.

As aplicações industriais deste trabalho são vastas e incluem setores como a agricultura, a alimentação, a farmacêutica e a biotecnologia. Entretanto, esta pesquisa é focada na análise da partícula de sal, reforçando a relevância em caráter regional. Dessa forma, os resultados esperados da investigação não apenas contribuirão para o conhecimento acadêmico na área de

engenharia mecânica, mas também fornecerão diretrizes práticas para profissionais da indústria, visando a melhoria na qualidade dos produtos e na eficiência dos processos de secagem.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Processo de secagem

A história do processo de secagem é bastante vasta por ser o método mais antigo de conservação de alimentos. Historicamente, elementos naturais como o sol, o vento e o fogo eram empregados para extrair a umidade de frutas, carnes, grãos e ervas.

Esta é uma das técnicas de processamento mais antigas, cuja origem remonta a períodos muito anteriores ao surgimento de registros escritos. É plausível supor que os primeiros caçadores/coletores tenham se deparado com frutas que secaram naturalmente nos galhos. Esses frutos desidratados, embora distintos dos frescos, apresentavam uma característica fundamental: maior durabilidade para o consumo (Navarro, 2021).

Além das frutas, outros alimentos também podiam ser desidratados naturalmente por meio da exposição ao sol. Outra técnica também empregada para a secagem foi o fogo, oferecendo vantagens em relação à secagem solar, tal como maior confiabilidade, controle e praticidade. As carnes, por exemplo, passaram a ser secas com o uso do fogo, o que proporcionava ainda os benefícios adicionais do cozimento e da defumação (Nummer, 2002).

No decorrer do século XXI, foram observados avanços consideráveis em todas as áreas do processamento de alimentos, incluindo a secagem e/ou desidratação. Embora o princípio do processo continue sendo a remoção da água dos alimentos, os métodos modernos substituíram os procedimentos rudimentares, como o uso direto do fogo. O desenvolvimento do conhecimento científico também contribuiu significativamente para o aprofundamento da compreensão sobre essa técnica (Pokharel; Keerthi; Abunamous, 2023).

Mesmo com os avanços tecnológicos, a secagem mantém um caráter artesanal. Para a obtenção de produtos de alta qualidade, que satisfaçam às exigências do consumidor contemporâneo, não é suficiente dominar somente os fundamentos teóricos do processo. É igualmente necessário o domínio prático da técnica, considerando as particularidades de cada alimento a ser desidratado (Mercer, 2007).

2.1.1. Definição e importância

A secagem é um processo fundamental na indústria, onde a principal finalidade é a remoção de água ou outros líquidos de um determinado material. O objetivo deste processo pode variar conforme a aplicação, mas envolve geralmente a redução do teor de umidade de produtos para aumentar sua durabilidade, prevenir o crescimento de microrganismos ou facilitar o manuseio e transporte (Mercer, 2007; Celestino, 2010).

É comum haver confusão entre os processos de secagem e evaporação. Por isso, a Tabela 1 apresenta as principais diferenças entre esses dois processos, destacando suas características e aplicações.

Tabela 1 - Diferenças entre secagem e evaporação.

CRITÉRIO	SECAGEM	EVAPORAÇÃO
Definição	Remoção de líquido de um material sólido	Remoção de líquido de uma solução líquida
Método de remoção	Pode ocorrer a temperaturas inferiores ao ponto de ebulição do líquido presente no material sólido	Ocorre na temperatura de ebulição do líquido que se deseja remover da solução líquida
Exemplo de aplicação	Secagem de grãos na indústria alimentícia, secagem de roupas ao ar livre, secagem de tintas	Concentração de soluções na indústria química, evaporação da água em lagos e reservatórios
Interação com o meio	Pode envolver a ação do ar quente, fluxo de ar ou aplicação de vácuo para acelerar o processo	Pode ocorrer naturalmente ou ser acelerada com a aplicação de calor

Fonte: Adaptado de Celestino, (2010).

2.1.2. Secagem de particulados

A secagem de sólidos particulados é importante para manter a qualidade do produto em indústrias alimentícias, agrícolas, de produtos biotecnológicos e itens de origem biológica (Celestino, 2010). Jangam, Law e Shirkole (2024) demonstram que, controlar o teor de umidade nos materiais é importante para uma melhor eficiência energética e de custos.

No processo, é possível verificar que partículas maiores demoram mais para secar, pois a água precisa se mover por uma distância maior do centro até a superfície. Assim, é evidente que controlar o tamanho da partícula influencia diretamente no processo (Mercer, 2007).

De forma geral, para atingir o teor de umidade desejado é necessário um equilíbrio que garanta qualidade, eficiência energética e os requisitos de processamento.

2.1.3. Métodos de secagem

A definição dos tipos de secagem depende de diferentes fatores, como o tipo de material a ser processado, condições ambientais, infraestrutura disponibilizada e objetivos que são propostos a cada processo. Cada tipo de secagem apresenta características únicas, sendo essencial entender cada particularidade a fim de selecionar aquele que se adequa melhor às características do produto (Ahmed *et al.*, 2013).

Neste contexto, os principais métodos de secagem, incluindo técnicas tradicionais e tecnologias serão abordadas.

2.1.3.1. Secagem ao sol

A exposição de produtos ao sol é uma das técnicas de secagem e preservação de alimentos mais antigas praticadas ao longo dos séculos em todo o mundo. Após a colheita, cereais, leguminosas e forragens verdes são secos no campo. Frutas, vegetais, especiarias, produtos marinhos, grãos debulhados, são vendidos em camadas finas no solo ou em cestos, conforme o caso. Outros procedimentos envolvem pendurar a colheita em um abrigo, em árvores ou em prateleiras no campo (Weiss; Buchinger, 2003).

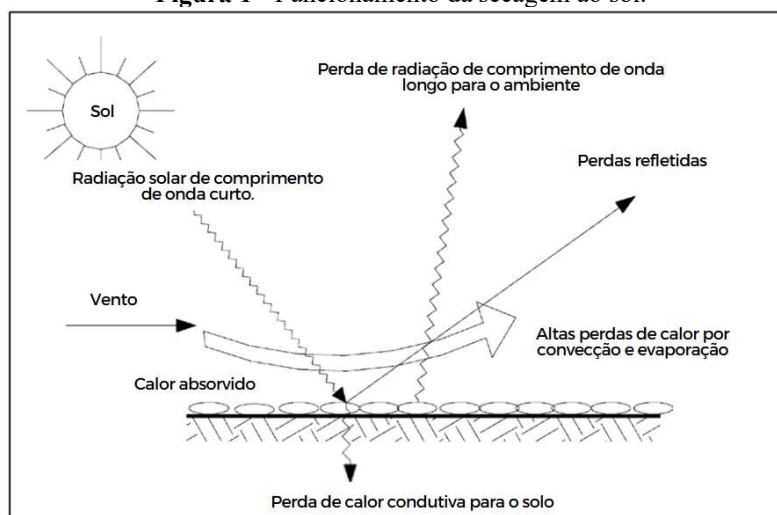
Este é o método mais comum e simples de secagem em países em desenvolvimento. Esse método acontece quando material a ser seco é espalhado em uma fina camada, diretamente exposta à radiação solar, ao vento e outros fatores ambientais (Jain; Tiwary, 2003).

A Figura 1 ilustra o princípio de funcionamento deste método. Aqui, a radiação solar flui sobre a superfície do material sendo refletida e absorvida. Essa energia absorvida unida ao aquecimento provocado pela temperatura ambiente é responsável por aquecer a superfície do material. Parte desse calor é empregada para transferir a umidade da superfície da colheita para o ar circundante. Uma parte deste calor é dissipado através da radiação de longo comprimento para atmosfera e por condução até a superfície do solo. O processo de transferência de calor e massa acontece simultaneamente. Além disso, existem diferentes

fatores externos que afetam na velocidade de secagem (radiação solar, temperatura do ambiente, velocidade do vento e umidade relativa) e internos (teor de umidade inicial, tipo de material, absorção e peso/área) (Jain; Tiwary, 2003).

No processo de secagem ao sol ocorre a transferência de calor por meio da convecção do ar ao redor e da absorção de radiação direta e difusa na superfície da colheita. O calor gerado é em parte transferido para o interior, elevando a temperatura, e em parte utilizado para promover a migração de água e vapor do interior para a superfície. A energia que sobra é utilizada para evaporar a água na superfície ou dissipada para o meio ambiente através de convecção e radiação (Weiss; Buchinger, 2003).

Figura 1 - Funcionamento da secagem ao sol.



Fonte: Jain, D. e Tiwary, G.N., (2003).

Esse processo continua até que a pressão de vapor e a umidade não se comparem ao produto existente na atmosfera. Portanto, a taxa de perda de umidade do produto para o meio ambiente e a absorção estão em equilíbrio. Esse processo também é dependente das condições ambientais. Assim, considera-se que o processo de secagem é gradual e, em locais com umidade relativa alta, o nível de umidade para atingir o equilíbrio não é adequado para o armazenamento seguro. (Weiss; Buchinger, 2003).

Existem diferentes aplicações para este método de secagem, entretanto uma das mais conhecidas é na indústria cafeeira conforme observado na Figura 2.

Figura 2 - Secagem do café orgânico.



Fonte: Pena, Carlos (2021).

2.1.3.2. Secagem solar

A secagem solar surge como uma alternativa de melhorar a secagem ao sol. Assim como a secagem ao sol, a secagem solar também utiliza o sol como fonte de calor. Neste caso, uma superfície de alumínio (ou material similar) no interior do desidratador ajuda no aumento de temperatura do sistema, uma vez que reflete a luz solar. A ventilação, por sua vez, atua como um fator que aumenta a eficiência da secagem, resultando em tempos de secagem mais curtos e redução de perdas. Isso se deve ao fato de que a circulação de ar no desidratador ajuda a remover a umidade do material, o que, por sua vez, reduz o tempo necessário de secagem (Ahmed *et al.*, 2013).

O sistema de secagem utiliza um coletor solar para aquecer o ar, sendo então usado para desidratar o produto sem que haja a exposição direta à luz solar. Isso permite um controle mais preciso das condições de secagem, como temperatura e umidade, o que pode resultar em um produto final de melhor qualidade. Além disso, a instalação de um sistema de controle no coletor solar pode otimizar ainda mais o processo, garantindo eficiência e consistência na desidratação. Em alguns sistemas, são utilizados os painéis fotovoltaicos e baterias para alimentação da iluminação, ventilador, comutação de energia (corrente contínua). O secador solar geralmente proporciona uma taxa de secagem mais rápida quando comparado à secagem ao sol, devido à maior temperatura interna proporcionada pelo coletor solar (Chong *et al.*, 2021).

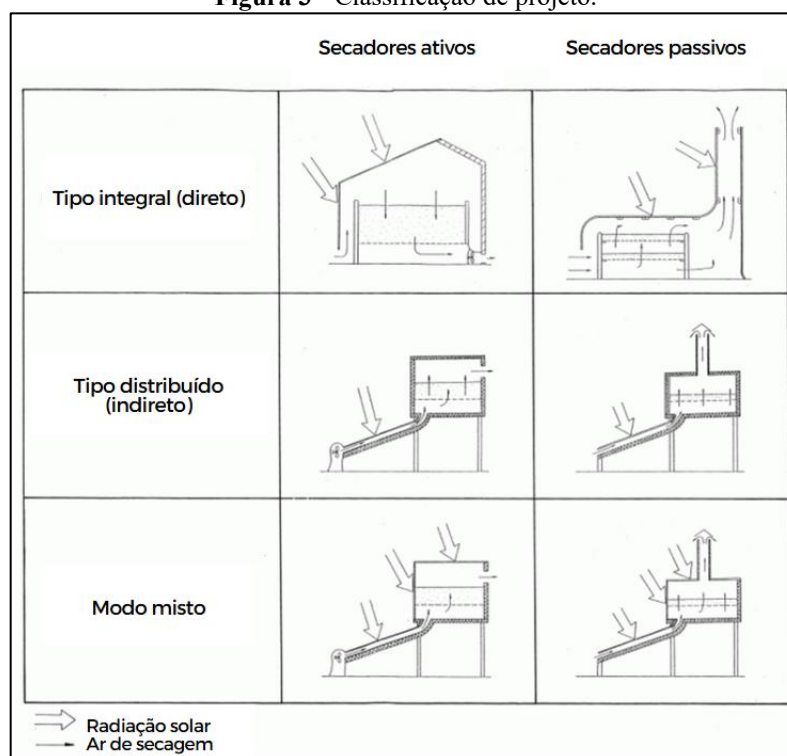
Por essas propriedades, os secadores apresentam maior popularidade, além do menor custo de manutenção, confiabilidade e fatores ecológicos, uma vez que o sol é um recurso inesgotável. Portanto, a produção de calor através do sol é bastante alta, uma vez que está presente na maior parte do dia (Ortiz-Rodríguez *et al.*, 2022).

Os secadores solares apresentam algumas configurações diferentes com base na faixa de temperatura de operação do sistema. Portanto, alguns tipos de critérios são seguidos para a

classificação desses objetos, são eles: movimentação do ar, exposição ao isolamento e direção do fluxo de ar (Weiss; Buchinger, 2003).

Além da classificação com base na temperatura de operação, os secadores solares também podem ser classificados de acordo com os métodos de aquecimento e a forma de utilização da energia solar. Basicamente, essas classificações consideram dois critérios distintos. A primeira categoria corresponde aos secadores ativos, geralmente conhecidos por serem sistemas híbridos. Em contraste, os secadores solares passivos são conhecidos por apresentar circulação natural, sendo dependentes exclusivamente da radiação solar e da convecção natural para a transferência de calor e remoção da umidade (Weiss; Buchinger, 2003). A Figura 3 mostram as classificações que esse método de secagem possui.

Figura 3 - Classificação de projeto.



Fonte: (Weiss, Werner; Buchinguer, Josef, 2003).

Na Figura 4, pode ser observado um protótipo de secador solar, bem como, fatias de tomate parcialmente secas na prateleira do secador.

Figura 4 - Sistema de secagem solar.



Fonte: Adaptado de (Mercer, Donald G., 2008).

2.1.3.3. Liofilização

A liofilização é um método de secagem que consiste em eliminar a água de um produto após o seu congelamento (Gaidhane *et al.*, 2015).

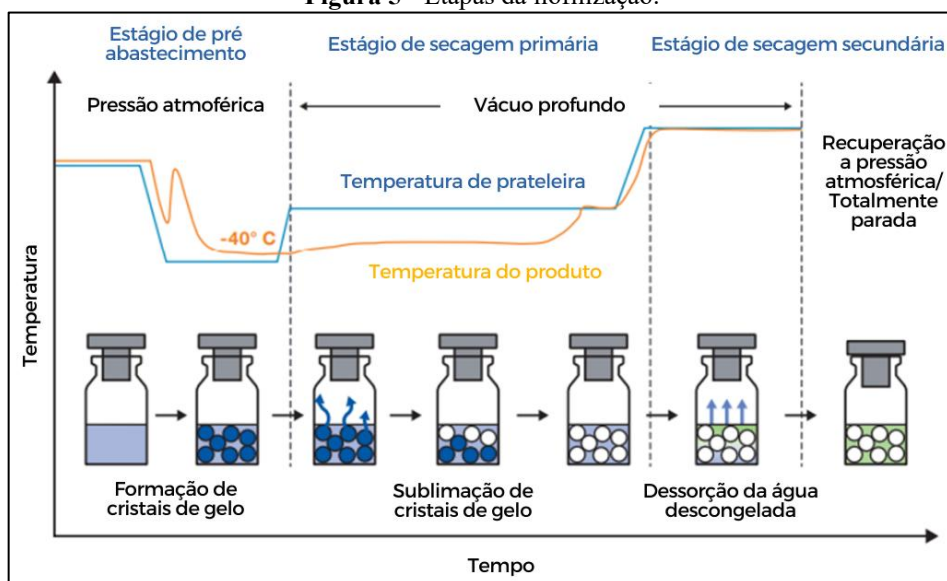
O processo é dividido em três etapas principais: A primeira etapa ocorre com material é submetido ao processo de resfriamento. A qualidade do produto liofilizado pode ser significativamente influenciada pelo método de congelamento e pela temperatura final. O resfriamento rápido influencia no surgimento de pequenos cristais de gelo, ao passo que o resfriamento mais gradual gera cristais mais densos, o que pode simplificar o processo de secagem (Gaidhane *et al.*, 2015).

A segunda fase é a secagem primária a qual ocorre pela redução de pressão e o calor que é aplicado ao produto congelado, resultando na sublimação do gelo diretamente para o vapor de água, sem a necessidade de passar pela fase líquida. Isso é realizado mediante um vácuo elevado, que possibilita a eliminação da água sem comprometer a estrutura e composição do produto (Gaidhane *et al.*, 2015).

A terceira fase é a secagem secundária. Com a finalização da sublimação (etapa 2), toda a umidade que sobrou é eliminada (Gaidhane *et al.*, 2015).

A partir da Figura 5 podem ser observados as etapas decorrentes no processo de liofilização.

A finalidade desse processo é produzir um produto seco e estável que possa ser armazenado e reconstituído facilmente, adicionando água no momento em que seja necessário. Este procedimento é de certa forma, vantajoso para materiais sensíveis ao calor, como medicamentos e produtos biológicos, uma vez que atuam na preservação da integridade e eficácia durante o período de armazenamento (Gaidhane *et al.*, 2015).

Figura 5 - Etapas da liofilização.

Fonte: Adaptado de LabConco, (2020).

A Figura 6 mostra que a secagem em lote permite eficiência, maior controle de temperatura e da entrada de calor.

Figura 6 - Secagem em lote: Liofilizador.

Fonte: LabConco, (2020).

2.1.3.4. Secagem em forno

O processo de secagem em forno é um método frequentemente empregado para agilizar o processo de remoção de umidade, criando condições propícias para a evaporação. Em fornos a ar quente, o material é seco através do aquecimento por convecção, processo em que o ar quente circula ao redor da amostra, favorecendo uma secagem eficaz e eficiente, particularmente em grandes volumes (MRC, 2024). Este secador pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Forno de secagem.



Fonte: Ahmed, Naseer; *et al.*, (2013).

Até o momento, foram apresentados métodos que não envolvem o uso de motores ou que não realizam o transporte do material. A seguir, será abordado sobre os secadores rotativos, que se destacam nas indústrias pela união das funções de secagem e transporte contínuo ao longo do equipamento.

2.2. Secadores rotativos

O secador rotativo é composto por uma carcaça cilíndrica que gira sobre roldanas e geralmente apresenta uma ligeira inclinação em relação à horizontal. A alimentação com o material úmido é inserida na parte superior do secador e segue para o final do processo com o produto seco (Krokida; Marinos-Kouri; Mujumdar, 2006).

A seguir serão apresentados os dois principais tipos de secadores rotativos.

2.2.1. Secador rotativo indireto

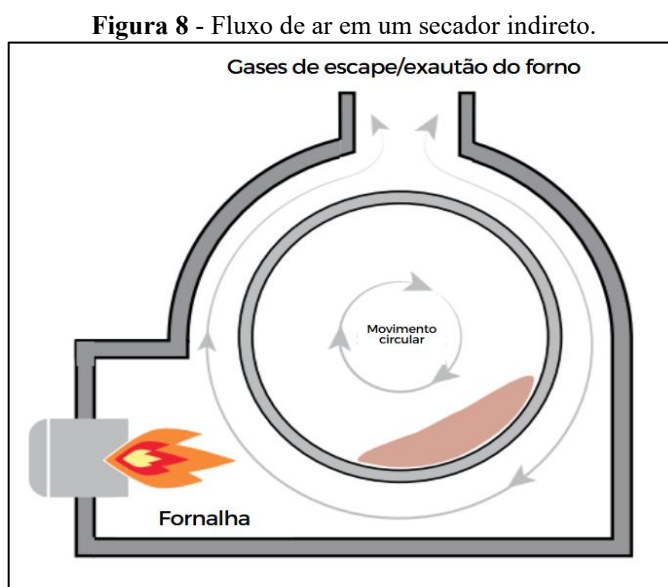
Secadores indiretos utilizam de uma fonte de calor (por exemplo, vapor, gás quente ou fluidos térmicos) a qual não entra em contato direto com material que está sendo seco. Ao contrário, o calor se propaga por condução através de uma superfície aquecida. A temperatura dessas superfícies pode oscilar entre -40 °C (como na liofilização) e 300 °C, conforme o uso, enquanto a temperatura do material se alinha com o ponto de ebulição da umidade sobre pressão de operação. Diferentemente dos secadores diretos, os indiretos necessitam de uma quantidade mínima de gás ou vácuo para eliminar a umidade evaporada, prevenindo a saturação de vapor (Devahastin; Mujumda, 2006).

Esses sistemas são mais eficientes em termos de energia quando comparados com os secadores diretos devido à perda reduzida de energia através dos gases de exaustão. O vapor gerado durante a secagem pode ser utilizado como fonte de aquecimento em fases posteriores,

diminuindo ainda mais a necessidade de fontes primárias de calor (Devahastin; Mujumdar, 2006).

Esse tipo de secador é perfeito para a secagem de materiais finos e empoeirados, ou materiais que não podem ser expostos ao oxigênio ou gases de combustão durante o processamento (Capitaine; Carlson, 2024).

A Figura 8 mostra o fluxo de ar no interior de um secador indireto.



Fonte: (Capitaine e Carlson, 2024, a).

2.2.2. Secadores rotativos diretos

Os secadores rotativos, conforme a Figura 9, são equipamentos utilizados para a secagem de diversos materiais. Essa flexibilidade permitiu que o sistema se tornasse eficiente para diferentes setores da indústria (Capitaine; Carlson, 2024 a). As suas principais vantagens se devem à sua adaptabilidade para grandes capacidades, reversibilidade e capacidade de gerir uma vasta gama de fontes de energia. São geralmente utilizados na indústria e no setor químico devido à sua fácil operação, alta capacidade e custo operacional reduzido (Zabaniotou, 2007).

O secador rotativo é constituído por um tambor que rotaciona a uma velocidade controlada, onde o material a ser seco troca calor e massa com o ar de secagem. No interior do tambor, os levantadores são responsáveis por elevar o material do fundo e soltá-lo no fluxo de ar de forma a aumentar a eficiência do processo. Este movimento contínuo intensifica a troca de calor entre o material e o ar de secagem, especialmente em secadores de configuração direta, nos quais há contato direto entre ambos, onde existe um contato direto entre o material e o ar.

Durante um período específico, conhecido como tempo de retenção, o material é mantido no tambor a uma temperatura regulada. Esse período é modificado para assegurar que o produto final alcance o grau de umidade pretendido, cumprindo os critérios de qualidade e eficácia do procedimento (Capitaine; Carlson, 2024 b).

Figura 9 - Secador rotativo de açúcar e biomassa.



Fonte: Mause, (2022).

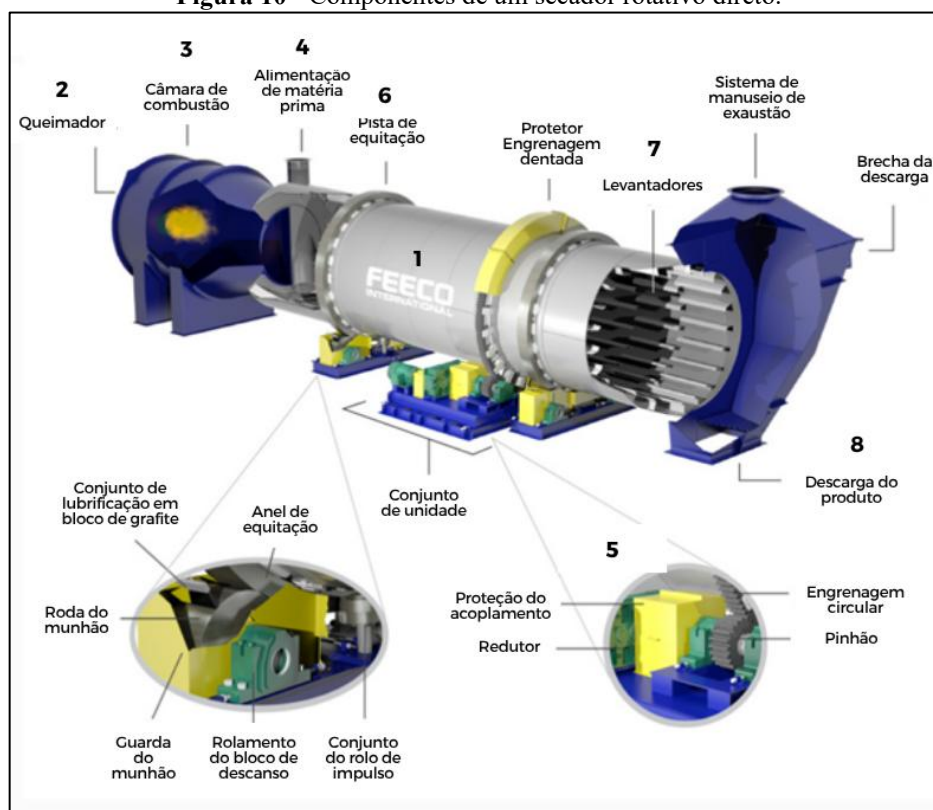
No tópico subsequente serão apresentados detalhes sobre cada componente de um secador rotativo direto.

2.2.2.1. Componentes de um secador rotativo

Capitaine e Carlson (2024 b) mostram que os componentes dos secadores rotativos são projetados de acordo com as dimensões e os materiais a serem processados para cada cliente. Entretanto, esses equipamentos possuem uma base padronizada, com ajustes em termos de tamanho, material de construção e componentes mecânicos. Estes componentes podem ser observados na Figura 10.

As principais partes dos secadores são: tambor; queimador; câmara de combustão; alimentação de matéria-prima; conjunto de transmissão; pista de equitação; levantadores; e descarga. Os principais componentes destacados estão enumerados de 1 a 8 (Capitaine; Carlson, 2024 b).

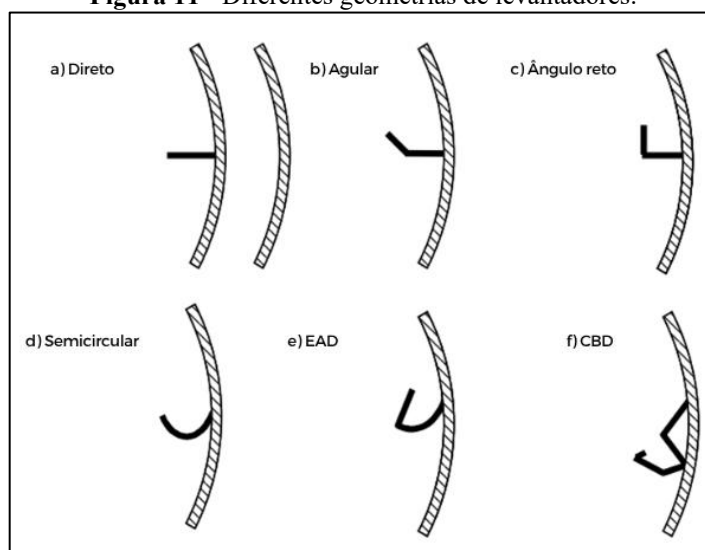
Figura 10 - Componentes de um secador rotativo direto.



Fonte: Adaptado de Seim, (2024).

2.2.2.2. Projeto de levantadores

Os levantadores possuem como propósito elevar e espalhar partículas sólidas no fluxo de gás, contribuindo para uma interação próxima entre os sólidos úmidos e os gases aquecidos. Normalmente, os levantadores são espaçados de 0,6 a 2,0 m, e sua forma é determinada pelas propriedades dos sólidos. Utilizam-se levantadores radiais com aba de 90° para materiais de fluxo livre, enquanto os radiais planos sem aba são utilizados para materiais pegajosos. Utilizar diferentes modelos de levantadores ao longo do comprimento do secador é útil para ajustar as alterações nas propriedades do material durante o processo de secagem. Nos estágios iniciais, próximo à extremidade da alimentação, são empregados levantadores em espiral para otimizar a distribuição do material sob a calha de alimentação ou transportador (Krokida; Marinos-Kouris; Mujumdar, 2006). Os levantadores comumente utilizados estão representados na Figura 11.

Figura 11 - Diferentes geometrias de levantadores.

Fonte: Adaptado de Krokida; Marinos-Kouris; Mujumdar, (2006).

Mercer (2007) mostra que assim como o tipo de secador utilizado pode influenciar o processo de secagem de um produto, as características incorporadas ao projeto do secador também podem ter um impacto significativo. Alguns secadores utilizam uma correia de malha metálica móvel para transportar o produto mediante uma câmara de secagem. Nesse arranjo, as partículas do produto ficam empilhadas umas sobre as outras, e o ar é passado pela cama de material para remover a umidade. Para minimizar os efeitos do contato entre as superfícies das partículas e melhorar o contato geral do ar de secagem com a superfície do produto, alguns secadores podem ser equipados com um mecanismo vibratório que agita as partículas enquanto se deslocam pelo secador. À medida que as partículas de alimento saltam para cima e caem de volta sobre a superfície vibratória do secador, têm um contato mais próximo com o ar de secagem do que teriam em uma cama plana sobre um transportador móvel.

Revol, Briens e Chabagno (2001) viram que o procedimento de construção dos levantadores deve ser de tal forma a permitir que os sólidos caiam em cascata dentro de quase 180° da rotação do tambor.

2.3. Método dos elementos discretos (DEM)

2.3.1. Conceito

O método dos elementos discretos foi introduzido em 1956 por Alder e Wainwright visando estudar a dinâmica molecular. Posteriormente, na década de 1970, Cundall e Strack desenvolveram seus princípios fundamentais, consolidando-o como uma abordagem numérica

amplamente utilizada na simulação de sistemas particulados. O DEM se caracteriza como um método discreto capaz de calcular numericamente as rotações e deslocamentos finitos das partículas e realizar automaticamente a detecção de contato em um conjunto de partículas (Altair, 2025).

O DEM utiliza uma abordagem discreta, sendo altamente adequado para a modelagem do comportamento em massa de materiais. As simulações de meios descontínuos permitem uma melhor compreensão dos processos envolvidos e, muitas vezes, reduzem a necessidade de experimentos físicos (Altair, 2025).

Como descrito anteriormente, o DEM é também um método de simulação numérica usada para modelar e analisar o movimento inúmeras de partículas, que podem estar organizadas em um sistema que pode ser fixo ou móvel ao longo do tempo. O que diferencia este método de outro, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), é que não requer a criação de malhas ou redes de elementos finitos. Isso implica que o DEM pode ser mais flexível em lidar com problemas de sistemas complexos, onde a geometria ou a configuração das partículas podem mudar constantemente durante a simulação (Kot, 2021).

A sua formulação inicial foi dada por Cundall e Strack em 1971, seu objetivo era entender e modelar os comportamentos mecânicos dos corpos ou meios através da discretização. Dividindo o sistema em um conjunto de partículas ou a estrutura na totalidade. Cada uma dessas partículas é tratada para permitir a sua interação com as demais, como colisões, força de atrito e outras interações físicas (Machado, 2017; Winik *et al.*, 2018).

Em 1979, Cundall e Track ampliaram o uso do DEM para os materiais granulares, compostos muitas partículas sólidas, como areia, grãos ou pedras. Nessa aplicação, as interações entre as partículas são fundamentais para entender como esses materiais se comportam durante processos como compactação, fluxo ou fraturamento (Machado, 2017).

O método DEM é resumido através de um ciclo de cálculo fundamental, ilustrado na Figura 12, no qual são executadas as principais etapas do método.

De acordo com Chaves (2023), este método é amparado na segunda lei de Newton para determinar as velocidades e acelerações de cada partícula no modelo de simulação. O cálculo da velocidade e acelerações de cada partícula são calculadas com base nas forças que atuam sobre cada partícula. Essas forças incluem não somente as colisões entre partículas, mas também as interações com as superfícies de contorno e a força gravitacional. Com as velocidades e acelerações determinadas, a nova posição (localização) de cada partícula é então atualizada ao longo do tempo. Para simplificar os cálculos, assume-se que essas propriedades permanecem constantes ao longo do pequeno intervalo de tempo escolhido. Essa aproximação

é aceita para manter a eficácia do modelo, dado que os intervalos de tempo são suficientemente pequenos para que mudanças significativas não ocorram durante o cálculo.

Figura 12 - Ciclo de cálculo DEM.



Fonte: Adaptado de Garcia e Emmendorfer, (2019).

Chaves (2023) mostra que a equação do movimento é utilizada para relacionar cada a partícula com a soma das forças que atuam sobre ela. Especificadamente, a cada instante, o equilíbrio de forças é calculado considerando todas as interações que influenciam o comportamento dinâmico de cada elemento do sistema. Para realizar essa análise, utiliza-se o método das diferenças finitas, que permite descontinuar o tempo em pequenos fragmentos. Esse método simula a dinâmica das partículas por permitir que as perturbações induzidas sejam comunicadas entre um elemento e seus vizinhos de maneira eficiente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Objeto de estudo

A melhoria dos levantadores nos secadores rotativos é de grande importância para diminuir o consumo de energia e alcançar um controle mais efetivo sobre a qualidade do produto final, o que é um objetivo prioritário para as indústrias que utilizam tais equipamentos. Devido a essas razões, os pesquisadores realizaram amplas investigações sobre a teoria da

operação, estudos experimentais e numéricos de secadores rotativos (Lominé; Hellou; Roques, 2023).

O desempenho no processo de secagem depende muito do levantador. De fato, é difícil definir diretrizes gerais devido à influência de uma combinação dos seguintes fatores: parâmetros geométricos, características físicas e propriedades específicas do material (Lominé; Hellou; Roques, 2023).

Embora os secadores rotativos sejam frequentemente encontrados em modelos padronizados, a concepção de um secador rotativo com base nas particularidades do material e das necessidades do processo resultará no melhor resultado. Durante o projeto inicial, diversos aspectos do secador são considerados para alcançar os parâmetros desejados do produto final (Feeco, 2025).

Neste estudo, foram realizadas alterações em determinados parâmetros do sistema, visando avaliar como essas mudanças influenciam o aumento da eficiência do sistema. Essas modificações foram selecionadas para explorar diferentes cenários operacionais e identificar configurações que otimizem o desempenho do secador rotativo em termos geométricos. Todos os parâmetros ajustados, bem como o processo de definição e implementação dessas alterações, serão descritos detalhadamente na seção 3.2 - Metodologia Computacional.

É importante observar que algumas partes do sistema não foram utilizadas na simulação, tais como: queimador; câmara de combustão; alimentação da matéria-prima; conjunto de unidade e sistema de exaustão, conforme o subtópico 2.2.2. Isso ocorreu porque a pesquisa tem como finalidade observar o efeito do número de levantadores do sistema associado à velocidade rotacional.

Como visto nos processos de secagem e equipamentos de secagem (subtópicos 2.1 e 2.2, respectivamente) os secadores são utilizados para secagem de diferentes materiais, em especial os granulares. Contudo, no processo industrial existe a possibilidade de partículas de diferentes tamanhos e geometrias entrarem no interior da câmara de secagem em grande quantidade. Portanto, as partículas utilizadas neste trabalho foram definidas com base no estudo realizado por Chaves (2023) que utilizou o sal do tipo churrasco, com uma densidade de 1160 kg/m^3 , módulo de Young de 20 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3. Foram utilizados grãos com formato esférico com diâmetro de 0,01 m (estimado experimentalmente).

Em relação ao funcionamento do tambor, foi necessário utilizar alguns parâmetros de entrada na configuração do software. A gravidade foi configurada conforme o sentido de entrada dos grãos no interior da máquina (eixo -Z); não foram consideradas as resistências provenientes do atrito; não foram consideradas forças adesivas entre tambor e partículas; e não

foi realizada a implementação de modelos térmicos. Por fim, foi considerado que os grãos de sal têm as mesmas propriedades e dimensões, e que não ocorre quebra das partículas durante o processo.

Em relação aos modelos térmicos não utilizados cabe destacar que existem duas maneiras de serem implementados. A primeira utilizando os parâmetros físicos de simulação no RockyDEM, isso ocorre através da ativação térmica e escolha configurações de partículas através do modelo de condução de calor, do modelo de correção de condução e do modelo de integração térmica. Em casos da utilização do SPH também pode ser implementado modelos de condução de calor. Já o segundo método é através da utilização do software Fluenty específico para análise de fluidodinâmica. Esses estudos serão implementados em estudos posteriores.

3.2. Metodologia computacional

Alguns fatores computacionais são essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa; logo este subtópico possui a importância de revelar os fatores computacionais que garantem as análises propostas.

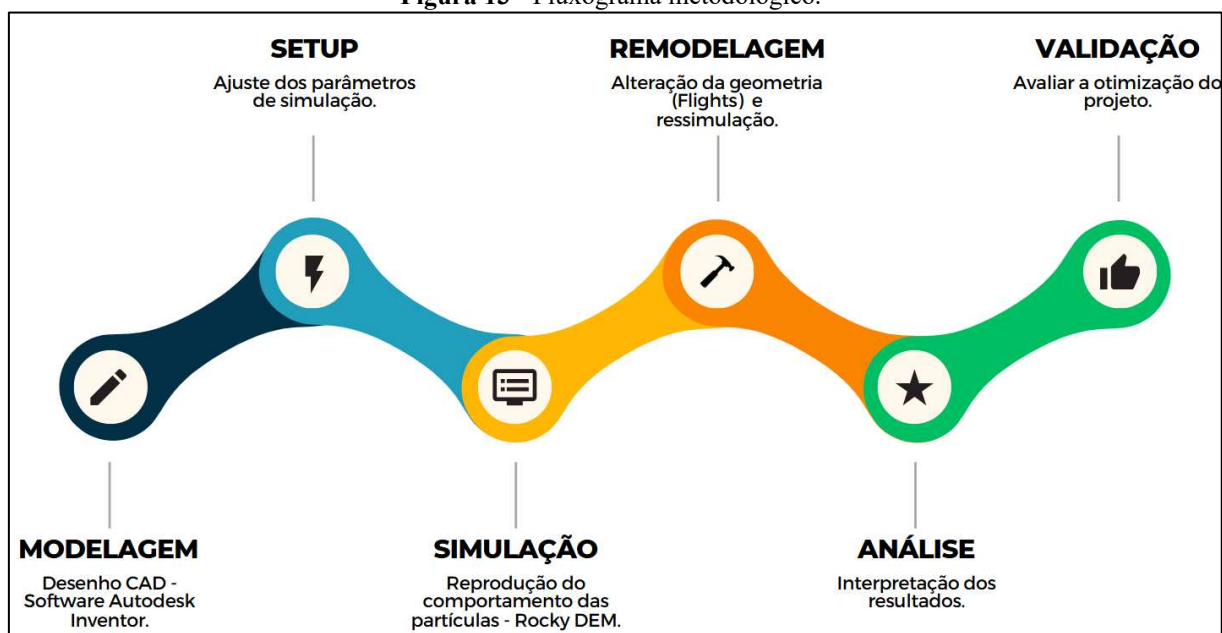
Como é amplamente conhecido, simulações computacionais dinâmicas tendem a ter um tempo de processamento relativamente alto quando comparado com simulações estáticas. Devido a isso, surge a necessidade de utilizar uma máquina com alto desempenho para redução do tempo e dos custos operacionais. Portanto, foi utilizado um notebook com processador Intel Core i7 de 12ª Geração de 2,30 GHz; memória RAM de 16 GB; placa de vídeo NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU; e frequência de memória 4800 MHz.

Nesse estudo não foram considerados colisão de limite, estatísticas de partículas de acoplamento CFD, contatos espectros energéticos, estatísticas de colisão entre grupos, estatísticas de colisão entre partículas/intrapartículas, estatísticas conjuntas, energia instantâneas de partículas, espectros de energias de partículas, estatísticas de interação de limite SPH, taxa de fluxo de massa SPH e estatísticas de interação SPH-DEM.

Para a simulação foram utilizadas 1646 partículas simuladas em um tempo de 20 segundos com frequência de saída de 0,05 segundos sem considerar quebra de partículas.

A Figura 13 apresenta um fluxograma que divide as etapas utilizadas. Cada ponto destacado será discutido detalhadamente a seguir:

Figura 13 - Fluxograma metodológico.



Fonte: Autoria própria, (2024).

O início deste projeto se dá com o processo de modelagem CAD. Nesta etapa a geometria foi modelada e em seguida montada com a utilização do software Autodesk Inventor 2025 - versão estudantil. Com o CAD e a montagem finalizados, o arquivo foi exportado para o software ANSYS Rocky DEM.

A segunda etapa consiste na configuração do *setup* dos parâmetros de projeto no Rocky DEM. Alguns pontos foram considerados: primeiramente, foram selecionadas e organizadas as geometrias a serem estudadas; em seguida os parâmetros físicos de simulação descritos anteriormente foram implementados no software. Seguindo a metodologia de Chaves (2023), foram configuradas as principais definições existentes no software a fim de adequá-las ao objeto de estudo deste trabalho.

A terceira etapa foi a realização das simulações para reproduzir o comportamento bem como o fluxo das partículas no interior da câmara de secagem.

Com a definição do *setup*, foi realizada a primeira simulação experimental teste para entender o funcionamento e a necessidade de alterações. Nesta etapa, foi constatado um tempo médio de 7 dias para a conclusão da simulação, entretanto, é necessário destacar que esta é apenas uma previsão dada nos primeiros minutos de simulação. Inicialmente, observou-se que, devido à quantidade de condições que seriam estudadas, a realização seria inviável, uma vez que demoraria aproximadamente 1 ano (somando o tempo de simulação com o operacional) para a conclusão das simulações. Portanto, alguns fatores foram importantes para a redução desse tempo e viabilização do projeto, os quais serão discutidos nos subtópicos 3.1.2 e 3.2.2.

A quarta etapa consistiu no processo de remodelagem. Essa etapa foi necessária devido a dois principais aspectos: o primeiro foi a construção de uma geometria otimizada e todas as configurações que serão discutidas no subtópico 3.2.1. O segundo aspecto foi a tentativa de minimizar o tempo operacional.

Na quinta etapa foi realizada a análise dos resultados com base no comportamento das partículas no interior do secador bem como nas curvas geradas no software.

Na sexta etapa a validação e escolha da melhor configuração simulada.

3.2.1. Geometria

Com base nos levantamentos bibliográficos realizados, foi possível identificar que a geometria dos levantadores desempenha um papel crucial no padrão de descarga dos sólidos. Esse padrão, por sua vez, influencia diretamente a área de fluxo das partículas no tambor rotativo, afetando o desempenho geral do secador. Contudo, considerando que este estudo tem caráter introdutório, optou-se por utilizar levantadores com geometria do tipo ângulo reto. Essa escolha foi feita para simplificar a análise inicial e estabelecer uma base para estudos futuros que poderão explorar o impacto de outras geometrias mais complexas.

Foi criado um critério que define o número de levantadores a serem analisados com base na divisão de um círculo de 360° em segmentos angulares. A quantidade de levantadores é determinada pela divisão de 360° pelo divisor especificado para cada caso conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Definição da quantidade de levantadores.

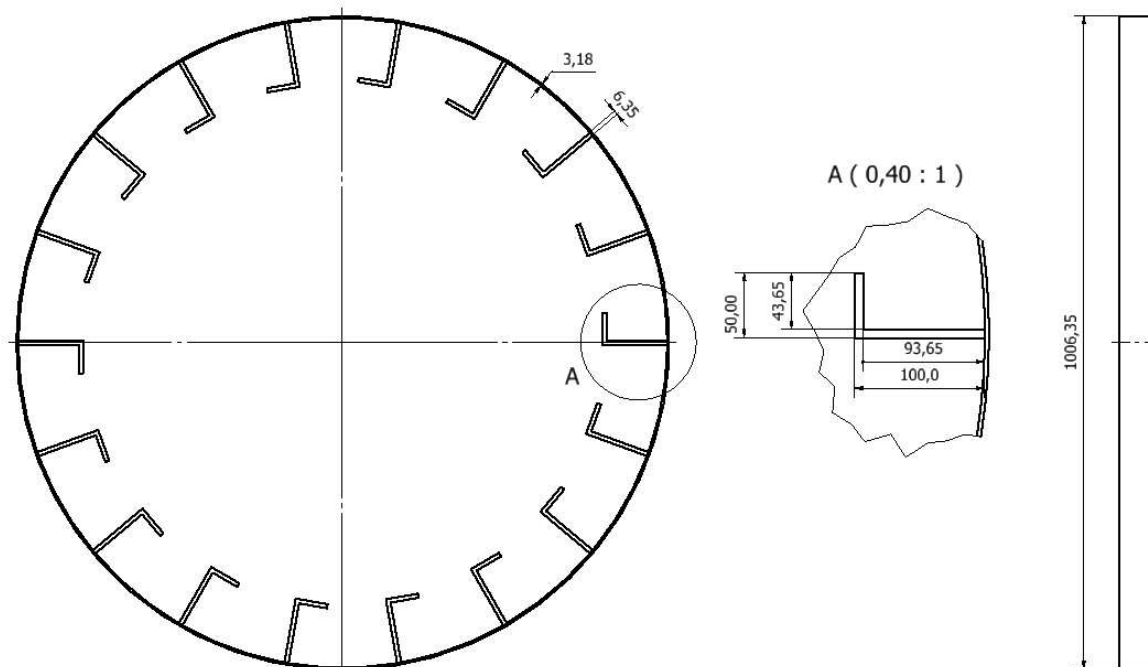
Ângulo base	Operação	Divisor	Quantidade de levantadores
360°	Divisão	60°	6
360°	Divisão	45°	8
360°	Divisão	36°	10
360°	Divisão	30°	12
360°	Divisão	20°	18

Fonte: Autoria própria, (2024).

A Figura 14 apresenta as dimensões do secador de 18 levantadores. Em relação aos secadores com 6, 8, 10 e 12 levantadores, as configurações foram as mesmas para a

modelagem; as diferenças estão apenas no padrão circular utilizado para adequar as demais geometrias mencionadas anteriormente.

Figura 14 - Dimensões geométricas do secador rotativo.



Fonte: Autoria própria (2024).

3.2.2. Velocidade

A velocidade de rotação de um secador é uma métrica importante no processo de secagem, por afetar diretamente a taxa de secagem e a qualidade do produto final. Essas velocidades variam geralmente de 4 a 10 rotações por minuto (rpm), dependendo do tamanho do tambor e das características do material utilizado para a construção. Embora uma velocidade de rotação mais alta acelere o processo de secagem, ela também pode causar danos ao material. Portanto, é necessário regular cuidadosamente a velocidade de rotação para garantir um escoamento eficaz sem comprometer a integridade do produto, uma vez que existem alguns materiais que não podem ter suas características geométricas alteradas durante o processo de secagem (SunRise, 2024).

Entretanto, em 2005, Golato *et al.*, em seu estudo avaliaram sistemas de secadores rotativos para desidratação de casca de limão em uma planta agroindustrial. Eles realizaram testes de medição e desenvolveram um modelo matemático baseado em balanços de massa e energia, explorando uma velocidade de rotação entre 1 e 30 rpm. Esse modelo levou a uma

correlação estatística para prever o coeficiente global de transferência de calor no processo de desidratação.

Para determinar a velocidade de rotação adequada para o secador, é fundamental considerar não apenas a eficiência de escoamento das partículas, mas também aspectos como o consumo energético, os custos operacionais e os impactos ambientais envolvidos, fatores que serão abordados em estudos futuros. Com base na metodologia de Golato (2005), foi desenvolvido um novo critério para a definição das velocidades de operação. Adotou-se uma progressão aritmética iniciando em 2 rpm até 29 rpm, possibilitando uma análise ampla das condições operacionais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento de secadores industriais era predominantemente fundamentado na experiência de fabricantes e em informações de plantas experimentais, com escassa utilização de modelos matemáticos e métodos teóricos. Consequentemente, os secadores eram criados com superdimensionamento e ineficiência, priorizando a confiabilidade mecânica em vez da otimização, mesmo que isso acarrete custos elevados. Essa realidade continua; entretanto, o surgimento de modelos e métodos de simulação tem contribuído para uma melhora. No entanto, desenvolver um modelo universal para secadores rotativos que combine a movimentação das partículas com a transferência de calor e massa ainda representa um obstáculo. Contudo, tais modelos auxiliam na compreensão dos processos individuais e do efeito de cada parâmetro (Krokida; Marinos-Kouris; Mujumdar, 2006).

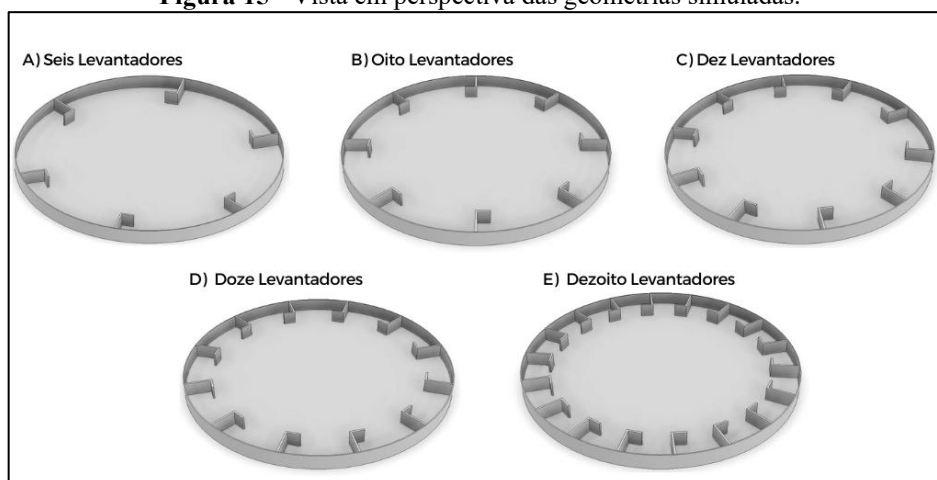
4.1. Geometrias

As Figuras 15 e 16 apresentam as geometrias simuladas dos secadores rotativos com diferentes configurações de levantadores. O objetivo dessas variações foi de analisar o impacto da quantidade de levantadores no comportamento das partículas durante o processo de secagem.

Essas divisões garantem uma distribuição simétrica dos levantadores, fator que influencia diretamente a distribuição das partículas no interior do tambor. A expectativa é que, à medida que o número de levantadores aumenta, a dispersão de partículas seja mais eficiente, o que justifica a comparação entre diferentes geometrias ao longo do estudo.

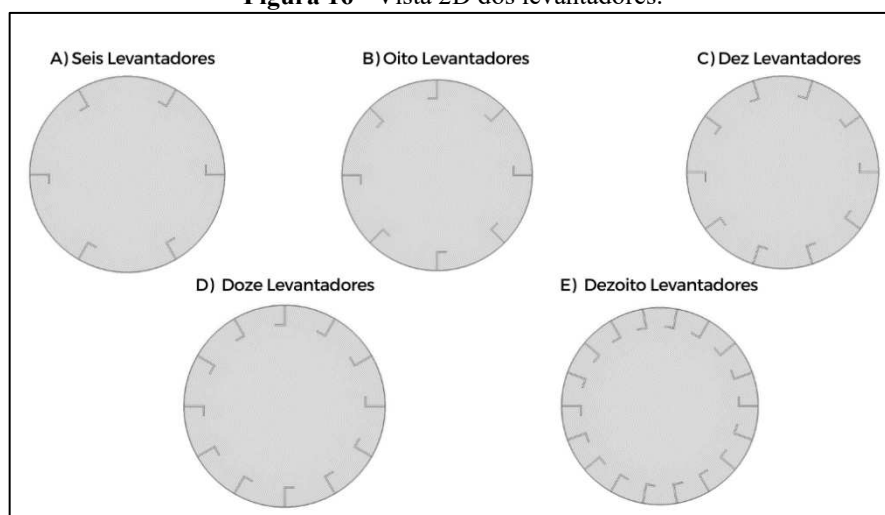
No entanto, a análise das diferentes geometrias com diferentes variações de levantadores não depende apenas da quantidade e distribuição, mas também da interação com outros parâmetros operacionais, como a velocidade de rotação do tambor. A velocidade influencia diretamente no comportamento das partículas dentro do secador, afetando o tempo de residência das partículas. Dessa forma, o estudo da velocidade associada à geometria torna-se essencial para avaliar como diferentes rotações impactam o desempenho da secagem em cada configuração geométrica simulada.

Figura 15 - Vista em perspectiva das geometrias simuladas.



Fonte: Autoria própria, (2025).

Figura 16 - Vista 2D dos levantadores.



Fonte: Autoria própria, (2025).

4.2. Influência das velocidades nas geometrias

Os intervalos criados a partir da progressão aritmética possibilitam a análise de diferentes cenários desde baixas velocidades, com uma menor energia cinética das partículas, até condições de rotação elevadas que tendem a exercer influência no sistema. Com isso, torna-se possível observar como o aumento da rotação influencia a distribuição das partículas, o tempo de residência e, por consequência o aumento de eficiência. O resultado da progressão aritmética utilizada pode ser visualizado na Tabela 3.

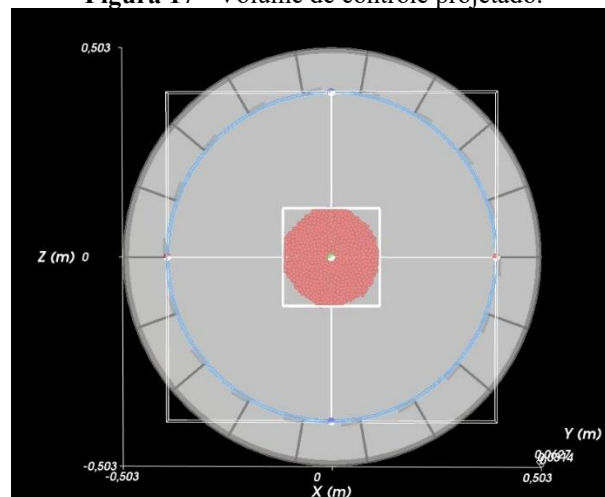
Tabela 3 - Progressão aritmética.

rpm									
2	5	8	11	14	17	20	23	26	29

Fonte: Autoria própria, (2025).

Um volume de controle (círculo azul presente na figura) foi estabelecido para quantificar a passagem das partículas pelo centro do secador conforme a Figura 17, sendo o critério primordial para avaliar a eficiência qualitativa do processo de secagem em estudo, uma vez que, quanto mais partículas estiverem passando por esse volume maior será a troca de calor e massa das partículas, aumentando a eficiência de secagem. A massa em vermelho representa a posição das partículas no tempo inicial.

Figura 17 - Volume de controle projetado.



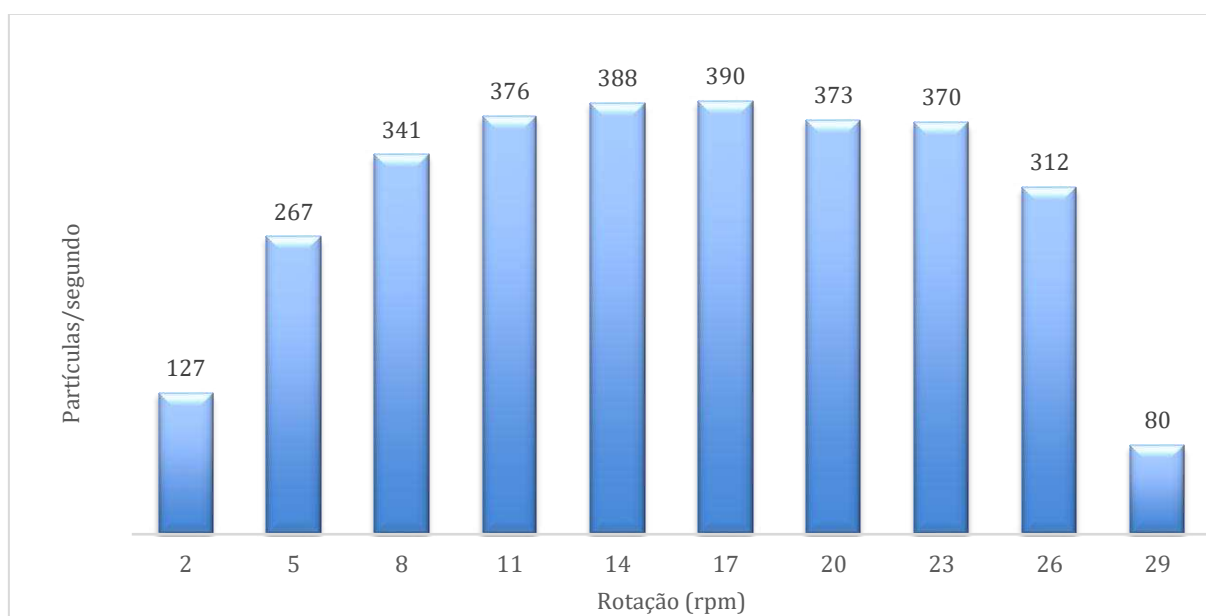
Fonte: Autoria própria, (2025).

4.2.1. Análise da velocidade para a geometria de seis levantadores

O Gráfico 1 representa a quantidade de partículas que passam pelo volume de controle (VC) por segundo (p/s) na geometria com seis levantadores, indicando a relação entre a quantidade média de partículas que atravessam o volume de controle por segundo e a rotação do tambor. O comportamento observado foi típico de um sistema rotativo de secagem, pois à medida que a rotação aumenta, inicialmente ocorre um crescimento da taxa de escoamento, seguido por um pico de desempenho e, posteriormente, uma queda acentuada no fluxo. Esse fato está diretamente relacionado com as forças centrífugas e gravitacionais que atuam no interior do tambor.

Ao analisar o padrão apresentado, é possível perceber que o fluxo muda de acordo com determinadas faixas de rotação. A primeira faixa está entre 2 rpm e 8 rpm, na qual ocorre um aumento progressivo do fluxo de partículas, passando de 127 partículas por segundo (p/s) a 2 rpm para 341 p/s a 8 rpm. Esse crescimento ocorre em decorrência de uma baixa rotação, pois há uma melhor efetivação no processo de transporte de partículas, favorecendo a criação de uma maior área de secagem. A velocidade ainda é relativamente baixa, o que favorece o desprendimento das partículas no interior da geometria dos levantadores, contribuindo significativamente para a maximização da quantidade de partículas que passam pelo VC.

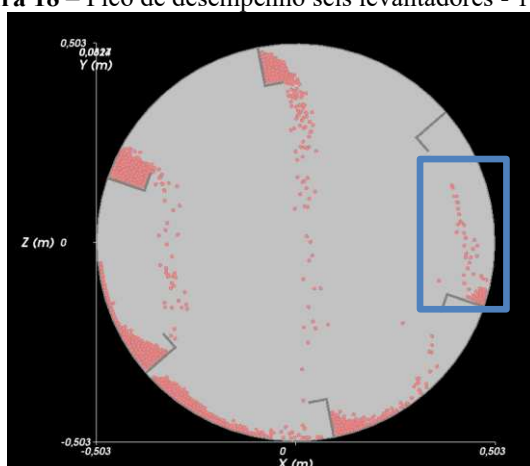
Gráfico 1 - P/s no VC de seis levantadores.



Fonte: Autoria própria, (2025).

Entre 11 rpm e 17 rpm, o sistema atinge a maior quantidade de partículas que passam pelo volume de controle (VC), com valores entre 376 e 390 partículas por segundo (p/s), representando um aumento de 3,7% na quantidade de partículas. Esse último valor corresponde ao pico do sistema. Esta faixa é chamada de ponto ótimo do sistema, pois existe o melhor equilíbrio na elevação e liberação de partículas. A Figura 18 mostra a o fluxo na rotação de 17 rpm no tempo de 19,6 s de simulação. Nela, apesar de ser o ponto com o melhor fluxo, é possível observar, na parte destacada, uma área de sobreposição de levantadores, o que diminui o tempo de residência das partículas e, conseqüentemente, o fluxo de ar entre as partículas.

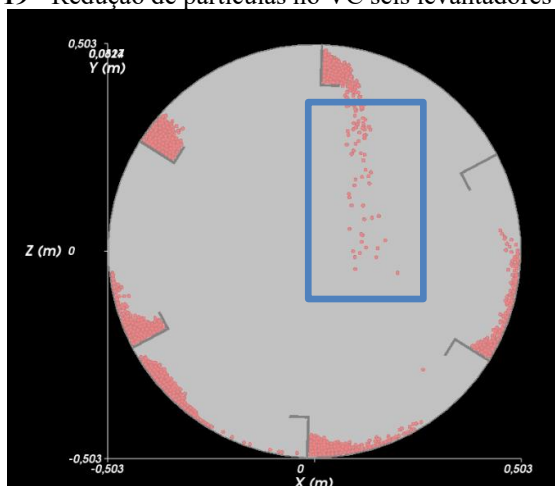
Figura 18 – Pico de desempenho seis levantadores - 17 rpm.



Fonte: Autoria própria, (2025).

A partir de 20 rpm, os resultados apresentam uma tendência de queda de desempenho. Em 20 rpm e 23 rpm, os resultados apresentados ainda representam uma alta eficiência (373 e 370 p/s, respectivamente), mas já demonstram uma pequena redução no valor. A partir de 26 rpm (312p/s), a perda de eficiência se torna mais acentuada, indicando que a ação de altas velocidades dificulta a passagem de partículas no VC. A Figura 19 mostra a rotação de 26 rpm, nela é possível observar uma redução na quantidade de partículas se movimentando pelo VC. Além disso, zonas de sobreposição ainda não são tão evidentes. Este fato resulta em uma diminuição da interação com o fluxo de ar (caso existisse) e, conseqüentemente, em uma redução da eficiência do sistema.

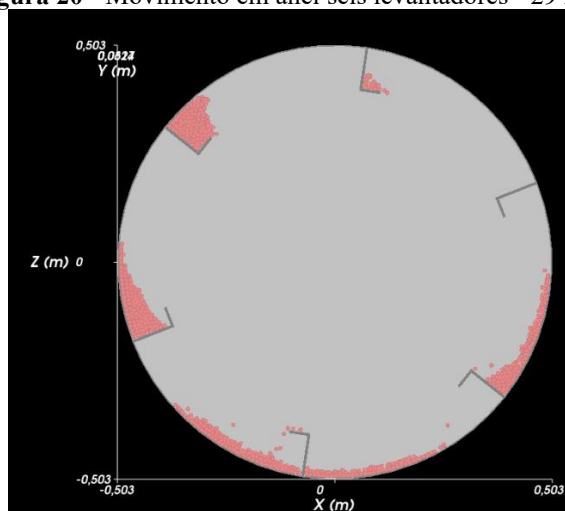
Figura 19 - Redução de partículas no VC seis levantadores - 26 rpm.



Fonte: Autoria própria, (2025).

Por fim, na rotação de 29 rpm ocorre uma queda substancial para 80 p/s. Conforme a Figura 20, é possível perceber a diminuição das partículas passando pelo VC em altas rotações.

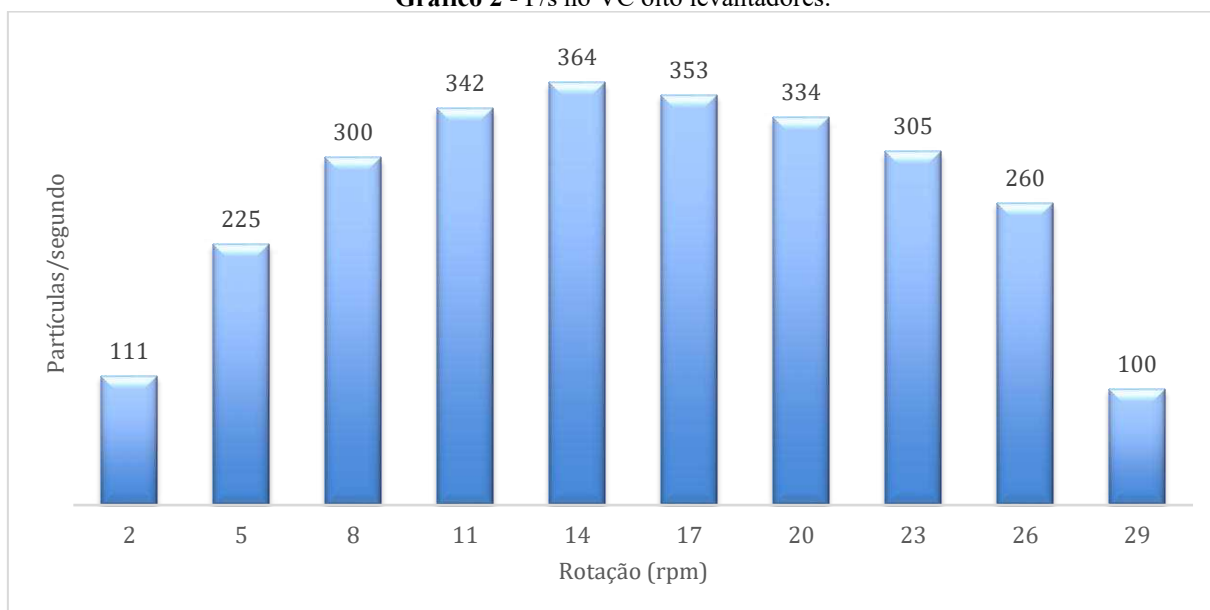
Figura 20 - Movimento em anel seis levantadores - 29 rpm.



Fonte: Autoria própria, (2025).

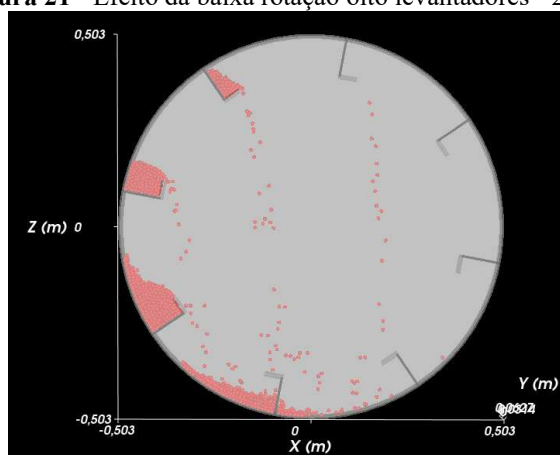
4.2.2. Análise da velocidade para a geometria de oito levantadores

O Gráfico 2 representa a quantidade de partículas que passam pelo VC da geometria com oito levantadores. O padrão observado foi semelhante ao da configuração anterior; nota-se um crescimento de eficiência até um ponto ótimo, em seguida, uma queda de desempenho em decorrência do aumento da rotação do sistema.

Gráfico 2 - P/s no VC oito levantadores.

Fonte: Autoria própria (2025).

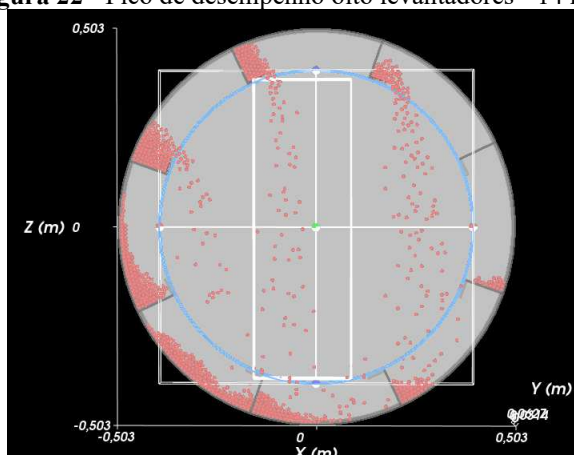
Na rotação de 2 rpm é possível observar o menor fluxo de partículas, com 111 p/s. esse fato pode ocorrer pela baixa rotação do sistema, que resulta em uma elevação mais demorada e uma menor queda de partículas. A Figura 21 mostra o efeito da baixa rotação (2 rpm) na configuração com oito levantadores, ao longo do tempo de simulação de 19,6 segundos. O desempenho melhora com o aumento da rotação, atingindo 225 p/s a 5 rpm, 300 p/s a 8 rpm e 342 p/s a 11 rpm.

Figura 21 - Efeito da baixa rotação oito levantadores - 2 rpm.

Fonte: Autoria própria (2025).

O maior desempenho ocorre na velocidade de 14 rpm, com 364 p/s. A Figura 22 mostra o VC para contagem de partículas da rotação de 14 rpm no tempo de simulação de 19,6 s. Após esse ponto, um declínio gradual na eficiência.

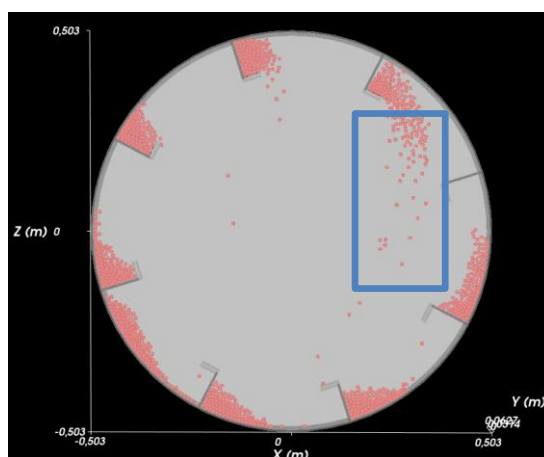
Figura 22 - Pico de desempenho oito levantadores - 14 rpm.



Fonte: Autoria própria, (2025).

Novamente ocorre a queda acentuada em altas rotações, explicada pela influência da velocidade sobre o movimento de queda livre das partículas. Com isso, os grãos tendem a permanecer dentro da área dos levantadores, reduzindo a eficiência de secagem. A Figura 23 ilustra a ação da velocidade em 29 rpm no tempo de simulação de 19,6 s. Através da imagem é possível ainda observar que praticamente não ocorre secagem na região central. As zonas de secagem tendem a ser vistas nas laterais do tambor, conforme destacado na imagem, diminuindo a quantidade de partículas passando pelo VC.

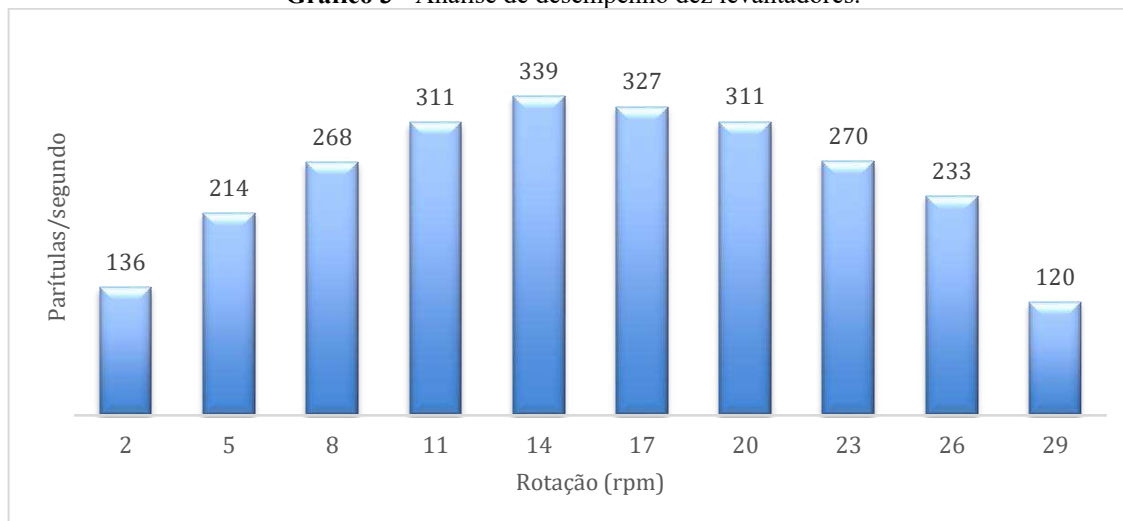
Figura 23 - Acúmulo de partículas oito levantadores - 29 rpm.



Fonte: Autoria própria, (2025).

4.2.3. Análise da velocidade para a geometria de dez levantadores

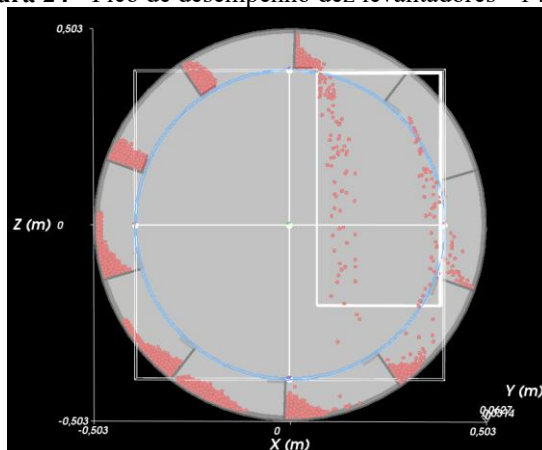
O Gráfico 3 representa a quantidade de partículas que passam pelo VC para a configuração de dez levantadores.

Gráfico 3 - Análise de desempenho dez levantadores.

Fonte: Autoria própria, (2025).

Na rotação de 2 rpm, a quantidade de p/s é a menor observada (136 p/s), o que é característico de um movimento de rotação lento, com pouca elevação e recirculação do material. À medida que a rotação é aumentada, o escoamento melhora consideravelmente, atingindo 214 p/s a 5 rpm, 268 p/s a 8 rpm e 311 p/s a 11 rpm.

O maior valor de partículas observada foi a 14 rpm, com 339 p/s, representando o ponto de maior eficiência do sistema para a configuração de dez levantadores. A partir desse ponto, há uma leve queda aos 17 rpm (327 p/s) e aos 20 rpm (311 p/s), ainda apresentando um bom desempenho. A simulação que apresentou a melhor eficiência de secagem pode ser vista na Figura 24 no tempo de simulação de 19,6 s. Em 23 rpm e 26 rpm, apresentou 270 p/s e 233 p/s, respectivamente. Em 29 rpm, o mesmo padrão de queda brusca foi observado, passando apenas 120 p/s no VC.

Figura 24 - Pico de desempenho dez levantadores - 14 rpm.

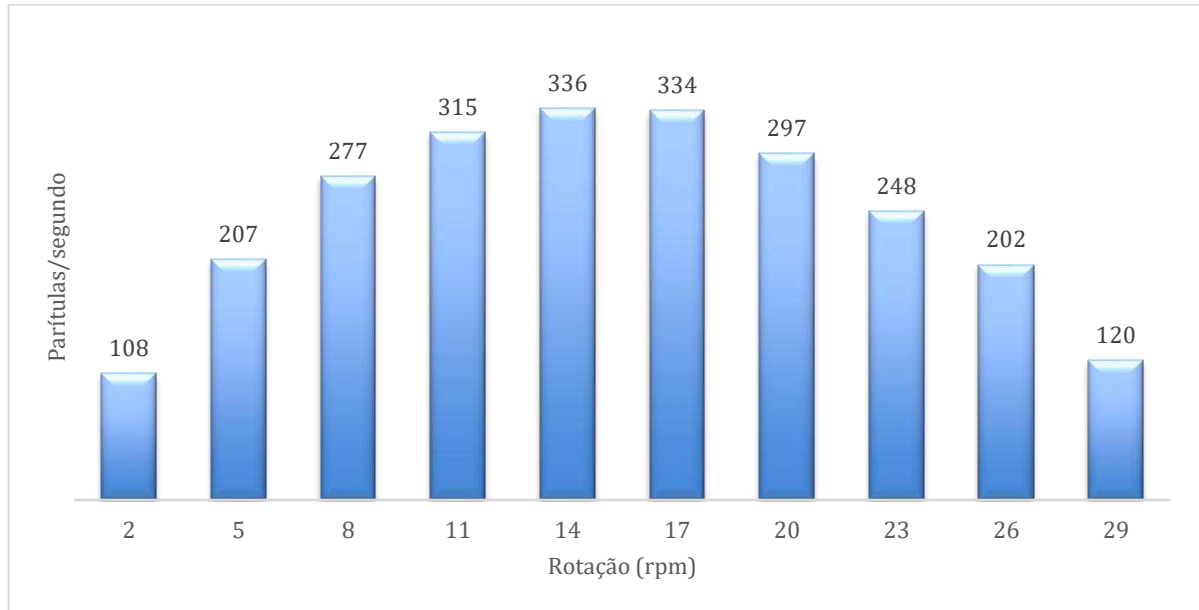
Fonte: Autoria própria, (2025).

4.2.4. Análise da velocidade para a geometria de doze levantadores

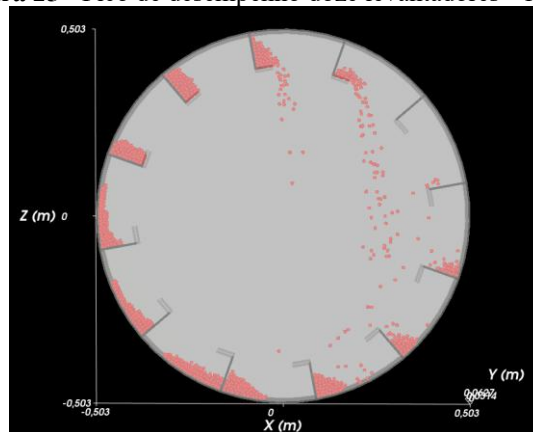
O Gráfico 4 representa a quantidade de partículas que passam pelo VC para a configuração de 12 levantadores.

Em 2 rpm, o VC contabilizou um total de 108 p/s indicando que poucas partículas passaram pelo VC. Com o aumento da rotação, o fluxo de partículas aumentou de forma progressiva: 207 p/s para 5 rpm, 277 para 8 rpm e 315 p/s para 11 rpm.

A maior eficiência de secagem conforme a Figura 25 no tempo de simulação de 19,6 s, ocorreu em 14 rpm, com 336,3 p/s. A rotação de 17 rpm, apresentou um resultado bem próximo ao anterior, com um total de 334 p/s. Após a rotação de 17 rpm a eficiência diminuiu de forma mais abrupta.

Gráfico 4 - P/s no VC doze levantadores.

Fonte: Autoria própria, (2025).

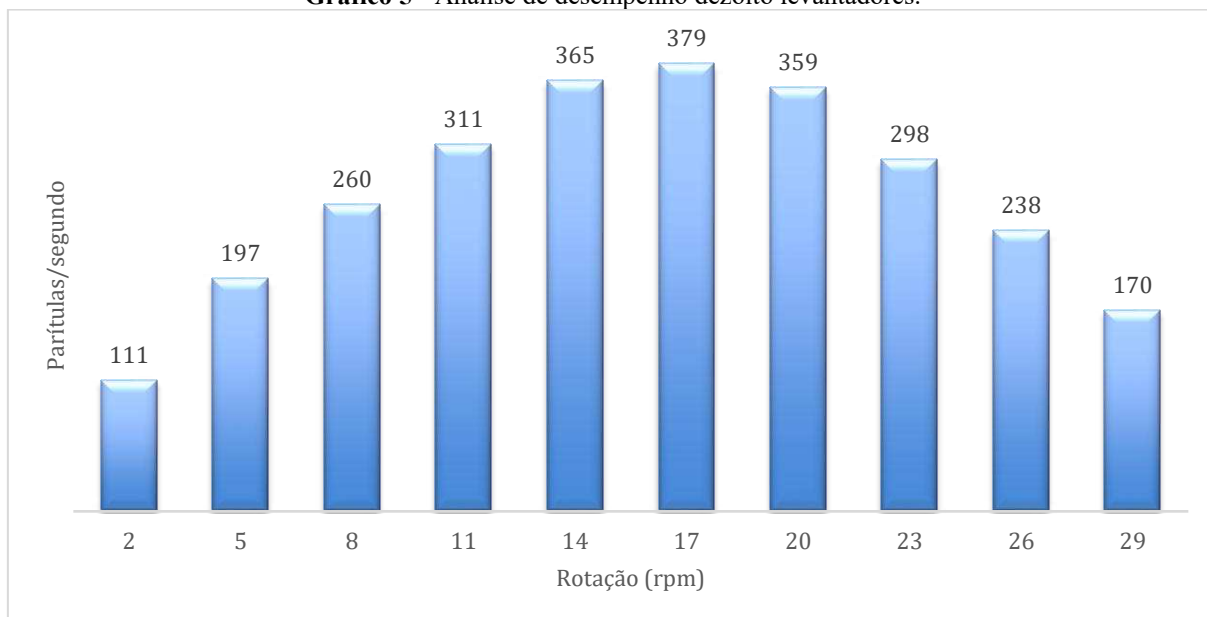
Figura 25 - Pico de desempenho doze levantadores - 14 rpm.

Fonte: Autoria própria, (2025).

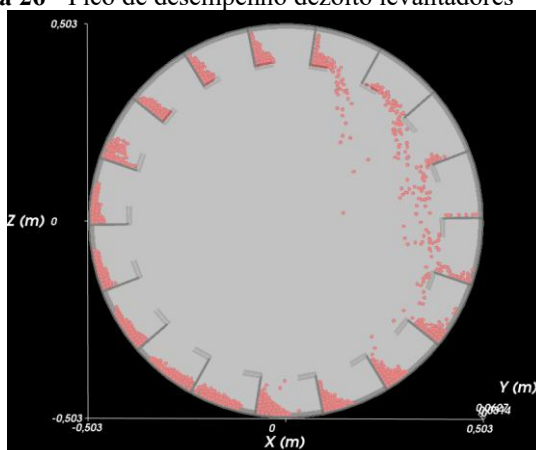
4.2.5. Análise da velocidade para a geometria de dezoito levantadores

A partir da análise do Gráfico 5, é possível observar o melhor desempenho entre todas as simulações realizadas, tendo em vista que apresentou a maior quantidade de p/s. O gráfico apresenta linearidade tanto no aumento quanto na queda de eficiência.

A eficiência máxima desta configuração ocorre na rotação de 17 rpm, conforme a Figura 26, com uma vazão de 379 p/s. A partir desse ponto, torna-se notório a redução de eficiência com o aumento da rotação.

Gráfico 5 - Análise de desempenho dezoito levantadores.

Fonte: Autoria própria, (2025).

Figura 26 - Pico de desempenho dezoito levantadores - 17 rpm.

Fonte: Autoria própria, (2025).

4.3. Influência da geometria com rotação constante

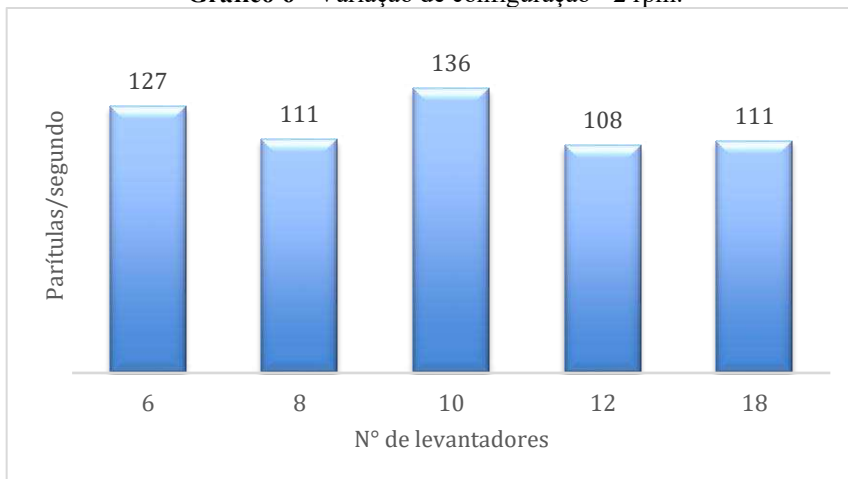
Com a necessidade de isolar o impacto da geometria no comportamento de secagem, foi realizada a análise com rotação constante, variando o número de levantadores.

4.3.1. Análise do comportamento para a velocidade de rotação de 2 rpm

Para a rotação de 2 rpm, conforme mostrado no Gráfico 6, os resultados indicaram que a configuração com 10 levantadores apresentou o maior número de partículas passando pelo volume de controle, com 136 p/s; em seguida pela geometria com 6 levantadores, com 127 p/s.

As geometrias de 8, 12 e 18 levantadores apresentaram valores bem próximos, em torno de 111 p/s.

Gráfico 6 - Variação de configuração - 2 rpm.

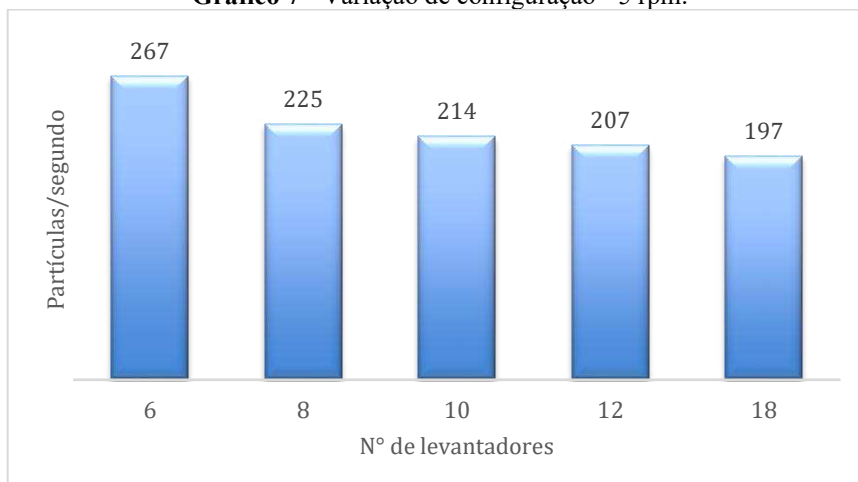


Fonte: Autoria própria, (2025).

4.3.2. Análise do comportamento para a velocidade de rotação de 5 rpm

Para a rotação de 5 rpm, conforme o Gráfico 7, os resultados mostraram que a configuração com 6 levantadores apresentou um maior número de partículas passando pelo volume de controle, sendo 267 p/s. Em seguida, observaram-se as configurações com 8 levantadores (225 p/s), 10 levantadores (214 p/s), 12 levantadores (207 p/s) e, por fim, 18 levantadores, com 197 p/s.

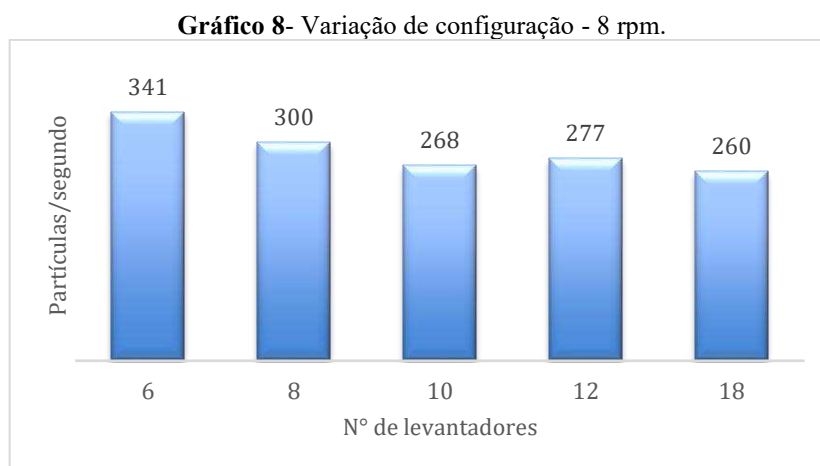
Gráfico 7 - Variação de configuração - 5 rpm.



Fonte: Autoria própria, (2025).

4.3.3. Análise do comportamento para a velocidade de rotação de 8 rpm

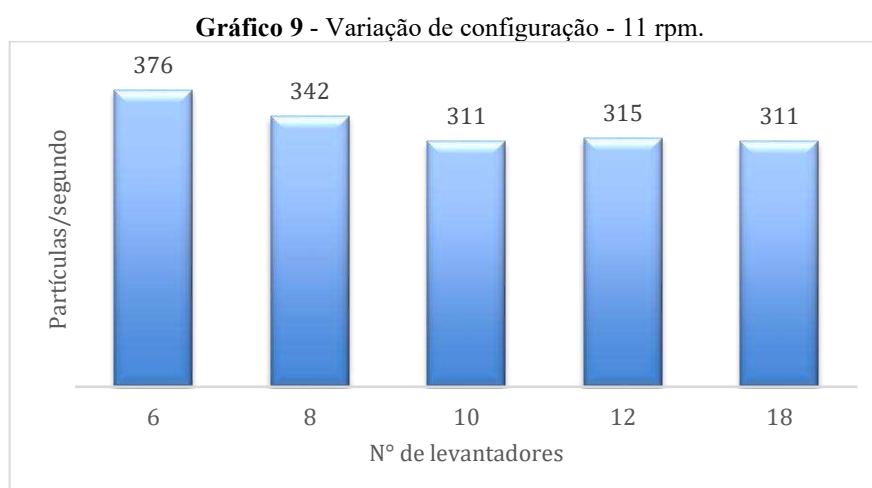
Para a rotação de 8 rpm, conforme o Gráfico 8, os resultados demonstraram que a configuração com 6 levantadores apresentou um maior número de partículas passando pelo volume de controle, sendo 341 p/s.



Fonte: Autoria própria, (2025).

4.3.4. Análise do comportamento para a velocidade de rotação 11 rpm

Em relação a rotação de 11 rpm, conforme o Gráfico 9, os resultados demonstraram que a configuração com 6 levantadores apresentou um maior número de partículas passando pelo volume de controle, sendo 376 p/s. Na sequência, observaram-se as configurações com 8 levantadores (342 p/s), 10 levantadores (315 p/s), 12 levantadores (311 p/s) e, por fim, 18 levantadores, com 311 p/s.



Fonte: Autoria própria, (2025).

4.3.5. Análise do comportamento para a velocidade de rotação 14 rpm

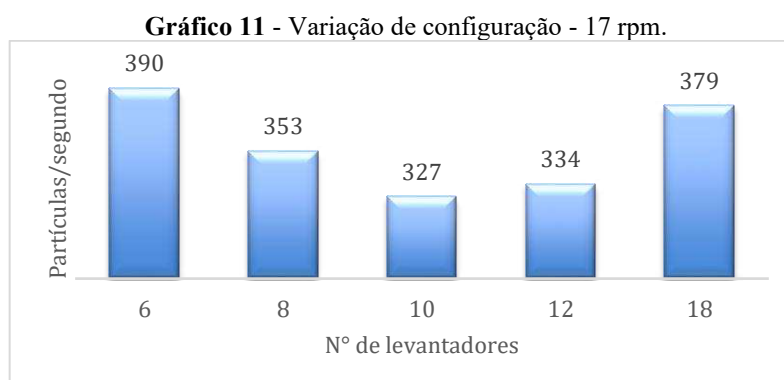
Para a rotação de 14 rpm, conforme o Gráfico 10, os resultados mostraram que a configuração com 6 levantadores apresentou o maior número de partículas passando pelo volume de controle, sendo 388 p/s. Em ordem decrescente, observaram-se as configurações com 18 levantadores (365 p/s), 8 levantadores (364 p/s), 10 levantadores (339 p/s) e, por fim, 12 levantadores, com 336 p/s.



Fonte: Autoria própria, (2025).

4.3.6. Análise do comportamento para a velocidade de rotação 17 rpm

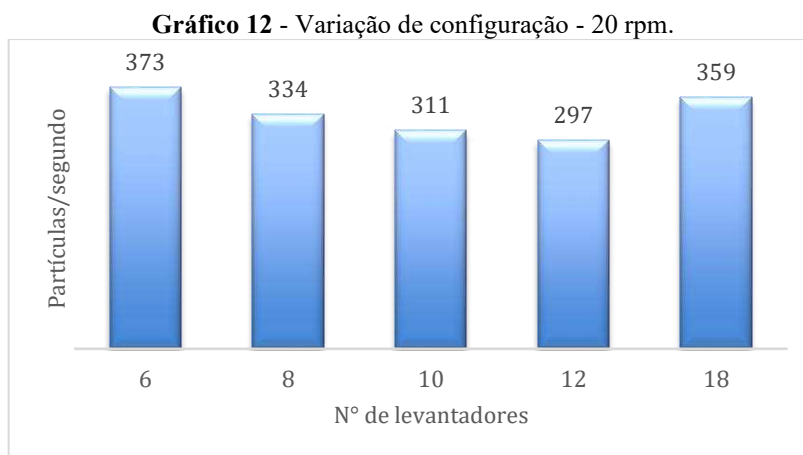
Para a rotação de 17 rpm, conforme o Gráfico 11, os resultados demonstraram que a configuração com 6 levantadores apresentou o maior número de partículas passando pelo volume de controle, sendo 390 p/s. Sequencialmente, observaram-se as configurações com 18 levantadores (379 p/s), 8 levantadores (353 p/s), 12 levantadores (334 p/s) e, por fim, 10 levantadores (327 p/s).



Fonte: Autoria própria, (2025).

4.3.7. Análise do comportamento para a velocidade de rotação 20 rpm

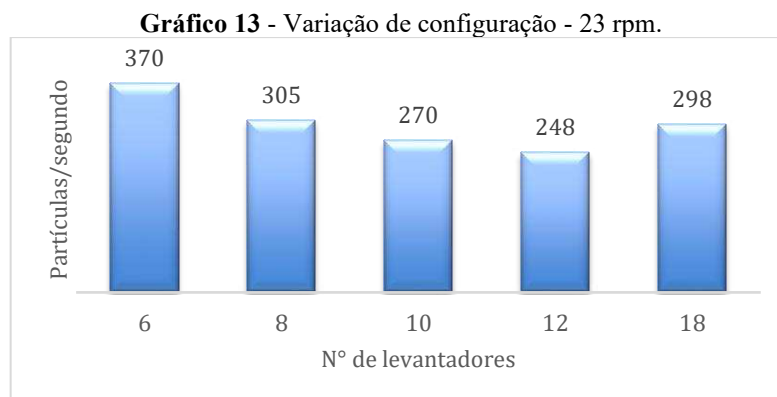
Em relação a rotação de 20 rpm, conforme o Gráfico 12, os resultados demonstraram que a configuração com 6 levantadores apresentou o maior número de partículas passando pelo volume de controle, sendo 373 p/s.



Fonte: Autoria própria, (2025).

4.3.8. Análise do comportamento para a velocidade de rotação 23 rpm

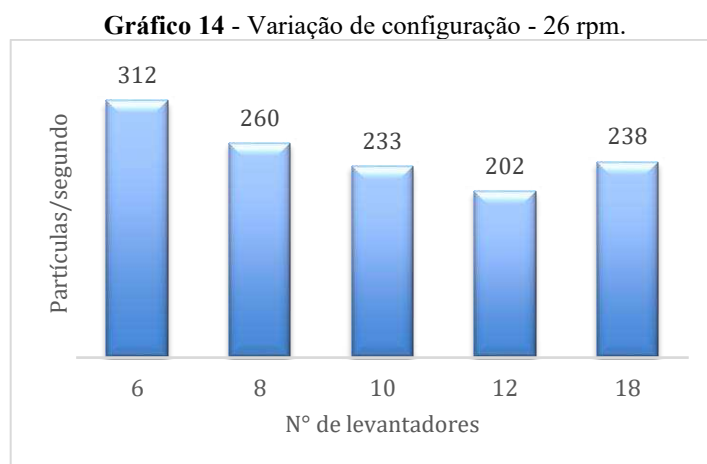
Na rotação de 23 rpm, conforme o Gráfico 13, os resultados demonstraram novamente que a configuração com 6 levantadores apresentou um maior número de partículas passando pelo volume de controle, sendo 370 p/s.



Fonte: Autoria própria, (2025).

4.3.9. Análise do comportamento para a velocidade de rotação de 26 rpm

Na rotação de 26 rpm, conforme o Gráfico 14, os resultados demonstraram que a configuração com 6 levantadores apresentou o maior número de partículas passando pelo volume de controle, totalizando 312 p/s.



Fonte: Autoria própria, (2025).

4.3.10. Análise do comportamento para a velocidade de rotação 29 rpm

Para a última análise, a rotação de 29 rpm, conforme o Gráfico 15, os resultados mostraram que a configuração com 18 levantadores apresentou o maior número de partículas passando pelo volume de controle, totalizando 170 p/s. Em seguida, observaram-se as configurações com 10 e 12 levantadores, 8 levantadores e, por fim, 6 levantadores.

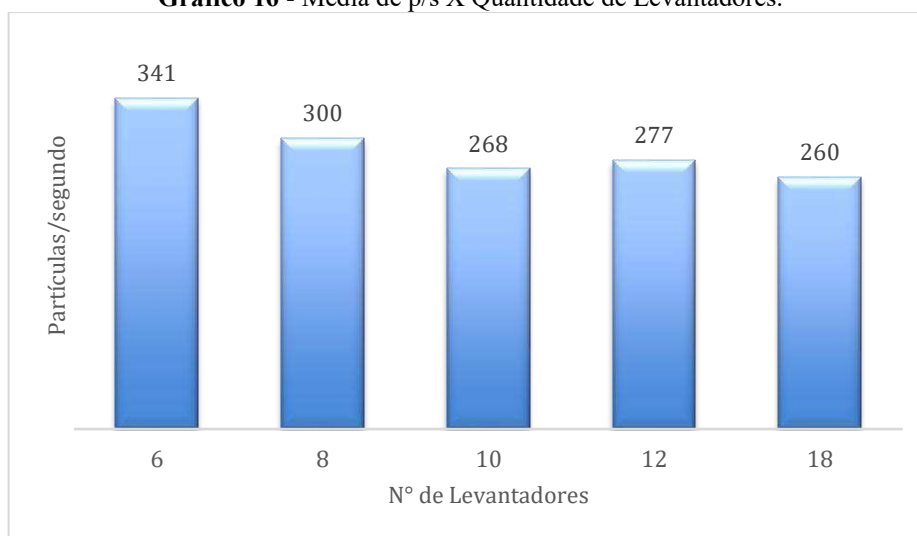


Fonte: Autoria própria, (2025).

4.4. Análise geral

O Gráfico 16 apresenta o comportamento da média de partículas que passaram pelo volume de controle em função da quantidade de levantadores instalados no sistema. O valor encontrado corresponde à média de partículas por segundo entre as velocidades 2 rpm e 14 rpm. Essa faixa foi selecionada para minimizar o efeito da sobreposição que ocorre em altas rotações.

Gráfico 16 - Média de p/s X Quantidade de Levantadores.



Fonte: Autoria própria, (2025).

Com a configuração de 6 levantadores, ocorreu o maior fluxo médio de partículas, sendo 341 p/s. Este resultado demonstra que o fluxo das partículas no interior do secador é otimizado, o que proporciona uma melhor eficiência de secagem do material. Observa-se que a eficiência de secagem e a área de secagem são favorecidas com uma quantidade reduzida de levantadores.

À medida que o número de levantadores aumenta para 8, ocorre uma queda significativa no fluxo médio, reduzindo para 300 p/s. Esse padrão de redução continua com as configurações de 10 e 12 levantadores, cujos os valores são de 268 e 277 p/s, respectivamente. Observa-se proximidade entre os dois valores, o que pode indicar um ponto de equilíbrio em que essa diferença específica no acréscimo de levantadores já não influencia significativamente a eficiência de secagem relativamente ao fluxo de partículas no volume de controle. A razão pela qual a configuração com 12 levantadores apresentou o maior valor pode estar relacionada a um equilíbrio da distribuição geométrica com a rotação do sistema.

Por fim, com 18 levantadores, foi observado o menor valor entre as simulações, apresentando uma média de 260 p/s. Este resultado permite compreender que o excesso de levantadores pode comprometer a fluidez do sistema, gerando retenções excessivas de

partículas, uma vez que a sobreposição de levantadores ocorre com maior facilidade mesmo em baixas rotações.

Com base na interpretação do Gráfico 16 a sugestão para o número de levantadores ideal que contribui para o escoamento mais eficiente de partículas em um secador rotativo. Compreende-se que uma quantidade insuficiente do número de levantadores pode comprometer a eficiência de secagem, enquanto o excesso pode gerar sobreposições e redução da taxa de escoamento, prejudicando o processo de secagem como um todo.

Evidentemente, a melhor configuração foi a de 6 (seis) levantadores. O fato de um número reduzido de levantadores ser mais eficiente suscita ainda outras análises relacionadas a questões econômicas para a execução do projeto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho não aborda o mérito relacionado ao detalhamento de orçamento, mas reconhece-se que, quanto menor a quantidade de levantadores, menor será o custo do material utilizado na produção.

Além disso, é possível que componentes como motor e os sistemas de acionamento possam ser dimensionados com menor potência, uma vez que o esforço necessário para retirar o sistema da inércia e movimentar o conteúdo interno tende a ser reduzido com o menor peso dos elementos internos.

Essa redução provoca ainda um menor consumo de energia elétrica, o que representa uma vantagem significativa, pois se trata de uma aplicação industrial que normalmente opera por longos períodos de tempo.

A etapa de projeto e simulação possui um papel fundamental quando se busca alinhar eficiência de secagem e economia. Através da simulação foi possível prever o comportamento do escoamento das partículas no interior do equipamento, identificar gargalos operacionais e testar diferentes configurações sem a necessidade de construir vários protótipos físicos, o que representa uma economia significativa de tempo e recursos.

Além disso, o uso de ferramentas de simulação CAD e DEM permitem antecipar decisões de projeto, como o número ideal de levantadores, o diâmetro do tambor, a rotação e outras variáveis operacionais que impactam diretamente na eficiência de secagem e no consumo energético. Dessa forma, a engenharia assistida por computador ganha ênfase, uma vez que o projeto baseado em modelagem computacional é indispensável para o dimensionamento e otimização de secadores industriais.

As análises foram especialmente relacionadas a uma análise puramente cinemática. Portanto, verificou-se que a quantidade de levantadores influencia significativamente a dinâmica de movimentação das partículas. Configurações com um menor número de levantadores resultaram em uma maior zona de secagem, enquanto quantidades excessivas, provocaram uma zona de secagem menor. A configuração com 6 levantadores demonstrou o melhor desempenho geral, atingindo 390 p/s a 17 rpm.

Na rotação de 29 rpm, observou-se que o aumento do número de levantadores resultou em uma maior quantidade de partículas passando pelo volume de controle, indicando que, em altas rotações, uma geometria com mais levantadores favorece o escoamento do material. A inversão de comportamento corrobora a necessidade de análises posteriores de forma a detalhas o efeito de altas rotações associadas ao excesso de levantadores.

Portanto, os resultados obtidos a partir do uso destes métodos, realizados variando a rotação, permitiram uma melhor avaliação do comportamento das partículas no interior do secador. Por meio desta análise, foi possível identificar que a rotação exerce uma influência significativa no escoamento do material, com desempenho aceitáveis na entre 11 e 17 rpm. Entretanto, a melhor velocidade de rotação foi de 14 rpm. Por outro lado, rotações abaixo deste faixa resultaram em uma baixa movimentação de partículas. Por outro lado, rotações superiores a 20 rpm tendem a ser afetados pelo efeito centrífugo de forma significativa, onde as partículas ficam aderidas às paredes do tambor, diminuindo a quantidade de partículas que passam pelo volume de controle.

Este estudo contribui tanto para a compreensão do comportamento das partículas no secador rotativo, quanto para fornecer subsídios para outras aplicações da engenharia mecânica, com a incorporação da análise térmica e de fluxo de ar utilizando outros softwares de simulação.

REFERÊNCIAS

AHMED, Naseer *et al.* **Different Drying Methods: Their Applications and Recent Advances**. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/275650176>. Acesso em: 20 mar. 2025.

ALTAIR. **What is DEM Theoretical background behind the Discrete Element Method (DEM)**. 2025. Disponível em: https://altair.com/docs/default-source/resource-library/ebook_what_is_dem_theoretical_background_behind_the_discrete_element_method.pdf?sfvrsn=975cfcf1_3. Acesso em: 05 abr. 2025.

BIOLAB. **Operation Manual: drying oven. Drying Oven**. Disponível em: <https://www.biolabsscientific.com/content/manuals/BODR-101,%20BODR-102,%20BODR-103,%20BODR-104.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2024.

CAPITAINE, Shane Le; CARLSON, Carrie (b). **Rotary Dryer Parts and Components Glossary**. 2024. Disponível em: <https://feeco.com/rotary-dryer-parts-components-glossary/>. Acesso em: 22 nov. 2024.

CAPITAINE, Shane Le; CARLSON, Carrie (a). **Indirect Drying vc. Direct Drying**. 2024. Disponível em: <https://feeco.com/rotary-dryers-indirect-vs-direct-drying/>. Acesso em: 22 nov. 2024.

CELESTINO, Sonia Maria Costa. **Princípios de secagem de Alimentos**. 2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/883845/1/doc276.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2025.

CHAVES, Francisco Samuel. **OTIMIZAÇÃO VIA ELEMENTOS DISCRETOS DE FLUXO PARTICULADO EM TRANSPORTADOR HELICOIDAL**. 2023. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2023.

CHONG, Chien Hwa; *et al.* **Aromatic Herbs in Food: bioactive compounds, processing, and applications**. Chania: Academic Press, 2021. Cap. 5. p. 167-200.

DEVAHASTIN, Sakamon; MUJUMDAR, Arun S.. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Singapura: Llc, 2006. Cap. 6. p. 137-148.

FEECO. **The Rotary Dryer Handbook**. 2025. Disponível em: <https://feeco.com/wp-content/uploads/2022/07/The-FEECO-Rotary-Dryer-Handbook.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2025.

GAIDHANI, Kunal A.; *et al.* **LYOPHILIZATION / FREEZE DRYING - A REVIEW**. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/292047227_LYOPHILIZATION_FREEZE_DRYING_-_A_REVIEW. Acesso em: 19 nov. 2024.

GARCIA, Luciano Garim; EMMENDORFER, Leonardo. **O ALGORITMO ESPECTRAL COMO ALTERNATIVA AO ALGORITMO K-MEANS EM CONJUNTO DE DADOS ARTIFICIAIS.** Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/333365995_O_ALGORITMO_ESPECTRAL_CO_MO_ALTERNATIVA_AO_ALGORITMO_K-MEANS_EM_CONJUNTO_DE_DADOS_ARTIFICIAIS. Acesso em: 23 mar. 2025.

JAIN, D.; Tiwari, G. N. (2003). **Thermal aspects of open sun drying of various crops.** Energy, 28(1), 37–54. doi:10.1016/s0360-5442(02)00084-1

JANGAM, Sachin Vinayak; LAW, Chung Lim; SHIRKOLE, Shivanand Shankarrao. **Particulate Drying: techniques and industry applications. Techniques and Industry Applications.** 2024. Disponível em:

https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781000874174_A45733486/preview-9781000874174_A45733486.pdf. Acesso em: 29 mar. 2025.

KROKIDA, Magdalini; MARINOS-KOURIS, Dimitris; MUJUMDAR, A. S.. **Rotary Drying.** In: MUJUMDAR, Arun S.. Handbook of Industrial Drying. 3. ed. Singapura: Llc, 2006. Cap. 7. p. 151-171.

LABCONCO. **Laboratory guide to Freeze Drying: an indutry service publication.** An indutry service publication. 2020. Disponível em: https://www.fishersci.es/content/dam/fishersci/en_EU/suppliers/labconco/LabconcoPDF5.pdf. Acesso em: 19 nov. 2024.

LOMINÉ, Franck; HELLOU, Mustapha; ROQUES, Yves. **An analysis of optimal segmented flight design in a rotary dryer.** 2023. Disponível em: https://cnrs.hal.science/hal-03691403/file/flomine_2022_powtech.pdf. Acesso em: 20 dez. 2024.

MACHADO, Alex dos Prazeres. **DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS UTILIZANDO MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO SEM DERIVADAS.** 2017. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/15/teses/876735.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2025.

MAUSA. **Secador Esfriador tipo SRB-4WD.** 2022. Disponível em: <https://mausa.com.br/detalhes-produto/secador-esfriador-tipo-srb-4wd>. Acesso em: 22 nov. 2024.

MERCER, Donal G.. **Solar Drying Developer Countries: possibilites and pitfalls.** 2008. Disponível em: https://worldfoodscience.com/sites/default/files/Chapter4_Mercer.pdf. Acesso em: 19 nov. 2024.

MERCER, Donald G.. **AN INTRODUCTION TO FOOD DEHYDRATION AND DRYING.** Disponível em: <https://iufost.org/iufostftp/IntroDehydrationManual.pdf>. 2007. Acesso em: 07 abr. 2025.

MRC. **Guide About A Drying Oven.** 2024. Disponível em: <https://www.mrclab.com/guide-about-a-drying->

oven#:~:text=Drying%20oven%3A%20Definition,as%20electronic%20components%20or%20chemicals. Acesso em: 21 nov. 2024.

MUJUMDAR, Arun S. **Impingement Drying**. Handbook of Industrial Drying. 3. ed. Singapura: Llc, 2006. Cap. 15. p. 385-394.

NAVARRO, Jacqueline. **Origens históricas da preservação dos alimentos**. 2021. Disponível em: <https://foodsafetybrazil.org/origens-historicas-preservacao-de-alimentos>. Acesso em: 07 abr. 2025.

NUMMER, Brian A.. **Historical Origins of Food Preservation**. 2002. Disponível em: <https://nchfp.uga.edu/resources/entry/historical-origins-of-food-preservation>. Acesso em: 06 abr. 2025.

OÑATE, Eugenio *et al.* **Discrete Element Method**. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/discrete-element-method>. Acesso em: 05 abr. 2025.

ORTIZ-RODRÍGUEZ, N.M.; CONDORÍ, M.; DURÁN, G.; GARCÍA-VALLADARES, O.. **Solar drying Technologies: a review and future research directions with a focus on agroindustrial applications in medium and large scale**. Applied Thermal Engineering, v. 215, p. 118993, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118993>.

PENA, Calos. **Secagem do café orgânico**. 2021. Disponível em: <https://plantarcrescercolher.blogspot.com/2021/07/secagem-do-cafe-organico.html>. Acesso em: 18 nov. 2024.

POKHAREL, Binod; KEERTHI, Reddi Sai Satya; ABUNAMOUS, Ziyad H. H.. **Advancements in Food Processing Technologies: Enhancing Safety, Quality, and Sustainability**. 2023. Disponível em: <https://encurtador.com.br/yCk0s>. Acesso em: 06 abr. 2025.

Kot Engenharia. **Métodos dos elementos finitos, volumes finitos e elementos discretos: quais as principais diferenças?** 2021. Disponível em: <https://kotengenharia.com.br/diferencas-metodos-elementos-volumes-finitos-elementos-discretos/>. Acesso em: 01 mar. 2025.

REVOL, D., Briens, C.; Chabagno, J.. **The design of flights in rotary dryers**. Power Technology, 230–238. doi:10.1016/s0032-5910(01)00362-x.

RODRIGUES, Lorryne Martins. **SECADORES ROTATÓRIOS**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/24971/3/SecadoresRotat%C3%B3rios.pdf>. Acesso em: 19 maio 2025.

SEIM, Jenini. **What Components does a Rotary Dryer Consist of?** 2024. Disponível em: <https://feeco.com/what-components-does-a-rotary-dryer-consist-of/>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SUNRISE. **Secador Rotatorio: um guia completo para secadores rotativos**. 2024. Disponível em: https://www.sunriserendering.com/pt/secador-rotatorio-a-comprehensive-guide-to-rotary-dryers/#Rotation_Speed. Acesso em: 29 dez. 2024.

WEISS, Werner; BUCHINGER, Josef. **Solar Drying: establishment of a production, sales and consulting infrastructure for solar thermal plants in zimbabwe**. Áustria: Aee Intec, 2003. 110 p.

WINIK, Saul Vione *et al.* **DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS POR MEIO DE ANÁLISE E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DEFINITION OF MATERIAL PROPERTIES BY ANALYSIS AND COMPUTATIONAL SIMULATIONS**. 2018. Disponível em: <https://revistas.ifpr.edu.br/index.php/mundietg/article/download/1274/1130/3828>. Acesso em: 06 abr. 2025.

ZABANIOTOU, A. A. (2000). **SIMULATION OF FORESTRY BIOMASS DRYING IN A ROTARY DRYER**. *Drying Technology*, 18(7), 1415–1431. doi:10.1080/07373930008917785.