



ENGENHARIA QUÍMICA

IMPACTOS TÉCNICOS E FINANCEIROS DA AUTOMAÇÃO A CAVACO NA SECAGEM DE SOJA

THAIS RODRIGUES REPISO

Rio Verde, GO

2026

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE**

ENGENHARIA QUÍMICA

**IMPACTOS TÉCNICOS E FINANCEIROS DA AUTOMAÇÃO A CAVACO
NA SECAGEM DE SOJA**

THAIS RODRIGUES REPISO

Trabalho de Curso apresentado ao
Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde,
como requisito parcial para obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia Química

Orientador: Prof. Rogério Favareto

Rio Verde – GO

Março, 2026

FICHA CATOLOGRÁFICA

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

R425i Repiso, Thais Rodrigues
IMPACTOS TÉCNICOS E FINANCEIROS DA
AUTOMAÇÃO A CAVACO NA SECAGEM DE SOJA / Thais
Rodrigues Repiso. Rio Verde 2026.
32f. il.
Orientador: Prof. Dr. Rogerio Favareto.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220354 -
Bacharelado em Engenharia Química - Integral - Rio Verde
(Campus Rio Verde).
I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS

NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

/ /

Documento assinado digitalmente

Local

Data

gov.br

THAIS RODRIGUES REPISO
Data: 09/03/2026 09:14:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura

Documento assinado digitalmente

Direitos autorais

gov.br

ROGERIO FAVARETO
Data: 09/03/2026 09:21:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 8/2026 - GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos cinco dias do mês de março de 2026, às 16 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Prof. Dr. Rogério Favareto, Profa. Dr^a. Geovana Rocha Plácido e Prof. M^a Karen Carvalho Ferreira, para examinar o Trabalho de Curso intitulado **"IMPACTOS TÉCNICOS, ENERGÉTICOS E FINANCEIROS DA AUTOMAÇÃO DA SECAGEM DE SOJA "** da estudante Thais Rodrigues Repiso, Matrícula nº 2021102203540037 do Curso de Bacharelado em Engenharia Química do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida a estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)
Dr. Rogério Favareto
Orientador

(Assinado Eletronicamente)
Dra. Geovana Rocha Plácido
Membro

(Assinado Eletronicamente)
Ma. Karen Carvalho Ferreira
Membro

Observação:

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Rogério Favareto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 05/03/2026 17:10:43.
- **Geovana Rocha Placido, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 05/03/2026 17:14:31.
- **Karen Carvalho Ferreira, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO** , em 05/03/2026 17:15:30.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 796677

Código de Autenticação: ffd581d120



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

Modelo de página de aprovação da banca examinadora

THAIS RODRIGUES REPISO

**IMPACTOS TÉCNICOS E FINANCEIROS DA AUTOMAÇÃO A CAVACO NA
SECAGEM DE SOJA**

Trabalho de Curso DEFENDIDO em 05 de Março de 2026, pela

Banca Examinadora constituída pelos membros:

Dr. Rogério Favaretto

**Instituto Federal De Educação, Ciência
E Tecnologia Goiano - Campus Rio
Verde**

Dra. Geovana Rocha Plácido

**Instituto Federal De Educação, Ciência
E Tecnologia Goiano - Campus Rio
Verde**

Ma. Karen Carvalho Ferreira

**Instituto Federal De Educação, Ciência
E Tecnologia Goiano - Campus Rio
Verde**

Rio Verde – GO

Março, 2026

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Amauri e Patricia, que me deram o suporte inicial para me tornar Engenheira Química, e ao meu companheiro de vida, Carlos, por me incentivar e apoiar no final dessa jornada. E a todos aqueles que estiveram ao meu lado durante esta jornada acadêmica. À minha família: Agardeço por acreditarem nisso antes mesmo de mim. Aos meus amigos, pela paciência, incentivo e momentos de descontração que tornaram essa caminhada mais leve, em especial: Isabelle, Gabriella e Josué. E, por fim, a todos da empresa em que fiz meu estágio, que me ajudaram a ser uma profissional em busca do melhor, a Elza e Yago. Sem o apoio de todas essas pessoas, esta conquista não seria possível.

Thais Rodrigues Repiso

AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada, agradeço a Deus por me guiar e me conceder forças durante toda esta trajetória.

Aos meus pais, Amauri e Patricia, que me deram o suporte inicial e a base fundamental para que eu pudesse trilhar o caminho e realizar o sonho de me tornar Engenheira Química.

Ao meu companheiro de vida, Carlos, pelo amor, pela paciência e por me incentivar e apoiar incondicionalmente, sendo o meu grande porto seguro, especialmente nesta reta final tão desafiadora.

À minha família, de forma geral, o meu muito obrigada por acreditarem nessa conquista antes mesmo de mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rogério Favaretto, pela paciência, pela prontidão e por estar sempre disposto a me auxiliar e acompanhar durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos, pela paciência, pelo incentivo contínuo e pelos momentos de descontração que tornaram essa longa caminhada muito mais leve. Um agradecimento especial à Isabelle, à Gabriella e ao Josué, por fazerem parte dessa história de forma tão presente.

Àos meus gestores, em especial à Elza e ao Yago, por todo o apoio, pela vivência prática e por me ajudarem e inspirarem a ser uma profissional que está sempre em busca de entregar o seu melhor.

Por fim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, estiveram ao meu lado durante esta jornada acadêmica. Sem o apoio de cada uma dessas pessoas, esta conquista não seria possível. A minha mais profunda gratidão.

Obrigado a todos por fazerem parte dessa jornada tão especial em minha vida.

Thais Rodrigues Repiso

RESUMO

A etapa de secagem de grãos representa um dos maiores gargalos operacionais e financeiros no pós-colheita da soja. Historicamente, a matriz energética predominante baseia-se na queima de lenha em toras com alimentação manual, processo que apresenta limitações termodinâmicas, altos riscos ergonômicos e severa dependência de mão de obra sazonal. Neste contexto, o presente estudo foi baseado na experiência vivida em uma unidade de beneficiamento de grãos, na cidade de Rio Verde, no estado de Goiás. Tendo como objetivo ~~O objetivo~~, analisar a viabilidade técnica e econômica da substituição da lenha por um sistema automatizado a cavaco de madeira nesta unidade armazenadora. A metodologia baseou-se num estudo de caso comparativo entre as safras de fevereiro de 2025 e fevereiro de 2026, que utilizaram, respectivamente, lenha e cavaco. Utilizou-se a análise de dispersão de dados para avaliar a estabilidade térmica do processo, além da avaliação do Índice Técnico por Ponto Baixado (ITpb) para o consumo de insumos e da variação dos custos operacionais (OPEX), consolidados por meio da ferramenta Power BI. Os resultados demonstraram que a automação térmica estabilizou o sistema, eliminando falhas operacionais atípicas causadas por atrasos na alimentação manual, o que viabilizou um expressivo incremento de 93,8% no volume de soja processada. O desempenho termodinâmico, atestado pelo ITpb, comprovou uma otimização no consumo específico de energia, vantagem estrategicamente alavancada pela eliminação integral da necessidade de contratação de trabalhadores temporários (safristas) para o manejo da fornalha. O ganho de escala operacional, atrelado à redução substancial da folha de pagamento, resultou numa queda de 46,8% no custo efetivo de secagem por unidade de grão (passando de R\$ 4,01 para R\$ 2,13 por tonelada). Conclui-se que a transição para o cavaco de madeira transcende a eficiência energética estrita, configurando-se como uma modernização logística que garante maior segurança ocupacional e otimização econômica sustentável para a agroindústria.

Palavras-chave: secagem; biomassa; automação térmica; viabilidade econômica; cavaco de madeira.

SUMMARY

The grain drying stage represents one of the major operational and financial bottlenecks in soybean post-harvest. Historically, the predominant energy matrix has been based on burning firewood logs with manual feeding, a process that presents thermodynamic limitations, high ergonomic risks, and a severe dependence on seasonal labor. In this context, the present study aimed to analyze the technical and economic feasibility of replacing firewood with an automated wood chip system in a storage facility. The methodology was based on a comparative case study between the February 2025 and February 2026 harvests, which used firewood and wood chips, respectively. Data dispersion analysis was used to evaluate the thermal stability of the process, in addition to assessing the Technical Index per Dropped Moisture Point (ITpb - Índice Técnico por Ponto Baixado) for input consumption and the variation in operational costs (OPEX), consolidated through the Power BI tool. The results demonstrated that thermal automation stabilized the system, eliminating atypical operational failures caused by delays in manual feeding, which enabled a significant increase of 93.8% in the volume of processed soybeans. The thermodynamic performance, attested by the ITpb, proved an optimization in specific energy consumption, an advantage strategically leveraged by the complete elimination of the need to hire temporary workers (safristas) for furnace management. The operational scale gain, coupled with a substantial reduction in the payroll, resulted in a 46.8% decrease in the effective drying cost per grain unit (dropping from R\$ 4.01 to R\$ 2.13 per ton). It is concluded that the transition to wood chips transcends strict energy efficiency, configuring itself as a logistical modernization that ensures greater occupational safety and sustainable economic optimization for the agro-industry.

Keywords: drying; biomass; thermal automation; economic feasibility; wood chips.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Peneiras da pré-limpeza	Error! Bookmark not defined.
Figura 2 - Pátio de armazenamento das lenhas	Error! Bookmark not defined.
Figura 3 - Fluxograma do beneficiamento	Error! Bookmark not defined.
Figura 4 - Área das moegas e tombador	Error! Bookmark not defined.
Figura 5 - Representação do fluxo do ar de secagem	19
Figura 6 - Operador usando Epis ao manusear lenhas.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 7 - Cavaco de madeira.....	Error! Bookmark not defined.
Figura 8 - Caixa de armazenamento com injetores de cavaco	Error! Bookmark not defined.
Figura 9 - Reabastecimento de cavaco na caixa de estoque com máquina	Error! Bookmark not defined.
Figura 10 - Interface do aplicativo desenvolvido para coleta de dados de secagem	Error! Bookmark not defined.
Figura 11 - <i>Power BI</i> desenvolvido para a coleta de dados de secagem	Error! Bookmark not defined.
Figura 12 - Distribuição comparativa de desempenho operacional (fevereiro/2025 vs. fevereiro/2026)	Error! Bookmark not defined.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atividades desenvolvidas	11
Tabela 2 - Conversão de cavaco para o equivalente volumétrico em lenha	23
Tabela 3 - Conversão consumo do estoque de cavaco para lenha em MEE (Safr 2026)23	
Tabela 4 - Comparativo de Consumo, IT e ITpb (fevereiro de 2025 e 2026)	26
Tabela 5 - Análise de Viabilidade Econômica e Custo de Secagem	27

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BI	<i>Business Intelligence</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CTPT	Custo Total do Posto de Trabalho
EPI	Equipamento de Proteção Individual
IDE	Indicador de Desempenho Energético
IT	Índice Técnico
IT _{pb}	Índice Técnico por Ponto Baixado
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
MEE	Metro Estéreo
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
PIB	Produto Interno Bruto
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
SHE	<i>Safety, Health and Environment</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
	Estruturação do Trabalho.....	2
2	REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1	O produto: A soja	2
2.1.1	Higroscopicidade e impactos na qualidade pós-colheita.....	3
2.2	Fundamentos da secagem de grãos.....	4
2.2.1	Mecanismos de transferência de calor e massa	Error! Bookmark not defined.
2.2.2	Integridade do produto e estresse térmico	4
2.3	O processo de beneficiamento e segurança operacional.....	Error! Bookmark not defined.
2.4	A Biomassa como Fonte Térmica	6
2.4.1	Propriedades físico-químicas da biomassa	Error! Bookmark not defined.
2.4.2	Cinética de combustão, controle e integridade do sistema	6
2.5	Automação e controle de processos térmicos.....	7
2.5.1	Malha de controle e PID.....	Error! Bookmark not defined.
2.6	Indicadores de Desempenho Energético e Operacional.....	7
2.6.1	Índice Técnico e Índice por Ponto Baixado	8
2.6.2	Fatores de conversão e padronização de dados	9
2.7	Segurança ocupacional e ergonomia	9
2.8	Custos Operacionais e Logística em Unidades Armazenadoras.....	9
3	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS E DISCUSSÃO	11
3.1	Fluxograma do Processo de Beneficiamento.....	Error! Bookmark not defined.
3.2	Caracterização da Unidade e dos Equipamentos Térmicos	14
3.2.1	Sistema de Aquecimento Anterior: Forno Manual a Lenha	15
3.2.2	Sistema Atual: Automação a Cavaco.....	16
3.3	Parâmetros de Qualidade e Integridade Física do Grão	18
3.4	Transformação Digital e Arquitetura de Dados	19
3.5	Procedimentos de Coleta e Tratamento de Dados	21
3.5.1	Definição do Período de Análise	21
3.5.2	Variáveis Operacionais Monitoradas	22
3.5.3	Tratamento de Dados e Fator de Conversão	22
3.6	Estabilidade Térmica na Secagem Primária	24
3.7	Viabilidade Econômica e Eficiência Operacional.....	25
3.8	Cronograma e Atividades Desenvolvidas no Estágio	Error! Bookmark not defined.

4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	28
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	30

3 INTRODUÇÃO

A evolução das operações unitárias demonstra que a transição do trabalho manual para o controle automatizado não é apenas uma busca por produtividade, mas a aplicação prática da termodinâmica para eliminar a incerteza dos processos e garantir a integridade dos resultados (SMITH; VAN NESS, 2018).

Um dos principais pilares da economia no Brasil é o setor do agronegócio no sudoeste goiano, fazendo com que os avanços em tecnologias pós-colheita se fizessem necessários. Nesse cenário, a viabilidade comercial e biológica necessita das melhores condições de armazenamento; para isso, a secagem dos grãos é uma etapa crucial para prolongar as qualidades físico-químicas (RESENDE et al., 2022). O fundamento deste processo consiste em remover a água presente no grão através de transferência de calor e massa, utilizando o ar quente como transportador de humidade para fora da massa dos grãos (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2005).

A geração de calor mais comum em unidades de recebimento de grãos é a combustão de biomassa em fornalhas de alvenaria com alimentação manual de lenha em toras. Todavia, esse modelo convencional possui limitações de operação, como dificuldade de manutenção de temperatura constante e as diversas variáveis que interferem no processo de queima da biomassa (BRAND; GIESEL, 2017). A implementação de queimadores automatizados viabilizou a substituição da lenha pelo cavaco de madeira. A substituição da lenha pelo cavaco é justificada por sua granulometria mais fina e homogênea, característica que viabiliza a alimentação mecânica contínua dos queimadores e otimiza o rendimento e a estabilidade da combustão (SOARES, 2016).

Assim, este estudo justificou-se pela necessidade de aprofundar o conhecimento em queima automatizada, combinando os fundamentos teóricos da Engenharia Química com a urgência de superar os gargalos logísticos e financeiros gerados pela dependência de mão de obra sazonal (safristas). A metodologia reuniu uma abordagem quantitativa e interdisciplinar da experiência desenvolvida durante o estágio supervisionado, realizado em uma unidade de armazenamento de grãos no sudoeste goiano.

Desse modo, o presente trabalho analisou o impacto técnico, operacional e econômico da transição para queimadores automáticos de biomassa em uma unidade de beneficiamento. Especificamente, buscou-se avaliar a estabilidade térmica do ar de secagem e o consumo

equivalente de biomassa, o Índice Técnico, além de quantificar o ganho de escala produtiva e a redução de custos viabilizados pela eliminação da alimentação manual das fornalhas.

Estruturação do Trabalho

O trabalho está estruturado em 4 capítulos descritivos, organizados da seguinte forma:

O capítulo 1 apresenta a introdução deste estudo, que compreende a contextualização do agronegócio, a definição do problema logístico e termodinâmico da secagem, a importância, a justificativa e os objetivos (geral e específicos) propostos.

O capítulo 2 expõe a revisão de literatura, abordando inicialmente as propriedades físico-químicas da soja, a higroscopicidade e os fundamentos termodinâmicos da secagem de grãos. Em seguida, discorre sobre a biomassa como fonte térmica, a cinética de combustão e a importância da automação e controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Por fim, apresenta os indicadores de desempenho e correlaciona a segurança ocupacional aos custos operacionais e logísticos em unidades armazenadoras.

O capítulo 3 destina-se às atividades desenvolvidas e à discussão dos resultados. Inicia-se com o fluxograma de beneficiamento e a caracterização dos sistemas térmicos (fornalha manual a lenha e sistema automatizado a cavaco). Na sequência, detalha a transformação digital implementada durante a experiência vivenciada, os métodos de tratamento de dados e o balanço de massa. O núcleo analítico do capítulo apresenta a avaliação da estabilidade térmica e a prova da viabilidade econômica, encerrando-se com o cronograma descritivo das três fases do estágio supervisionado.

Em subsequência, no capítulo 4, são tecidas as considerações finais acerca do projeto, relacionando a vivência do estágio supervisionado aos conhecimentos teóricos da Engenharia química. Atribui-se a este capítulo a conclusão direta dos objetivos específicos levantados na introdução.

Portanto, ao fim deste trabalho, são apresentadas as referências bibliográficas estudadas e utilizadas para a fundamentação teórica e técnica deste relatório.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O produto: A soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) consolida-se como pilar central do agronegócio no Brasil. Economicamente, essa oleaginosa é o principal produto de exportação do país, com destaque para o estado de Goiás que, na safra 2025/26, que segundo o 5º levantamento, projeta uma colheita superior a 35 milhões de toneladas, consolidando-se como o quarto maior produtor nacional e impulsionando o PIB (Produto Interno Bruto) do agronegócio brasileiro (CONAB, 2026).

Do ponto de vista da engenharia química, é necessário compreender o grão não apenas sob o aspecto físico, mas sim como uma matriz biológica complexa e termossensível. Em base seca, a composição centesimal média apresenta cerca de 40% de proteínas e 20% de lipídios (óleo), com o restante composto por carboidratos solúveis, fibras e minerais (EMBRAPA, 2019).

2.1.1 Higroscopicidade e impactos na qualidade pós-colheita

Grande parte dos produtos agrícolas é constituída por matrizes biológicas higroscópicas, assim como os grãos de soja. Isso significa que possuem a propriedade intrínseca de realizar trocas de umidade na forma de vapor com o ar circundante, buscando sempre o equilíbrio termodinâmico com o ambiente. Na operação de secagem, o controle rigoroso deste fenômeno é fundamental, pois, ao preservar a estabilidade da temperatura do ar, a qualidade física e fisiológica da carga também é mantida (SILVA, 2008).

As fornalhas a lenha com alimentação manual apresentam severas oscilações de temperatura que, conseqüentemente, alteram drasticamente a umidade relativa do ar injetado no secador. Assim, a massa de grãos fica submetida a um ciclo de adsorção e dessorção de água, conhecido como “efeito sanfona”, afetando não somente a estrutura física, como também a estabilidade bioquímica da carga. A reabsorção de umidade reativa o metabolismo celular do grão, acelerando sua taxa respiratória e consumindo suas reservas de matéria seca, além de criar o microclima ideal para a proliferação de fungos de armazenamento (*Aspergillus* e *Penicillium*) que elevam a acidez do óleo extraído (ALENCAR et al., 2009).

O conceito de super-secagem (*over-drying*) é consequência direta da falta de controle da temperatura e umidade. O padrão normativo de comercialização e armazenamento da soja estabelece teores entre 13% e 14% em base úmida; quando a umidade final da soja cai abaixo deste valor, a unidade sofre a chamada “quebra técnica” (EMBRAPA, 2020). Trata-se da perda direta de massa comercializável. Nesse contexto, o uso do cavaco de madeira em sistemas automatizados atua diretamente no controle da temperatura do ar de secagem, neste estudo

provou-se que impedindo que variações térmicas e higroscópicas se transformem em prejuízo financeiro para a operação.

2.2 Secagem de grãos

Na Engenharia Química, a secagem é uma operação unitária clássica, definida como a remoção de um líquido volátil de um material sólido para reduzir a sua atividade de água e garantir a estabilidade biológica e físico-química durante a etapa de armazenamento. Neste trabalho, o processo refere-se à remoção da umidade dos grãos para prevenir o crescimento microbiológico durante a estocagem. No contexto aplicado do agronegócio, a secagem não é apenas um processo de evaporação térmica, mas uma etapa crucial da gestão de um organismo vivo estruturalmente complexo (BAIDHE; CLEMENTSON, 2024).

A termodinâmica do processo de secagem baseia-se na ocorrência simultânea da transferência de calor e massa entre o ar aquecido e a partícula sólida. Este ar quente, proveniente da combustão da biomassa, atua como fornecedor da entalpia de vaporização e como veículo de arraste da umidade removida para fora do sistema (BAIDHE; CLEMENTSON, 2024).

Sob a ótica dos fenômenos de transporte, a convecção é o mecanismo responsável pela transferência de calor da corrente de ar para a superfície do grão, sendo o calor subsequentemente conduzido para o seu interior (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004). Simultaneamente, a umidade migra do centro do grão para a parte externa por meio de mecanismos de difusão capilar e molecular, impulsionada pelos gradientes de concentração e de pressão de vapor. Para que o processo atinja a máxima eficiência termodinâmica, a taxa de difusão interna da umidade e a taxa de evaporação superficial devem estar em rigoroso equilíbrio (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Na literatura, propriedades termodinâmicas como entalpia, entropia e energia livre de Gibbs são determinantes para avaliar o desempenho térmico em sistemas de secagem, bem como a cinética de secagem e outros parâmetros avançados da transferência de massa (BAIDHE; CLEMENTSON, 2024).

2.2.1 Integridade do produto e estresse térmico

Grãos de soja possuem uma macroestrutura celular altamente sensível, ao contrário de materiais inorgânicos inertes. O estresse térmico é um fenômeno termomecânico resultante da

drástica variação dos gradientes térmicos e de umidade, causados pela aplicação de ar com temperaturas excessivas ou taxas de aquecimento muito aceleradas (WEI et al., 2020).

Esse estresse resulta em microfissuras e trincas que depreciam severamente o produto, sendo consequência de forças mecânicas desiguais no grão. Enquanto a superfície perde água e encolhe rapidamente, o núcleo (endosperma) permanece úmido e resiste a essa deformação. Essas alterações físicas ocorrem quando o limite elástico do tegumento é superado pelas tensões internas de tração e compressão geradas por esse descompasso (CHEN et al., 2024).

2.3 Beneficiamento de grãos

O beneficiamento de grãos compreende uma série de operações unitárias aplicadas após a colheita, como recepção, pré-limpeza, secagem e armazenagem. O domínio destas etapas é o principal desafio para a mitigação de perdas e preservação das qualidades físico-químicas da soja, com o objetivo de estancar o processo de deterioração e padronizar o produto final (MANJARI et al., 2026).

Embora a secagem seja uma etapa determinante neste fluxograma, de maior complexidade energética, realizar a pré-limpeza do produto é um processo vital para a qualidade física da carga e para a segurança operacional e patrimonial da unidade. A carga de grãos chega à unidade como uma massa heterogênea, contendo impurezas como palha, vagens, restos de cultura e terra. A etapa da pré-limpeza tem a função de separar esses materiais estranhos, processo realizado por meio de peneiras vibratórias (Figura 01) e sistema de aspiração. A ineficiência dessa etapa é a causa raiz da maioria dos incêndios em secadores, uma vez que o acúmulo de resíduos cria condições favoráveis para a ignição (SILVA, 2008).

Figura 1- Peneiras da pré-limpeza



Fonte: Próprio autor

O risco de incêndio fundamenta-se no triângulo do fogo, um conceito clássico da segurança que postula a necessidade de três elementos simultâneos para ocorrer a combustão: o comburente (oxigênio), o calor e o combustível. Devido ao fluxo de ar, o interior do secador em operação possui oxigênio abundante e a fornalha fornece o calor. Estas são duas das três variáveis essenciais para o processo, restando controlar apenas o combustível (SILVA, 2008).

As impurezas, que possuem ponto de ignição inferior ao da soja, quando acumuladas em pontos de estagnação do equipamento, atuam como combustível indesejado e altamente reativo. Portanto, a pré-limpeza atua como barreira primária, impedindo o início de um incêndio ao eliminar uma das pontas do triângulo do fogo (MANJARI et al., 2026; SILVA, 2008).

2.4 A Biomassa como fonte térmica

A biomassa florestal tem sido a principal matriz energética para a secagem de grãos no Brasil e é responsável por grande parcela da geração térmica do agronegócio, devido à sua renovabilidade e viabilidade econômica quando comparada aos combustíveis fósseis (EPE, 2023). No contexto da engenharia química, a madeira não pode ser considerada um simples insumo, mas sim uma matriz complexa e um reagente que exige controle rigoroso durante a queima para garantir a estabilidade térmica do processo (PROTÁSIO et al., 2021).

Para o processo de combustão, a eficiência da geração de calor depende diretamente das propriedades intrínsecas do combustível. O Poder Calorífico Inferior (PCI), parâmetro mais crítico na operação, representa a energia efetivamente disponível no sistema após o desconto do calor latente consumido para evaporar a água presente na própria estrutura da madeira (ÇENGEL; BOLES; KANOĞLU, 2020).

A umidade da biomassa possui impacto direto no balanço de energia dentro da fornalha. O calor consumido para a mudança de fase dessa água reduz a energia útil transferida para o ar de secagem, diminuindo a eficiência global do secador (BRAND; GIESEL, 2017). Os teores de voláteis e de cinzas, também, devem ser rigorosamente monitorados, pois afetam a reatividade do combustível e propiciam a formação de incrustações nas grelhas e a emissão de material particulado (CARNEIRO et al., 2021).

2.4.1 Cinética de combustão, controle e integridade do sistema

A mudança da matriz energética de lenha em toras para o cavaco representa não apenas uma melhoria na segurança ocupacional, devido à eliminação da alimentação manual, mas uma profunda otimização na termodinâmica e na integridade física do equipamento. Com a madeira

em toras, o sistema sofre de inércia térmica aguda. Devido ao grande volume e à baixa área de contato da tora com o oxigênio, a transferência de calor para o interior da madeira ocorre por condução transiente lenta, de fora para dentro (INCROPERA et al., 2014). Isso gera um atraso na liberação dos gases voláteis, impossibilitando a automação fina e causando grandes oscilações com picos de calor descontrolados (BASU, 2018).

A transição para a biomassa particulada (cavaco) altera a cinética da reação. A padronização física e a drástica ampliação da área superficial específica do material permitem que a transferência de calor e a ignição ocorram de forma quase instantânea. Ao atuarem como um sólido a granel, os cavacos viabilizam uma alimentação mecânica contínua e dosada (GASPERINI; YEŞIL; TOSCANO, 2025).

Essa homogeneidade fluidodinâmica do combustível é a base para o controle PID da fornalha. Com a queima estabilizada, fatores como o teor de umidade e o poder calorífico tornam-se previsíveis (GASPERINI; YEŞIL; TOSCANO, 2025). Consequentemente, a curva de temperatura de secagem aproxima-se de um comportamento linear, eliminando o estresse térmico nos componentes refratários e metálicos do secador, além de mitigar os danos por choque térmico no tegumento dos grãos.

2.5 Automação e controle de processos térmicos

Para um projeto de automação industrial, não basta apenas o sistema, mas sim a transição de lenha para cavaco é o que permite que a unidade alcance seu potencial máximo de operação. Na engenharia química, o estudo de combustíveis sólidos é mais complexo que o de fluídos, por serem mais heterogêneos. Com a moagem da madeira em cavaco, o material se torna mais próximo do comportamento de um fluido, comparado às toras, viabilizando um procedimento em malha fechada (BAZZO, 2016).

Neste sentido, os sensores do sistema têm a função de enviar o sinal para um controlador lógico programável (CLP). Nele, o algoritmo compara essa medição com a leitura de temperatura desejada (*Setpoint*). Com o controle PID, ações são tomadas para modular atuadores, que geralmente são inversores de frequência acoplados a motores de roscas ou esteiras dosadoras de biomassa. Essa modulação garante alimentação somente quando necessário e de forma controlada, evitando estresse térmico e desperdício de cavaco (OGATA, 2010).

2.6 Indicadores de Desempenho Energético e Operacional

Para comprovação da viabilidade técnica e econômica uma análise qualitativa da operação é insuficiente nessa substituição de matriz energética de secagem. Os indicadores de desempenho servem para quantificar o processo por meio dos KPIs (*Key Performance Indicators*). Além disso, a norma ABNT NBR ISO 50001 (2018) estabelece como requisito fundamental para atestar a otimização e a eficiência de sistemas térmicos algum tipo de monitoramento contínuo de um Indicador de Desempenho Energético (IDE). No contexto do beneficiamento de grãos, essa eficiência é mensurada pela relação direta entre a energia consumida e o volume de água removido da massa de produto inicial no secador.

2.6.1 Índice Técnico e Índice por Ponto Baixado

O Índice Técnico (IT) é o principal parâmetro para avaliar o rendimento de um secador, o qual correlaciona a quantidade de insumo necessária consumir para o volume que foi até atingir o padrão normativo de armazenagem. Matematicamente expresso pela razão:

$$IT = \frac{m}{v}$$

Onde m representa a quantidade de biomassa consumida em quilos e v o volume de grãos de soja secos produzidos nesse mesmo período. No entanto, esse indicador não é uma constante isolada, pois sofre interferências diretas de outras variáveis termodinâmicas e operacionais do sistema, tais como: a umidade inicial e final dos grãos, a umidade intrínseca do próprio combustível biológico e a eficiência térmica real da fornalha industrial (QUEQUETO et al., 2023).

Para a avaliação de eficiência energética do sistema de secagem, o cálculo convencional do IT, que relaciona apenas a massa de biomassa consumida pelo volume de grãos secos, foi considerado insuficiente, pois desconsidera a carga higroscópica inicial da massa de grãos. Para corrigir essa distorção e padronizar o balanço de massa e energia, adotou-se o Índice Técnico por Ponto de Umidade Baixado (IT_{pb}). Esse indicador quantifica o consumo específico de insumo necessário para extrair um ponto percentual de umidade da carga, sendo calculado pela seguinte equação:

$$IT_{pb} = \frac{IT}{U_{in} - U_{out}}$$

Em que IT_{pb} é o Índice Técnico por ponto de umidade baixado, o IT é o Índice Técnico anteriormente calculado, e U_{in} é Umidade do grão na entrada do secador e U_{out} é a Umidade do grão na saída do secador (umidades em %).

2.6.2 Fatores de conversão e padronização de dados

A simples comparação volumétrica entre a tora e o cavaco de madeira induz a erros críticos no balanço de energia e massa, principalmente devido às grandes diferenças entre a densidade a granel e o poder calorífico inferior (PCI). Sendo assim, a energia específica consumida por quilograma de água evaporada é um método de quantificação mais preciso para atestar o real desempenho do equipamento (QUEQUETO et al., 2023).

2.7 Segurança ocupacional e ergonomia

Com um sistema automatizado de alimentação por cavaco sendo implementado, o contato humano com as toras e a zona de fogo é eliminado. O operador deixa de ter contato braçal e começa a supervisionar o painel do processo, mitigando o risco de acidentes com queimaduras, fadiga térmica e lesões osteomusculares (IIDA; BUARQUE, 2016), alinhando a operação aos preceitos modernos de gestão de riscos e às normas regulamentadoras de segurança industrial, em especial a NR-15 (BRASIL, 2019).

2.8 Custos Operacionais e Logística em Unidades Armazenadoras

A etapa de secagem representa um dos maiores gargalos operacionais e financeiros no pós-colheita de grãos, sendo a matriz energética o componente de maior impacto direto nos custos variáveis de uma unidade armazenadora. Contudo, a análise de viabilidade de um sistema de secagem moderno não deve se restringir apenas ao poder calorífico ou ao consumo específico do combustível, mas sim englobar toda a cadeia logística e os custos operacionais (OPEX) atrelados ao manejo da biomassa (BORGES et al., 2023).

Historicamente, o uso de lenha em tora tem sido o método predominante no Brasil devido ao seu baixo custo nominal de aquisição. No entanto, a logística deste insumo exige intensa manipulação manual. O descarregamento dos caminhões, o empilhamento no pátio (Figura 2) e, principalmente, a alimentação ininterrupta das fornalhas demandam a contratação de equipes extras de trabalhadores temporários, conhecidos como "safristas" (SILVA; OLIVEIRA, 2024).

Figura 2 – Pátio de armazenamento das lenhas



Fonte: Próprio autor

Atualmente, o setor agroindustrial enfrenta um cenário de crescente escassez de mão de obra rural qualificada e disposta a realizar trabalhos de alta exigência física. Dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2024) apontam que os custos com folha de pagamento no campo têm encarecido sistematicamente. Além do salário base, a operação manual em fornalhas envolve adicionais de insalubridade, adicional noturno e altos riscos de acidentes de trabalho, o que eleva substancialmente o Custo Total do Posto de Trabalho (CTPT) nas unidades de recebimento.

Neste contexto, a transição para a biomassa particulada, como o cavaco de madeira, surge não apenas como uma alternativa energética, mas como uma solução logística. O cavaco permite a mecanização total do processo de alimentação das fornalhas por meio de moegas, *redlers* e roscas transportadoras. Essa automação elimina a necessidade de intervenção humana direta na queima, garantindo maior estabilidade térmica e permitindo que a unidade armazenadora opere em sua capacidade máxima de recebimento sem a dependência de um grande volume de safristas (NOGUEIRA, 2025)

Portanto, a literatura recente consolida o entendimento de que a escolha da biomassa deve ser pautada pelo ganho de escala. A substituição da lenha pelo cavaco, embora possa apresentar um custo unitário de insumo superior em algumas regiões, viabiliza a diluição dos custos fixos da unidade, reduz passivos trabalhistas e otimiza o tempo de permanência dos caminhões no pátio, refletindo diretamente na rentabilidade da operação de secagem (BORGES et al., 2023; NOGUEIRA, 2025).

3 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS E DISCUSSÃO

3.1 Cronograma das atividades

O presente estudo e as atividades de estágio foram desenvolvidos em uma Unidade de Beneficiamento e Armazenagem de Grãos localizada no município de Rio Verde, estado de Goiás – região estratégica para o agronegócio nacional. A planta industrial atua de forma contínua nas principais janelas de safra, dedicando-se ao recebimento e processamento de soja no primeiro semestre e de milho no segundo semestre.

A infraestrutura da unidade é dimensionada para operações de alto rendimento, contando com um armazém graneleiro com capacidade estática para 53.000 toneladas. O gargalo logístico e foco principal da coleta empírica de dados concentra-se no setor de secagem, que é equipado com um secador de fluxo contínuo de alta capacidade, projetado para processar até 200 toneladas por hora. Devido a essa elevada vazão mássica de processamento e às severas e distintas exigências termodinâmicas de cada cultura (especialmente na redução de umidade do milho), a etapa de geração de calor requer extrema estabilidade. Esse cenário de alta demanda energética justifica plenamente a necessidade de substituição da lenha manual e fundamenta a análise técnica e financeira da automação por cavaco de madeira abordada neste trabalho.

Tabela 1 – Atividades desenvolvidas

Fase do Projeto	Período / Duração	Atividades Desenvolvidas	Interface Departamental
Fase 1: Imersão Operacional	Dez/2024 a Abr/2025	- Mapeamento do fluxograma de beneficiamento. - Acompanhamento da secagem e movimentação, diário. - Extração e consolidação de dados via planilhas. - Mapeamento de insalubridade no manuseio da lenha.	Operações / Originação
Fase 2: Qualidade e SHE	Mai/2025 a Set/2025	- Acompanhamento das análises de Segurança do Trabalho. - Auditoria de parâmetros de qualidade e quebra técnica. - Acompanhamento dos procedimentos de controle de estoque	SHE / Controle de Qualidade e de Estoque

Fase 3: Comissionamento e Automação de Dados	Out/2025 a Fev/2026	- Treinamento operacional e elaboração de manuais dos automatizadores de queima de cavaco. - Desenvolvimento de aplicativo para coleta de dados de rotina. - Criação de dashboard em <i>Power BI</i> para monitoramento térmico.	Manutenção / Automação / Operações
---	------------------------	--	--

Fonte: Próprio autor

A atuação na planta compreendeu um período de 15 meses de projeto, desde dezembro de 2024 até fevereiro (março iniciou agora) de 2026, e foi estruturada em três fases progressivas de complexidade técnica e de tratamento de dados, conforme sintetizado no cronograma de atividades (Tabela 5).

A primeira fase consistiu em uma imersão operacional inicial. Neste período, o foco foi o mapeamento do fluxo de grãos, o acompanhamento das rotinas de classificação e o entendimento dos pontos críticos de controle do secador (temperaturas, gradiente de umidade e balanço de estoque de biomassa). Essa etapa demandou a extração manual de dados operacionais e a consolidação de todas as variáveis do processo termodinâmico exclusivamente por meio de planilhas eletrônicas.

Na segunda fase, as atividades foram direcionadas à interface transversal com os departamentos de Qualidade e SHE (*Safety, Health and Environment*). Acompanhou-se a elaboração de análises de risco, inspeções de segurança ocupacional no manuseio de toras de lenha e a auditoria dos procedimentos de secagem, fundamentando estatística e ergonomicamente a necessidade de uma transição de matriz energética.

A terceira fase, e núcleo deste trabalho de conclusão, envolveu a participação ativa no comissionamento do novo sistema automatizado de cavaco e a transformação digital da coleta de dados. As atividades abrangeram a redação de manuais de uso para dos automatizadores de queima de cavaco e o treinamento da equipe de operadores para a rotina em malha fechada. Visando otimizar a visualização da nova eficiência térmica comprovada no início de 2026, desenvolveu-se um aplicativo interno para a inserção simplificada de dados pelos operadores, integrado à criação de um painel interativo em *Power BI*. A aplicação de modelagem de dados permitiu o monitoramento dinâmico das curvas de secagem, substituindo o antigo preenchimento manual de planilhas e garantindo maior confiabilidade à análise de viabilidade do cavaco.

3.2 Fluxograma do Processo de Beneficiamento

Para compreensão da etapa de secagem, é imprescindível apresentar o fluxograma do beneficiamento do grão (Figura 3), permitindo observar as interações físico-químicas e mecânicas que ocorrem durante o processamento do grão na unidade industrial.

Figura 3 - Fluxograma do beneficiamento



Fonte: Próprio autor

A dinâmica física da unidade inicia-se na recepção com a identificação padrão da carga, seguindo para a classificação do produto. Neste setor, o teor de umidade e a quantidade de impurezas são quantificados para as próximas tomadas de decisões. Após a liberação, o produto é descarregado em moegas, onde é segregado o material seco do úmido, como mostrado na Figura 4. A partir destas, inicia-se a movimentação interna, a massa de grãos é destinada para à etapa de pré-limpeza por transportadores mecânicos (como *redlers* e elevadores de canecas), uma operação unitária de separação física que garante a preservação e a integridade mecânica das rotas subsequentes e mitiga o risco de ignição na etapa de secagem.

Figura 4 – Área das moegas e tombador



Fonte: Próprio autor

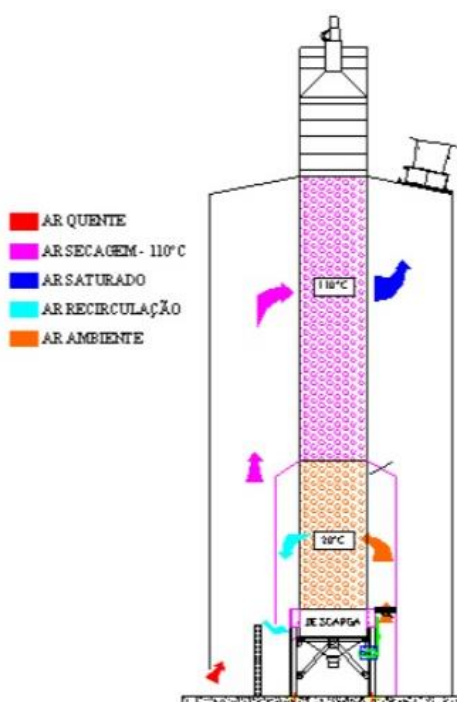
Após a saída da pré-limpeza, o percurso do produto é ramificado com base no seu gradiente de umidade, definindo as rotas operacionais do maquinário. Lotes dentro do padrão normativo de umidade seguem a rota direta de armazenagem; por outro lado, a massa de grãos com umidade maior que 14% é, obrigatoriamente, direcionada à rota de secagem. No secador, ocorre o contato entre os grãos úmidos e o ar quente proveniente da fornalha. Este processo obedece a um controle a cada 15 minutos das variáveis críticas, como a umidade e a temperatura do grão, além dos sensores de temperatura da coluna de secagem.

Se a operação for bem-sucedida, ou seja, a massa de grãos atingir uma umidade menor ou igual a 14%, o lote é destinado ao armazém. Caso contrário, o produto retorna para o secador com um controle de temperatura mais rigoroso em relação aos padrões, para que não perca qualidade física nem sofra super-secagem, o que resultaria em perda econômica de massa comercializável (quebra técnica). É neste contexto que uma automação de estabilidade térmica demonstra seu impacto técnico, sendo este proporcionado pela substituição da lenha manual por um sistema automatizado de cavaco.

3.3 Caracterização da Unidade e dos Equipamentos Térmicos

A pesquisa de campo foi conduzida em uma unidade de beneficiamento de grãos de grande porte. O processo analisado ocorre em um secador contínuo de fluxo dupla corrente, da Figura 5, com capacidade nominal operacional estipulada em 200 toneladas por hora. O fluxo termodinâmico deste equipamento exige uma demanda energética constante, fornecida por uma fornalha a biomassa, cujo sistema de alimentação foi o objeto central da otimização técnica e econômica deste estudo.

Figura 5 - Representação do fluxo do ar de secagem



Fonte: Kepler Weber (2025, p. 15).

3.3.1 Sistema de Aquecimento Anterior: Fornalha Manual a Lenha

Anteriormente à otimização, a geração de calor era realizada por uma fornalha convencional alimentada com lenha em toras. O monitoramento das variáveis críticas do processo, a umidade de entrada e de saída do grão, temperatura superior e inferior do ar de secagem, e a temperatura da massa de grãos, era registrado periodicamente (intervalo de 15 minutos) pelos operadores por meio de um aplicativo de controle interno.

Apesar do monitoramento digital, a alimentação da fornalha dependia de intervenção estritamente manual. O processo exigia a alocação de 2 a 4 funcionários temporários adicionais durante o período de safra. Devido à alta rotatividade sazonal e à falta de conhecimento técnico aprofundado, a inserção das toras ocorria somente com a aprovação de um funcionário experiente. Os operadores safristas não possuíam a noção do momento térmico ideal para a

realimentação, resultando em dosagens excessivas ou tardias, o que gerava oscilações severas na curva de temperatura do secador, além de não estarem acostumados com a operação, aumentando o risco de um acidente.

Sob a ótica da segurança e ergonomia, a atividade apresentava alto grau de insalubridade. Além dos EPIs mandatórios da planta (óculos, máscara, protetor auricular, botina de segurança e capacete), os alimentadores necessitavam de paramentação pesada para suportar a radiação térmica e o risco de acidentes e queimaduras. Era obrigatório o uso de luvas, avental, perneiras, mangotes de raspa de couro e viseira facial, condições que aceleravam a fadiga física dos colaboradores (Figura 6).

Figura 6 – Operador usando Epis ao manusear lenhas



Fonte: Próprio autor

3.3.2 Sistema Atual: Automação a Cavaco

A modernização do sistema térmico consistiu na transição da matriz energética de lenha em toras para biomassa particulada (cavaco de madeira, Figura 7), viabilizada pela instalação de equipamentos automatizadores. Esta tecnologia substitui o esforço físico braçal por um sistema eletromecânico contínuo de dosagem de combustível.

Figura 7 – Cavaco de madeira



Fonte: Próprio autor

O automatizador é composto por uma moega de armazenamento local (caixa de cavaco) acoplada a um sistema de alimentação mecânica. O acionamento deste sistema é modulado por inversores de frequência que se comunicam diretamente com os sensores de temperatura do secador, formando uma malha de controle fechada. Quando a temperatura do ar de secagem apresenta defasagem em relação ao *setpoint*, o sistema altera a velocidade de injeção, inserindo a quantidade exata de cavaco necessária para estabilizar a queima, anulando o erro humano do processo anterior, com o equipamento da Figura 8.

Figura 8 – Caixa de armazenamento com injetores de cavaco



Fonte: Próprio autor

Com a automação, a demanda operacional braçal foi suprimida. O mesmo operador responsável por realizar as medições do processo e registrar os dados no aplicativo atua, agora, como supervisor do sistema e é responsável apenas pelo reabastecimento periódico da caixa de armazenamento de cavaco, utilizando maquinário de movimentação de cargas, como na Figura 9.

Figura 9 – Reabastecimento de cavaco na caixa de estoque com máquina



Fonte: Próprio autor

A eliminação do manuseio manual das toras não apenas extinguiu a necessidade do quadro extra de funcionários safristas, gerando redução de custos trabalhistas, como também retirou o operador da zona de exposição direta ao fogo. Consequentemente, dispensou-se o uso dos EPIs de raspa de couro de alta densidade, promovendo uma melhoria imediata na ergonomia e na qualidade de vida no ambiente de trabalho.

3.4 Parâmetros de Qualidade e Integridade Física do Grão

A eficiência de uma operação unitária de secagem não se restringe apenas à remoção de água através da transferência de massa, mas estende-se à preservação da integridade estrutural e bioquímica do produto agrícola. No caso da soja, a exposição a gradientes térmicos

descontrolados resulta em perdas irreversíveis, quantificadas industrialmente como quebra técnica.

Durante o período em que a fornalha operava com alimentação manual de lenha, as oscilações bruscas na temperatura do ar de secagem submetiam a massa de grãos a choques térmicos frequentes. O aquecimento excessivo e abrupto gera uma rápida expansão do vapor de água no interior do cotilédone, originando o trincamento do tegumento (casca) e, em casos de maior severidade, a bipartição do grão. Fissuras na estrutura física da soja aumentam exponencialmente a suscetibilidade ao ataque de patógenos e à oxidação lipídica durante a posterior armazenagem.

Além dos danos físicos macroscópicos, temperaturas do ar de secagem significativamente superior ao *setpoint* estabelecido promovem a desnaturação das proteínas e a degradação qualitativa do óleo extraível, parâmetros que desvalorizam o lote no momento da classificação e comercialização. Por outro lado, a submissão a temperaturas muito baixas retarda o processo, resultando num grão com umidade superior aos 14% exigidos pela norma, obrigando ao retorno do produto ao secador (rodízio), o que consome dupla carga energética.

Deste modo, a estabilização térmica não é apenas um indicador de eficiência energética, mas um requisito fundamental de qualidade. A substituição do método empírico pela automatização em malha fechada (cavaco) garantiu a aplicação de uma curva de secagem suave e constante, mitigando o risco de degradação térmica e justificando a necessidade de uma monitorização rigorosa das variáveis do processo.

3.5 Transformação Digital e Arquitetura de Dados

Apesar da estruturação rigorosa das variáveis operacionais e da modelagem da planilha de conversão energética, o método de coleta e armazenamento de dados carecia de otimização no quesito temporalidade. Durante a primeira fase do projeto, o registro das temperaturas e umidades era realizado de forma fragmentada, dependendo do preenchimento manual em planilhas eletrônicas locais. Esse atraso entre a coleta no chão de fábrica e a análise gerencial impossibilitava tomadas de decisão em tempo real, limitando a capacidade de resposta da supervisão frente a eventuais desvios térmicos.

Visando integrar a unidade aos conceitos de Indústria 4.0, o projeto de otimização transcendeu a automação eletromecânica da fornalha e avançou para a arquitetura de dados.

Desenvolveu-se um aplicativo de uso interno, na terceira fase, focado em dispositivos móveis, para a inserção direta dos dados operacionais pelo operador do secador (Figura 10).

Figura 10 - Interface do aplicativo desenvolvido para coleta de dados de secagem

The image displays two screenshots of a mobile application interface for data collection. The top screenshot is titled "Secagem - Novo Relatório" and features a dark blue header with a back arrow and a user icon. Below the header, there are two input fields: "Filial" (with the value "Jataí") and "Equipamento" (a dropdown menu). A progress bar is visible. The main form area includes a "Secador parado?" section with radio buttons for "Sim" and "Não" (selected). Below this are several input fields: "Origem" (dropdown with "AZ01-B1"), "Destino" (dropdown), "Umidade de Entrada" (text field with "##,##"), "Umidade de Saída" (text field with "##,##"), "Temp. de Secagem Sup." (text field with "###,##"), and "Temp. de Secagem Inferior" (text field with "###,##"). At the bottom right are "Cancelar" and "Próximo" buttons. The bottom screenshot is titled "Biomassa - Novo Relatório" and has a similar layout. It includes "Filial" (Jataí) and "Equipamento" fields. The main form area has "Tipo de Alimentação" (dropdown), "Quantidade consumida" (text field with "#####"), and "Unidade de medida" (text field). Below these are "Data" and "Hora" fields, each with a calendar icon. At the bottom right are "Anterior" and "Salvar" buttons.

Fonte: Próprio autor

O aplicativo foi desenhado com uma interface simples para mitigar erros de digitação e garantir a padronização das entradas (como umidade de entrada/saída e temperatura superior/inferior). Ao inserir o dado no momento exato da leitura, o sistema alimenta automaticamente um banco de dados em nuvem, eliminando o retrabalho de digitação ao final do turno e garantindo a integridade da informação histórica.

Para traduzir esse grande volume de dados (banco de dados relacional) em inteligência de negócio, construiu-se um painel interativo (dashboard) utilizando a ferramenta *Power BI* (Figura 11), com intuito de rápida visualização dos dados de forma consolidada

Figura 11 - *Power BI* desenvolvido para a coleta de dados de secagem



Fonte: Próprio autor

A aplicação da inteligência de negócios (*Business Intelligence*) na rotina do secador permitiu a visualização dinâmica, ao longo do dia operacional, do comportamento termodinâmico da máquina. O painel foi programado para consolidar o consumo do cavaco com as médias de temperaturas e umidades, transformando linhas de planilhas em cards rápidos com o IT. Esta gestão à vista foi o elemento central para comprovar, visualmente e em tempo real, a estabilidade promovida pela nova malha de controle, entregando à coordenação da unidade uma ferramenta definitiva para acompanhar a eficiência energética.

3.6 Procedimentos de Coleta e Tratamento de Dados

A pesquisa adotou uma abordagem quantitativa baseada na coleta de dados primários in loco, para quantificar o impacto da substituição da matriz energética e da automação da fornalha. O estudo foi fundamentado no monitoramento diário da secagem e no balanço de massa do insumo energético, registrados e consolidados nas planilhas de mensalmente pela equipe operacional e de controle de estoque.

3.6.1 Definição do Período de Análise

Para assegurar o rigor comparativo da análise e mitigar a interferência de variáveis externas, como variações drásticas na temperatura ambiente e na umidade relativa do ar, o estudo adotou o princípio da similaridade sazonal. Os dados selecionados para comparação foram da operação de fevereiro de safras anteriores (operação manual a lenha) contra fevereiro

da safra atual (operação automatizada a cavaco). A escolha de fevereiro justifica-se por representar o pico de recebimento da safra de soja na unidade, submetendo os equipamentos térmicos ao seu regime máximo de operação e estresse térmico.

3.6.2 Variáveis Operacionais Monitoradas

A coleta de dados foi estruturada em duas frentes de controle principais: a eficiência no produto final, referente ao processo físico de secagem, e o consumo de insumo, voltado à análise termodinâmica do sistema. A partir dos relatórios diários de produção, as variáveis operacionais foram sistematicamente monitoradas a cada turno. No que tange ao processo da matéria-prima, registrou-se a porcentagem de umidade inicial de entrada e a umidade final de saída da soja, tendo como meta operacional o *setpoint* de comercialização de 14%, além da quantificação do volume total da massa de grãos secados por turno, aferido em toneladas.

Simultaneamente, para avaliar o comportamento térmico do secador, mensurou-se a temperatura do ar de secagem nas zonas superior e inferior da coluna, em graus Celsius. Esse monitoramento contínuo permitiu a posterior análise da estabilidade térmica e das oscilações, expressas pelo desvio padrão, do controle PID sob a influência das diferentes matrizes energéticas. Por fim, quanto às variáveis de suprimento logístico e operacional, contabilizou-se o tempo de uso efetivo do equipamento em horas e o consumo quantitativo de biomassa medido durante a operação, consolidando a base de dados necessária para o balanço de massa e energia.

3.6.3 Tratamento de Dados e Fator de Conversão

Para que a comparação termodinâmica e financeira entre as safras fosse cientificamente válida, era imperativo isolar as variáveis da biomassa. Uma particularidade fundamental deste estudo de caso é que o cavaco de madeira utilizado na safra de 2026 foi proveniente da picagem mecânica do estoque residual de lenha em toras da própria unidade. Este fato garantiu que o combustível biológico apresentasse rigorosamente a mesma origem físico-química, mantendo constantes o Poder Calorífico Inferior (PCI) e a densidade básica da madeira.

Apesar da uniformidade química do insumo, o tratamento de dados apresentou o desafio da incompatibilidade de unidades de medida operacionais. Historicamente, a operação a lenha em toras tinha o seu consumo aferido volumetricamente em Metros Estéreos (MEE), utilizando-se réguas de medição geométrica nas pilhas do pátio. Em contrapartida, o consumo do cavaco de madeira para o sistema automatizado é mensurado estritamente de forma gravimétrica (em quilogramas), utilizando-se balanças de pesagem rodoviária.

Realizar o cálculo do Índice Técnico misturando MEE e quilogramas induziria a falhas críticas na análise de viabilidade econômica. Para equalizar o balanço de massa, estruturou-se uma tabela de fatores de conversão (Tabela 1), correlacionando a massa efetiva do cavaco picado com o volume estéreo histórico da tora, para efeito de controle de estoque de insumos.

Tabela 2 – Conversão de cavaco para o equivalente volumétrico em lenha

CONVERSÃO DO ESTOQUE	
LENHA	1185,00
PESO TOTAL CAVACO	528.510
KG/MEE	446,00

Fonte: Próprio autor

Conforme detalhado na Tabela 1, estabeleceu-se o fator empírico da unidade de 446 kg de cavaco para cada 1 MEE de lenha. Ao aplicar este quociente sobre o peso total de cavaco processado em fevereiro de 2026 (108.845 kg), os dados brutos foram matematicamente convertidos para 244,05 MEE. Conforme Tabela 2, indicando consumo dos dias com operação de secagem e total do mês.

Tabela 3– Conversão consumo do estoque de cavaco para lenha em MEE (Safrá 2026)

CONVERSÃO CAVACO UTILIZADO		
Data	Em Kg	Em Mee
07/02/2026	10355	23,22
09/02/2026	14450	32,40
10/02/2026	8010	17,96
13/02/2026	13150	29,48
14/02/2026	10380	23,27
15/02/2026	4240	9,51
20/02/2026	3030	6,79
21/02/2026	4450	9,98
22/02/2026	5600	12,56
23/02/2026	7430	16,66
25/02/2026	8090	18,14
26/02/2026	7750	17,38
27/02/2026	11910	26,70
Total mês	108845	244,05

Fonte: Próprio autor

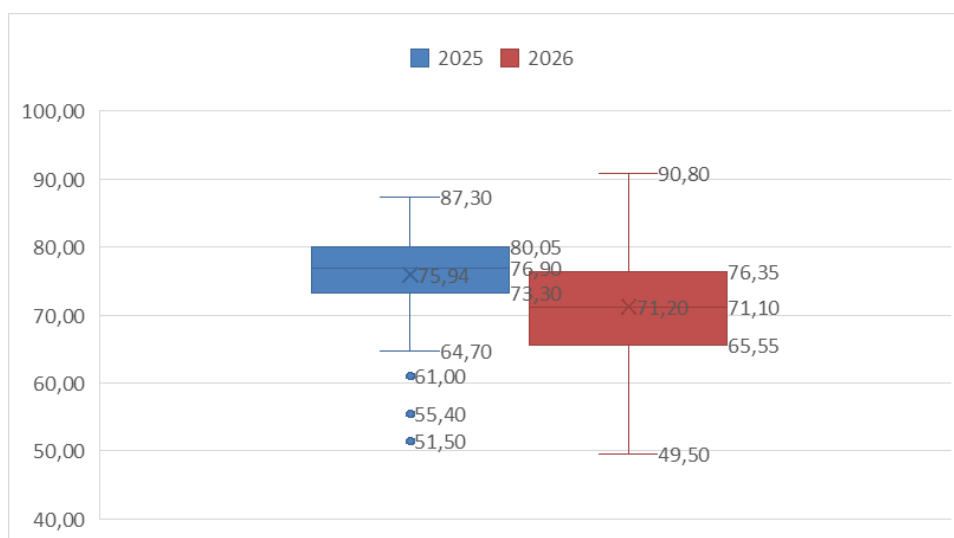
Essa padronização estatística nivelou a base de cálculo, permitindo confrontar diretamente o consumo de 2414,05 MEE (2026) contra o consumo de 96 MEE (2025). Através deste tratamento numérico, tornou-se possível calcular o IT e IT_{pb} de ambas as safras sob a mesma unidade estrutural, revelando a real eficiência termodinâmica da automação.

3.7 Estabilidade Térmica na Secagem Primária

Para compreender o impacto da transição da lenha em tora para o cavaco de madeira automatizado, é necessário analisar o comportamento térmico e operacional do sistema sob estresse produtivo. Na safra de fevereiro de 2026, a unidade armazenadora processou um volume de soja 93,8% superior ao de fevereiro de 2025. Para avaliar se o novo sistema de biomassa suportou essa expansão de carga mantendo a integridade das temperaturas de secagem, adotou-se a análise de distribuição de dados por meio do diagrama de caixa (*Boxplot*).

Este método estatístico permite visualizar não apenas a tendência central do desempenho térmico, mas também a dispersão, a simetria e a ocorrência de falhas operacionais atípicas (*outliers*).

Figura 12 - Distribuição comparativa de desempenho operacional (fevereiro/2025 vs. fevereiro/2026)



Fonte: Próprio autor

A análise da Figura 12 revela mudanças comportamentais claras na dinâmica da fomalha entre os dois períodos. No mês de fevereiro de 2025 (sistema manual a lenha), observa-se uma mediana de 76,90 °C e um intervalo interquartil (a "caixa" azul) mais estreito. Embora isso sugira, à primeira vista, uma estabilidade central, o limite máximo de temperatura ficou restrito a 87,30 °C. Além disso, a presença de três *outliers* inferiores (com quedas abruptas para

61,00 °C, 55,40 °C e 51,50 °C) evidencia o principal gargalo da alimentação manual: a dependência do fator humano. Atrasos na recarga da fornalha pelos safristas resultavam em perdas drásticas e atípicas de calor no sistema, comprometendo a curva de secagem contínua.

Em contrapartida, os dados de fevereiro de 2026 (sistema automatizado a cavaco) demonstram o comportamento termodinâmico de uma planta operando em escala industrial acelerada. A mediana de temperatura ajustou-se ligeiramente para 71,10 °C e ocorreu um alongamento da dispersão dos dados (caixa vermelha mais longa). No entanto, este comportamento não representa uma ineficiência, mas sim a adaptação da malha de controle térmico a um volume de grãos 65% maior exigindo calor ininterruptamente.

Dois pontos cruciais comprovam a superioridade técnica do cavaco na safra de fevereiro de 2026:

- Maior Potencial Térmico: O limite superior do sistema rompeu o teto do ano anterior, atingindo um pico de 90,80 °C. Isso prova que a automação e a queima contínua do cavaco oferecem uma capacidade energética que a lenha em tora não conseguia fornecer nas mesmas condições.

- Eliminação de Falhas Atípicas: Ao contrário de fevereiro de 2025, o diagrama de 2026 não apresenta nenhum *outlier*. A amplitude de dados, incluindo a mínima de 49,50 °C, passou a compor a variabilidade natural de um equipamento trabalhando em carga máxima contínua, eliminando as quedas abruptas (e não programadas) causadas por falhas humanas de alimentação.

Conclui-se que o sistema automatizado trocou uma estabilidade aparente e limitada (fevereiro/2025) por uma dinâmica operacional mais robusta (fevereiro/2026), capaz de sustentar picos de calor mais altos e eliminar as falhas severas de operação, garantindo o fluxo térmico necessário para processar as 15.006 toneladas daquele mês.

3.8 Viabilidade Econômica e Eficiência Operacional

A análise puramente termodinâmica e volumétrica do consumo de biomassa pode levar a interpretações equivocadas se não for contextualizada com a escala de produção e os custos operacionais (OPEX) atrelados à secagem.

Para avaliar o real impacto da transição tecnológica, primeiramente consolidou-se o IT de consumo comparativo entre as safras, utilizando a conversão equivalente em MEE

estabelecida anteriormente. Contudo, esse cálculo revelou-se um indicador vulnerável. O índice não é uma constante isolada, ele sofre interferências diretas de variáveis termodinâmicas e operacionais do sistema, destacando-se a umidade inicial e final dos grãos, a umidade intrínseca do próprio combustível e a eficiência térmica da fornalha.

Tabela 4 - Comparativo de Consumo, IT e IT_{pb} (fevereiro de 2025 e 2026)

Mês/Ano	Volume Secado (Ton)	IT	IT _{pb}
Fevereiro/2025	7.740	0,015	0,004
Fevereiro/2026	15.006	0,003	0,001
Varição	+ 7.266	-0,011	-0,003

Fonte: Próprio autor

Conforme evidenciado na Tabela 3, o IT em fevereiro de 2026 apresentou uma diminuição de 0,011 (37,1%) em relação ao mesmo mês do ano anterior. Do ponto de vista estritamente energético, o sistema consumiu menos combustível equivalente por unidade de soja processada. Contudo, este aumento no consumo foi o fator habilitador para um salto expressivo de 93,8% na capacidade de recebimento da unidade armazenadora, que passou de 7.740 para 15.006 toneladas processadas no mesmo intervalo de tempo, consumo 244,05 MEE (2026) contra o consumo de 96 MEE (2025), descrito anteriormente.

Para contornar essa limitação e obter um reflexo real da eficiência, os dados foram submetidos à métrica de Índice Técnico por Ponto Baixado (IT_{pb}). A transição da operação manual com lenha (fevereiro de 2025) para o sistema automatizado com cavaco (fevereiro de 2026) demonstrou um ganho de eficiência termodinâmica expressivo. Como demonstrado na Tabela 3, a média do IT_{pb} no sistema da lenha situou-se em 0,004. Em contrapartida, a adoção da malha de controle estabilizou o consumo e derrubou a média para 0,001, representando uma redução de 0,003 (75,66%) no consumo específico de combustível por ponto percentual de umidade evaporada. Essa estabilização comprova que a automação não apenas mitiga o desperdício energético, mas também isola a operação das flutuações de umidade na recepção da carga.

Para justificar essa dinâmica, a avaliação foi expandida para a viabilidade financeira (Tabela 4), incorporando os preços médios de mercado da biomassa (R\$ 165,00/MEE para

lenha e R\$ 280,00/tonelada para cavaco) e, fundamentalmente, o custo da mão de obra operacional (CEPEA, 2026)

Historicamente, o sistema manual a lenha exigia a contratação de quatro trabalhadores temporários (safristas) exclusivamente para a alimentação ininterrupta da fornalha, gerando um custo mensal estimado de R\$ 15.200,00 (considerando salários e encargos trabalhistas do CTPT).

Tabela 4 - Análise de Viabilidade Econômica e Custo de Secagem

Descrição do Custo	Fev/2025 (Lenha em Tora)	Fev/2026 (Cavaco de Madeira)	Observação
Aquisição de Biomassa	R\$ 15840,00	R\$ 27252,4	Aumento devido à escala produtiva
Mão de Obra para fornalha (Safristas)	R\$ 15.200,00 (4 funcionários)	R\$ 0,00 (Automação)	Eliminação do gargalo operacional
Total do Mês	R\$ 31040,00	R\$ 27252,4	27252,4 economizados
Volume Secado	7740 Ton	12780 Ton	Maior diluição de custos fixos
Custo Efetivo por Tonelada Secada	R\$ 4,01	R\$ 2,13	Redução de 46,8% no custo unitário

Fonte: Próprio autor (2026).

A análise dos dados financeiros revela a verdadeira eficiência da implementação do cavaco de madeira. Embora o gasto absoluto com combustível tenha sido maior em fevereiro de 2026 (R\$ 30.476,6 contra R\$ 15.840,00 em fevereiro de 2025), a quantidade de produto secado em 2026 teve um aumento de 7.740 para 15.006 toneladas, além da eliminação integral da folha de pagamento dos safristas mais do que compensou esse aumento, resultando em uma economia operacional global de 46,8% no mês analisado.

O impacto mais contundente desta transição logística observa-se no "Custo Efetivo por Tonelada Secada". Ao associar a automação (que reduziu o custo fixo) com a alta capacidade do secador (que processou 93,9 % mais soja naquele mês), o custo financeiro para secar cada tonelada de soja despencou de R\$ 4,01 para R\$ 2,03.

Portanto, conclui-se que a aparente perda de eficiência térmica apontada pelo Índice Técnico é, na realidade, um compromisso estratégico altamente rentável. A automação a cavaco garantiu a estabilidade do processo e viabilizou um modelo de secagem quase 49,3% mais barato por unidade processada, cancelando a viabilidade econômica do projeto.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou, de forma quantitativa e analítica, os múltiplos impactos decorrentes da modernização do processo de secagem de soja, especificamente através da substituição da matriz energética convencional — baseada em lenha em toras com alimentação manual — por um sistema automatizado a cavaco de madeira. A análise integrada dos indicadores termodinâmicos, operacionais e financeiros permitiu validar a premissa de que a eficiência de uma unidade armazenadora transcende o mero consumo energético isolado, estando intrinsecamente ligada à escalabilidade, à segurança operacional e à otimização dos recursos humanos.

Sob a perspectiva termodinâmica e de controle de processos, a avaliação da estabilidade térmica, suportada pela análise de dispersão (*Boxplot*), revelou que a automação eliminou o principal estrangulamento da operação convencional: a instabilidade gerada pela dependência do fator humano. Durante o pico da safra, em fevereiro de 2026, o sistema automatizado a cavaco absorveu uma carga produtiva 93,8% superior à do período homólogo, demonstrando capacidade para sustentar picos de temperatura mais elevados (até 90,80 °C) sem a ocorrência de quedas abruptas (*outliers*). Esta constância térmica assegurou uma curva de secagem contínua, fundamental para a manutenção da integridade física e fisiológica dos grãos, evitando o estresse térmico e assegurando a qualidade final do produto.

Do ponto de vista da eficiência energética, a adoção da métrica do Índice Técnico por Ponto Baixado (IT_{pb}) revelou-se fundamental para aferir o real desempenho termodinâmico da automação. A transição da matriz energética provou que o ganho de escala foi acompanhado de uma otimização no consumo específico: o IT_{pb} decaiu de 0,004 para 0,001. Esta redução atesta que o sistema automatizado não apenas mitiga o desperdício energético, mas também isola a operação das flutuações de umidade na recepção da carga, entregando maior precisão calorífica por ponto de água evaporada.

A viabilidade financeira do projeto consolidou-se na reestruturação da força de trabalho, culminando na eliminação integral da necessidade de quatro postos de trabalho sazonais (safristas) dedicados exclusivamente à alimentação insalubre das fornalhas. Esta medida gerou uma economia direta de aproximadamente R\$ 15.200,00 mensais em folha de pagamento e encargos.

O impacto mais expressivo desta transição tecnológica evidenciou-se na diluição dos custos fixos operacionais. A combinação da redução drástica das despesas com recursos

humanos e a ampliação de 93,8% na capacidade de processamento resultou numa queda de 46,8% no custo efetivo de secagem por unidade de soja, que decresceu de R\$ 4,01 (fevereiro/2025) para R\$ 2,03 (fevereiro/2026). Comprova-se, assim, que o investimento na automação a cavaco é uma estratégia altamente rentável, capaz de absorver o aumento nominal do custo do insumo através da otimização global da cadeia produtiva.

Adicionalmente, o projeto destacou-se pela adequação aos pilares de SHE. A erradicação do manuseamento manual de toras de madeira mitigou drasticamente a exposição dos colaboradores a riscos ergonômicos e acidentes de trabalho, alinhando a planta com as melhores práticas de segurança ocupacional. Paralelamente, a implementação de ferramentas de transformação digital, como a aplicação de recolha de dados e a monitorização dinâmica via *Power BI*, substituiu o preenchimento obsoleto de folhas de cálculo manuais, garantindo rastreabilidade, fiabilidade e agilidade na tomada de decisão em tempo real.

Em suma, conclui-se que a transição para o sistema automatizado a cavaco superou as expectativas iniciais. O projeto não apenas modernizou a matriz energética da unidade, como também evidenciou que a aplicação rigorosa dos fundamentos de engenharia, aliada à transformação digital e à gestão inteligente de custos, resulta em processos industriais mais seguros, operacionais e financeiramente sustentáveis, preparando a planta para os desafios crescentes do agronegócio contemporâneo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, E. R. et al. Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 606-613, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/Nt6Ld4nT34d99ZLF5ynjf7g/>. Acesso em: 23 fev. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 50001**: Sistemas de gestão da energia - Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- BAIDHE, E.; CLEMENTSON, C. L. A review of the application of modeling and simulation to drying systems for improved grain and seed quality. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 222, p. 109094, 2024.
- BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction**: Practical Design and Theory. 3. ed. Cambridge: Academic Press, 2018.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2016.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- BORGES, A. X. et al. Avaliação dos custos da secagem de grãos utilizando lenha e cavacos de eucalipto como combustível. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 9, p. 14258-14287, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv21n9-202>. Acesso em: 22 fev. 2026.
- BRAND, M. A.; GIESEL, A. D. Produção e uso de biomassa para geração de energia. **Documentos Embrapa**, v. 211, n. 1, p. 1–45, 2017.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Portaria nº 1.297, de 13 de agosto de 2014**. Aprova o Anexo 3 - Limites de Tolerância para Exposição ao Calor - da Norma Regulamentadora nº 15. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2014.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. **Norma Regulamentadora nº 12 (NR-12)** - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Brasília, DF, 2019.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- CARNEIRO, A. C. O. et al. **Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal**. Viçosa: Editora UFV, 2021.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; KANOĞLU, M. **Termodinâmica**: uma abordagem de engenharia. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2020.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA.
Indicadores de Preços: Cavaco de Madeira. Piracicaba: ESALQ/USP, 2026. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/>. Acesso em: 27 mar. 2026.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA.
Indicadores de Preços: Lenha. Piracicaba: ESALQ/USP, 2026. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/>. Acesso em: 27 mar. 2026.

CEPEA - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA.
Mercado de Trabalho no Agronegócio Brasileiro: Custos e Tendências. Piracicaba: ESALQ/USP, 2024.

CHEN, P. X. et al. Effects of drying methods on the drying kinetics and quality of maize. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 17, n. 5, p. 256-265, 2024.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: 5º levantamento, Safra 2025/26.** Brasília: Conab, 2026.

EMBRAPA. **Árvore do Conhecimento: Soja** - Composição Química e Valor Nutricional. Brasília: Embrapa, 2019.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja.** Londrina: Embrapa Soja, 2020.

GASPERINI, T.; YEŞİL, V.; TOSCANO, G. Machine learning and woody biomasses: Assessing wood chip quality for sustainable energy production. **Biomass and Bioenergy**, v. 193, p. 107527, 2025.

IIDA, I.; BUARQUE, L. **Ergonomia: projeto e produção.** 3. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

KEPLER WEBER. **Manual de Operação e Manutenção: Secadores de Grãos Linha ADS.** Panambi: Kepler Weber, 2025.

MANJARI, T. et al. Soybean storage and preservation: a comprehensive review of post-harvest challenges, technologies, and global perspectives. **Journal of Stored Products Research**, v. 116, 102910, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102910>. Acesso em: 20 fev. 2026.

NOGUEIRA, R. A. Automação em unidades armazenadoras e o impacto da matriz energética na viabilidade econômica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 2, p. 45-52, 2025.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno.** 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PROTÁSIO, T. P. et al. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, p. e3567, 2021.

QUEQUETO, W. D. et al. Performance of industrial drying and soybean grains quality. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 43, e101022, 2023.

RESENDE, O. et al. Drying and Quality of Agricultural Products. **Agricultural Engineering Concepts**, v. 14, n. 3, p. 112–128, 2022.

SILVA, J. S. (ed.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008.

SILVA, M. T.; OLIVEIRA, J. C. Gargalos logísticos e operacionais no pós-colheita de soja. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 32, 2024.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

SOARES, J. M. **Avaliação da qualidade de três diferentes tipos de cavacos de madeira**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

WEI, S. et al. Effect of drying conditions on the cellular structure and thermal stress of soybeans. **Drying Technology**, v. 38, n. 4, p. 450-462, 2020.