



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**UMA ANÁLISE SOBRE A OPERAÇÃO DE SECAGEM APLICADA NA
INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES**

JAVIER TELIS NICOLETTI

UBERLÂNDIA - MG

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**UMA ANÁLISE SOBRE A OPERAÇÃO DE SECAGEM APLICADA NA
INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES**

JAVIER TELIS NICOLETTI

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni

UBERLÂNDIA - MG

2025

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DE MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE JAVIER TELIS NICOLETTI
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 15/09/2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
FEQUI/UFU - Orientador

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
PPGEQ/UFU

Dr. Heitor Otacílio Nogueira Altino
PPGEQ/UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, que me ofereceu conhecimento e aprendizado desde o momento que cheguei à cidade.

A minha família, por sempre me cuidar, me dar amor e me apoiar a ser cada vez melhor.

A minha namorada, meus amigos e meu cachorro, por me trazerem felicidade em horas desafiadoras.

A meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni, pela oportunidade de realizar um trabalho sob supervisão cuidadosa, experiente e respeitosa.

“A felicidade só é real quando compartilhada.”

Christopher McCandless, 1992.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES	v
RESUMO.....	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Panorama mundial dos fertilizantes.....	4
2.2 Produção de fertilizantes	7
2.2.1 Produção de Fertilizantes Nitrogenados	7
2.2.2 Produção de Fertilizantes Fosfatados	9
2.2.3 Produção de Fertilizantes Potássicos.....	10
2.2.4 Formas Físicas	11
2.3 Fundamentos da Secagem	12
2.3.1 Aspectos Termodinâmicos da Secagem	13
2.3.2 Mecanismos de Transferência de Massa: Lei de Fick.....	13

2.3.3 Períodos da Secagem.....	14
2.3.4 Fatores que Influenciam a Secagem e Faixas Comuns de Operação	16
2.3.5 Faixas Comuns de Operação de Equipamentos.....	16
2.3.6 Balanços e Coeficientes na Secagem	18
2.4 Tecnologias de Secagem na Indústria de Fertilizantes.....	21
2.4.1 Secadores Rotativos.....	23
2.4.2 Secadores de Leito Fluidizado.....	27
2.4.3 Secadores de Bandeja	28
2.5 Inovações	29
3 ESTUDO DE CASO: TECNOLOGIAS UTILIZADAS EM SECAGEM DE FERTILIZANTES	33
3.1 Introdução.....	33
3.2 Modelo de Page	33
3.2 Melhoria de Procedimento Experimental	34
3.3 Simulação e Modelos Preditivos de Desempenho.....	35
3.4 Comparação do Secador Roto-Fluidizado.....	37
3.5 Secagem por Infravermelho para Fertilizantes de Liberação Lenta.....	42
3.6 Análise Crítica sobre os Desafios da Secagem.....	44

4 CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	48
4.1 Conclusão	46
4.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos em milhões de toneladas ao longo de 1965 a 2022.....	1
Figura 2 – Esquema de processo Haber-Bosch	7
Figura 3 – Fluxograma de produção de diferentes fertilizantes nitrogenados.....	8
Figura 4 – Fluxograma de produção de diferentes fertilizantes Fosfatados.....	9
Figura 5 – Diagrama do processamento do potássio	10
Figura 6 – Tambor granulador YARA, para unidade de Serra do Salitre em Minas Gerais	11
Figura 7 – Tambor secador YARA, para unidade de Serra do Salitre em Minas Gerais	12
Figura 8 – Curva de taxa de secagem em função da umidade livre	15
Figura 9 – Curva de secagem evidenciando a taxa de secagem	17
Figura 10 – Umidades críticas de sais fertilizantes e misturas a 30°C.....	22
Figura 11 – Fertilizante empedrado.....	23
Figura 12 – Esquema secador rotativo	23
Figura 13 – Efeito de cascadeamento.....	24
Figura 14 – Secador direto com câmara de combustão	25
Figura 15 – Secador indireto	26
Figura 16 – Esquema de um secador de leito fluidizado.....	27

Figura 17 – Esquema do secador de bandejas vibradas com reciclo (vista frontal).....	29
Figura 18 – Esquema de câmara de secagem com câmara de monitoramento e atuação de IA	30
Figura 19 – Esquema de análise NIRS em câmara de secagem	30
Figura 20 – Esquema de processo de revestimento em tambor.....	31
Figura 21 – Esquema de ureia revestida.....	32
Figura 22 – Um secador rotativo de passagem única com aletas de enchimento central, usado para experimentos de tempo de retenção e secagem.	36
Figura 23 – Teor de umidade previsto e medido das partículas de saída no secador rotativo, seis testes.	37
Figura 24 – Secador rotativo experimental	38
Figura 25 – Interior de secador roto fluidizado	38
Figura 26 – Curvas experimentais de cinética de secagem para o fertilizante SSPG sob diferentes condições.	39
Figura 27 – Gráfico de valores observados e os valores preditos pela equação de PAGE, 1949.	40
Figura 28 – Valores observados contra preditos pela equação de FRIEDMAN e MARSHALL (1949b), para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor em secador rotatório convencional com suspensores 2x0,7x0,7 cm.....	41
Figura 29 – Valores observados contra preditos pela equação de FRIEDMAN e	

MARSHALL (1949b), para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor para o secador roto-fluidizado Roto-09 mm.....	41
Figura 30 – Comparação da variação da condutividade em função do tempo das amostras com o fertilizante: (a) amostras de 1 a 4; (b) de 5 a 8.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nutrientes relevantes no crescimento vegetal	4
Tabela 2 – Fertilizantes Entregues ao Mercado (em toneladas de produto).....	5
Tabela 3 – Produção Nacional de Fertilizantes Intermediários e Complexos NPK (em toneladas de produto)	6
Tabela 4 – Importação de Fertilizantes Intermediários e Complexos NPK (em toneladas de produto).....	6
Tabela 5 – Tabela de parâmetros K, m e n para secadores utilizados em trabalho	37
Tabela 6 – Análise geral das amostras e suas simulações	44
Tabela 7 – Comparativo dos Estudos de Caso em Secagem Rotativa.	46

LISTA DE ABREVIACÕES

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos

IA – Inteligência Artificial

CFD – Fluido-Dinâmica Computacional

MAP – Fosfato Monoamônico

DAP – Fosfato Diamônico

NPK – Nitrogênio, Fósforo e Potássio

SSP – Superfosfato Simples

TSP – Superfosfato Triplo

KCl – Cloreto de Potássio

MOP – Muriate of Potash (Cloreto de Potássio)

SSPG – Superfosfato Simples Granulado

CAPEX – Custos de Capital

OPEX – Custos Operacionais

LISTA DE SÍMBOLOS

q_T – Calor transferido	[kJ]
\dot{m}_s – Vazão mássica de material sólido dentro do secador	[kg/s]
c_{ps} – Calor específico do sólido	[kJ /kg°C]
T_{sb} – Temperatura final do sólido	[C°]
T_{sa} – Temperatura de alimentação do sólido.....	[C°]
c_{pL} – Calor específico do líquido	[kJ /kg°C]
T_v – Temperatura de vaporização	[K]
X_a – Umidade inicial	[-]
X_b – Umidade final.....	[-]
λ – Calor de vaporização	[kJ /kg°C]
c_{pv} – Calor específico do vapor.....	[kJ /kg°C]
T_{va} – Temperatura final de vapor	[C°]
\dot{m}_g – Vazão mássica de ar seco	[kg/s]
c_{sb} – Calor úmido do ar na umidade de entrada.....	[kJ /kg°C]
T_{hb} – Temperatura de entrada do ar	[C°]
T_{ha} – Temperatura de saída do ar	[C°]
Ua – Coeficiente de transferência de calor volumétrico	[W/m³C°]
V – Volume do secador	[m³]
$\overline{\Delta T}$ – Diferença de temperatura média.....	[-]
G – Vazão mássica de sólido úmido.....	[kg/s]
D – Diâmetro do secador.....	[m]
L – Comprimento do secador	[m]
N_t – Número de unidades de transferência de calor.....	[-]

T_{wb}	– Temperatura de bulbo úmido na entrada.....	[C°]
T_{wa}	– Temperatura de bulbo úmido na saída	[C°]
\dot{m}_v	– Taxa de transferência de massa média	[kg/s]
X	– Umidade livre	[-]
X_T	– Umidade total.....	[-]
X^*	– Umidade de equilíbrio.....	[-]
M_v	– Massa molecular de vapor	[kg/kmol]
k_y	– Coeficiente de transferência de massa	[m/s]
y_i	– Fração molar do vapor na interface.....	[-]
y	– Fração molar do vapor no ar de secagem.....	[-]
A	– Área de secagem	[m ³]
h_y	– Coeficiente de transferência de calor	[W/m ² C°]
T	– Temperatura do ar de secagem.....	[C°]
T_i	– Temperatura de interface.....	[C°]
λ_i	– Calor latente na temperatura de interface.....	[kJ /kg°C]
R_c	– Taxa média de secagem.....	[kg /m ²]
t_c	– Tempo de secagem	[s]
J_a	– Fluxo molar do componente A	[mol/(m ² ·s)]
D_{AB}	– Coeficiente de difusão de A em B	[m ² /s]
D_{eff}	– Coeficiente de difusão efetivo	[m ² /s]
C_a	– Concentração do componente A.....	[mol/m ³]
x	– Coordenada de posição (unidimensional)	[m]
τ	– Tempo de residência	[min ou s]
k_p	– Coeficiente empírico para tempo de residência.....	[-]
N_r	– Velocidade de rotação do secador	[rpm]
α	– Inclinação do secador	[graus]

MR – Razão de umidade (adimensional)	[-]
K – Constante de secagem (Modelo de Page/Lewis)	[s ⁻¹ ou min ⁻¹]
n – Expoente de Page (adimensional)	[-]

RESUMO

A secagem representa uma das operações unitárias mais importantes e de maior consumo energético na indústria de fertilizantes, impactando diretamente a qualidade do produto final, a estabilidade de armazenamento e a eficiência da aplicação agrícola. Este trabalho realiza uma análise das tecnologias e dos desafios associados à secagem de fertilizantes, com o objetivo de identificar as melhores práticas e as inovações que visam a otimização do processo. Através de uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos de transferência de calor e massa e da análise de uma série de estudos de caso, traça-se uma linha evolutiva do conhecimento no setor. A pesquisa parte de trabalhos experimentais, avança pela era da simulação computacional e chega-se na avaliação de tecnologias inovadoras, como o secador roto-fluidizado. Adicionalmente, explora-se a secagem como uma ferramenta de engenharia de produto, analisando como o controle do processo é fundamental para o desenvolvimento de fertilizantes de liberação lenta. A principal conclusão é que o futuro da secagem no setor reside em uma abordagem de múltiplas faces, que equilibra a implementação de tecnologias de ponta em novas instalações, a otimização da base industrial existente através de modelagem e controle avançado, e a integração do processo de secagem, não só com rapidez e eficiência, mas também, preservando a melhor qualidade e desempenho do produto.

Palavras-chave: fertilizantes, secagem, secador rotativo, otimização de processos, transferência de calor, transferência de massa.

ABSTRACT

Drying represents one of the most important and energy-intensive unit operations in the fertilizer industry, directly impacting final product quality, storage stability, and agricultural application efficiency. This work provides an analysis of the technologies and challenges associated with fertilizer drying, aiming to identify best practices and innovations for process optimization. Through a literature review on the fundamentals of heat and mass transfer and an analysis of a series of case studies, an evolutionary line of knowledge in the sector is traced. The research begins with experimental works, progresses through the era of computational simulation, and arrives at the evaluation of innovative technologies, such as the roto-fluidized dryer. Additionally, drying is explored as a product engineering tool, analyzing how process control is fundamental for the development of slow-release fertilizers. The main conclusion is that the future of drying in the sector lies in a multifaceted approach that balances the implementation of cutting-edge technologies in new facilities, the optimization of the existing industrial base through advanced modeling and control, and the integration of the drying process, not only with speed and efficiency but also preserving the best quality and performance of the product.

Keywords: fertilizers, drying, rotary dryer, process optimization, heat transfer, mass transfer.

1 INTRODUÇÃO

A história da agricultura é ligada à busca por maior produtividade e sustentabilidade dos solos. Desde as práticas rudimentares de rotação de culturas e adubação natural, a humanidade tem aprimorado continuamente as técnicas para garantir a fertilidade da terra. A verdadeira revolução agrícola, no entanto, veio com a descoberta e a aplicação de nutrientes essenciais para as plantas, como nitrogênio, fósforo e potássio, marcando a introdução dos fertilizantes inorgânicos no século XIX (MAZOYER, 2010). Inicialmente impulsionada pela necessidade de suprir a demanda por alimentos em uma população global crescente, a fabricação de fertilizantes tornou-se uma indústria de importância estratégica em constante crescimento (Figura 1), fundamental para a segurança alimentar mundial.

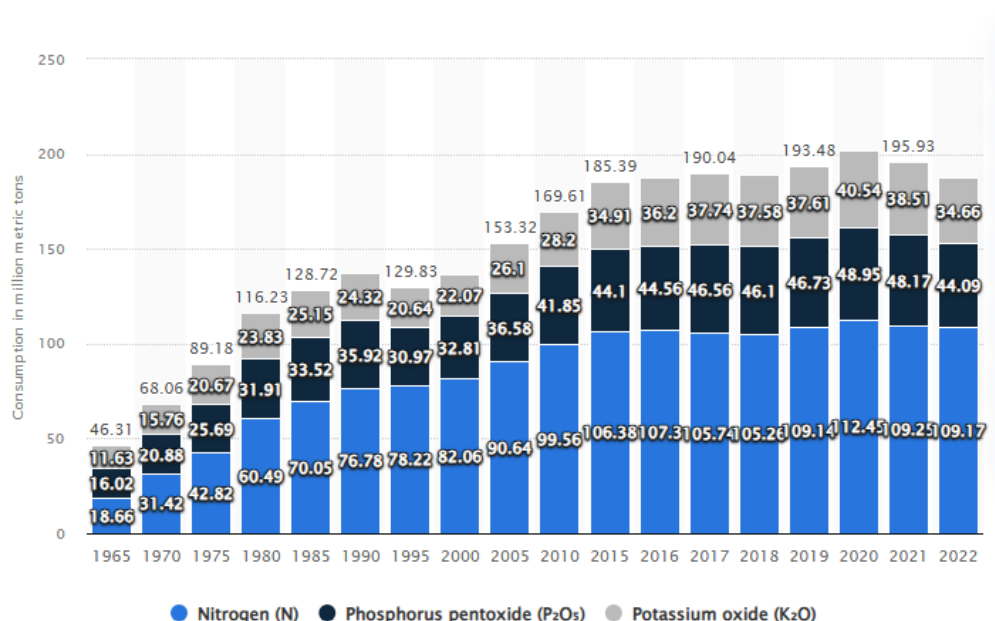


Figura 1. Consumo de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos em milhões de toneladas ao longo de 1965 a 2022 (FAO, 2022).

O comércio de fertilizantes é um pilar da economia global, movimentando bilhões de dólares anualmente e sustentando vastas cadeias de produção agrícola. A indústria de fertilizantes é complexa e diversificada, englobando desde a mineração de matérias-primas (como fosfato e potássio) até a síntese química de compostos nitrogenados (como a ureia e o nitrato de amônio), passando por processos de formulação e granulação (BERNARDES, 2006). No Brasil, país com uma forte vocação agrícola e um dos maiores produtores e exportadores de

alimentos do mundo, o setor de fertilizantes desempenha um papel ainda mais crítico. A demanda por fertilizantes no país é robusta e crescente, refletindo a expansão da área cultivada e a busca por melhores produtividades nas lavouras. Dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) evidenciam esse crescimento contínuo do consumo de fertilizantes no mercado brasileiro, sublinhando a dependência da nossa agricultura moderna em relação a esses insumos (ANDA, 2025).

Nesse complexo cenário industrial, a qualidade do produto final é de extrema importância. Fertilizantes devem apresentar características físicas e químicas específicas para garantir sua eficácia na aplicação, a liberação controlada de nutrientes e a minimização de perdas. É nesse ponto que a secagem se destaca como uma etapa crucial ligada à qualidade final do produto e à eficiência do processo produtivo. Definida como a remoção de umidade de um material sólido através de meios térmicos e mecânicos (MUJUMDAR, 2014), a secagem desempenha um papel fundamental na prevenção da aglomeração (o "empedramento" das partículas), no aumento da estabilidade de armazenamento e transporte, e no ajuste das propriedades físicas dos fertilizantes, como granulometria e densidade. A umidade residual excessiva pode não só comprometer a fluidez e aplicabilidade do fertilizante, mas também promover reações químicas indesejadas que degradam os nutrientes e diminuem a vida útil do produto, resultando em perdas econômicas significativas para toda a cadeia produtiva.

A complexidade dos desafios impostos pela secagem na indústria de fertilizantes reside na diversidade de matérias-primas, nas variações granulométricas e nas exigências específicas de cada tipo de fertilizante (SILVA, 2011). Fertilizantes em pó, granulados ou até mesmo os que são processados como suspensões, cada um requer uma abordagem de secagem adaptada para otimizar o consumo de energia e garantir a qualidade. Além disso, a energia consumida nos processos de secagem representa uma parcela substancial dos custos operacionais totais em uma planta de fertilizantes. Em um contexto de crescentes preocupações com a pegada de carbono e a eficiência energética, a otimização dos sistemas de secagem não é apenas uma questão de qualidade do produto, mas também de viabilidade econômica e responsabilidade ambiental.

A presente pesquisa propõe-se a realizar uma análise dos métodos de secagem empregados na indústria de fertilizantes, com foco nos desafios tecnológicos e nas oportunidades de otimização. Serão investigadas as tecnologias predominantes, como secadores rotativos, de leito fluidizado e pulverizadores, avaliando suas características, vantagens e limitações para diferentes tipos de fertilizantes. Serão explorados os parâmetros operacionais críticos, incluindo temperatura, vazão do ar de secagem, umidade do material e tempo de

residência, e como a manipulação desses parâmetros pode impactar a eficiência do processo e a qualidade final do produto.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é analisar os processos de secagem na indústria de fertilizantes, identificando as melhores práticas e as inovações tecnológicas para a otimização da eficiência e da qualidade do produto. Para alcançar este objetivo, serão estabelecidos os seguintes objetivos específicos: (i) descrever os principais tipos de secadores utilizados na indústria de fertilizantes e suas características operacionais, destacando suas aplicações e limitações; (ii) identificar os parâmetros críticos de controle do processo de secagem e analisar seu impacto na qualidade do fertilizante e no custo energético da operação e (iii) analisar estudos de caso e avanços tecnológicos recentes que promoveram melhorias significativas na secagem de fertilizantes, considerando exemplos práticos de sucesso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Panorama mundial dos fertilizantes

Os fertilizantes são produtos, naturais ou sintéticos, que contêm um ou mais nutrientes essenciais, chamados macronutrientes, (Tabela 1) para o desenvolvimento das plantas, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), além de micronutrientes como boro (B), cobre (Cu) e zinco (Zn). A aplicação desses insumos visa otimizar a produtividade das culturas, corrigir deficiências nutricionais do solo e melhorar a qualidade dos produtos agrícolas. A indústria de fertilizantes é complexa e abrange desde a mineração de matérias-primas como fosfatos e potássios, a produção de compostos nitrogenados a partir do gás natural ou carvão, até os sofisticados processos de formulação e granulação que otimizam a liberação de nutrientes e a aplicabilidade do produto.

Nutriente	Forma em fertilizantes
Nitrogênio	N
Fósforo	P ₂ O ₅
Potássio	K ₂ O
Cálcio	CaO
Magnésio	MgO
Enxofre	S
Boro	B
Cloro	Cl
Cobre	Cu
Ferro	Fe
Manganês	Mn
Molibdênio	Mo
Zinco	Zn

Tabela 1. Nutrientes relevantes no crescimento vegetal (MALAVOLTA, 1980).

No contexto brasileiro, a relevância do setor é ainda mais acentuada. O Brasil se destaca como um dos maiores consumidores de fertilizantes do mundo, impulsionado por sua vasta área cultivada e sua forte vocação agrícola. A Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) publica anualmente relatórios e tabelas que detalham o consumo, produção e entrega (Tabela 2) de fertilizantes no país, evidenciando a crescente demanda e a importância estratégica da indústria para a balança comercial e a segurança alimentar nacional.

Fertilizantes Entregues ao Mercado (em toneladas de produto)					
	2022	2023	2024	2025	2025 × 2024
Janeiro	3.222.516	3.425.291	3.699.769	3.695.968	-0,10%
Fevereiro	2.508.739	2.678.326	2.867.580	-	-
Março	2.924.642	2.449.368	2.085.333	-	-
Abril	2.712.826	2.319.556	2.298.029	-	-
Maio	3.255.620	3.629.611	3.253.335	-	-
Junho	3.556.481	4.115.948	4.030.402	-	-
Julho	3.571.141	4.479.902	4.612.436	-	-
Agosto	4.157.967	5.515.469	5.119.342	-	-
Setembro	4.190.985	4.891.456	4.841.011	-	-
Outubro	3.866.288	4.713.873	4.980.319	-	-
Novembro	3.749.436	3.999.297	4.219.177	-	-
Dezembro	3.360.878	3.607.590	3.609.235	-	-
Total do Ano	41.077.519	45.825.687	45.615.968	3.695.968	-

Tabela 2. Dados de fertilizantes entregues ao mercado (ANDA, 2025).

Por exemplo, os dados mais recentes da ANDA (2025) mostram, mesmo com pequenas variações crescentes e decrescentes, em média um aumento no consumo de NPK de 2022 a 2024 (Tabela 3), refletindo a intensificação da agricultura brasileira para atender tanto o mercado interno quanto as exportações.

Dados também apontam que, atualmente, o país, mesmo que apresente produção e minas importantes, como a de Taquari-Vassouras no estado de Sergipe, importa muito mais do que produz para poder atender a alta demanda de nutrientes no segmento (Tabela 4).

Produção Nacional de Fertilizantes Intermediários e Complexos NPK (em toneladas de produto)					
Mês	2022	2023	2024	2025	2025 × 2024
Janeiro	634.427	572.752	531.375	647.100	21,80%
Fevereiro	599.713	563.517	497.036	-	-
Março	690.247	605.101	504.674	-	-
Abril	727.409	555.515	537.165	-	-
Maio	724.609	480.455	562.407	-	-
Junho	587.391	477.596	646.487	-	-
Julho	636.538	581.085	697.171	-	-
Agosto	673.228	629.143	658.926	-	-
Setembro	583.179	638.464	692.461	-	-
Outubro	654.985	673.326	665.754	-	-
Novembro	598.924	615.281	621.011	-	-
Dezembro	621.337	563.189	604.901	-	-
Total do Ano	7.731.987	6.955.424	7.219.368	647.100	-

Tabela 3. Dados de produção nacional de fertilizantes intermediários e complexos NPK (ANDA, 2025).

Importação de Fertilizantes Intermediários e Complexos NPK (em toneladas de produto)					
Mês	2022	2023	2024	2025	2025 × 2024
Janeiro	3.277.848	2.558.924	2.931.475	3.004.331	2,50%
Fevereiro	3.001.519	2.633.254	2.520.325	-	-
Março	2.462.725	2.551.814	2.005.231	-	-
Abril	2.568.959	3.150.098	2.578.890	-	-
Maio	3.116.423	3.201.030	3.068.835	-	-
Junho	3.379.639	3.122.779	3.643.744	-	-
Julho	3.641.339	3.140.510	3.762.579	-	-
Agosto	2.944.362	3.261.430	4.321.770	-	-
Setembro	3.160.432	3.959.726	4.225.711	-	-
Outubro	2.634.273	4.008.603	4.432.116	-	-
Novembro	2.346.175	3.998.966	4.412.077	-	-
Dezembro	2.073.149	3.852.209	3.445.451	-	-
Total do Ano	34.606.843	39.439.343	41.348.204	3.004.331	-

Tabela 4. Dados de importação de fertilizantes intermediários e complexos NPK (ANDA ,2025).

2.2 Produção de fertilizantes

A produção de fertilizantes é um processo industrial complexo que varia significativamente dependendo do nutriente específico (nitrogênio, fósforo, potássio) e da forma final desejada do produto (sólido, líquido, granulado, farelado) (SILVA, 2014). No entanto, alguns princípios e etapas são comuns à maioria das cadeias produtivas. A fabricação desses insumos essenciais envolve uma série de operações unitárias que transformam matérias-primas, muitas vezes extraídas da natureza, em produtos de alto valor agregado para a agricultura.

2.2.1 Produção de Fertilizantes Nitrogenados

A base da produção de fertilizantes nitrogenados é a síntese da amônia (NH_3) a partir do nitrogênio atmosférico (N_2) e hidrogênio (H_2) por meio do Processo Haber-Bosch (BICER & KHALID, 2021), mostrado na Figura 2.

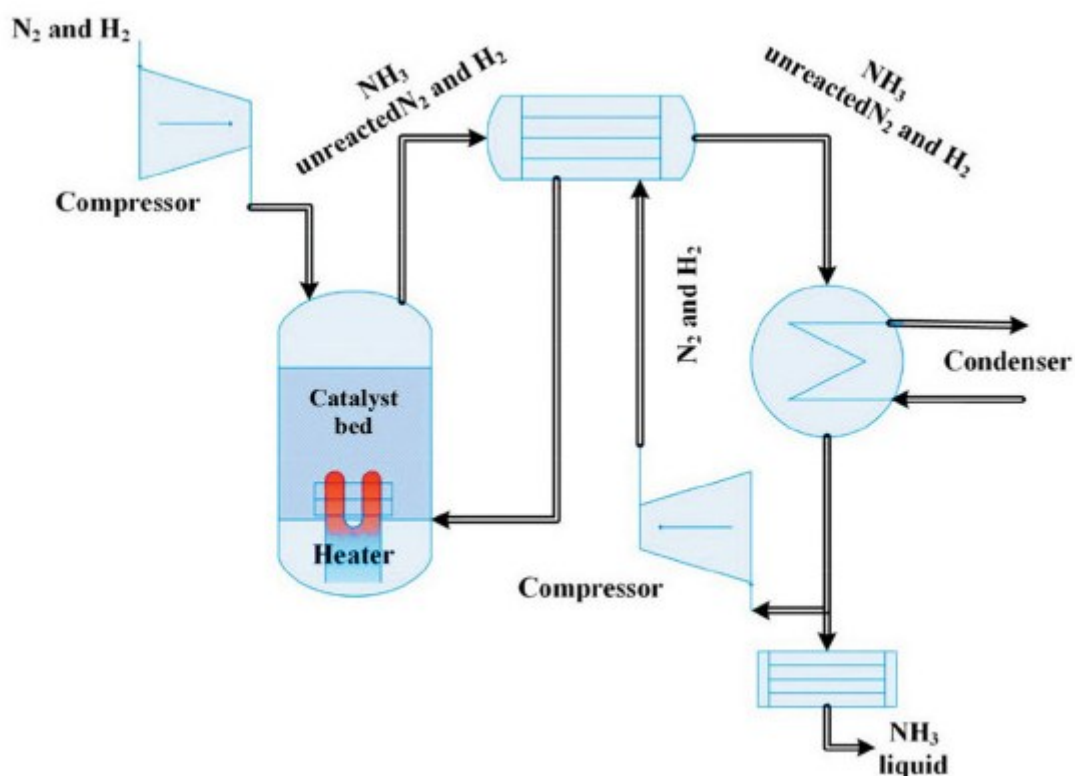


Figura 2. Esquema de processo Haber-Bosch (BICER & KHALID, 2021).

Este processo é um dos maiores feitos da engenharia química do século XX, permitindo a produção em larga escala de amônia, que é subsequentemente convertida em uma variedade

de fertilizantes nitrogenados. O hidrogênio é frequentemente obtido por reforma a vapor do gás natural, o que torna a produção de fertilizantes nitrogenados altamente dependente do custo da energia. A partir da amônia, são produzidos os principais fertilizantes nitrogenados (Figura 3), cada um com propriedades e aplicações específicas (COELHO, 2004).

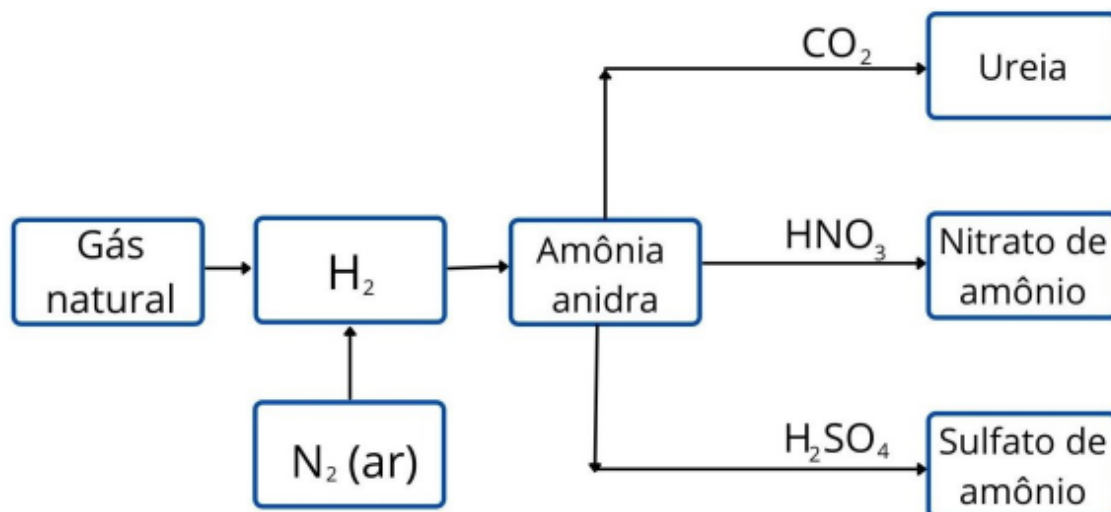


Figura 3. Fluxograma de produção de diferentes fertilizantes nitrogenados (FERNANDES, 2022).

Dentre eles, a ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) destaca-se como o fertilizante nitrogenado sólido mais amplamente utilizado no mundo, principalmente devido ao seu alto teor de nitrogênio, que é de aproximadamente 46%. A síntese da ureia ocorre pela reação entre amônia e dióxido de carbono, e seu produto final pode ser granulado ou prilled (perolizado) para otimizar o manuseio e a aplicação.

Outro composto relevante é o nitrato de amônio (NH_4NO_3), obtido pela neutralização de amônia com ácido nítrico. Embora seja uma fonte rápida e eficiente de nitrogênio para as plantas, seu manuseio exige cuidados especiais de segurança devido à sua natureza potencialmente explosiva. Adicionalmente, o sulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) é um fertilizante importante, frequentemente originado como subproduto de outros processos industriais ou produzido diretamente pela reação de amônia com ácido sulfúrico. Sua vantagem reside no fornecimento combinado de nitrogênio e enxofre, um micronutriente também essencial para o desenvolvimento das culturas.

2.2.2 Produção de Fertilizantes Fosfatados

Os fertilizantes fosfatados são obtidos a partir de rochas fosfáticas, minerais que contêm fósforo na forma de fosfato (KORNDORFER,1990). As principais etapas de produção envolvem a mineração da rocha, moagem e tratamento químico. Dentre os fertilizantes fosfatados mais comuns, destacam-se produtos com diferentes rotas de produção e características (Figura 4).

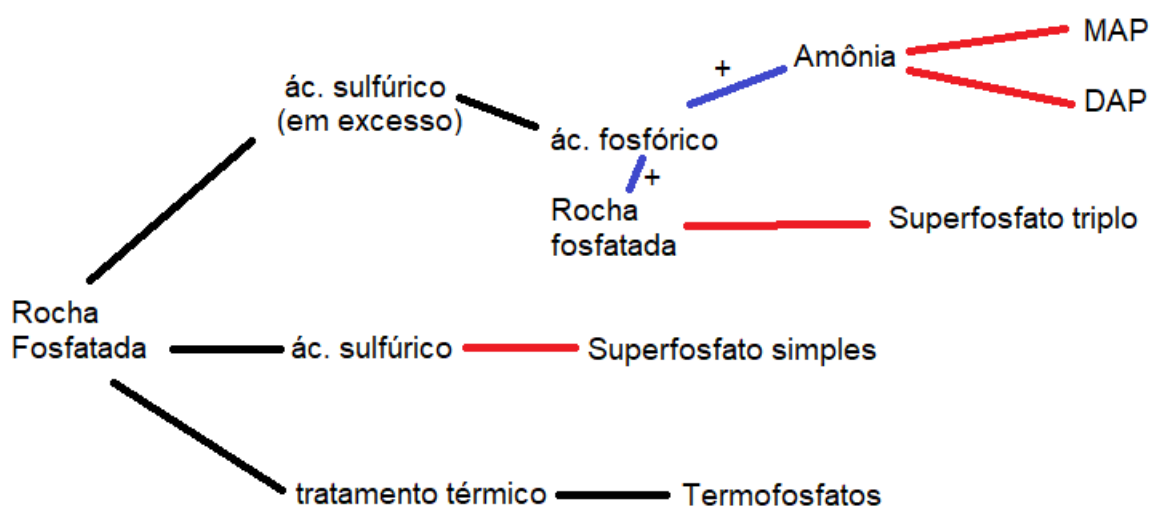


Figura 4. Fluxograma de produção de diferentes fertilizantes Fosfatados Autoria Própria (2025).

. O superfosfato simples (SSP), por exemplo, é produzido pela reação da rocha fosfática moída com ácido sulfúrico, resultando em um produto que contém fósforo e cálcio, além de enxofre, e gera gesso como subproduto.

De forma similar, o superfosfato triplo (TSP) é obtido pela reação da rocha fosfática com ácido fosfórico, o que resulta em um fertilizante com maior concentração de fósforo e sem a presença de enxofre. Outra classe de grande importância comercial inclui o fosfato monoamônico (MAP) e o fosfato diamônico (DAP), ambos produzidos pela reação de ácido fosfórico com amônia; estes são fertilizantes complexos que fornecem tanto fósforo quanto nitrogênio, sendo muito populares devido à sua alta concentração de nutrientes e boa granulometria.

Diferenciando-se destes, o termofosfato é obtido pelo tratamento térmico da rocha fosfática, e o fósforo presente em sua composição é disponibilizado para as plantas de forma mais gradual em comparação aos fosfatos solúveis em água, tornando-o uma fonte de liberação mais lenta (RAHAL, 1990).

2.2.3 Produção de Fertilizantes Potássicos

Os fertilizantes potássicos são derivados de sais de potássio, principalmente o cloreto de potássio (KCl), que são extraídos de depósitos subterrâneos ou, em menor escala, de águas salinas. Após a etapa de mineração, o minério, normalmente silvita (NASCIMENTO, 2005), é submetido a um processo de beneficiamento (Figura 5), geralmente por flotação ou cristalização, a fim de purificar o KCl. O produto resultante, o cloreto de potássio (KCl), também conhecido comercialmente como MOP (*Muriate of Potash*), é o fertilizante potássico mais comum e constitui uma fonte concentrada de potássio, elemento fundamental para diversas funções fisiológicas das plantas. Além dele, existem outras formas utilizadas para fins específicos, como o sulfato de potássio (K_2SO_4), aplicado em culturas sensíveis ao cloro, e o nitrato de potássio (KNO_3), que oferece a vantagem de fornecer tanto potássio quanto nitrogênio.

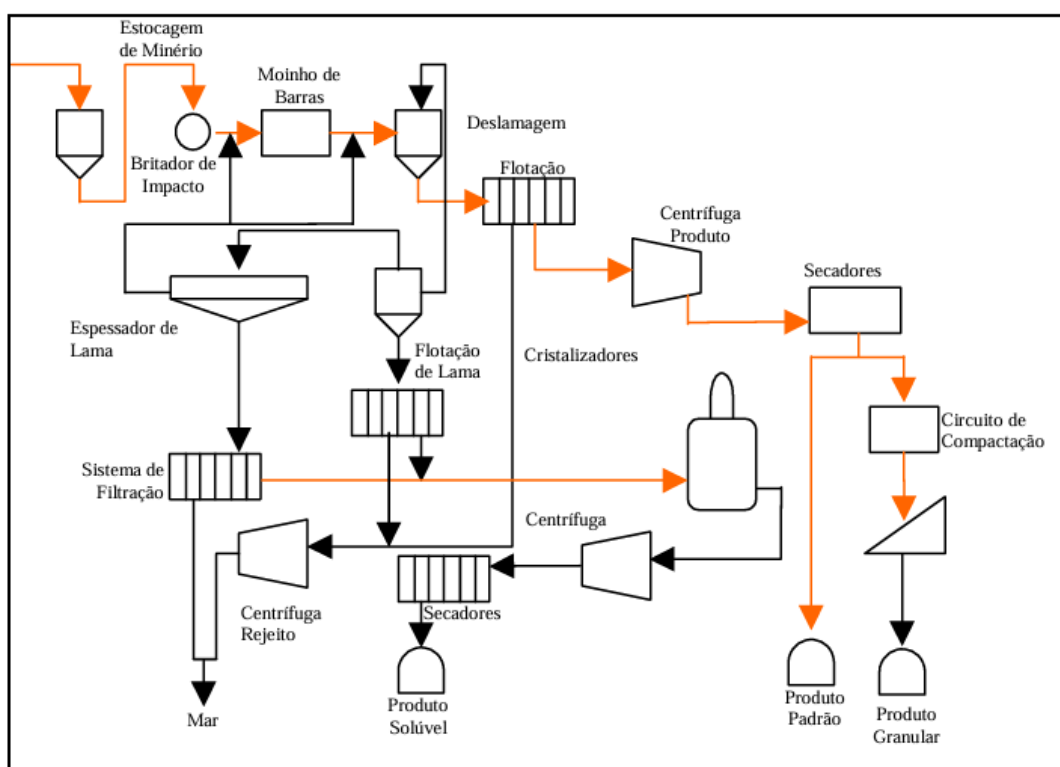


Figura 5 - Diagrama do processamento do potássio (ICL FERTILIZER, 2003).

No cenário brasileiro, a produção de fertilizantes potássicos, embora não seja suficiente para suprir a alta demanda do agronegócio, conta com minas importantes, como a de Taquari-Vassouras no estado de Sergipe. Após o processo de extração e beneficiamento, o cloreto de potássio, assim como os fertilizantes nitrogenados e fosfatados, frequentemente passa por etapas de formulação e granulação para criar produtos com características físicas específicas.

2.2.4 Formas Físicas

Após a produção dos nutrientes primários, muitos fertilizantes passam por processos de formulação e granulação (BERNARDES, 2006) em tambores rotativos (Figura 6) para criar produtos com características físicas específicas, que impactam diretamente sua aplicabilidade, manuseio e armazenamento. De acordo com a legislação brasileira, estabelecida pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2018), os fertilizantes sólidos são classificados em diversas naturezas físicas, como pó, farelado e granulado, cada uma com especificações granulométricas precisas.



Figura 6. Tambor granulador YARA, para unidade de Serra do Salitre em Minas Gerais (YARA, 2019).

A forma em pó é caracterizada por partículas de dimensões muito pequenas, enquanto o farelado apresenta grânulos mais desuniformes. A forma granulada, por sua vez, consiste em partículas de dimensões mais uniformes e específicas, sendo uma das mais comuns devido à sua facilidade de aplicação e menor tendência à segregação. Além dessas, existem fertilizantes na forma líquida (soluções ou suspensões) e, em menor escala, gasosa (como a amônia anidra).

Essas diferentes naturezas físicas são determinadas por processos industriais específicos, como moagem, aglomeração (ex: granulação por tambor rotativo, spray drying) e, crucialmente, a secagem, normalmente feita em tambores rotativos (Figura 7), visando melhorar as propriedades de fluxo e distribuição no campo.



Figura 7. Tambor secador YARA, para unidade de Serra do Salitre em Minas Gerais (YARA, 2019).

2.3 Fundamentos da Secagem

A secagem é uma das operações unitárias mais antigas e energeticamente intensivas em diversos setores da indústria de processos, desempenhando um papel fundamental na cadeia produtiva de inúmeros produtos, desde alimentos e fármacos até minerais e, no caso do presente estudo, fertilizantes. Seu objetivo principal é a remoção de umidade (geralmente água) de um material sólido ou líquido, através da evaporação (MUJUMDAR, 2015). Esse processo é crucial para atingir características desejadas de produto, como estabilidade de armazenamento, peso, forma, fluidez e durabilidade. A eficiência da secagem é um fator determinante para a qualidade final do produto e para os custos operacionais da indústria.

A umidade pode existir no material de diversas formas, cada uma influenciando a facilidade e a taxa de sua remoção. Distinguem-se a água ligada, que pode estar adsorvida nas superfícies do material ou quimicamente ligada (e é mais difícil de remover), e a água não ligada (ou água livre), que está retida em poros e espaços vazios e é mais facilmente evaporada. Há

também a água capilar, que é absorvida em poros de pequeno diâmetro por forças capilares. O mecanismo de secagem, portanto, é um fenômeno complexo que envolve a transferência de massa (movimento da água do interior para a superfície do material) e a transferência de calor (fornecimento de energia para a evaporação da água). O calor pode ser fornecido por convecção (ar quente), condução (superfícies aquecidas) ou radiação.

2.3.1 Aspectos Termodinâmicos da Secagem

Do ponto de vista termodinâmico, a secagem é um processo que envolve a interação entre o calor fornecido e a umidade a ser removida. O calor latente de vaporização da água é o principal componente energético necessário para a secagem. Além disso, o calor sensível é requerido para elevar a temperatura do material úmido e do ar de secagem até a temperatura de processo. Para o ar, que é o meio de secagem mais comum, as propriedades psicrométricas são fundamentais. Um diagrama psicrométrico permite relacionar temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade absoluta (ou razão de umidade), umidade relativa, entalpia e volume específico do ar. A eficiência térmica de um secador é avaliada pela quantidade de energia realmente utilizada para evaporar a água em relação à energia total fornecida. O balanço de energia em um secador considera o calor total que entra com o ar quente e o material úmido, e o calor que sai com o ar úmido, o material seco e as perdas para o ambiente. A entalpia do ar é uma propriedade chave para esses balanços, indicando o conteúdo total de energia do ar úmido.

A capacidade do ar de remover e transportar e remover umidade é diretamente proporcional à diferença entre sua temperatura de bulbo seco e sua temperatura de bulbo úmido, e inversamente proporcional à sua umidade relativa. Ar mais quente e mais seco tem maior potencial para remover umidade. A temperatura de bulbo úmido é particularmente importante porque, durante o período de taxa constante de secagem, a superfície do sólido se mantém aproximadamente nessa temperatura devido ao resfriamento evaporativo.

2.3.2 Mecanismos de Transferência de Massa: Lei de Fick

A transferência de massa durante a secagem é governada por diferentes mecanismos que se tornam predominantes dependendo do período do processo e da umidade do material.

Durante o período de taxa constante, a superfície do sólido permanece saturada de umidade. Nessa fase, a taxa de secagem é limitada pela transferência de massa externa, ou seja,

pela capacidade do ar de secagem em remover e transportar o vapor de água da interface sólido-gás para a corrente principal de ar (MUJUMDAR, 2015).

Quando a migração de umidade do interior do sólido para a superfície não consegue mais manter a saturação superficial, inicia-se o período de taxa decrescente. A partir deste ponto, o controle do processo passa a ser a difusão interna, e a taxa de secagem é ditada pela velocidade com que a umidade se move através da estrutura porosa do material.

O princípio fundamental que descreve o fluxo difusivo é a Primeira Lei de Fick, na Equação (1), que relaciona o fluxo molar ao gradiente de concentração, em que J_A é o fluxo molar, D_{AB} é o coeficiente de difusividade, C_A é a concentração e x é o eixo de deslocamento.

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dx} \quad (1)$$

Contudo, como a secagem é um processo transiente, onde a concentração de umidade varia com o tempo e com a posição dentro do sólido, a descrição matemática mais adequada é dada pela Segunda Lei de Fick, Equação (2), em que t é o tempo. Esta lei descreve a variação da concentração de umidade ao longo do tempo em um ponto específico, sendo fundamental para modelar a cinética de secagem.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (2)$$

Para sólidos porosos e complexos como os fertilizantes, o coeficiente de difusividade é uma simplificação. Na prática, utiliza-se um coeficiente de difusão efetivo (D_{eff}), pois o transporte de umidade interna é resultado de múltiplos mecanismos simultâneos (BIRD, 2004).

2.3.3 Períodos da Secagem

O processo de secagem é classicamente dividido em períodos (MUJUMDAR, 2015), que caracterizam a taxa de remoção de umidade em função do teor de umidade do material. Esses períodos são cruciais para entender e otimizar a operação dos secadores. Na Figura 8, estão evidentes o período de taxa constante e período de taxa decrescente.

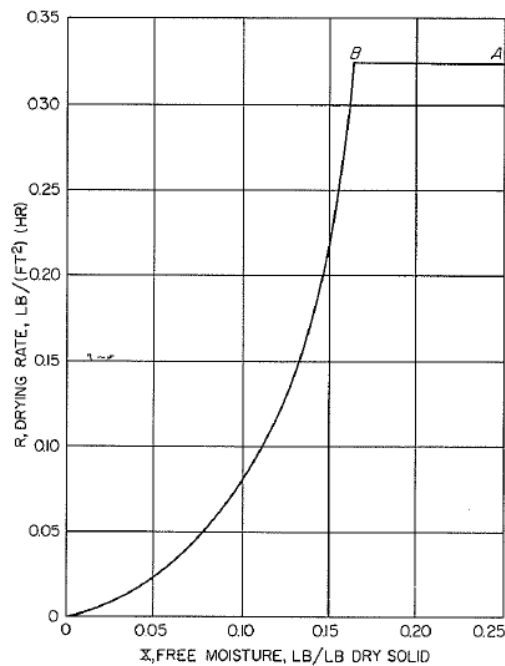


Figura 8. Curvas de taxa de secagem para uma placa de argila não porosa (SHERWOOD, 1929).

2.3.3.1 Período de Aquecimento Inicial

No início do processo, o material absorve calor do meio de secagem (geralmente ar quente) até que sua temperatura atinja a temperatura de bulbo úmido do ar. Durante esta fase, a taxa de evaporação é relativamente baixa, pois a energia está sendo primariamente utilizada para aquecer o sólido e a água contida nele.

2.3.3.2 Período de Taxa Constante

Uma vez que a superfície do material está saturada de água e sua temperatura atingiu a temperatura de bulbo úmido, a água livre evapora da superfície a uma taxa constante. Neste período, a taxa de secagem é controlada pela taxa de transferência de calor do ar para a superfície molhada e pela taxa de transferência de massa do vapor de água da superfície para o ar. A superfície do material se comporta como uma superfície de água livre, e a temperatura do material permanece aproximadamente constante, desde que haja água suficiente para saturar a superfície. Este período persiste enquanto a umidade da superfície puder ser repostada pela

difusão interna da água. A taxa de secagem constante (R_c) pode ser calculada por equações que dependem do coeficiente de transferência de massa ou calor do ar.

2.3.3.3 Período de Taxa Decrescente

Este período começa quando a umidade superficial do material não pode mais ser repostada pela difusão interna na mesma velocidade em que é evaporada. A superfície começa a secar, a área molhada diminui, e a taxa de secagem, portanto, começa a decair. A taxa de secagem passa a ser controlada pela difusão da umidade do interior para a superfície do sólido. Durante este período, a temperatura do material começa a subir gradualmente em direção à temperatura de bulbo seco do ar de secagem. A secagem neste período é mais lenta e exige maior tempo de residência no secador para remover a umidade remanescente, que está mais fortemente ligada ao sólido (MUJUMDAR, 2015).

2.3.4 Fatores que Influenciam a Secagem e Faixas Comuns de Operação

A eficiência do processo de secagem é influenciada por diversos fatores inter-relacionados. Entre eles, destacam-se a temperatura do ar de secagem, a umidade do ar de secagem, a velocidade do ar, a área de superfície do material, a espessura da camada e as características intrínsecas do material (porosidade, higroscopicidade, teor de sólidos, calor específico) (BIRD, 2004). A compreensão desses fundamentos é essencial para o projeto e otimização de secadores industriais, visando a máxima eficiência energética e a qualidade do produto final.

2.3.5 Faixas Comuns de Operação de Equipamentos

As faixas de trabalho de equipamentos de secagem variam amplamente dependendo do tipo de secador, das propriedades do material e da aplicação específica, sendo que no contexto de fertilizantes, diversos parâmetros são cruciais. A temperatura do ar de secagem geralmente varia de 100°C a 300°C (MUJUMDAR, 2015), embora para materiais mais sensíveis ao calor, como alguns fertilizantes nitrogenados, as temperaturas possam ser significativamente mais baixas, situando-se por volta de 80°C a 150°C.

A velocidade do ar também é um parâmetro chave: em secadores rotativos, pode variar de 1 m/s a 3 m/s na zona de secagem, enquanto em secadores de leito fluidizado, essa velocidade é crítica e situa-se geralmente entre 0,5 m/s e 5 m/s, ajustada conforme o tamanho e a densidade das partículas para garantir a fluidização adequada sem arraste excessivo. Independentemente

do método, o objetivo é atingir uma umidade final do produto que, para a maioria dos fertilizantes sólidos, é tipicamente inferior a 1% em peso, e muitas vezes abaixo de 0,5%, para evitar o empedramento e a degradação.

Na literatura, o ideal é reunir tais informações das simulações nas chamadas curvas de secagem (LEWIS, 1921), as quais exibem a variação de umidade com o tempo a depender da temperatura e velocidade do ar, como mostra a Figura 9, assim fica evidente a taxa de secagem quando feita a derivação de umidade em relação ao tempo. O tempo de residência necessário para atingir essa umidade varia de minutos a horas, dependendo das umidades inicial e final e do equipamento; em secadores de leito fluidizado, pode ser de apenas alguns minutos, ao passo que em secadores rotativos, costuma variar de 10 a 60 minutos, normalmente sendo aplicada a Equação (3) de PERRY & GREEN, 1999, sendo que $\bar{\tau}$ é o tempo de residência, D é o diâmetro do tambor, N_R é o número de rotações por minuto do tambor, L é o comprimento do tambor, α é a angulação do tambor e k_p é o coeficiente empírico.

$$\bar{\tau} = \frac{k_p L}{D N_R^{0.9} \cdot \tan(\alpha)} \quad (3)$$

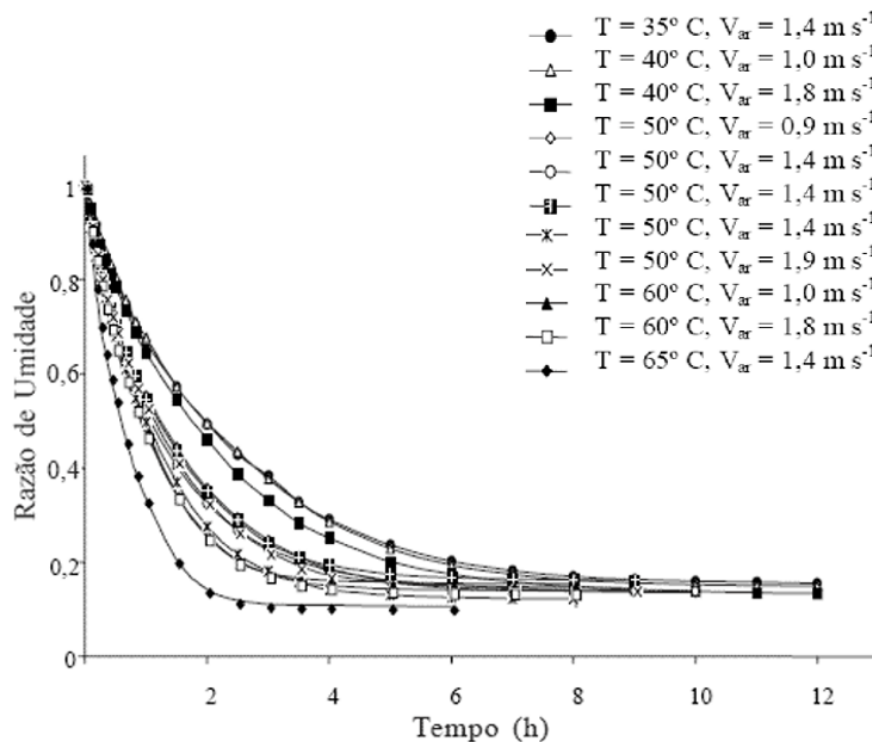


Figura 9. Cinética de secagem do caju para diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem (GOUVEIA et al., 2002).

2.3.6 Balanços e Coeficientes na Secagem

Para aprofundar a análise da secagem e permitir o dimensionamento e otimização de equipamentos, faz-se necessário o uso de modelos matemáticos que quantifiquem os fenômenos de transferência de calor e massa. Nesse contexto, o modelo proposto por Lewis (1921), trabalhado por Sherwood (1928), autores posteriores e academicamente difundido em livros de operações químicas (MCCABE & SMITH, 1993) é fundamental para os cálculos e compreensão dos balanços envolvidos em secadores industriais, especialmente os rotativos.

A secagem é fundamentalmente um processo térmico, em que o calor fornecido deve ser suficiente para aquecer o material particulado e, crucialmente, vaporizar o líquido contido. A quantidade de calor transferida por unidade de massa de sólido em um secador é dada pela Equação (4), em que q_T é o calor total transferido, \dot{m}_s é a vazão mássica de sólido, c_{ps} é o calor específico do sólido, T_{sb} e T_{sa} são as temperaturas final e inicial do sólido, respectivamente, X_a e X_b são as umidades inicial e final, c_{pL} é o calor específico do líquido, T_v é a temperatura de vaporização, λ é o calor de vaporização, c_{pv} é o calor específico do vapor e T_{va} é a temperatura final do vapor.

$$\frac{q_T}{\dot{m}_s} = c_{ps}(T_{sb} - T_{sa}) + X_a c_{pL}(T_v - T_{sa}) + (X_a - X_b)\lambda + X_b c_{pL}(T_{sb} - T_v) + (X_a - X_b)c_{pv}(T_{va} - T_v) \quad (4)$$

Para um secador contínuo que opera adiabaticamente, o calor total transferido também pode ser representado pelo balanço de energia no ar, conforme a Equação (5), em que \dot{m}_g é a vazão mássica de ar seco, c_{sb} é o calor úmido do ar na entrada, e T_{hb} e T_{ha} são as temperaturas do ar na entrada e na saída, respectivamente.

$$q_T = \dot{m}_g c_{sb}(T_{hb} - T_{ha}) \quad (5)$$

Adicionalmente, para cálculos de dimensionamento de secadores, é comum a introdução de um coeficiente de transferência de calor volumétrico (Ua). Este parâmetro é especialmente útil em situações onde a área de transferência de calor disponível nos equipamentos é de difícil avaliação precisa. Assim, o calor transferido pode ser expresso pela Equação (6), em que V é volume e $\overline{\Delta T}$ é diferença de temperatura média.

$$q_T = UaV\overline{\Delta T} \quad (6)$$

Para o secador rotativo, o coeficiente Ua pode ser obtido empiricamente, conforme a Equação (7), em que G é a vazão mássica de sólido úmido e D é o diâmetro do secador.

$$Ua = \frac{0.5G^{0.67}}{D} \quad (6)$$

Substituindo a expressão para o volume de um cilindro na Equação (7) e utilizando a Equação (7) para Ua , o calor total transferido em secadores rotativos pode ser reescrito como a Equação (8), em que L é o comprimento do secador.

$$q_T = \frac{0.5G^{0.67}}{D} V\overline{\Delta T} = 0.125\pi D L G^{0.67} \overline{\Delta T} \quad (8)$$

Uma consideração importante no projeto de secadores rotativos é a razão entre o comprimento e o diâmetro, a qual se mantém em um intervalo adequado que varia de 4 a 10, influenciando diretamente a geometria e o desempenho do equipamento. Secadores rotativos são também caracterizados pelo número de unidades de transferência de calor (N_t), dado pela Equação (9):

$$N_t = \frac{T_{hb} - T_{ha}}{\overline{\Delta T}} \quad (9)$$

Para este tipo de equipamento, adota-se comumente um número de unidades de transferência de calor entre 1,5 a 2,5. A diferença de temperatura média ($\overline{\Delta T}$) é tipicamente calculada utilizando a média logarítmica para a diferença de temperatura entre bulbo seco e bulbo úmido nas entradas e saídas do secador, conforme a Equação (10) em que T_{wb} e T_{wa} são as temperaturas de bulbo úmido na entrada e na saída, respectivamente.

$$\overline{\Delta T} = \overline{\Delta T}_L = \frac{(T_{hb} - T_{wb}) - (T_{ha} - T_{wa})}{\ln \left[\frac{T_{hb} - T_{wb}}{T_{ha} - T_{wa}} \right]} \quad (10)$$

Para o sistema ar-água, frequentemente utilizado na secagem de fertilizantes, a Equação (11) oferece uma forma simplificada para o cálculo do número de unidades de transferência de calor:

$$N_t = \ln \frac{T_{hb} - T_{wb}}{T_{ha} - T_{wb}} \quad (11)$$

No que tange à transferência de massa, o processo de secagem exige a avaliação da umidade presente no material que deve ser vaporizada. A água pode passar para a fase vapor tanto diretamente da superfície do material quanto internamente, pelos canais do particulado. Para essa avaliação, é necessário o cálculo do parâmetro de taxa média de transferência de massa (\dot{m}_v), dada pela Equação (12):

$$\dot{m}_v = \dot{m}_s(X_a - X_b) \quad (12)$$

Para estudos de secagem, é de maior interesse trabalhar com a umidade livre (X) em comparação com a umidade total (X_T). A umidade livre é obtida pela subtração da umidade total com a umidade de equilíbrio (X^*), conforme Equação (13):

$$X = X_T - X^* \quad (13)$$

Para o cálculo de transferência de massa, também se faz uso de correlações que possibilitam seu cálculo pelo coeficiente de transferência de massa (k_y) ou pelo coeficiente de transferência de calor (h_y). As Equações (14) e (15) são exemplos, em que M_v é a massa molecular do vapor, k_y é o coeficiente de transferência de massa, y_i e y são as frações molares do vapor na interface e no ar, A é a área de secagem, h_y é o coeficiente de transferência de calor, T é a temperatura do ar, T_i é a temperatura de interface e λ_i é o calor latente na temperatura de interface.

$$\dot{m}_v = \frac{M_v k_y (y_i - y) A}{(1 - y)_L} \quad (14)$$

$$\dot{m}_v = \frac{h_y (T - T_i) A}{\lambda_i} \quad (15)$$

A compreensão desses coeficientes e balanços é fundamental para determinar a taxa de secagem. Cada curva de secagem tipicamente exibe um segmento horizontal que corresponde ao primeiro período principal de secagem. Este período, que pode estar ausente se o teor de umidade inicial do sólido for menor que um certo mínimo, é denominado período de taxa constante. Ele é caracterizado por uma taxa de secagem independente do teor de umidade. Durante este período, o sólido está tão úmido que uma película contínua de água existe sobre toda a superfície de secagem, e esta água age como se o sólido não estivesse lá. Se o sólido não

for poroso, a água removida neste período é principalmente água superficial. A taxa de evaporação (R_c) para o período de taxa de secagem constante pode ser expressa pela Equação (16):

$$R_c = \frac{\dot{m}_v}{A} = \frac{h_y(T-T_i)}{\lambda_i} \quad (16)$$

Finalmente, para a fabricação de secadores, é necessário calcular o tempo de secagem sob as condições do secador, o que definirá como este deve ser projetado em questão de tamanho para uma capacidade desejada. Para obtenção do tempo de secagem, são utilizadas curvas de taxa de secagem, em que, para um período de taxa de secagem constante, o tempo de secagem (t_c) é dado pela Equação (17), em que X_1 e X_2 representam os teores de umidade no início e no fim do período:

$$t_c = \frac{m_s(X_1-X_2)}{AR_c} \quad (17)$$

A integração desses balanços e princípios de transferência, complementados por dados experimentais da cinética de secagem do material específico, é a base para o projeto eficiente de secadores industriais (MCCABE & SMITH, 1993).

2.4 Tecnologias de Secagem na Indústria de Fertilizantes

A escolha do tipo de secador na indústria de fertilizantes depende de fatores como as propriedades físico-químicas do fertilizante (granulometria, higroscopicidade, sensibilidade térmica), a capacidade de produção desejada, os requisitos de qualidade do produto final e os custos operacionais e de investimento. Dada a diversidade de produtos fertilizantes, diferentes tecnologias de secagem são empregadas, cada uma com suas características, vantagens e limitações específicas para atender às necessidades do processo.

Os fertilizantes, sejam eles nitrogenados, fosfatados ou potássicos, geralmente passam por uma etapa de secagem após a granulação ou formulação para reduzir o teor de umidade a níveis aceitáveis para armazenamento e aplicação. A umidade residual é um dos maiores desafios na produção e armazenamento de fertilizantes, sendo diretamente responsável por fenômenos indesejáveis como a higroscopicidade e o empedramento (YARA BRASIL, 2025). A higroscopicidade refere-se à tendência intrínseca de um material absorver umidade do ar atmosférico. Para fertilizantes, esta propriedade é expressa pela umidade relativa crítica, que é

a umidade relativa máxima à qual o produto pode ser exposto sem que haja absorção de água significativa. Na Figura 10 observa-se que cada tipo de fertilizante e mistura apresenta uma umidade crítica a depender da temperatura de ambiente e, quando a umidade do ambiente excede a umidade crítica do fertilizante (ALCARDE et al., 1992), ele começa a absorver água.

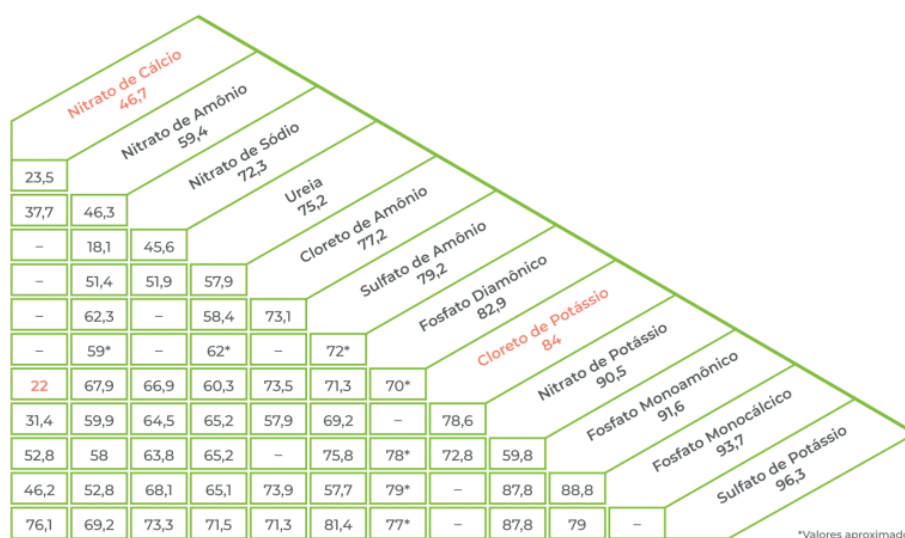


Figura 10. Umidades críticas de sais fertilizantes e misturas a 30°C. Os valores são em % de umidade relativa. Valores aproximados obtidos pelo T.V.A. (TVA, 1970).

A absorção de umidade tem consequências diretas no empedramento (Figura 11), que é a formação de aglomerados ou massas sólidas a partir de partículas que deveriam ser livres. Este fenômeno ocorre principalmente devido à formação de fortes pontes cristalinas e forças adesivas entre os grânulos, ativadas pela presença de umidade. Fatores como umidade do ar, temperatura e pressão ambiente, teor de umidade do próprio produto, dureza e formato da partícula, composição química e tempo de armazenamento influenciam significativamente a tendência ao empedramento. O fenômeno compromete severamente a fluidez do fertilizante, dificultando seu manuseio, transporte, armazenamento e, crucialmente, sua aplicação uniforme no campo, resultando em perdas de produto e ineficiência. Para evitar esses problemas, a secagem eficiente é indispensável.



Figura 11. Fertilizante empedrado (THOMÉ & BURCON, 2014).

2.4.1 Secadores Rotativos

Os secadores rotativos são uma das tecnologias de secagem mais empregadas e consolidadas na indústria de processos, incluindo o setor de fertilizantes. Sua prevalência é justificada por sua versatilidade, robustez operacional e grande capacidade de processamento contínuo, tornando-os ideais para lidar com grandes volumes de materiais sólidos (FOUST, 1982). Na Figura 12, o princípio de funcionamento baseia-se em um cilindro metálico, levemente inclinado em relação à horizontal, que gira lentamente em torno de seu próprio eixo. Essa rotação, combinada com a inclinação, permite que o material sólido se desloque axialmente de uma extremidade à outra do secador, ao mesmo tempo em que é elevado e redistribuído no interior do cilindro.

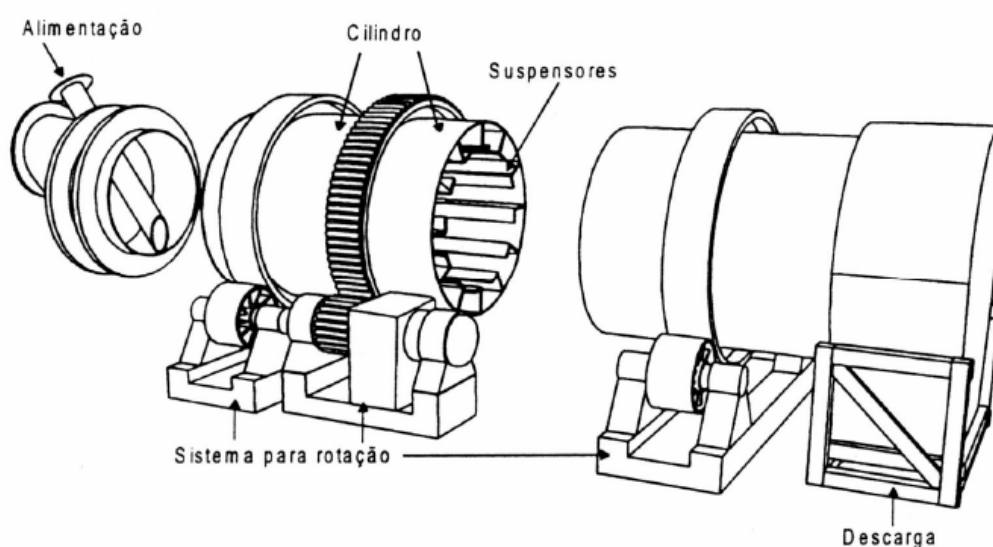


Figura 12. Esquema de um secador rotativo (ARRUDA, 2008).

O processo de secagem ocorre à medida que o material entra em contato com uma corrente de gases quentes, que pode fluir em contracorrente (o ar quente entra pela extremidade de descarga do sólido e se move em direção à entrada) ou em concorrente (o ar quente e o sólido entram pela mesma extremidade e se movem juntos). A escolha entre essas configurações depende da sensibilidade térmica do material e da umidade final desejada. A rotação do cilindro, auxiliada por "palhetas" ou "levantadores" internos (também conhecidos como suspensores ou talhas), promove o cascadeamento do sólido (Figura 13). Este movimento cíclico de elevação e queda do material maximiza o contato entre o sólido e o ar quente, aumentando drasticamente a área superficial exposta e, conseqüentemente, favorecendo a eficiência das transferências de calor e massa.

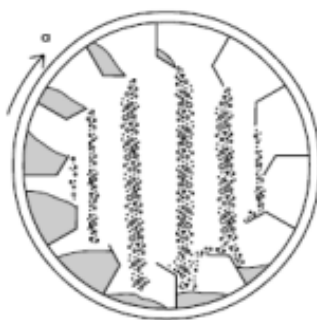


Figura 13. Efeito de cascadeamento (NILSON, 2008).

Secadores rotativos são particularmente adequados para materiais granulares e em pó, proporcionando uma boa homogeneização do produto durante o processo, o que contribui para uma secagem mais uniforme. Sua capacidade de processar grandes volumes de material com um custo operacional relativamente baixo, em comparação com outras tecnologias de secagem de alta eficiência, os torna a escolha preferencial para muitas etapas de produção de fertilizantes. Além disso, sua construção robusta permite o manuseio de materiais abrasivos e a operação contínua por longos períodos, minimizando paradas para manutenção.

2.4.1.1 Secadores Rotativos Diretos

Nos secadores rotativos diretos, a transferência de calor para o material úmido ocorre por contato direto entre os gases de secagem (geralmente ar quente ou gases provindos de uma câmara de combustão) e o material sólido. Os gases quentes são introduzidos no cilindro e passam através do leito de material que está sendo cascadeado (MCCABE & SMITH, 1993). A transferência de calor se dá principalmente por convecção, embora a radiação das paredes

internas quentes e a condução do próprio gás para as partículas também contribuam. Na Figura 14, um secador rotativo com câmara de combustão na extremidade.



Figura 14. Secador direto com câmara de combustão (FEECO).

A principal vantagem dos secadores rotativos diretos reside na sua alta eficiência de transferência de calor, alcançada através do contato íntimo entre o meio de secagem e o material. Essa característica permite taxas de secagem elevadas, tornando-os ideais para materiais que podem tolerar o contato direto com gases de alta temperatura. A flexibilidade operacional é outra vantagem significativa, permitindo configurações em concorrente ou contracorrente. Na operação em concorrente, o ar quente e o sólido úmido entram pela mesma extremidade do secador, o que é benéfico para materiais sensíveis ao calor, pois a maior umidade inicial do sólido mantém a temperatura da sua superfície mais baixa, próxima à temperatura de bulbo úmido, protegendo-o contra superaquecimento. À medida que o sólido avança e seca, a temperatura do ar de secagem já diminuiu. Por outro lado, na configuração em contracorrente, o ar quente é introduzido na extremidade de descarga do sólido seco, enquanto o material úmido entra pela extremidade oposta. Este arranjo é termicamente mais eficiente, pois o ar mais quente encontra o material mais seco e quente, e o ar mais frio e saturado encontra o material úmido, garantindo uma força motriz de secagem contínua ao longo do equipamento.

A operação em contracorrente é, portanto, ideal para materiais que não são termicamente sensíveis e para processos onde se deseja atingir uma umidade final muito baixa.

Contudo, os secadores rotativos diretos podem ter limitações, como a potencial emissão de pó fino junto com os gases de exaustão, exigindo sistemas de controle de poluição mais robustos (filtros de manga, ciclones). Além disso, o contato direto entre os gases de combustão e o produto pode ser inadequado para materiais inflamáveis ou que podem reagir com os produtos da combustão.

2.4.1.2 Secadores Rotativos Indiretos

Nos secadores rotativos indiretos, a transferência de calor para o material sólido ocorre indiretamente, ou seja, sem contato direto entre os gases de aquecimento e o material. O cilindro do secador é aquecido externamente por gases de combustão, vapor ou outro fluido térmico que flui através de uma jaqueta externa ou tubos internos (tubos de fogo). O calor é então transferido para o material por condução através da parede do cilindro ou dos tubos (LUZ et al., 2006). Na Figura 15, um secador indireto com manta térmica.



Figura 15. Secador indireto (FEECO).

Uma das principais vantagens deste método é o controle mais preciso da temperatura do produto, tornando-o ideal para materiais termicamente sensíveis ou que poderiam ser danificados por produtos de combustão. Outro benefício é o menor volume de gás de exaustão, uma vez que o fluxo de gás se destina apenas a purgar os vapores liberados, o que reduz os custos associados ao tratamento de gases e sistemas de filtragem. Adicionalmente, este tipo de secador facilita a recuperação de solventes, pois, ao operar com atmosfera inerte ou sob vácuo, os vapores não são diluídos em grandes volumes de ar e podem ser mais facilmente condensados. No entanto, os secadores indiretos apresentam desvantagens, como uma menor taxa de transferência de calor em comparação com os secadores diretos e um custo de capital potencialmente mais elevado devido à maior complexidade construtiva. Além disso, a capacidade de processamento pode ser inferior para equipamentos de mesmo volume.

2.4.2 Secadores de Leito Fluidizado

Os secadores de leito fluidizado representam uma tecnologia avançada e altamente eficiente para a secagem de materiais particulados, como fertilizantes, caracterizando-se por oferecerem altas taxas de transferência de calor e massa. O princípio fundamental de sua operação envolve a suspensão das partículas sólidas em um estado de "fluidização" por meio de um fluxo ascendente de gás, geralmente ar quente, que passa por uma placa perfurada na base do secador (STRUMILLO & PAKOWSKI, 1980). A velocidade do gás é precisamente ajustada para ser superior à velocidade mínima de fluidização, mas inferior à velocidade de arraste das partículas, garantindo que o material se comporte como um fluido em ebulição. Na Figura 16, um secador de leito fluidizado

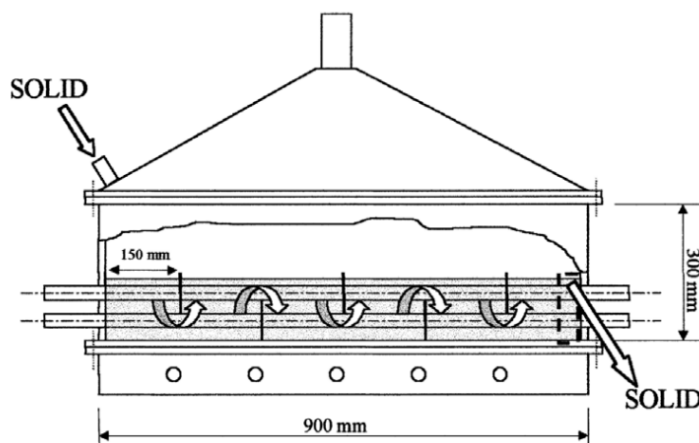


Figura 16. Esquema de um secador de leito fluidizado (CHENG et al., 2020).

Essa condição de fluidização confere ao processo diversas vantagens significativas. O movimento vigoroso e a mistura contínua das partículas garantem um contato íntimo e uniforme entre o ar quente e a superfície do material, resultando em excelentes taxas de transferência de calor e massa e, conseqüentemente, em uma secagem mais rápida. Além disso, a intensa agitação do leito minimiza a ocorrência de pontos quentes e frios, o que assegura a uniformidade do produto final, um fator crítico para fertilizantes, pois a umidade homogênea previne o empedramento e mantém a qualidade física do produto. A alta capacidade calorífica e a mistura constante também levam a uma temperatura quase isotérmica dentro do leito, permitindo um controle preciso que é crucial para materiais termossensíveis. Por fim, devido às suas altas taxas volumétricas de processamento, esses secadores tendem a ter um design mais compacto em comparação com outras tecnologias para uma mesma capacidade.

Apesar dos benefícios, existem desafios a serem considerados. O design da placa distribuidora de ar é crítico para garantir uma fluidização homogênea, e materiais muito abrasivos podem causar desgaste nos componentes internos. A suspensão de partículas finas também pode gerar emissões que exigem sistemas robustos de controle, como ciclones e filtros. Adicionalmente, o processo é mais adequado para materiais com uma faixa de granulometria relativamente estreita.

Mesmo assim, para aplicações como a de fertilizantes, que exigem secagem rápida e onde a uniformidade do produto é primordial, o secador de leito fluidizado pode ser uma opção. A combinação de alta eficiência, controle de temperatura e homogeneidade torna-o uma tecnologia de ponta para a produção de fertilizantes de alta qualidade.

2.4.3 Secadores de Bandeja

São utilizados para operações de menor escala, ensaios, pesquisa e para produtos com características especiais ou para materiais termicamente sensíveis que requerem um controle muito preciso. Na Figura 17, o material é disposto em camadas finas em bandejas, e o ar quente flui sobre elas (SFREDO & REZENDE, 2008). São mais empregados em fases de desenvolvimento de produto, para a produção de fertilizantes de alto valor agregado ou para lotes específicos que demandam controle rigoroso do processo.

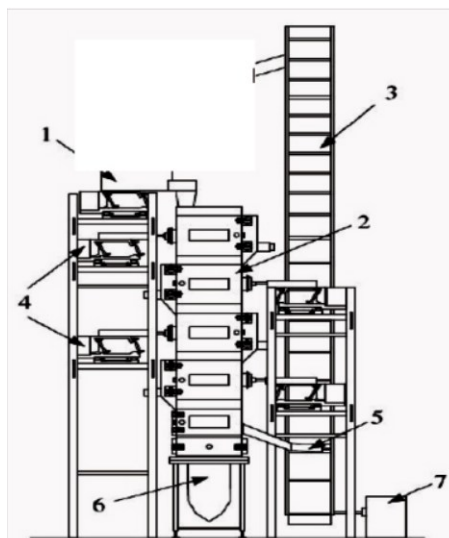


Figura 17. Esquema do secador de bandejas vibradas com reciclo (vista frontal). 1: alimentador vibratório; 2: túnel de secagem; 3: esteira transportadora; 4 vibradores eletromagnéticos; 5: descarga dos frutos de tomate; 6: tubulação de ar; 7: motorreductor (LOURENÇO & FINZER, 2013).

2.5 Inovações

A indústria de fertilizantes, impulsionada pela necessidade de aumentar a eficiência produtiva, reduzir custos operacionais e minimizar o impacto ambiental, tem investido significativamente em inovações tecnológicas no processo de secagem. Essas inovações buscam superar os desafios inerentes à secagem de materiais com características variadas, sensibilidade térmica e alta higroscopicidade. A busca por processos mais eficientes e sustentáveis é um motor contínuo de pesquisa e desenvolvimento.

Uma das direções mais promissoras é o desenvolvimento de secadores híbridos, que combinam diferentes tecnologias de secagem para maximizar a eficiência e a qualidade do produto. Por exemplo, a integração de secadores de leito fluidizado com tecnologias de movimento rotativos permite uma transferência de calor e massa mais eficiente e homogênea, resultando em tempos de secagem reduzidos e menor consumo de energia. Essas abordagens híbridas buscam explorar as vantagens de cada método, mitigando suas limitações individuais (ARRUDA, 2008).

A aplicação de inteligência artificial (IA) e modelos preditivos para o controle e otimização de processos representa outra fronteira de inovação. Sistemas avançados de controle podem monitorar em tempo real múltiplos parâmetros operacionais (temperatura, umidade, vazão, pressão, etc.) e ajustar automaticamente as condições do secador. Utilizando algoritmos de aprendizado de máquina (Figuras 18 e 19), esses sistemas podem prever o comportamento do material, otimizar o consumo de energia, garantir a uniformidade da secagem e reagir rapidamente a perturbações no processo, minimizando desperdícios e garantindo a qualidade do produto final de forma autônoma e preditiva. A manutenção preditiva, baseada na análise de dados dos equipamentos, também se beneficia da IA prevenindo falhas e paradas não programadas (NETTO-FERREIRA et al., 2024).

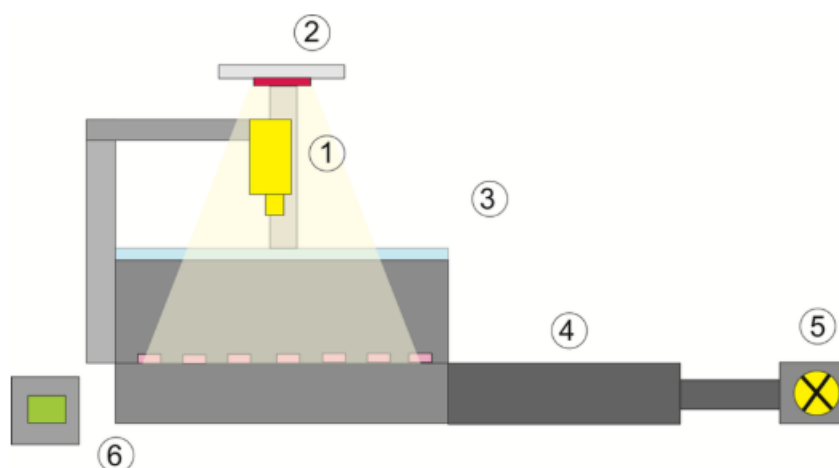


Figura 18. Esquema de uma câmara de secagem com câmara de monitoramento e atuação de IA (NETTO-FERREIRA et al., 2024).

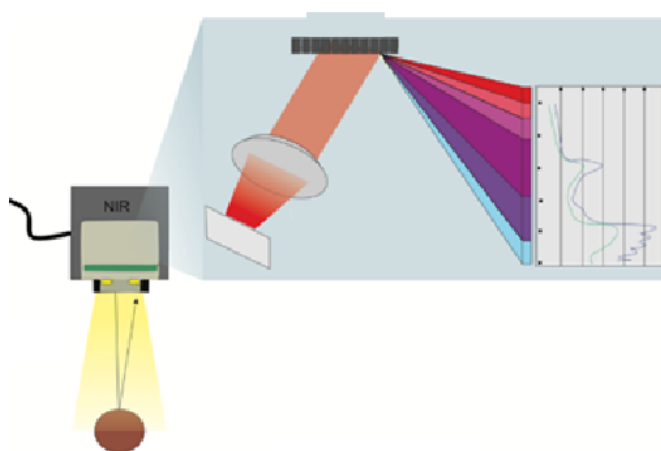


Figura 19. Esquema de análise NIR em câmara de secagem (NETTO-FERREIRA et al., 2024).

Outra área de inovação para a indústria de fertilizantes é o revestimento de partículas. Esta técnica consiste na aplicação de uma fina camada de material sobre os grânulos do fertilizante, conferindo-lhes propriedades aprimoradas. O objetivo principal do revestimento é controlar a taxa de liberação de nutrientes para que ela se alinhe melhor com o ciclo de vida da planta, reduzindo perdas por lixiviação e volatilização, e aumentando a eficiência de uso do nutriente. Além do controle de liberação, o revestimento (Figura 20) também é eficaz na mitigação da higroscopicidade e do empedramento, prolongando a vida útil do produto e melhorando seu manuseio.

Dessa forma, se faz de extrema necessidade realizar estudos de secagem sobre fertilizantes que já estejam revestidos, visto que as propriedades serão alteradas e é preciso ter maior cuidado para observar intervalos de operação que não venham a prejudicar a cobertura durante o processo de aquecimento.



Figura 20. Esquema de processo de revestimento em tambor (ES'HAGHI et al., 2024).

Os materiais empregados no revestimento são diversos, incluindo polímeros sintéticos (como poliuretano e polietileno), como na Figura 21, em que se mostra uma ureia revestida com uma camada interna de enxofre e uma externa de polímero, o qual é principalmente biodegradável de origem natural, como lignina, amido, quitosana e celulose. Estes últimos oferecem uma alternativa mais sustentável, alinhada com as demandas por produtos mais ecológicos. Além dos polímeros, materiais como enxofre (ES'HAGHI, et al., 2024) elementar e minerais também são utilizados, muitas vezes em combinação em sistemas híbridos para otimizar as propriedades e reduzir custos.

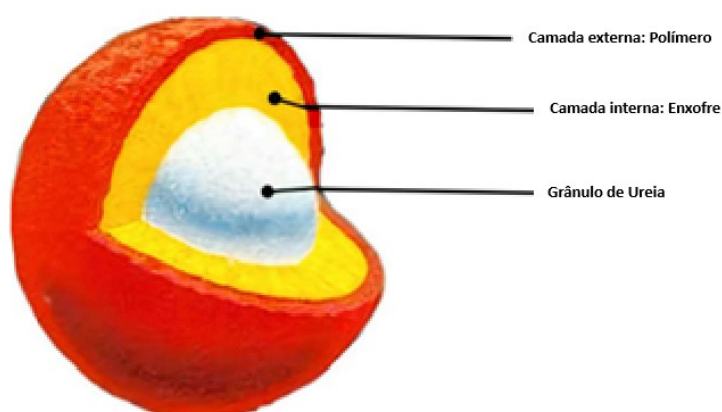


Figura 21. Esquema de ureia revestida (ES'HAGHI et al., 2024).

Finalmente, a sustentabilidade ambiental é um motor fundamental para as inovações. Pesquisas e implementações focam em tecnologias de secagem que minimizem a emissão de gases poluentes e partículas, bem como a maximização da recuperação de calor e água nos processos. Isso inclui o uso de combustíveis mais limpos, sistemas de filtragem avançados para o ar de exaustão e a integração de ciclos de recuperação de energia para reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Apesar desses avanços, a secagem na indústria de fertilizantes ainda enfrenta desafios, como a modelagem precisa do comportamento de secagem para as diversas formulações de fertilizantes e a redução do consumo energético em processos de alta capacidade, especialmente para materiais com alta sensibilidade térmica.

3 ESTUDO DE CASO: TECNOLOGIAS UTILIZADAS EM SECAGEM DE FERTILIZANTES

3.1 Introdução

A operação de secagem é um dos processos mais críticos e energeticamente intensivos na indústria de fertilizantes. A escolha e a otimização do método de secagem impactam diretamente a qualidade final do produto, os custos operacionais e a sustentabilidade da produção. Historicamente, os secadores rotativos convencionais têm sido a tecnologia dominante para materiais granulares devido à sua robustez e alta capacidade de processamento. Contudo, a busca contínua por maior eficiência energética e controle de processo impulsionou tanto a otimização da tecnologia existente quanto o desenvolvimento de novos equipamentos.

Para contextualizar os desafios e as inovações nesta área, este capítulo analisará uma série de estudos de caso emblemáticos. Primeiramente, será apresentado o modelo de Page, uma ferramenta matemática fundamental para a descrição da cinética de secagem. Em seguida, iniciaremos com uma análise do trabalho clássico de Friedman e Marshall (1949), que estabeleceu as bases experimentais para a compreensão da transferência de calor em secadores rotativos. Abordaremos a evolução para a era da simulação computacional e, por fim, aprofundaremos em estudos de caso modernos que comparam tecnologias e focam na engenharia de produto, como os de Arruda (2008) e Teixeira et al. (2019). A análise conjunta destes estudos permitirá a formulação de uma visão crítica sobre as melhores práticas e o futuro da secagem de fertilizantes.

3.2 Modelo de Page

Antes de analisar os estudos de caso de desempenho de secadores, é fundamental compreender uma das ferramentas matemáticas mais importantes e recorrentes na análise da cinética de secagem: o modelo de Page. Proposto por Glen E. Page em sua tese de mestrado de 1949, o modelo surgiu da necessidade de encontrar uma relação matemática mais precisa para descrever a taxa de secagem de produtos agrícolas, especificamente o milho em camadas finas (PAGE, 1949).

O modelo de Page é uma modificação do modelo de Lewis (também conhecido como modelo de Newton para resfriamento), Equação (17), que descreve a secagem com uma simples relação exponencial derivada da lei de Fick (LEWIS, 1921), em que MR representa a razão de

umidade (a umidade livre remanescente no produto), t é o tempo de secagem e K é a constante de secagem (relacionada à velocidade do processo).

$$MR = \exp(-K \cdot t) \quad (17)$$

Enquanto o modelo de Lewis, era uma boa aproximação, ele frequentemente falhava em descrever com precisão toda a curva de secagem de materiais biológicos. A inovação de Page foi a introdução de um segundo parâmetro, um expoente 'n', resultando na equação empírica, Equação (18), que hoje leva seu nome:

$$MR = \exp(-K \cdot t^n) \quad (18)$$

A adição do expoente n conferiu ao modelo a flexibilidade necessária para se ajustar com muito mais precisão aos dados experimentais da secagem de grãos e outros materiais particulados, como o caso dos fertilizantes.

Em seu trabalho original, Page (1949) concluiu que o expoente n variava principalmente com a umidade relativa do ar de secagem, enquanto a constante k (chamada por ele de "unidade de tempo") era afetada pela temperatura do ar e pela umidade inicial do grão. Devido à sua simplicidade e alta precisão para uma vasta gama de materiais, o modelo de Page tornou-se uma ferramenta padrão na engenharia de secagem. Sua importância será evidenciada nos estudos de caso a seguir, onde tanto Arruda (2008) quanto Teixeira et al. (2019) o identificaram como o modelo de melhor ajuste para descrever a cinética de seus respectivos processos.

3.2 Melhoria de procedimento experimental

O trabalho de S. J. Friedman e W. R. Marshall Jr., publicado em 1949, representa um marco na engenharia de secagem, sendo uma referência fundamental para a análise de secadores rotativos convencionais. A pesquisa, citada extensivamente por Arruda (2008), focou na caracterização experimental rigorosa dos fenômenos de transferência de calor e massa, estabelecendo correlações empíricas que são utilizadas até hoje.

A pesquisa foi realizada em um secador piloto de 0,3 m de diâmetro por 1,83 m de comprimento. Os autores empregaram isolamento extensivo para reduzir as perdas de calor do sistema em aproximadamente 15%. Um dos desafios experimentais notáveis foi a dificuldade

em obter medições precisas da temperatura do ar dentro do equipamento, atribuída a padrões de circulação interna. Para superar isso, as temperaturas do ar foram calculadas por meio de balanços de energia, garantindo a consistência dos resultados. A investigação foi dividida em duas partes: a primeira focada na fluidodinâmica (*holdup* e geração de pó) e a segunda, de maior impacto, na transferência de calor e massa.

O principal legado do estudo foi a proposição de uma correlação empírica robusta para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor (U_a). A equação demonstrou que este coeficiente é fortemente dependente (Equação 19), em que K , m e n são parâmetros empíricos, G_f é a vazão de ar quente e G_s é a vazão de sólidos.

$$U_a = K \cdot G_f^m \cdot G_s^n \quad (19)$$

Uva (kJ/m ³ s°C)				
Secador	K	m	n	R ² (%)
2 × 0,7 × 0,7cm	3,535	0,289	0,541	89,13
Roto-09mm	63,235	-0,08	1,12	86,24

Tabela 5. Tabela de parâmetros K , m e n para secadores utilizados em trabalho (ARRUDA, 2008).

Este estudo de caso é fundamental por estabelecer um *benchmark* experimental para o desempenho de secadores convencionais. Ele quantificou a performance da tecnologia, criando uma base sólida sobre a qual novas abordagens puderam ser comparadas. O trabalho ilustra a base fundamental sobre a qual o conhecimento moderno de secagem foi construído, destacando a transferência de calor como o principal gargalo de eficiência a ser superado.

3.3 Simulação e Modelos Preditivos de Desempenho

Com o avanço da capacidade computacional, a análise de secadores rotativos evoluiu da dependência de correlações empíricas globais para o desenvolvimento de modelos de simulação mais detalhados. Essa abordagem busca descrever os fenômenos físicos de forma mais fundamental, permitindo prever o desempenho do secador. O trabalho de Kamke e Wilson

(1986) é um exemplo representativo dessa transição, onde foram feitas diversas simulações e comparações com a unidade experimental da Figura 22.

Diferente da abordagem de Friedman e Marshall (1949), que correlaciona variáveis macroscópicas, os modelos de simulação dividem o secador em múltiplos incrementos ao longo de seu comprimento. Para cada incremento, são resolvidos simultaneamente os balanços de massa e energia, além das equações de movimento das partículas. Um avanço chave dessa abordagem é o cálculo do coeficiente global de transferência de calor (U_a) a partir de parâmetros mais fundamentais, como o coeficiente pelicular de transferência de calor por convecção (h) e a área superficial das partículas em queda nos suspensores (A_f), Equação 20. Isso confere ao modelo uma maior capacidade preditiva e uma menor dependência de dados puramente empíricos para cada novo material.

$$U_a = \frac{h \cdot A_f}{V} \quad (20)$$

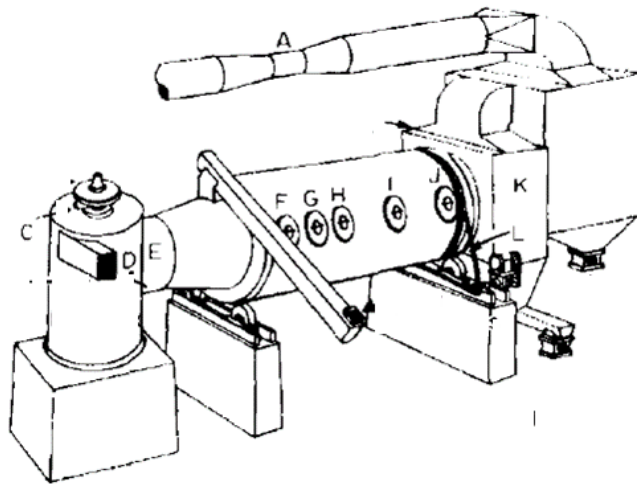


Figura 22. Um secador rotativo de passagem única com aletas de enchimento central, usado para experimentos de tempo de retenção e secagem (KAMKE & WILSON, 1986).

Este tipo de estudo de caso demonstra a viabilidade da simulação como uma poderosa ferramenta de projeto e otimização, resultando em dados muito próximos dos experimentais, como visto na Figura 23. Um modelo validado permite uma análise muito mais granular do processo, possibilitando a identificação de gargalos e a otimização virtual de variáveis

operacionais. Essa metodologia representa uma mudança de paradigma, fornecendo uma plataforma para a melhoria de processos existentes e servindo como base para a validação de novas tecnologias, exatamente como realizado por Arruda (2008) em sua análise.

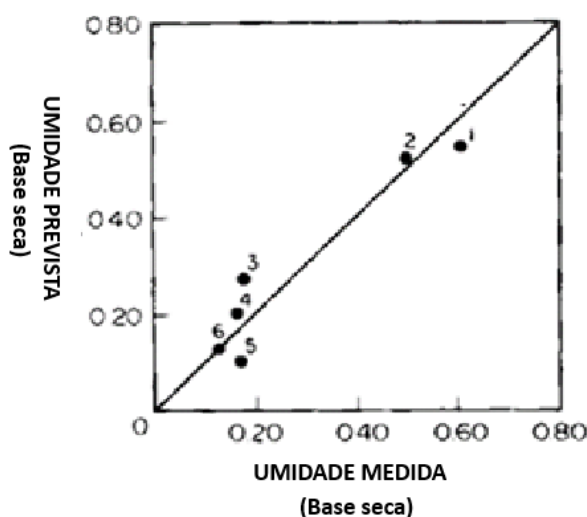


Figura 23. Teor de umidade previsto e medido das partículas de saída no secador rotativo, seis testes (KAMKE & WILSON, 1986).

3.4 Comparação do Secador Roto-Fluidizado

O estudo de Arruda (2008) realiza uma avaliação de inovação de processo. O trabalho realiza uma análise comparativa direta entre o secador rotatório convencional com cascadeamento e uma nova configuração, o secador roto-fluidizado, utilizando como material o fertilizante superfosfato simples granulado (SSPG).

A metodologia teve como objetivo central analisar e comparar os fenômenos de transferência de massa e energia nos dois equipamentos. A pesquisa foi conduzida em uma unidade piloto (Figura 24) na Faculdade de Engenharia Química da UFU, composta por um secador de 1,5 m de comprimento e 0,3 m de diâmetro, com sistemas de controle para as principais variáveis de processo. Para garantir uma comparação justa, o estudo primeiro determinou as condições operacionais ótimas para o secador convencional (equipado com suspensores para promover o cascadeamento), que ocorreram com 6 suspensores, inclinação de 3° e rotação de 3,6 rpm.

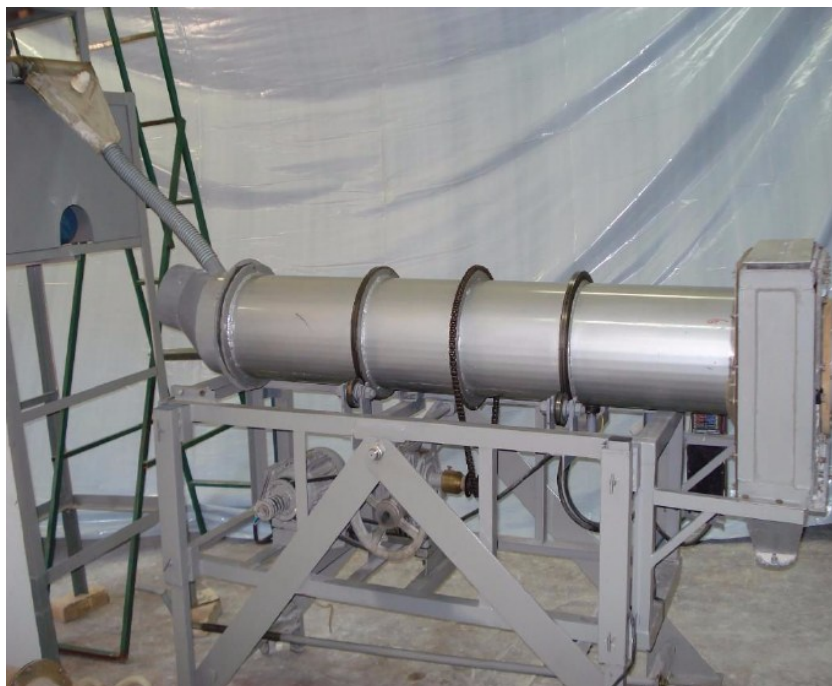


Figura 24. Secador rotativo experimental (ARRUDA, 2008).

A inovação do secador roto-fluidizado consiste na substituição desses suspensores por um sistema de tubos que injeta o ar de secagem diretamente no leito de sólidos, como mostrado na Figura 25, promovendo sua fluidização e intensificando o contato gás-partícula (ARRUDA, 2008). Durante os ensaios, foram sistematicamente variadas e controladas a temperatura do ar de secagem, a vazão do ar e a taxa de alimentação do fertilizante. A umidade das amostras foi determinada pelo método gravimétrico padrão, com secagem em estufa a 105°C por 24 horas.



Figura 25. Interior de secador roto fluidizado (ARRUDA, 2008).

Um passo fundamental anterior à comparação dos secadores foi a caracterização do material. Arruda (2008) realizou ensaios de cinética de secagem em camada fina para entender o comportamento intrínseco do fertilizante SSPG sob diferentes condições de temperatura e velocidade do ar. Os resultados desses ensaios geraram as curvas de secagem, que plotam a umidade adimensional (MR) em função do tempo, Figura 26. Essas curvas são cruciais, pois revelam a taxa na qual o material perde umidade. Foi observado que o aumento da temperatura do ar acelerou significativamente a secagem, enquanto o efeito da velocidade do ar foi pequeno, indicando que o processo é controlado primariamente por mecanismos difusivos internos da partícula. Os dados experimentais dessas curvas foram então utilizados para ajustar um modelo matemático semiempírico (o modelo de Page) que descreve a taxa de secagem (R_w), como mostra a Figura 27. Essa equação da taxa de secagem tornou-se um componente essencial do modelo de simulação global para prever o desempenho dos secadores em escala piloto.

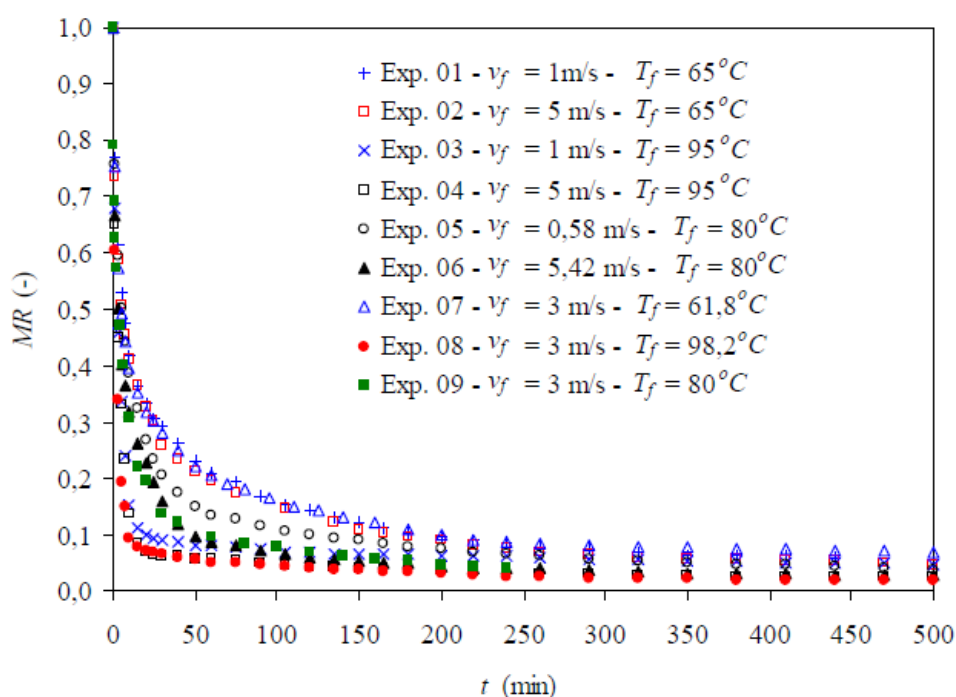


Figura 26. Curvas experimentais de cinética de secagem para o fertilizante SSPG sob diferentes condições (ARRUDA, 2008).

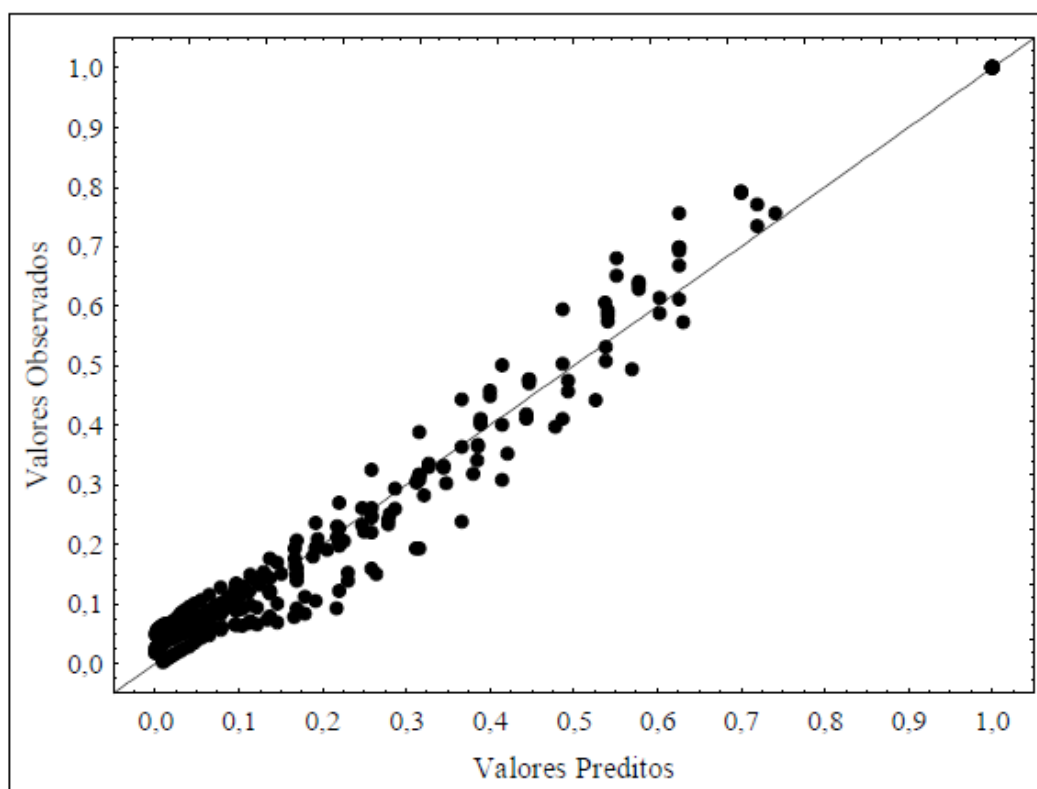


Figura 27. Gráfico de valores observados e os valores preditos pela equação de PAGE, 1949 (ARRUDA, 2008).

A comparação final entre os equipamentos revelou uma melhora expressiva e quantificável no desempenho do secador roto-fluidizado. As conclusões do estudo indicam que a nova configuração, quando comparada à convencional operando em sua faixa ótima, apresentou uma série de melhorias significativas. Especificamente, observou-se um aumento de 2,1 a 4,4 vezes no coeficiente global volumétrico de transferência de calor, o que resultou em taxas de secagem de 3,1 a 4,9 vezes maiores, como mostram as Figuras 28 e 29. Paralelamente, a variação na temperatura do sólido foi de 1,7 a 3,3 vezes maior, indicando uma troca térmica mais eficaz. Finalmente, o tempo de residência das partículas foi, em média, 48% menor, o que implica um aumento direto na capacidade de processamento do equipamento. As implicações deste estudo são vastas, apontando para um potencial significativo de redução no consumo energético e aumento da capacidade produtiva.

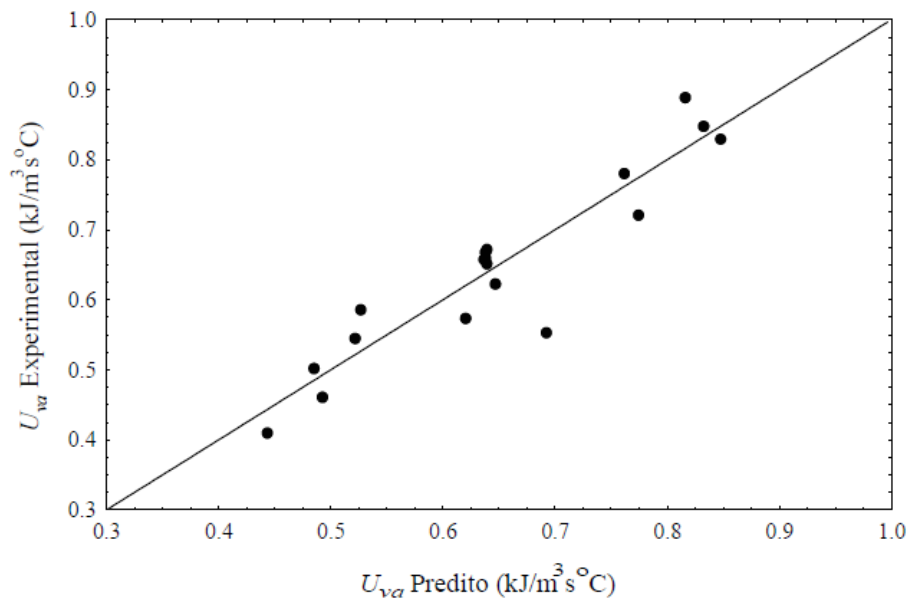


Figura 28. Valores observados contra preditos pela equação de FRIEDMAN e MARSHALL (1949b), para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor em secador rotatório convencional com suspensores 2x0,7x0,7 cm (ARRUDA, 2008).

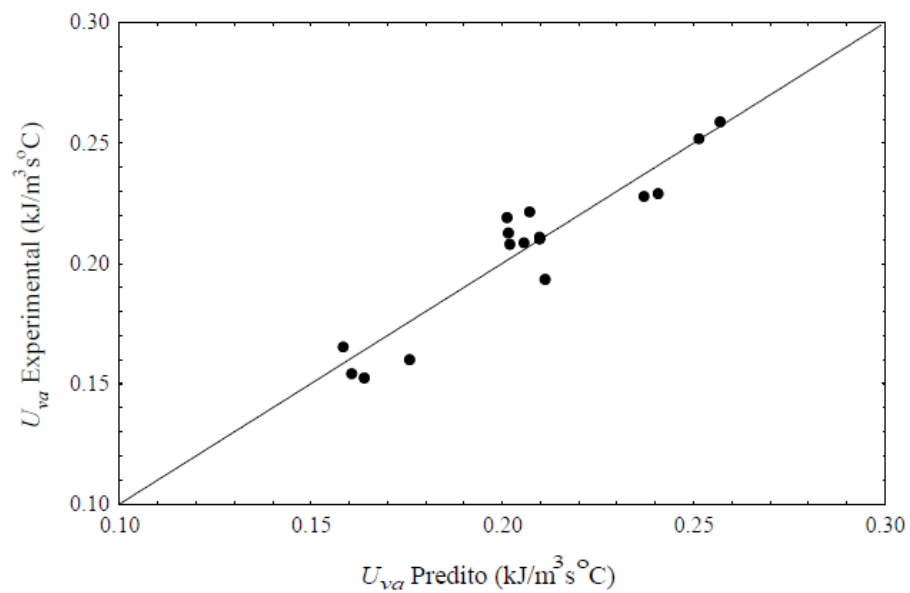


Figura 29. Valores observados contra preditos pela equação de FRIEDMAN e MARSHALL (1949b), para o coeficiente global volumétrico de transferência de calor para o secador roto-fluidizado Roto-09 mm. (ARRUDA, 2008).

3.5 Secagem por Infravermelho para Fertilizantes de Liberação Lenta

Este trabalho, conduzido por Jesus et al. (2019), ilustra uma aplicação moderna da secagem, onde o processo é uma etapa crítica não apenas para a remoção de umidade, mas para a engenharia de um produto de alto valor agregado: um fertilizante de liberação lenta. O objetivo da pesquisa foi desenvolver um fertilizante NPK imobilizado em uma biomassa (resíduo de malte de cervejaria) para retardar a liberação de nutrientes no solo, combatendo perdas por lixiviação e volatilização.

A metodologia envolveu a impregnação do fertilizante NPK na biomassa de malte, seguida pela secagem da mistura em um analisador de umidade por infravermelho. O estudo avaliou o efeito da temperatura de secagem (60°C, 100°C e 110°C), da concentração de fertilizante e do tempo de embebedimento na biomassa (t) sobre a cinética do processo. As curvas de secagem geradas mostraram que a razão de umidade decresce mais rapidamente com o aumento da temperatura, um comportamento cinético esperado e similar ao observado por Arruda (2008).

Amostra	Variáveis			Respostas	
	C (g fert/g bio)	T (°C)	t (min)	t_c 90% (min)	Parâmetros do Modelo de Page
1	0,9	60	21	21	$n= 1,4328$ $K= 0,0277$
2	0,9	60	99	21,3	$n= 1,4357$ $K= 0,0269$
3	0,9	100	21	9	$n= 1,0364$ $K= 0,1990$
4	0,9	100	99	9	$n= 1,4016$ $K= 0,0987$
5	1,5	60	21	28	$n= 1,3164$ $K= 0,0284$
6	1,5	60	99	28,5	$n= 1,2966$ $K= 0,0286$
7	1,5	100	21	14,1	$n= 1,0965$ $K= 0,1206$
8	1,5	100	99	10,4	$n= 1,4641$ $K= 0,0730$
9	0,74	80	60	12,9	$n= 1,3802$ $K= 0,0624$
10	1,66	80	60	15	$n= 1,2110$ $K= 0,0841$
11	1,2	50	60	46	$n= 1,4306$ $K= 0,0091$
12	1,2	110	60	10,2	$n= 1,1319$ $K= 0,1457$
13	1,2	80	0,54	16,5	$n= 1,2215$ $K= 0,0733$
14	1,2	80	119	15,2	$n= 1,3903$ $K= 0,0503$

Tabela 6. Análise geral das amostras e suas simulações (JESUS et al., 2019).

Uma conexão notável entre os dois trabalhos é a modelagem da cinética. Assim como Arruda (2008) concluiu para o superfosfato simples em secador convencional, o estudo de Jesus et al. (2019) também determinou que, dentre vários modelos testados, o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da secagem da mistura fertilizante-biomassa. Isso sugere a robustez do modelo de Page para descrever a cinética de secagem de diferentes tipos de fertilizantes sob diferentes métodos de aquecimento.

O diferencial deste estudo reside no seu critério de otimização. Enquanto os trabalhos anteriores focavam na maximização da eficiência do processo (maior taxa de secagem, menor tempo de residência), o objetivo aqui era encontrar a condição que produzisse a liberação de nutrientes mais lenta, medida por meio da condutividade da solução ao longo do tempo. O resultado mais significativo, observado na Figura 30, foi que a liberação mais lenta de nutrientes, ou seja, a melhor qualidade do produto para a aplicação desejada, foi alcançada nas amostras com maior concentração de fertilizante (1,5 g fertilizante/g biomassa) e secas na menor temperatura (60°C).

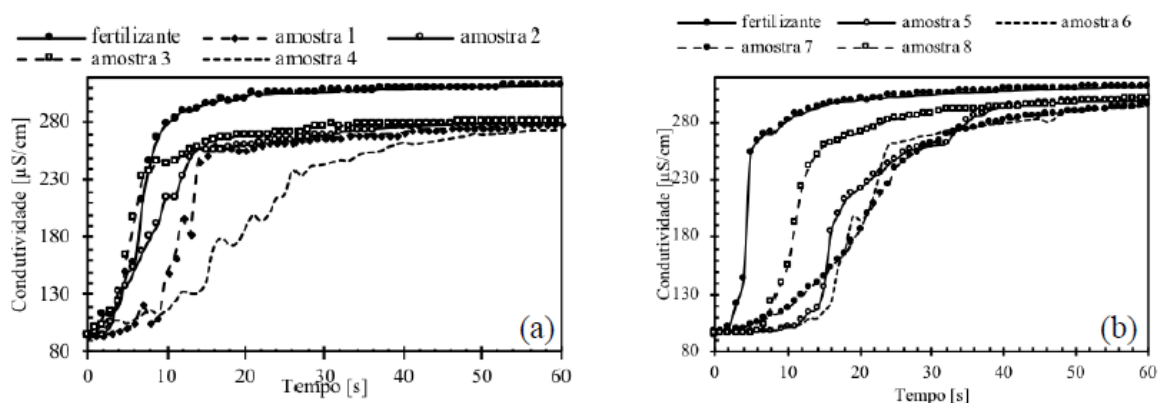


Figura 30 - Comparação da variação da condutividade em função do tempo das amostras com o fertilizante: (a) amostras de 1 a 4; (b) de 5 a 8. (JESUS et al., 2019).

Este achado é contraintuitivo sob a ótica da eficiência de processo, mas fundamental sob a ótica da engenharia de produto, pois demonstra que uma secagem mais branda pode ser benéfica para a preservação e funcionalidade de produtos compósitos, como os fertilizantes de liberação controlada. O estudo conclui recomendando esta condição para futuros testes de granulação.

3.6 Análise sobre os Desafios da Secagem

Para consolidar as informações apresentadas, a Tabela 7 resume as principais características dos estudos de caso analisados, evidenciando a evolução das abordagens na engenharia de secagem.

Característica	Friedman & Marshall (1949)	Kamke & Wilson (1986)	Arruda (2008)	Jesus et al. (2019)
Foco Principal	Caracterização experimental e desenvolvimento de correlações empíricas.	Simulação computacional do processo de secagem.	Comparação de desempenho entre tecnologia convencional e inovadora (roto-fluidizado).	Desenvolvimento de um produto de liberação lenta, otimizando a secagem para a funcionalidade final.
Metodologia	Medições em secador piloto para obter dados globais.	Modelo matemático com balanços incrementais resolvidos numericamente.	Experimentos em unidade piloto e modelagem matemática para validação.	Secagem por infravermelho e medição de liberação de nutrientes por condutividade.
Material	Areia e outros materiais granulares.	Partículas de madeira.	Fertilizante SSPG.	Fertilizante NPK e biomassa de malte.
Principal Contribuição	Primeira correlação robusta para o coeficiente de transferência de calor (Uva).	Demonstração da viabilidade de modelos de simulação para predição de desempenho.	Prova quantitativa da superioridade do secador roto-fluidizado em eficiência e capacidade.	Demonstração de que a secagem a temperaturas mais baixas (60°C) otimiza a qualidade (liberação lenta) do produto final.

Tabela 7 – Comparativo dos trabalhos envolvendo secador rotativo. Autoria Própria (2025).

A análise conjunta dos estudos de caso traça uma clara linha evolutiva na abordagem da secagem de sólidos: da caracterização experimental fundamental, passando pela simulação computacional, até a inovação em hardware de processo. A partir desta análise, conclui-se que a seleção de uma tecnologia de secagem não se resume a uma decisão única, mas a um balanço complexo entre eficiência, engenharia, custo e a realidade industrial. O estudo de Arruda (2008) demonstra a superioridade técnica de tecnologias inovadoras como o secador roto-fluidizado. A intensificação da transferência de massa e energia é o caminho tecnológico evidente para novas plantas que buscam máxima eficiência.

Contudo, a realidade industrial é dominada por uma vasta base instalada de secadores rotativos convencionais. Neste contexto, a otimização desses sistemas, conforme explorado por modelos de simulação, é igualmente crucial. Ganhos significativos de eficiência podem ser alcançados através do melhor controle dos equipamentos existentes, sem a necessidade de investimentos de capital proibitivos. A otimização de ativos existentes e o desenvolvimento de novas tecnologias não são, portanto, estratégias excludentes, mas complementares para a competitividade do setor.

Diante do exposto, pode-se argumentar que o futuro da secagem na indústria de fertilizantes reside em uma abordagem holística e adaptativa. Essa abordagem se desdobra em três frentes estratégicas. Primeiramente, a inovação para novas instalações, priorizando tecnologias de ponta como o secador roto-fluidizado em novos projetos para estabelecer novos padrões de desempenho. Em segundo lugar, a otimização da base instalada, utilizando modelagem e controle avançado para extrair o máximo de eficiência da infraestrutura existente. Finalmente, a integração com a engenharia de produto, considerando a secagem não apenas como uma etapa de remoção de umidade, mas como um processo-chave na fabricação de produtos de maior valor agregado, como os fertilizantes de liberação controlada, onde o controle preciso do processo é mandatório para a funcionalidade do produto final. Em suma, o desafio para a indústria é balancear a busca por inovações disruptivas com a otimização pragmática do presente para atender à crescente demanda global por alimentos de forma mais eficiente, econômica e sustentável.

4 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

4.1 Conclusão

Este trabalho propôs-se a realizar uma análise crítica e abrangente dos processos de secagem na indústria de fertilizantes, com o objetivo de identificar as melhores práticas, avaliar as tecnologias predominantes e destacar as inovações que visam a otimização da eficiência e da qualidade do produto final. Através de uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos da secagem e da análise aprofundada de uma série de estudos de caso, foi possível contextualizar a relevância estratégica desta operação unitária, traçando uma clara linha evolutiva do conhecimento e da tecnologia no setor.

A revisão bibliográfica estabeleceu que a secagem é uma etapa indispensável no ciclo de produção de fertilizantes. Sua função transcende a simples remoção de umidade, sendo fundamental para garantir as propriedades físicas ideais do produto, como a fluidez e a granulometria, e para prevenir fenômenos deletérios como a higroscopicidade e o empedramento, que comprometem a estabilidade, o armazenamento e a eficácia da aplicação. A compreensão dos mecanismos de transferência de calor e massa e dos diferentes períodos de secagem mostrou-se um pré-requisito essencial para o projeto, a operação e a otimização de secadores industriais, como os rotativos e os de leito fluidizado, que são amplamente utilizados na indústria.

A análise dos estudos de caso, por sua vez, revelou uma trajetória clara na evolução da engenharia de secagem. Partindo dos fundamentos da cinética com o modelo de Page (1949) e dos benchmarks experimentais estabelecidos por Friedman e Marshall (1949), que criaram as primeiras correlações robustas para secadores rotativos, a abordagem progrediu para a era da simulação computacional. Esta nova fase permitiu o desenvolvimento de modelos preditivos mais detalhados, capazes de otimizar processos existentes de forma virtual. Subsequentemente, a inovação em hardware foi demonstrada pelo estudo de Arruda (2008), que comprovou quantitativamente a superioridade de uma nova tecnologia, o secador roto-fluidizado, em termos de eficiência de transferência de massa e energia. Finalmente, o trabalho de Teixeira et al. (2019) ilustrou uma nova fronteira para a secagem, onde o processo é utilizado como uma ferramenta de engenharia de produto, com a otimização focada em conferir funcionalidades específicas ao fertilizante, como a liberação lenta de nutrientes.

A principal conclusão deste trabalho é que a otimização da secagem na indústria de fertilizantes moderna requer uma abordagem adaptativa, que vai além da escolha de uma única tecnologia. A análise conjunta dos estudos de caso aponta para a necessidade de uma estratégia multifacetada. Primeiramente, a inovação em novos projetos, com a adoção de tecnologias de alta eficiência como o secador roto-fluidizado, é o caminho para estabelecer novos padrões de desempenho e sustentabilidade. Em segundo lugar, a otimização da vasta base industrial existente por meio de modelagem, simulação e controle avançado representa uma via pragmática e de alto impacto para ganhos de eficiência e redução de custos. Por fim, e de forma cada vez mais proeminente, a secagem deve ser integrada à engenharia de produto, onde os parâmetros do processo são ajustados não apenas para a máxima velocidade, mas para garantir a funcionalidade e a qualidade superior de fertilizantes de especialidade.

Em suma, a presente análise reforça a criticidade da operação de secagem e demonstra que seu papel está em constante evolução. Para a indústria de fertilizantes continuar a suprir a demanda global por alimentos de forma eficiente, econômica e ambientalmente responsável, a otimização desses processos é um caminho necessário. A escolha criteriosa e o aprimoramento contínuo das tecnologias de secagem têm um impacto direto e profundo na qualidade do produto, na viabilidade operacional e na sustentabilidade de todo o setor, impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento em busca de soluções cada vez mais inovadoras e eficientes.

4.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A análise aprofundada dos processos de secagem na indústria de fertilizantes, fundamentada na revisão bibliográfica e nos estudos de caso, abre diversas e promissoras avenidas para futuras investigações. As recomendações a seguir visam aprofundar o conhecimento em áreas-chave identificadas neste trabalho, da escala industrial à engenharia de produto.

Com base nos promissores resultados do secador roto-fluidizado apresentados por Arruda (2008), uma etapa subsequente crucial é a realização de um estudo de viabilidade técnico-econômica para sua implementação em escala industrial. Tal análise deve ir além do desempenho técnico, considerando custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX) em comparação com secadores convencionais, para quantificar os benefícios em termos de redução de perdas, consumo energético e qualidade do produto. Adicionalmente, recomenda-se a investigação de outras tecnologias híbridas, como aquelas que combinam a roto-fluidização

com métodos de aquecimento alternativos, como micro-ondas ou ultrassom, para avaliar potenciais sinergias na intensificação do processo.

Para otimizar tanto as tecnologias existentes quanto as inovadoras, sugere-se o desenvolvimento de modelos de simulação mais detalhados com foco em Fluido-Dinâmica Computacional (CFD). Esses modelos podem aprofundar a compreensão dos fenômenos de transporte multifásico dentro dos secadores e otimizar o projeto de componentes internos, como os suspensores ou os distribuidores de ar. Em paralelo, o desenvolvimento de algoritmos de controle avançado, baseados em inteligência artificial e aprendizado de máquina, apresenta grande potencial. Tais sistemas poderiam otimizar o processo em tempo real, ajustando as variáveis operacionais para maximizar a eficiência energética e garantir a uniformidade da umidade final, utilizando os modelos cinéticos e fluidodinâmicos como base para seu treinamento.

Os estudos de caso analisados focaram em tipos específicos de fertilizantes. Portanto, recomenda-se estender a comparação e a otimização dos métodos de secagem para outros produtos de grande volume, como Fosfato Monoamônico (MAP), Fosfato Diamônico (DAP) e diferentes formulações de Ureia e NPK, que possuem comportamentos de secagem distintos. Além disso, com base nos achados de Teixeira et al. (2019), que demonstraram o papel crítico da secagem na funcionalidade de fertilizantes de liberação lenta, um campo de pesquisa promissor envolve o estudo aprofundado da interação entre o processo de secagem e as tecnologias de revestimento. Investigações futuras devem avaliar como diferentes métodos de secagem (rotativo, leito fluidizado, infravermelho) afetam a cura, a integridade e, consequentemente, a performance de liberação de nutrientes de diferentes materiais de revestimento, consolidando o papel da secagem como uma etapa de engenharia de produto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCARDE, J. C.; MALAVOLTA, E. A.; BORGES, A. L.; HAGIN, J. Avaliação da higroscopicidade de fertilizantes e corretivos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 49, n. spe, p. 115-121, 1992. DOI: 10.1590/S0103-90161992000400016.

ANDA. ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Entregas de fertilizantes no Brasil crescem 11,4% entre janeiro e maio de 2025**. Portal do Agronegócio, 12 ago. 2025.

ARRUDA, E. B. *Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotatório convencional: secagem de fertilizantes*. 2008. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

AZEEM, B. et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of Controlled Release**, v. 181, p. 11-21, 2014. DOI: 10.1016/j.jconrel.2014.02.020.

BERNARDES, L. J. L. A Granulação de Materiais. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 3, p. 17-22, maio/jun. 2006.

BICER, Y.; KHALID, F. Sustainability assessment of renewable energy-based hydrogen and ammonia pathways. In: SAYIGH, A. (Ed.). **Renewable-Energy-Driven Future**. [S. l.]: Academic Press, 2021. p. 435-468.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

CHENG, Z. et al. Technologies and fundamentals of waste heat recovery from high-temperature solid granular materials. **Applied Thermal Engineering**, v. 179, p. 115703, 2020. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115703.

COELHO, E. F. et al. **Fontes e Frequências de aplicação de nitrogênio via água de irrigação no mamoeiro**. Cruz das Almas: Embrapa, 2004. (Comunicado Técnico 111).

FAO. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA. **Fertilizers by Nutrient**. In: FAOSTAT statistical database. Roma: FAO, 2022.

FERNANDES, M. C. S. *Estudo da indústria de fertilizantes nitrogenados: fontes, produção, mercado e impacto ambiental*. 2022. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

FOUST, A. S. et al. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

FRIEDMAN, S. J.; MARSHALL, W. R. Studies in rotary drying. Part I: Holdup and Dusting. **Chemical Engineering Progress**, v. 45, p. 482-573, 1949.

FRIEDMAN, S. J.; MARSHALL, W. R. Studies in rotary drying. Part II: Heat and mass transfer. **Chemical Engineering Progress**, v. 45, n. 9, p. 573-588, 1949.

GOUVEIA, J. P. G. de et al. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 447-452, dez. 2002. DOI: 10.1590/S1415-43662002000300015.

JESUS, T. M.; TEIXEIRA, G. F.; SANTOS, K. G. Secagem da mistura fertilizante-biomassa para produção de fertilizantes de liberação lenta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Uberlândia, 2019.

KAMKE, F. A.; WILSON, J. B. Computer Simulation of a Rotary Dryer Part I: Retention Time. **AIChE Journal**, v. 32, n. 2, p. 263-268, fev. 1986. DOI: 10.1002/aic.690320211.

KAMKE, F. A.; WILSON, J. B. Computer Simulation of a Rotary Dryer Part II: Heat and Mass Transfer. **AIChE Journal**, v. 32, n. 2, p. 269-275, fev. 1986. DOI: 10.1002/aic.690320212.

KORNDORFER, G. H. *Fertilizantes fosfatados sólidos e fluidos na cana-de-açúcar*. 1990. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

LEWIS, W. K. The Rate of Drying of Solid Materials. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921. DOI: 10.1021/ie50137a021.

LOURENÇO, G. A.; FINZER, J. R. D. Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 16, n. 4, p. 334–345, out. 2013. DOI: 10.1590/S1981-67232013005000037.

LUZ, G. R. et al. Análise energética da secagem de farelo de soja em secador rotativo indireto. **Acta Scientiarum. Technology**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 173–180, 2008. DOI: 10.4025/actascitechnol.v28i2.1191.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. São Paulo: Editora Unesp; Brasília, DF: NEAD, 2010.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

NASCIMENTO, M.; MONTE, M. B. de M.; LOUREIRO, F. E. L. Potássio. In: LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. (Ed.). **Rochas e Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. p. 173-197.

NETTO-FERREIRA, J. B. et al. Granulated fertilizers are more efficient in reducing potassium leaching losses than combining biosolids with inorganic sources. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, p. e0230103, 2024. DOI: 10.36783/18069657rbcs20230103.

PAGE, G. E. *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. 1949. Dissertação (Mestrado) - Purdue University, West Lafayette, 1949.

RAHAL, F. G. *Produção de termofosfato potássico fundido com fosfato de Irecê, BA*. 1990. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

SEDDIGHI, H. et al. Fertilizers Coating Methods: A Mini Review of Various Techniques. **Chemical Research and Technology**, v. 1, n. 1, p. 38-48, 2024. DOI: 10.2234/chemrestec.2024.444838.1008.

SFREDO, M. A.; REZENDE, D. R. Adimensionais na secagem de frutos de café em secador de bandejas vibradas. **FAZU em Revista**, Uberaba, n. 5, p. 73-78, 2008.

SHERWOOD, T. K. The Drying of Solids—II. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 21, n. 1, p. 12-16, 1929. DOI: 10.1021/ie50217a004.

SILVA, D.; LOPES, A. **Princípios básicos para formulação e mistura de fertilizantes**. Lavras: UFLA, 2011. 53 p.

STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. Drying of granular products in vibro-fluidized beds. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Drying '80**. New York: Hemisphere Publishing, 1980. v. 1, p. 211-226.

T.V.A. **Procedures for determining physical properties of fertilizers**. Muscle Shoals: Tennessee Valley Authority, 1970. (Special Report n. 5.444).

THANH, T. H. et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of Controlled Release**, v. 181, p. 11-21, 2014. DOI: 10.1016/j.jconrel.2014.02.020.

THOMÉ, E. C.; BURCON, R. F. *Estudo e desenvolvimento de um equipamento para descompactar fertilizante*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, 2014.

YARA BRASIL. **Fatores que afetam a qualidade dos fertilizantes e suas implicações no armazenamento e manuseio**. [S. l.]: Yara Brasil, 2025.