



Eduardo Müller

**APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA NO PROCESSO DE
PLANEJAMENTO DE CORTES DE MADEIRA EM FORNECEDORA DA CADEIA
LOGÍSTICA**

Horizontina - RS

2025

Eduardo Müller

**APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA NO PROCESSO DE
PLANEJAMENTO DE CORTES DE MADEIRA EM FORNECEDORA DA CADEIA
LOGÍSTICA**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção na Faculdade Horizontina, sob a orientação da Professora Ivete Ruppenthal Ebrin.

Horizontina - RS

2025

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

“Aplicação da programação linear inteira no processo de planejamento de cortes de madeira em fornecedora da cadeia logística”

Elaborada por:

Eduardo Müller

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Produção

Aprovado em: 03/12/2025
Pela Comissão Examinadora

Mestra. Ivete Ruppenthal Ebrin
Presidente da Comissão Examinadora - Orientadora

Mestra. Eliane Garlet
FAHOR – Faculdade Horizontina

Mestra. Francine Centenaro Gomes
FAHOR – Faculdade Horizontina

Horizontina - RS
2025

À Deus, por ser meu guia em todos os momentos, iluminando meus passos, fortalecendo minha fé e me concedendo sabedoria para seguir em frente diante dos desafios.

À minha família, em especial à minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão, por serem minha base forte, meu alicerce e minha maior inspiração. Pelo amor, apoio e incentivo incondicionais, que me deram forças para chegar até aqui.

À professora Ivete Ruppenthal Ebrin, pela orientação, paciência e dedicação ao longo do desenvolvimento deste Trabalho Final de Curso. Sua orientação foi essencial para a conclusão desta etapa.

“É melhor ser um guerreiro no jardim do que um jardineiro na guerra. Um homem bom não é fraco. Ele é perigoso, disciplinado e treinado, mas escolhe ser gentil, dócil e justo.”

(Jordan Peterson)

RESUMO

O aproveitamento eficiente da matéria-prima é um desafio recorrente na indústria madeireira, especialmente no processo de corte de tábuas de madeira (ripas) utilizadas na fabricação de caixas. Assim, o presente estudo tem como objetivo aplicar a Programação Linear Inteira (PLI) como ferramenta de otimização no processo de corte de ripas de madeira destinadas à fabricação de caixas, visando a minimização dos desperdícios, maximização do aproveitamento da matéria-prima e redução dos custos operacionais em uma empresa fornecedora da cadeia logística. A pesquisa caracteriza-se como pesquisa-ação, baseada no método quali-quantitativo hipotético-dedutivo, sustentado por pesquisa exploratória, descritiva e comparativa. Na coleta de dados, utilizaram-se observação direta do processo produtivo, entrevistas informais com colaboradores e levantamento documental para coletar dados quantitativos referentes às dimensões das ripas, especificações das caixas e demandas. Com essas informações, elaboraram-se planos de corte e, posteriormente, desenvolveram-se modelos de PLI, implementados no suplemento Solver do Microsoft Excel, permitindo simular diferentes cenários e determinar as combinações ideais entre ripas e peças, visando maximizar o aproveitamento do material e minimizar as perdas no processo de corte. A aplicação dos modelos resultou em uma redução superior a 85% no desperdício de madeira e praticamente 100% de redução no tempo de planejamento dos cortes, demonstrando a eficiência da PLI na padronização das decisões de corte e no aumento do aproveitamento da matéria-prima.

Palavras-chave: Otimização de cortes. Programação Linear Inteira. Desperdício.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura geral da função objetivo e restrições de um modelo de otimização	33
Figura 2: Fluxograma da pesquisa	41
Figura 3: Modelos de caixas.....	44
Figura 4: Fluxograma atual do processo de corte	46
Figura 5: Desenho técnico das caixas usado para o cálculo de quantidade de cortes	47
Figura 6: Painel IHM usado para configurar as combinações de corte	47
Figura 7: Corte da matéria-prima na serra	48
Figura 8: Armazenamento de peças cortadas.....	49
Figura 9: Sobras de madeira para descarte	50
Figura 10: Planos de corte dos modelos NP 2626 e NP 2628	54
Figura 11: Representação parcial dos planos de corte dos modelos NP 2626 e NP 2628	55
Figura 12: Fluxograma do processo de corte otimizado.....	57
Figura 13: Painel de navegação do usuário	61
Figura 14: Modelo matemático de corte para caixas NP 2626 e NP 2628 utilizando matéria-prima de 4,5 metros	62
Figura 15: Modelo matemático das caixas NP 2626 e NP 2628 utilizando matéria-prima de 4,5 metros – demanda e instruções	64
Figura 16: Instruções de uso do modelo matemático.....	65
Figura 17: Instruções de uso do modelo matemático.....	66
Figura 18: Parâmetros do Solver.....	66
Figura 19: Modelo matemático para matéria-prima de 3 metros com demanda de 5 caixas NP2699 e 5 caixas NP2700	67
Figura 20: Valor monetário do desperdício da produção de 5 caixas NP2699 e NP2700	68
Figura 21: Resultado da simulação 1 com estoque igual a zero	69
Figura 22: Resultado da simulação 2 com estoque de uma unidade	70
Figura 23: Gráfico comparativo do desperdício da situação atual versus o modelo matemático.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cortes de peças necessários para cada modelo de caixa	52
Tabela 2: Cortes necessários para cada modelo de caixa	54
Tabela 3: Custo do desperdício da situação atual.....	71

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 TEMA.....	12
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.4 HIPÓTESES	13
1.5 JUSTIFICATIVA.....	14
1.6 OBJETIVOS	15
1.6.1 Objetivo geral.....	15
1.6.2 Objetivos específicos.....	16
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1 INDÚSTRIA MADEIREIRA.....	17
2.1.1 Características e importância da indústria madeireira no Brasil e no Rio Grande do Sul.....	18
2.1.2 Desafios no uso eficiente da matéria-prima na indústria madeireira	19
2.2 GESTÃO DA PRODUÇÃO E EFICIÊNCIA OPERACIONAL.....	19
2.2.1 Fundamentos da gestão da produção.....	20
2.2.2 Conceito de eficiência produtiva	21
2.2.3 Indicadores de desempenho e controle de perdas	22
2.3 DESPERDÍCIOS NA PRODUÇÃO INDUSTRIAL	24
2.3.1 Definição e tipos de desperdícios	24
2.3.2 Causas comuns de desperdício na indústria madeireira e setores produtivos.....	25
2.3.3 Impactos econômicos, ambientais e operacionais dos desperdícios.....	26
2.3.4 Estratégias para redução de desperdícios e melhoria contínua.....	27
2.4 PLANEJAMENTO DE CORTE DE MADEIRA.....	28
2.4.1 Etapas e técnicas envolvidas no processo de corte.....	28
2.4.2 Importância do planejamento na redução de sobras e refugos.....	29
2.5 FUNDAMENTOS DA PROGRAMAÇÃO LINEAR	30
2.5.1 Definição e aplicações da Programação Linear	31
2.5.2 Estrutura de um modelo matemático: função objetivo, variáveis de decisão e restrições.....	32
2.5.3 Aplicações da Programação Linear na Indústria	34
2.6 SOFTWARES E FERRAMENTAS UTILIZADAS EM PROGRAMAÇÃO LINEAR	35
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS.....	37
3.1.1 Método de Abordagem.....	38
3.1.2 Procedimentos Técnicos	38
3.1.3 Técnicas de Coleta de Dados.....	39
3.1.4 Técnicas de Análise de Dados	40
3.1.5 Delineamento do Estudo	41
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	43
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA.....	43
4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE ESTUDO	44
4.3 PROCESSO ATUAL DE CORTE DE RIPAS DE MADEIRA	45
4.3.1 Identificação de desperdícios e ineficiência.....	49
4.4 VARIÁVEIS DO PROCESSO DE CORTE DE MADEIRA	51
4.4.1 Elaboração dos planos de corte	53

4.5 PROCESSO DE CORTE OTIMIZADO.....	57
4.6 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO	58
4.7 SIMULAÇÕES DO CENÁRIO DA EMPRESA.....	69
4.8 COMPARATIVO DA SITUAÇÃO ATUAL X PROCESSO OTIMIZADO.....	70
4.9 RECOMENDAÇÕES PARA A EMPRESA	73
CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS.....	77
APÊNDICE A - CÓDIGO VBA	81

1 INTRODUÇÃO

A busca por resultados mais eficientes dentro das organizações exige um entendimento cada vez mais aprofundado dos recursos disponíveis no setor produtivo, onde ocorre a agregação de valor ao produto final. Compreender como cada etapa funciona, identificar pontos de desperdício e utilizar indicadores confiáveis de desempenho são práticas essenciais para fortalecer a gestão empresarial e as tomadas de decisões (Prates, 2011).

No contexto da indústria madeireira, essa atenção destacada por Prates (2011) torna-se ainda mais relevante, uma vez que o aproveitamento adequado da matéria-prima impacta diretamente nos custos de produção e nos aspectos ambientais. Reduzir perdas ao longo do processo, especialmente na etapa de corte, representa não apenas um avanço em eficiência operacional, mas também uma estratégia para aumentar a competitividade e promover a sustentabilidade do negócio. Isso se dá, principalmente, pela possibilidade de otimizar o uso da madeira, minimizar sobras e reduzir a geração de resíduos.

Diante desse cenário, a aplicação de técnicas de otimização, como a Programação Linear, apresenta-se como uma alternativa promissora para evitar desperdícios em uma indústria de produção de caixas de madeira. De acordo com Stein, Gehlen e Afonso (2018), a Programação Linear é uma ferramenta matemática utilizada para resolver problemas que envolvem decisões otimizadas dentro de um conjunto de condições bem definidas. Segundo os autores, ela baseia-se em equações e restrições que representam situações reais, como a alocação de recursos, o planejamento da produção ou o controle de custos.

O principal objetivo desse método, conforme explicado pelos mesmos, é encontrar a melhor solução possível para maximizar ganhos ou minimizar perdas, sempre respeitando as restrições impostas pelo sistema em estudo. Essa abordagem é amplamente adotada em diversos setores, especialmente na área industrial, por possibilitar maior controle sobre o uso de matéria-prima, tempo e mão de obra.

Frente ao exposto, este estudo teve como objetivo, aplicar a Programação Linear Inteira como ferramenta para minimizar os custos na produção de caixas de madeira em uma empresa fornecedora da cadeia logística, situada no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, por meio da redução de desperdícios no processo produtivo. A ideia central foi desenvolver modelos matemáticos que considerassem

variáveis relevantes, como as dimensões das caixas, a disponibilidade da matéria-prima, as restrições do sistema de produção e os custos associados. Com isso, buscou-se identificar a melhor forma de alocar os recursos disponíveis, otimizando o uso dos materiais e reduzindo os resíduos gerados ao longo da fabricação.

A empresa analisada é a filial da Artefacto, pertencente à Kohler & Kohler Indústria Metalúrgica Ltda., localizada em Horizontina – RS. Fundada em 19 de junho de 1985, a unidade atua na fabricação de caixas de madeira sob medida para transporte e armazenamento de produtos industriais. O processo produtivo envolve as etapas de corte, montagem e acabamento, contando com cerca de 24 colaboradores. Além disso, a empresa também realiza tratamento fitossanitário (HT) para caixas destinadas à exportação, assegurando qualidade e conformidade com normas internacionais.

Este trabalho foi estruturado a partir de uma análise aprofundada da literatura existente sobre o tema, identificando pesquisas que abordaram problemas semelhantes e os métodos utilizados em suas respectivas soluções. Com base nesse levantamento, foram desenvolvidos modelos matemáticos fundamentados em Programação Linear Inteira, nos quais foram detalhadas suas variáveis, restrições e o objetivo principal da formulação. Esses modelos possibilitam simular diferentes cenários e combinações, oferecendo um suporte para otimização do processo produtivo da empresa.

Por fim, foram apresentados os resultados obtidos, apontando as contribuições deste trabalho para o setor, bem como suas limitações e sugestões para investigações futuras. Com isso, espera-se oferecer contribuições relevantes para a indústria madeireira, incentivando a adoção de novas estratégias para tornar o processo de fabricação de caixas de madeira mais eficiente e sustentável.

1.1 TEMA

O tema deste estudo foi a aplicação de técnicas de Programação Linear Inteira para otimização do planejamento de corte de madeira, visando a redução de desperdícios e aumento da eficiência em uma empresa da cadeia logística.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este estudo se delimitou na aplicação de técnicas de Programação Linear Inteira como ferramenta de otimização no processo de corte de ripas de madeira utilizadas na fabricação de caixas, na empresa Artefacto, fornecedora da cadeia logística localizada no estado do Rio Grande do Sul. A pesquisa foi desenvolvida com base em dados operacionais coletados no segundo semestre de 2025, considerando variáveis como as dimensões das ripas de madeira, especificações das caixas, demanda produtiva, restrições do processo e custos envolvidos. O trabalho focou no desenvolvimento de modelos matemáticos voltados à minimização de perdas de matéria-prima (sobras) e custos, não abrangendo outras etapas da cadeia produtiva ou processos de manufatura subsequentes ao corte.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

O planejamento do corte das ripas de madeira utilizadas na fabricação das caixas era realizado com base na intuição e na experiência prática do colaborador responsável pela operação. O operador definia manualmente as combinações de corte, buscando atender às demandas produtivas de cada modelo de caixa. No entanto, a ausência de um método sistematizado e apoiado em ferramentas matemáticas permitia que o processo fosse suscetível a erros, variações de aproveitamento e altos índices de desperdício de matéria-prima. Essa falta de padronização resulta em custos produtivos elevados, além de comprometer a eficiência e a previsibilidade da produção.

Diante da necessidade de atender diferentes demandas na produção de caixas de madeira, o problema de pesquisa deste estudo é: como a aplicação da Programação Linear Inteira pode otimizar os planos de corte de ripas na fabricação de caixas de madeira, visando à minimização de perdas de matéria-prima?

1.4 HIPÓTESES

Considerando o objetivo deste estudo de aplicar modelos de Programação Linear Inteira (PLI) para otimizar os planos de corte de ripas de madeira e reduzir desperdícios no processo produtivo, foram formuladas as seguintes hipóteses de pesquisa:

- A aplicação de modelos de PLI no planejamento de cortes de ripas de madeira reduz significativamente o desperdício de matéria-prima em comparação aos métodos manuais atualmente utilizados na produção de caixas;
- A implementação de modelos matemáticos baseados em PLI reduz o tempo necessário para o planejamento dos cortes, automatizando decisões que antes dependiam exclusivamente da experiência do operador e tornando o processo mais ágil e padronizado.

1.5 JUSTIFICATIVA

De acordo com Cechin (2020), é essencial que as empresas busquem continuamente formas de tornar seus processos produtivos mais eficientes. Segundo o autor, a melhoria desses processos contribui tanto para o aumento da lucratividade quanto para a manutenção da competitividade no mercado, permitindo que a organização se destaque frente à concorrência. Para isso, é fundamental aproveitar os avanços tecnológicos e os conhecimentos desenvolvidos na área acadêmica.

Ainda conforme Cechin (2020), uma das estratégias para alcançar essa eficiência é a redução de custos, sem comprometer a qualidade dos produtos. Nesse contexto, minimizar o desperdício de matéria-prima durante a produção é um fator relevante, pois impacta diretamente no custo final do produto, na quantidade de insumos adquiridos e nas horas de trabalho envolvidas. A aplicação de métodos de otimização, como os estudados na Engenharia de Produção, pode contribuir significativamente nesse processo, auxiliando na tomada de decisões e promovendo uma operação mais racional e eficiente.

Segundo Hillier e Lieberman (2013), a Programação Linear é um dos avanços científicos mais relevantes do século XX, amplamente utilizada em diversos setores da indústria por sua capacidade de fornecer soluções otimizadas para problemas complexos. De acordo com os autores, essa técnica tem como objetivo planejar atividades de modo a alcançar o melhor resultado possível, como a minimização de custos, o aproveitamento máximo de recursos ou a maximização da produção, sempre considerando as restrições impostas pelo sistema.

No contexto da empresa estudada, identifica-se que o corte das ripas de madeira é realizado após o momento em que as ordens de produção são emitidas, sem um planejamento prévio que oriente essa etapa. Essa prática torna o processo

dependente da experiência do operador e propenso a falhas, desperdícios e retrabalho. A falta de um plano estruturado para os cortes pode comprometer o aproveitamento da matéria-prima e também, impacta negativamente no tempo de produção e nos custos operacionais.

Dessa forma, este trabalho se justifica pela possibilidade de promover ganhos reais à empresa, ao implementar uma solução baseada na PLI, que visa organizar e otimizar o plano de corte das ripas. A implementação de modelos matemáticos para essa finalidade pode contribuir diretamente para a redução de perdas, melhor utilização dos recursos disponíveis e aumento da eficiência produtiva. Esses ganhos operacionais impactam diretamente na economia de insumos, diminuição de custos, sustentabilidade e maior competitividade no mercado.

Este estudo também possui relevância acadêmica, pois proporciona ao discente de Engenharia de Produção a oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação. A elaboração e aplicação de modelos de otimização em um ambiente real de produção, reforça a importância de métodos quantitativos como suporte à tomada de decisão e estimula a capacidade analítica e crítica do futuro profissional. Assim, o trabalho contribuiu tanto para o avanço técnico da organização, quanto para o desenvolvimento pessoal e profissional do pesquisador.

1.6 OBJETIVOS

Com base na problemática apresentada e na justificativa do estudo, esta seção apresenta os objetivos que nortearam o desenvolvimento da pesquisa. Eles foram definidos de forma a direcionar as etapas do trabalho e garantir que os resultados obtidos estejam alinhados à implementação da otimização do processo produtivo e à redução de desperdícios na fabricação de caixas de madeira.

1.6.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo foi aplicar a Programação Linear Inteira como ferramenta de otimização no processo de corte de ripas de madeira, visando a minimização dos desperdícios em uma empresa fornecedora da cadeia logística.

1.6.2 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Levantar dados do processo atual de corte de ripas de madeira;
- Analisar as variáveis envolvidas na produção das caixas;
- Elaborar planos de corte com as melhores combinações possíveis da matéria-prima,
- Desenvolver modelos matemáticos baseados em Programação Linear Inteira;
- Implementar os modelos matemáticos na empresa;
- Analisar os resultados obtidos;
- Propor recomendações para a empresa com base nos resultados da aplicação dos modelos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura tem como propósito apresentar o embasamento teórico que sustenta o desenvolvimento deste estudo, reunindo conceitos, pesquisas e aplicações relacionadas ao tema da otimização de processos produtivos na indústria madeireira. Por meio da análise de diferentes autores, busca-se compreender os fundamentos da gestão da produção, a importância da eficiência operacional, as causas e impactos dos desperdícios, além das principais técnicas de Programação Linear aplicadas ao planejamento de cortes. Essa revisão fornece o suporte necessário para contextualizar o problema de pesquisa, fundamentar a escolha da metodologia adotada e direcionar a aplicação prática dos modelos matemáticos desenvolvidos no presente trabalho.

2.1 INDÚSTRIA MADEIREIRA

A indústria madeireira é um dos setores de maior relevância econômica no Brasil e no mundo, desempenhando papel essencial na geração de empregos, renda e divisas. O setor madeireiro brasileiro se destaca especialmente pela extração e transformação da madeira utilizada em diversos segmentos, como construção civil e fabricação de móveis. Contudo, os autores destacam que, apesar de sua importância econômica, a atividade madeireira ainda apresenta um baixo rendimento operacional em média 41%, resultando em grande geração de resíduos e, conseqüentemente, em impactos ambientais e sociais, como a contaminação de solos e águas e a emissão de gases pela queima irregular desses materiais. Além disso, a gestão inadequada desses resíduos demonstra a carência de investimentos em tecnologia, capacitação e práticas sustentáveis, o que compromete o desenvolvimento sustentável do setor (Ramos *et al.*, 2017).

De acordo com Silva, Barbieri e Lima (2019), a sustentabilidade na indústria madeireira depende fortemente da integração entre os elos da cadeia de suprimentos, que abrange desde a extração até o processamento e distribuição. Os autores destacam que práticas de gestão da cadeia de suprimentos sustentável (GCSS) têm se mostrado fundamentais para reduzir desperdícios e aumentar a eficiência no uso dos recursos naturais, promovendo o equilíbrio entre desempenho econômico, ambiental e social. Nesse contexto, o setor madeireiro precisa adotar tecnologias de

rastreabilidade, controle de produção e planejamento otimizado de cortes, a fim de alinhar-se a princípios de sustentabilidade e competitividade no mercado global.

2.1.1 Características e importância da indústria madeireira no Brasil e no Rio Grande do Sul

Segundo Fagundes (2003), a indústria madeireira tem um papel relevante tanto do ponto de vista ambiental quanto social no Brasil, especialmente no que se refere à produção de madeira serrada proveniente de florestas plantadas. De acordo com o autor, essa atividade representa o elo fundamental entre o potencial florestal e sua transformação em bens e serviços, cuja valorização é essencial para garantir a sustentabilidade das áreas florestais. Ainda conforme Fagundes, a modernização tecnológica no setor é um fator decisivo para a melhoria dos processos, a redução das emissões e o aproveitamento mais eficiente dos resíduos oriundos do desdobro da madeira.

No contexto do Rio Grande do Sul, Fagundes (2003) aponta que a produção de madeira serrada está fortemente ligada ao cultivo de espécies como *Pinus* e *Eucalyptus*, as principais utilizadas em plantações comerciais para esse fim. O autor ressalta que as serrarias da região apresentam diferentes níveis estruturais e tecnológicos, o que influencia diretamente a eficiência da produção e o volume de resíduos gerados. Conforme o estudo, a valorização desses resíduos, por meio de reciclagem ou aproveitamento em outros segmentos como na produção de painéis e chapas reconstituídas, é uma estratégia importante para ampliar o rendimento e agregar valor ao produto final.

Ainda de acordo com Fagundes (2003), a racionalização do uso da madeira deve ser uma prioridade no setor. A redução de desperdícios e o gerenciamento adequado dos resíduos representam não apenas um desafio operacional, mas também uma oportunidade de tornar o processo produtivo mais sustentável e competitivo. Segundo o autor, no contexto do Rio Grande do Sul, essa busca por eficiência está diretamente relacionada à sustentabilidade ambiental e econômica da atividade, além de ser um diferencial competitivo frente a outros materiais utilizados na construção civil e na cadeia logística.

2.1.2 Desafios no uso eficiente da matéria-prima na indústria madeireira

O setor madeireiro lida com desafios significativos relacionados ao aproveitamento eficiente da matéria-prima, especialmente na etapa de corte, onde há grande influência sobre o volume de resíduos gerados e o rendimento final da produção. De acordo com Nascimento, Dutra e Numazawa (2006), as maiores perdas ocorrem durante o uso de equipamentos como galgadeiras e balancins, responsáveis pelo bitolamento das peças serradas. Essas fases resultam na formação de grandes quantidades de resíduos como aparas e serragem, frequentemente descartados ou incinerados sem reaproveitamento adequado, o que intensifica os impactos ambientais.

Nascimento, Dutra e Numazawa (2006), também observam que, em determinadas regiões, como no estado do Pará, a infraestrutura logística limitada em muitas serrarias compromete o aproveitamento dos resíduos, que apresentam elevada umidade e baixa densidade, características que dificultam tanto o transporte quanto o reaproveitamento. Como alternativas, são citadas soluções como a conversão dos resíduos em energia térmica por meio da queima controlada e a produção de itens utilizando aparas de maior dimensão. No entanto, mesmo essas estratégias não substituem a importância de um planejamento mais eficiente desde o início do processo produtivo.

Diante desse cenário, reforça-se a importância da adoção de técnicas que promovam maior racionalidade no corte, como é o caso da Programação Linear. Essa abordagem pode contribuir para a diminuição de perdas e a redução dos custos operacionais. O trabalho de Nascimento, Dutra e Numazawa (2006) fornece subsídios relevantes para justificar a busca por métodos mais eficazes no planejamento da produção, evidenciando a necessidade de estratégias que maximizem o uso da matéria-prima e reduzam os desperdícios no setor madeireiro.

2.2 GESTÃO DA PRODUÇÃO E EFICIÊNCIA OPERACIONAL

Segundo Belisario e Rodolpho (2022), a gestão da produção está intimamente ligada à eficiência operacional, pois envolve o controle adequado dos fluxos de materiais e informações dentro da empresa. O Planejamento e Controle da Produção (PCP) é essencial nesse contexto, garantindo o equilíbrio entre demanda e capacidade produtiva, além de integrar setores como compras, almoxarifado e chão

de fábrica. Essa integração permite reduzir falhas no controle de materiais, minimizar desperdícios e otimizar o uso dos recursos, fatores fundamentais para manter a competitividade e a sustentabilidade dos processos produtivos.

Belisario e Rodolpho (2022), ressaltam que a acuracidade das informações e a confiabilidade dos controles internos são determinantes para o bom desempenho operacional. Ferramentas como a Curva ABC e o estoque de segurança contribuem para um melhor planejamento e abastecimento, evitando paradas e excessos de materiais. Assim, a gestão eficiente da produção e dos estoques resulta em processos mais enxutos, redução de custos e maior produtividade, princípios que também se aplicam à otimização de planos de corte na indústria madeireira, objetivo central deste trabalho.

2.2.1 Fundamentos da gestão da produção

A gestão da produção desempenha um papel central nas organizações, sendo responsável pelo planejamento, coordenação e controle dos processos que transformam insumos em produtos ou serviços. Segundo Fontana (2024), a gestão da produção, também denominada administração da produção, refere-se ao projeto, direção e controle das atividades produtivas, que abrangem tanto os clientes internos quanto os externos. A autora explica que, tradicionalmente, o termo “produção” está mais associado às atividades industriais, relacionadas à transformação de materiais em bens físicos, enquanto “operações” se refere mais à prestação de serviços. No entanto, destaca que na prática, ambos os conceitos são complementares, pois os processos produtivos atuais combinam bens e serviços de forma integrada, refletindo a complexidade e a interdependência das organizações contemporâneas.

Ainda de acordo com Fontana (2024), todas as empresas, independentemente do porte ou segmento, enfrentam desafios semelhantes em termos de organização, utilização de recursos e eficiência produtiva. A autora observa que o sucesso operacional depende de uma administração eficaz de pessoas, materiais, capital e informações, o que permite atingir as metas da organização e garantir a competitividade no mercado. Desse modo, a atividade de produzir envolve qualquer processo de transformação de recursos em bens ou serviços, enquanto a função produção está diretamente relacionada àquilo que a empresa entrega ao cliente final, ou seja, o produto ou serviço que representa sua finalidade econômica.

Complementando essa perspectiva, Apolinário (2016) enfatiza que os fundamentos da gestão da produção estão baseados na racionalização das atividades produtivas, buscando elevar a eficiência e reduzir desperdícios. O autor destaca o Sistema Toyota de Produção (STP) como um modelo de referência moderno e flexível, por sua capacidade de incorporar inovações tecnológicas e ajustar-se às mudanças nas relações entre fornecedores, empresas e consumidores. Esse sistema, promove uma produção enxuta, eliminando atividades que não agregam valor ao produto final e estimulando a melhoria contínua ao longo de todas as etapas do processo produtivo.

Segundo Apolinário (2016), o toyotismo introduz uma abordagem de qualidade total, em que cada etapa do processo produtivo é monitorada e aprimorada continuamente. O autor explica que a redução de estoques intermediários, que muitas vezes mascaram ineficiências operacionais, é um dos pilares desse modelo. Essa filosofia de gestão busca eliminar desperdícios relacionados ao transporte, ao tempo de espera e ao processamento desnecessário, promovendo uma operação mais eficiente, sustentável e produtiva.

Por fim, Apolinário (2016) ressalta que o modelo Toyota representa um avanço em relação às abordagens anteriores, como o taylorismo e o fordismo, ao incorporar aspectos humanos e subjetivos do trabalho, promovendo uma visão integrada e flexível da produção. Essa integração entre eficiência operacional e valorização do trabalho humano passou a influenciar diversas organizações, consolidando os princípios da gestão da produção moderna, que une inovação tecnológica, eficiência e melhoria contínua.

Assim, tanto Fontana (2024) quanto Apolinário (2016) convergem na ideia de que a gestão da produção é um processo dinâmico e estratégico, essencial para otimizar recursos, reduzir desperdícios e garantir a competitividade empresarial, sendo a base para a excelência operacional e a sustentabilidade dos processos produtivos.

2.2.2 Conceito de eficiência produtiva

A eficiência produtiva é entendida como a relação entre os resultados obtidos e os recursos empregados na produção. Segundo Souza, Claudino e Melo (2016), alcançar essa eficiência exige a racionalização dos métodos de trabalho, o uso correto dos recursos disponíveis e a padronização dos processos produtivos. Os autores destacam que, em um cenário de alta competitividade, melhorar a eficiência não

apenas reduz custos operacionais, mas também amplia a capacidade da empresa de se manter competitiva e sustentável a longo prazo.

Para os mesmos autores, a gestão da qualidade desempenha um papel estratégico nesse processo, pois ao estabelecer padrões claros de execução e controle, permite que as atividades sejam realizadas da forma mais econômica e segura possível. Eles observam que a eficiência produtiva se torna um diferencial competitivo na medida em que contribui para reduzir perdas, retrabalho e desperdícios ao longo do processo, ao mesmo tempo em que eleva o valor percebido pelo cliente.

Já para Souza, Stela e Ferreira (s.d.), a eficiência produtiva está diretamente conectada à capacidade da empresa em integrar novas tecnologias ao seu sistema de produção. Os autores analisam essa questão à luz da Indústria 4.0 e ressaltam que, com o uso de ferramentas digitais e sistemas de monitoramento, é possível mensurar de forma precisa a performance de uma linha de produção. A utilização do indicador OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), por exemplo, permite avaliar a disponibilidade, o desempenho e a qualidade dos processos produtivos, servindo como base para decisões de melhoria contínua.

Ainda conforme os autores, a aplicação de indicadores como o OEE torna possível identificar onde ocorrem as maiores perdas dentro do processo produtivo. Esse controle permite intervenções pontuais que contribuem para a redução de custos e o aumento do rendimento operacional. Nesse sentido, a eficiência não depende apenas da execução correta das tarefas, mas também da capacidade da empresa em acompanhar e ajustar constantemente seus processos com base em dados concretos.

Portanto, os estudos de Souza *et al.* (2016) e Souza, Stela e Ferreira (s.d.) convergem ao afirmar que a eficiência produtiva é resultado da combinação entre gestão estruturada, padronização operacional e uso de tecnologias que favorecem a tomada de decisão. Em um ambiente industrial que exige agilidade, qualidade e redução de desperdícios, essas abordagens oferecem o suporte necessário para que a produção seja mais enxuta, eficaz e competitiva.

2.2.3 Indicadores de desempenho e controle de perdas

De acordo com Viasiminski *et al.* (2021), em um cenário industrial competitivo, o monitoramento e controle das perdas torna-se essencial para o aumento da produtividade e da eficiência. O estudo realizado em uma indústria moveleira propôs a redução das perdas operacionais por meio da implementação de indicadores de

desempenho, com destaque para o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), um índice composto pelos parâmetros de disponibilidade, desempenho e qualidade. A análise desses indicadores permitiu diagnosticar com precisão os principais fatores de ineficiência, como falhas de máquina, setups excessivos, paradas não programadas e retrabalho, os quais comprometem significativamente o aproveitamento da matéria-prima.

Ainda segundo Viasiminski *et al.* (2021), no estudo, o controle de perdas foi iniciado pela identificação das principais causas de desperdício por meio de ferramentas da qualidade, como o diagrama de Pareto e o diagrama de causa e efeito (*Ishikawa*). Essas ferramentas permitiram visualizar que a maior parte das perdas estava concentrada em poucas causas, principalmente *setups* longos e problemas com abastecimento e manutenção. Com isso, foi possível aplicar melhorias direcionadas e mensurar os avanços com o próprio OEE, que apresentou um crescimento de aproximadamente 25 pontos percentuais após as intervenções, demonstrando a eficácia do controle contínuo.

Roque (2023), em sua dissertação sobre a indústria corticeira, também destaca o papel fundamental dos indicadores de desempenho na gestão de perdas, integrando-os a uma abordagem *Lean*. A autora reforça que o uso de *dashboards* com indicadores como o OEE proporciona uma análise mais clara e dinâmica dos problemas produtivos, permitindo o acompanhamento em tempo real do desempenho e da qualidade. Além disso, os dados coletados alimentam a prática da melhoria contínua, contribuindo para decisões mais assertivas e um melhor alinhamento estratégico da produção.

A autora ainda ressalta que os desperdícios mais críticos, como retrabalho, tempo de parada, variações no ritmo de produção e peças defeituosas podem ser identificados a partir de sistemas automatizados de controle e da normalização dos métodos de trabalho (*Standard Work*), o que fortalece o combate às chamadas Seis Grandes Perdas, classificadas por Nakajima (1988), e associadas diretamente aos três componentes do OEE: falhas e setups (disponibilidade), velocidade reduzida e micro paradas (desempenho), e defeitos e retrabalhos (qualidade).

Os estudos de Viasiminski *et al.* (2021) e Roque (2023) demonstram que o controle das perdas produtivas é uma etapa prévia e indispensável para qualquer processo de otimização, inclusive aqueles que envolvem modelos matemáticos de Programação Linear. A partir da identificação e mensuração das perdas, é possível

estabelecer parâmetros reais para a formulação de restrições e objetivos nos modelos, tornando-os mais eficientes no uso da matéria-prima e na minimização dos custos operacionais.

2.3 DESPERDÍCIOS NA PRODUÇÃO INDUSTRIAL

Segundo Borges (2023), os desperdícios na produção industrial representam um dos maiores desafios para a eficiência e a competitividade das empresas. O autor destaca que, dentro da filosofia da produção enxuta (*Lean Manufacturing*), eliminar atividades que não agregam valor é essencial para reduzir custos e otimizar processos. Entre os diferentes tipos de perdas existentes, um dos mais relevantes é o desperdício de matéria-prima, que ocorre quando os recursos não são aproveitados de forma eficiente durante o processo produtivo, resultando em sobras, retrabalhos e aumento do custo operacional.

Ainda conforme Borges (2023), a gestão eficiente dos recursos e a padronização dos processos produtivos contribuem para minimizar falhas e elevar a qualidade dos produtos. A sobrecarga de trabalho e o mau aproveitamento dos insumos estão diretamente ligados ao surgimento de desperdícios e à redução do desempenho operacional. Dessa forma, o autor enfatiza que adotar práticas de melhoria contínua e racionalizar o uso da matéria-prima são medidas fundamentais para reduzir perdas, aumentar a produtividade e promover maior eficiência na indústria.

2.3.1 Definição e tipos de desperdícios

A definição e a classificação dos desperdícios estão no centro dos estudos sobre *Lean Manufacturing* e eficiência operacional. Segundo Ohno (1997), citado por Paiva *et al.* (2020), o desperdício corresponde a toda atividade que não agrega valor ao produto final e que eleva o custo sem gerar benefício para o cliente. Dentro dessa abordagem, os autores destacam que a eliminação sistemática de desperdícios é essencial para o aumento da produtividade e a redução de custos, já que o princípio da produção enxuta consiste em “fazer mais com menos”, menos tempo, menos esforço humano e menos recursos, enquanto se busca oferecer ao cliente exatamente o que ele deseja no momento certo.

De acordo com Paiva *et al.* (2020), os desperdícios foram organizados por Ohno em oito categorias principais: superprodução, espera, transporte desnecessário, superprocessamento, excesso de estoque, movimentos desnecessários, defeitos e desperdício de potencial humano. A superprodução é considerada o desperdício mais grave, pois dá origem a muitos outros; já o desperdício por espera e movimentações desnecessárias representa atrasos e esforços improdutivos no fluxo de trabalho. O desperdício de criatividade dos funcionários, por sua vez, está relacionado à não utilização das ideias e habilidades dos colaboradores, prejudicando a melhoria contínua.

Essas classificações e conceitos de desperdício dialogam diretamente com os fundamentos da otimização de processos apresentados por Paiva *et al.* (2020), uma vez que a compreensão e a identificação dessas perdas constituem a base para a formulação de modelos matemáticos de otimização, como a Programação Linear.

2.3.2 Causas comuns de desperdício na indústria madeireira e setores produtivos

As causas de desperdício na indústria madeireira estão diretamente associadas às etapas de processamento primário e secundário da madeira, abrangendo desde o preparo e corte inicial até as operações de acabamento. De acordo com Hillig, Schneider e Pavoni (2009), perdas significativas ocorrem tanto em serrarias e laminadoras quanto em indústrias moveleiras, em função de fatores como degradação da madeira durante o armazenamento, variações na qualidade da matéria-prima e baixo rendimento dos processos produtivos. Em alguns segmentos, como na produção de lâminas e compensados, o volume de resíduos pode ultrapassar 50% do volume original da madeira, evidenciando o impacto das ineficiências operacionais sobre o aproveitamento do material.

Ainda conforme Hillig, Schneider e Pavoni (2009), variáveis produtivas como quantidade de matéria-prima consumida, número de colaboradores, máquinas utilizadas, consumo de energia e de água também influenciam diretamente a geração de resíduos. Os autores destacam que a análise multivariada desses fatores permite compreender melhor o potencial gerador de desperdícios e, conseqüentemente, planejar medidas de controle e otimização mais eficazes, como o uso de modelos matemáticos de programação linear. Essa abordagem contribui para prever e reduzir perdas materiais, tornando o processo mais sustentável e economicamente viável.

Complementando essa perspectiva, Brito (2023) aponta que as falhas no dimensionamento das ripas, erros operacionais durante o corte e a ausência de padronização dos processos estão entre as principais causas de desperdício nas indústrias madeiras. Segundo o autor, esses fatores resultam em sobras excessivas, refugos e retrabalhos, comprometendo a eficiência da produção e elevando os custos relacionados à matéria-prima — um recurso de alto valor para o setor.

Brito (2023) também ressalta que a inexistência de um método estruturado de monitoramento e análise sistemática das causas das perdas mantém os problemas recorrentes ao longo do tempo. A aplicação de ferramentas de gestão da qualidade, como o ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar), associadas à filosofia *Lean Manufacturing*, permite mapear pontos críticos, identificar causas de ineficiência e implementar melhorias contínuas no processo de corte.

Além dos fatores técnicos, Brito (2023) e Hillig, Schneider e Pavoni (2009) reforçam que aspectos organizacionais e culturais também influenciam diretamente o desempenho operacional das empresas. A falta de engajamento das equipes, treinamento insuficiente e ausência de indicadores de desempenho confiáveis dificultam o controle efetivo das perdas e a padronização das operações. Para os autores, a adoção de ferramentas de gestão *Lean*, aliada a práticas de planejamento e controle de produção mais estruturadas, contribui para a redução de desperdícios e o aumento da competitividade no setor madeireiro.

Dessa forma, observa-se que as causas de desperdício na indústria madeireira são multifatoriais, envolvendo desde a qualidade da matéria-prima e as condições de armazenamento até as práticas de gestão e cultura organizacional. A integração entre os estudos de Hillig, Schneider e Pavoni (2009) e Brito (2023) evidencia que o controle e a avaliação dessas variáveis são essenciais para a gestão eficaz dos resíduos e para o planejamento otimizado dos cortes de madeira, contribuindo para processos mais sustentáveis e economicamente eficientes.

2.3.3 Impactos econômicos, ambientais e operacionais dos desperdícios

Com base no artigo de Hoose e Kripka (2023), os desperdícios na indústria têm impactos significativos de ordem econômica, ambiental e operacional. Economicamente, perdas de matéria-prima implicam em maiores custos de produção, redução da lucratividade e aumento do desperdício de recursos financeiros.

Operacionalmente, essas perdas dificultam o planejamento da produção, resultam em baixa eficiência e comprometem o cumprimento de metas de produtividade. A Programação Linear (PL) se mostra uma ferramenta eficaz para minimizar esses impactos, ao permitir a modelagem de cenários de corte, transporte e alocação de recursos de maneira otimizada.

Do ponto de vista ambiental, Hoose e Kripka (2023) destacam que o desperdício de materiais acarreta um aumento no consumo de recursos naturais e energia, além de uma maior geração de resíduos sólidos. Segundo os autores, a aplicação da Programação Linear está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), por buscar soluções que promovam o uso racional da água, da energia e da terra. Ainda conforme Hoose e Kripka (2023), o uso da Programação Linear em diferentes setores industriais possibilita melhorar o aproveitamento dos recursos disponíveis e, simultaneamente, reduzir as emissões de poluentes e outros impactos negativos ao meio ambiente. Essa abordagem foi evidenciada em estudos aplicados a áreas como transporte de biomassa, produção agrícola e geração de energia, demonstrando que a otimização de processos produtivos também pode ser uma ferramenta eficaz de sustentabilidade ambiental.

Por fim, Hoose e Kripka (2023) destacam que, embora existam desafios na aplicação da PL, como a complexidade na formulação de modelos sustentáveis, seu uso contribui significativamente para integrar os pilares da sustentabilidade (econômico, social e ambiental). A aplicação correta da PL permite, por exemplo, evitar excessos de produção, reduzir estoques desnecessários e direcionar investimentos em tecnologias mais limpas.

2.3.4 Estratégias para redução de desperdícios e melhoria contínua

De acordo com David (2024), a redução de desperdícios no setor madeireiro está fortemente relacionada à aplicação de metodologias voltadas à melhoria contínua, como o *Kaizen*. Essa abordagem, ao envolver diretamente as equipes operacionais na identificação de falhas e oportunidades de melhoria, contribui para o aperfeiçoamento dos processos produtivos. O autor ressalta que a presença de sistemas estruturados de comunicação e monitoramento contínuo é essencial para acompanhar indicadores-chave, como paradas de máquinas e rejeição de materiais, possibilitando ações corretivas mais rápidas e eficazes.

David (2024) também destaca que o melhor aproveitamento da matéria-prima pode ser alcançado por meio de práticas sustentáveis baseadas nos princípios da economia circular. Essa visão propõe a valorização dos resíduos e sua reinserção no ciclo produtivo, o que reduz significativamente tanto o volume de sobras quanto os impactos ambientais. A integração do *Kaizen* com estratégias como o gerenciamento eficiente de estoques, o planejamento logístico e a manutenção produtiva total (TPM) favorecem um ambiente produtivo mais eficiente e energeticamente otimizado.

Por fim, o autor enfatiza que a eficácia dessas iniciativas depende do comprometimento da liderança, da capacitação das equipes e do uso consistente de indicadores para mensuração de desempenho. A união entre práticas de gestão enxuta e uma cultura organizacional voltada à sustentabilidade torna-se, segundo David (2024), um fator determinante para a minimização de perdas e a redução de custos operacionais no setor madeireiro.

2.4 PLANEJAMENTO DE CORTE DE MADEIRA

O planejamento de corte de madeira desempenha um papel fundamental para o uso eficiente da matéria-prima e para a redução de desperdícios no processo produtivo. Nesta seção, são apresentados os principais aspectos relacionados à organização e execução do corte, considerando as etapas operacionais, as técnicas aplicadas e os fatores que influenciam o aproveitamento do material. Além disso, discute-se a importância do planejamento estruturado como forma de minimizar sobras e retrabalhos, garantindo maior eficiência, padronização e qualidade na fabricação das caixas de madeira. A abordagem também busca contextualizar a relevância de métodos de otimização nesse processo, preparando o leitor para a compreensão dos modelos matemáticos aplicados posteriormente neste estudo.

2.4.1 Etapas e técnicas envolvidas no processo de corte

Com base nas dissertações de Raseira (2013) e Ibeiro (2023), é possível identificar as principais etapas e técnicas envolvidas no processo de corte da madeira, especialmente no contexto de sua aplicação industrial e reaproveitamento para redução de desperdícios. Segundo Ibeiro (2023), o processo de corte florestal envolve uma série de etapas sequenciais: derrubada, desgalhamento, traçamento, empilhamento, extração e transporte. Sendo a etapa de corte (realizada por máquinas

como *harvesters*) a mais crítica em termos de investimento e impacto na produtividade. O autor destaca que a mecanização dessa etapa exige operadores altamente capacitados e padrões operacionais bem definidos, pois qualquer falha compromete significativamente o desempenho da produção e pode aumentar o desperdício de material.

Já Raseira (2013), ao abordar o reaproveitamento de resíduos madeireiros na marchetaria, apresenta um enfoque mais técnico e detalhado sobre o corte em si, especificamente utilizando tecnologias de alta precisão, como o corte a laser. A autora descreve que, para garantir cortes eficientes em lâminas de madeira de diferentes espessuras, é necessário ajustar parâmetros como potência do feixe, velocidade, distância focal e fluxo de ar. O estudo revelou ainda que a variabilidade natural das espécies de madeira afeta diretamente o desempenho do corte, sendo indispensável caracterizar previamente as propriedades físicas (densidade, umidade e estabilidade dimensional) dos materiais para alcançar precisão, qualidade e minimizar perdas.

O trabalho de Ibeiro (2023) converge com o de Raseira (2013) ao demonstrar que a eficiência do processo de corte de madeira, seja na etapa inicial de colheita florestal ou na revalorização de resíduos, depende diretamente da adoção de tecnologias adequadas e da gestão precisa dos parâmetros operacionais. Ambos os autores reforçam que o controle técnico do corte, aliado ao uso de ferramentas modernas e à qualificação dos operadores, é essencial para reduzir desperdícios e aumentar o aproveitamento da matéria-prima. Nesse sentido, os estudos destacam a importância da Programação Linear Inteira e de outras técnicas de otimização como instrumentos capazes de elevar a eficiência produtiva e promover um processo de corte mais sustentável no setor madeireiro.

2.4.2 Importância do planejamento na redução de sobras e refugos

O planejamento produtivo desempenha papel essencial na redução de sobras e refugos em processos industriais. De acordo com Marcis, Lima e Trentin (2017), o alinhamento entre planejamento e práticas sustentáveis permite às empresas minimizar perdas de matéria-prima e impactos ambientais, especialmente em setores que utilizam madeira como insumo principal. Os autores afirmam que a ausência de um controle sistemático dos resíduos e da gestão das etapas produtivas leva ao aumento de sobras e desperdícios, o que prejudica tanto o desempenho operacional quanto a sustentabilidade do negócio. Dessa forma, o planejamento das operações

deve considerar o fluxo de materiais e a destinação adequada dos resíduos, buscando um equilíbrio entre eficiência produtiva e responsabilidade ambiental.

Segundo Paiva *et al.* (2020), o *Lean Manufacturing* contribui diretamente para o planejamento eficiente ao eliminar atividades que não agregam valor, como a superprodução, o retrabalho e o excesso de movimentação. O estudo mostra que o planejamento detalhado do processo e a padronização das operações permitem identificar pontos de desperdício e agir preventivamente antes que os erros resultem em refugos ou sobras. Essa abordagem sistemática possibilita um controle mais rigoroso sobre o uso dos recursos, reduzindo perdas de matéria-prima e custos de produção.

Dessa forma, a integração entre o planejamento produtivo e as práticas enxutas descritas por Marcis *et al.* (2017) e Paiva *et al.* (2020) reforça a importância da gestão proativa para o alcance de resultados sustentáveis. O planejamento orientado pela lógica *Lean* permite prever gargalos, ajustar a capacidade produtiva e racionalizar o uso de materiais, o que resulta em menores volumes de sobras e refugos e em uma operação mais eficiente e competitiva.

2.5 FUNDAMENTOS DA PROGRAMAÇÃO LINEAR

Segundo Souza e Jacinto (2018), a Programação Linear é uma área da matemática aplicada que tem como objetivo encontrar a melhor solução possível para problemas reais representados por expressões lineares. Ela busca maximizar ou minimizar uma função linear, denominada função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições também lineares, que definem os limites e condições do problema. Essas restrições estabelecem a região viável onde a solução ótima pode ser encontrada. Os autores destacam que, para a formulação correta de um modelo de Programação Linear, é essencial definir variáveis de decisão, restrições e a função objetivo, que pode representar lucro, custos ou produção, permitindo aplicar o modelo a problemas industriais e econômicos diversos.

Ainda conforme Souza e Jacinto (2018), a resolução de modelos de Programação Linear pode ser feita por diferentes métodos, como o Método Gráfico, aplicável a problemas com duas variáveis e o Método Simplex, amplamente utilizado em problemas de maior complexidade. Esses métodos permitem identificar a combinação ideal de recursos para atingir o melhor resultado possível, considerando as restrições impostas pelo sistema. Na prática, a Programação Linear tem sido

empregada em áreas como planejamento de produção, controle de custos, logística e otimização de cortes, demonstrando sua relevância na melhoria da eficiência produtiva e na minimização de desperdícios aspectos diretamente relacionados ao objetivo do presente trabalho.

2.5.1 Definição e aplicações da Programação Linear

Segundo Araújo (2012), a Programação Linear é uma técnica matemática amplamente utilizada para a resolução de problemas de otimização, especialmente em situações que envolvem a alocação eficiente de recursos escassos. Essa metodologia permite representar problemas reais por meio de modelos compostos por variáveis de decisão, uma função objetivo linear e um conjunto de restrições que delimitam as condições do sistema. Por meio dessa estrutura, torna-se possível buscar soluções que atendam ao objetivo proposto — como a minimização de custos ou a maximização de lucros — de maneira racional e sistemática.

De acordo com Dantas (2017), a Programação Linear consiste em minimizar ou maximizar uma função linear sujeita a restrições também lineares, de igualdade ou desigualdade. A autora reforça que o termo programação deve ser entendido no sentido de planejamento e não como programação de computadores, pois a PL busca determinar o melhor plano de ação que otimize um determinado resultado dentro de um conjunto de limitações. O modelo é formado por uma função objetivo, que expressa o propósito da otimização, e por um sistema de restrições, que define o espaço de soluções viáveis.

Ainda conforme Dantas (2017), dois métodos são amplamente utilizados para resolver modelos de Programação Linear. O primeiro é o método gráfico, aplicável a problemas com até duas variáveis, em que a solução pode ser visualizada geometricamente por meio da interseção das restrições. O segundo é o Método Simplex, proposto por George Dantzig, que constitui um algoritmo iterativo e sistemático capaz de encontrar a solução ótima de modelos com múltiplas variáveis. Esse método percorre os vértices da região viável em busca do ponto que fornece o melhor valor para a função objetivo, garantindo eficiência na resolução de problemas reais de grande escala.

No contexto do planejamento de cortes de madeira, Araújo (2012) destaca que a Programação Linear oferece uma base sólida para a formulação de modelos que visam reduzir desperdícios e melhorar o aproveitamento da matéria-prima. Ao

estruturar o problema com base nas condições específicas da produção, torna-se possível determinar soluções que minimizem perdas, otimizem o uso de recursos e reduzam custos operacionais, atendendo às demandas produtivas da empresa. Essa aplicação está diretamente alinhada à proposta deste trabalho, que utiliza técnicas de otimização para aumentar a eficiência na fabricação de caixas de madeira dentro da cadeia logística.

Por outro lado, Dantas (2017) ressalta a importância da Programação Linear Inteira (PLI), uma variação da PL em que as variáveis de decisão assumem apenas valores inteiros. Essa característica é essencial em problemas de natureza discreta, como alocação de tarefas, escalonamento de produção ou planejamento de cortes, em que as decisões não podem ser fracionadas. A autora explica que a PLI se diferencia da PL contínua porque não é possível simplesmente resolver o modelo e arredondar os resultados, visto que tal procedimento pode gerar soluções inviáveis. Para esses casos, utilizam-se métodos específicos, como os algoritmos de planos de corte e os métodos enumerativos, capazes de explorar o espaço de soluções de forma inteligente e sistemática.

Assim, observa-se que tanto a Programação Linear quanto a Programação Linear Inteira constituem ferramentas fundamentais da Pesquisa Operacional, amplamente utilizadas em contextos industriais que demandam eficiência e racionalização de recursos. Quando corretamente formuladas e ajustadas às restrições do processo produtivo, essas técnicas permitem a obtenção de soluções ótimas que reduzem desperdícios, melhoram a eficiência produtiva e apoiam a tomada de decisões estratégicas na gestão de operações industriais, conforme destacam Araújo (2012) e Dantas (2017).

2.5.2 Estrutura de um modelo matemático: função objetivo, variáveis de decisão e restrições

De acordo com Weingarten e Dalla Vecchia (2016), a modelagem matemática é um processo dinâmico que envolve a formulação de representações simbólicas da realidade para apoiar a tomada de decisões. No contexto da Pesquisa Operacional, esse processo é formalizado por meio da construção de modelos matemáticos, que permitem transformar problemas reais em sistemas lógicos e quantificáveis, compostos por funções objetivo, variáveis de decisão e restrições. Segundo os autores, a elaboração desses modelos ocorre a partir da análise de problemas

práticos, muitas vezes oriundos do ambiente industrial e tem como finalidade obter uma solução ótima, que atenda às condições impostas pela situação estudada.

A função objetivo é o elemento central do modelo, pois representa matematicamente o propósito da otimização. Ela pode expressar a maximização de lucros, minimização de custos, redução de desperdícios ou aumento da eficiência produtiva. Longaray (2013), explicam que essa função é sempre linear nos modelos de Programação Linear, e é expressa pela combinação ponderada das variáveis de decisão, isto é, dos fatores que podem ser controlados para atingir o melhor resultado possível. A Figura 1 ilustra essa estrutura geral, demonstrando a forma padrão de um modelo matemático de Programação Linear.

Figura 1: Estrutura geral da função objetivo e restrições de um modelo de otimização

otimizar $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sujeito a: $g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, =, \geq b_1$ $g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, =, \geq b_2$ $g_3(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, =, \geq b_3$ $\dots \dots \dots \dots \dots$ $g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, =, \geq b_m$
--

Fonte: Adaptado de Longaray (2013).

Conforme demonstrado na Figura 1, os modelos matemáticos de otimização incluem variáveis de decisão, função objetivo e restrições que delimitam o espaço de soluções. Cada variável X_j representa uma decisão possível do modelo, enquanto a função objetivo $f(x)$ indica o valor a ser otimizado. Já as restrições $g_i(x)$ representam as limitações impostas pelo problema, associadas a termos independentes b_i , que devem ser atendidas para que a solução seja viável. Essas relações podem assumir diferentes sinais, limite superior ($\leq$), igualdade ($=$) ou limite inferior ($\geq$), posicionados entre a função da restrição e seu termo independente, garantindo que o modelo respeite os limites reais do sistema produtivo (Longaray, 2013).

As variáveis de decisão correspondem aos elementos que podem ser ajustados dentro do problema para alcançar a meta definida pela função objetivo. Segundo Carmo (2016), essas variáveis representam decisões práticas, como quantidades a serem cortadas, alocadas ou produzidas, e constituem a base sobre a qual o modelo atua. No caso específico dos problemas de corte unidimensional, cada variável de

decisão pode indicar a quantidade de peças obtidas de determinado comprimento, ou ainda a proporção de uso de cada padrão de corte, de forma a atender à demanda de produção com o menor desperdício possível.

Além disso, todo modelo matemático é limitado por um conjunto de restrições, que traduzem as condições reais do problema, como limites físicos, disponibilidade de recursos, capacidade produtiva ou exigências de demanda. Conforme Weingarten e Dalla Vecchia (2016), essas restrições são expressas por equações ou inequações lineares, que definem a região de viabilidade da solução, isto é, o espaço onde a função objetivo deve ser avaliada. As restrições são o elo entre o modelo e a realidade, garantindo que a solução encontrada seja factível e aplicável ao sistema produtivo analisado.

Carmo (2016) complementa que, na formulação de um modelo de Programação Linear Inteira (PLI), como o aplicado em seu estudo para o problema de corte de tubos, as restrições também asseguram que as soluções sejam inteiras e não fracionadas, o que é essencial em processos industriais discretos, como o corte de barras, chapas ou tubos. As condições de restrição garantem que o somatório dos comprimentos cortados de cada padrão não ultrapasse o tamanho total da matéria-prima, respeitando a demanda mínima e os comprimentos dos itens definidos.

Dessa forma, observa-se que a estrutura de um modelo matemático de otimização é composta por três elementos fundamentais, função objetivo, variáveis de decisão e restrições, que quando corretamente definidos, permitem representar de maneira fiel e eficiente as situações reais da indústria. Tais modelos, como ressaltam Carmo (2016), Longaray (2013) e Weingarten e Dalla Vecchia, tornam-se instrumentos decisivos para a minimização de desperdícios e melhoria do aproveitamento de recursos, especialmente em processos industriais complexos, como o planejamento de cortes de madeira, chapas metálicas ou tubos, em que pequenas melhorias na modelagem podem resultar em ganhos significativos de produtividade e redução de custos.

2.5.3 Aplicações da Programação Linear na Indústria

Com base nos estudos de Uliana, Nolasco e Caixeta Filho (2006) e Loeblein *et al.* (2012), a Programação Linear se mostra uma ferramenta de grande utilidade prática na indústria, especialmente para problemas relacionados ao corte e ao uso eficiente de matéria-prima. Esses autores demonstram que, ao estruturar

corretamente o problema com uma função objetivo clara e restrições baseadas nas limitações produtivas reais, é possível obter soluções que contribuem significativamente para a redução de perdas e custos, além da melhoria da eficiência produtiva.

No estudo conduzido por Uliana, Nolasco e Caixeta Filho (2006), a técnica foi aplicada no contexto de uma indústria moveleira que produzia cadeiras de madeira certificadas e não certificadas. O modelo de Programação Linear permitiu identificar a melhor combinação de produtos a serem fabricados de forma a maximizar o lucro, levando em consideração restrições como mercado consumidor, estoque de madeira, espaço de armazenamento e limite de geração de resíduos. A solução obtida proporcionou um lucro mensal otimizado, além de fornecer dados relevantes para decisões estratégicas sobre investimentos em marketing e expansão de mercado.

Já Loeblein *et al.* (2012) abordam a aplicação da Programação Linear em uma indústria metal-mecânica para otimizar o corte de tubos, minimizando as perdas de aparas. Com o uso do *Solver* do *Excel*, o modelo proposto reduziu o desperdício de material de até 10% para apenas 1,21%. Os autores enfatizam que a utilização da Programação Linear possibilitou à empresa atingir ganhos em sustentabilidade e competitividade, mesmo sendo de pequeno porte, sem necessidade de grandes investimentos em tecnologia.

Ambos os estudos, de Uliana, Nolasco e Caixeta Filho (2006) e de Loeblein *et al.* (2012), reforçam que a Programação Linear é perfeitamente aplicável ao setor madeireiro e à cadeia logística associada, especialmente quando o objetivo é minimizar perdas, otimizar recursos e reduzir custos operacionais. As aplicações apresentadas por esses autores demonstram, de forma concreta, que o uso de modelos matemáticos bem estruturados possibilita ganhos expressivos de eficiência, sustentabilidade e competitividade, mesmo em empresas de pequeno e médio porte, confirmando a relevância dessa técnica como ferramenta estratégica para a indústria moderna.

2.6 SOFTWARES E FERRAMENTAS UTILIZADAS EM PROGRAMAÇÃO LINEAR

Segundo Uliana, Nolasco e Caixeta Filho (2006), mesmo existindo algoritmos eficientes como o Simplex para encontrar soluções ótimas em Programação Linear, a manipulação de modelos de médio e grande porte torna-se inviável sem o suporte de ferramentas computacionais. O avanço dos computadores pessoais e o

desenvolvimento de *softwares* com algoritmos incorporados permitiram a popularização da Programação Linear, inclusive em ambientes não especializados. Entre esses *softwares*, destaca-se o *Microsoft Excel*, que, por meio do suplemento solver, viabiliza simulações e resoluções de problemas de otimização com acessibilidade e praticidade, sendo amplamente utilizado tanto em aplicações industriais quanto em ambientes acadêmicos.

De acordo com Uliana, Nolasco e Caixeta Filho (2006), para a utilização eficaz do Solver é necessário estruturar o modelo matemático de forma compatível com a lógica da planilha eletrônica, organizando-o em três áreas principais: variáveis de decisão, restrições e função objetivo. Essa estrutura permite configurar corretamente os parâmetros do *Solver*, como a definição da função a ser maximizada ou minimizada, o tipo de restrição e o método de resolução, normalmente o algoritmo Simplex. Após a configuração, a ferramenta é capaz de fornecer automaticamente a solução ótima, desde que o modelo seja consistente e o problema possua viabilidade matemática.

Oliveira (2023) complementa que o uso de ferramentas computacionais representa um marco na aplicação prática da Programação Linear, pois possibilita que métodos tradicionalmente complexos sejam resolvidos de maneira acessível, inclusive em dispositivos móveis e plataformas online. A autora destaca a importância de recursos como o *PHPSimplex*, *Linear Program Solver* e *Linear Optimization LITE*, que oferecem interfaces intuitivas e permitem a visualização de tabelas *Simplex* e representações gráficas do problema, tornando o processo de ensino e aplicação dinâmicos.

Além disso, Oliveira (2023) enfatiza que a integração entre a pesquisa operacional e a computação potencializa o alcance e a aplicabilidade da Programação Linear, tanto em contextos industriais quanto educacionais. As ferramentas computacionais auxiliam na resolução de problemas que envolvem múltiplas variáveis e restrições, algo impraticável manualmente, e favorecem a análise de cenários e a tomada de decisão baseada em dados. Essa sinergia entre matemática e tecnologia reforça a importância da capacitação de profissionais e estudantes no uso desses *softwares* para otimização de processos e redução de desperdícios.

3 METODOLOGIA

A metodologia constitui o alicerce deste trabalho, pois descreve de forma estruturada o caminho percorrido para atingir os objetivos propostos e responder ao problema de pesquisa. Nesta etapa, são apresentados os métodos, procedimentos e técnicas utilizados para a coleta, análise e interpretação dos dados, bem como as ferramentas aplicadas no desenvolvimento dos modelos matemáticos de otimização.

A escolha de uma abordagem quantitativa e aplicada fundamenta-se na necessidade de compreender o processo produtivo de forma mensurável e propor uma solução prática para a redução de desperdícios no corte de madeira. Assim, este capítulo detalha as estratégias metodológicas adotadas, desde o levantamento teórico e empírico até a implementação dos modelos de Programação Linear Inteira, garantindo a coerência entre os objetivos do estudo e os resultados esperados.

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, empregou-se um conjunto de métodos e técnicas de pesquisa que possibilitaram uma análise estruturada e precisa da realidade observada. A escolha dessas abordagens teve como objetivo garantir que os modelos de Programação Linear Inteira propostos fossem efetivamente aplicáveis e úteis na prática, contribuindo para melhorar o aproveitamento das ripas de madeira e reduzir os desperdícios na produção de caixas.

A pesquisa iniciou-se com um levantamento bibliográfico, que serviu como base teórica para compreender melhor os conceitos e ferramentas relacionadas à otimização de processos produtivos. Em paralelo, foram realizadas visitas à empresa e observações diretas do processo de corte, além de entrevistas informais com funcionários, buscando compreender como a produção funciona no dia a dia.

Com essas informações, foi possível ajustar os modelos matemáticos às particularidades da empresa, respeitando suas limitações e aproveitando suas oportunidades. Esse caminho metodológico ajudou a construir uma proposta realista e bem fundamentada, aumentando as chances de gerar resultados que fizessem sentido na prática e trouxessem benefícios concretos à organização.

3.1.1 Método de Abordagem

A abordagem metodológica adotada neste estudo foi o método hipotético-dedutivo, o qual, segundo Marconi e Lakatos (2022), baseia-se na formulação de hipóteses baseadas em fundamentos teóricos, que são posteriormente testadas com o objetivo de confirmar ou refutar proposições acerca de um fenômeno. Dessa forma, o estudo partiu dos princípios da Programação Linear Inteira para levantar hipóteses sobre a possibilidade de otimizar o processo de corte de madeira, buscando reduzir desperdícios e custos operacionais. A aplicação prática do modelo permitiu testar essas hipóteses em um ambiente real de produção, possibilitando a validação das relações teóricas e a proposição de soluções eficazes e aplicáveis ao contexto analisado.

Este trabalho também utilizou o método quali-quantitativo, alinhado à abordagem de métodos mistos, entendidos como a combinação planejada de procedimentos qualitativos e quantitativos em um mesmo estudo, com integração de seus respectivos dados para ampliar a compreensão do fenômeno investigado conforme Creswell (2021). Para o autor, nessa perspectiva, articulam-se dados qualitativos mais abertos, obtidos por meio de observações e entrevistas, com dados quantitativos estruturados, como levantamentos e medições, possibilitando triangulação, complementação e explicação recíproca dos resultados, de modo a reduzir limitações e vieses de cada abordagem isoladamente

3.1.2 Procedimentos Técnicos

Segundo Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa exploratória busca oferecer uma compreensão inicial sobre um problema, permitindo maior familiaridade com o tema. Com base nessas definições dos autores, esta pesquisa é considerada exploratória, pois procurou entender de forma ampla o funcionamento do processo de corte de madeira na empresa, identificando variáveis importantes e oportunidades de melhoria no sistema produtivo.

Conforme Prodanov e Freitas (2013) também se caracteriza como pesquisa descritiva, a qual tem como objetivo observar, registrar e analisar fatos sem interferência do pesquisador, descrevendo características do processo ou ambiente estudado. Assim, seguindo esses autores, este estudo também se caracteriza como

descritivo, pois detalhou as etapas do processo produtivo, suas restrições e recursos utilizados, possibilitando uma visão clara e objetiva do contexto analisado.

Além disso, de acordo com Marconi e Lakatos (2022), trata-se de uma pesquisa comparativa, pois após a implementação dos modelos de otimização, os resultados obtidos foram comparados com os métodos utilizados pela empresa. Conforme os autores, pesquisas comparativas analisam diferenças e semelhanças entre métodos ou procedimentos com o objetivo de identificar vantagens e limitações de cada abordagem. Assim, essa comparação permitiu avaliar os ganhos em eficiência, redução de desperdícios e diminuição de custos, evidenciando os benefícios proporcionados pela aplicação do modelo desenvolvido.

Como principal procedimento técnico, foi adotada a pesquisa-ação, que, conforme Marconi e Lakatos (2022), caracteriza-se pela atuação participativa do pesquisador no ambiente estudado, visando compreender o fenômeno e ao mesmo tempo intervir para propor melhorias. Essa abordagem envolve acompanhar de perto as decisões, ações e atividades dos atores envolvidos no processo, buscando solucionar ou esclarecer problemas reais da organização.

Nesse sentido, durante o desenvolvimento deste trabalho foi realizada observação contínua do processo, aplicação de modelos de otimização, validação dos resultados e discussão direta com os responsáveis pela produção, acompanhando as atividades dos envolvidos e avaliando o impacto das mudanças propostas. Assim, a pesquisa não apenas analisou a situação existente, mas também ofereceu soluções práticas para reduzir desperdícios e aumentar a eficiência operacional, alinhando teoria e prática na realidade da empresa.

3.1.3 Técnicas de Coleta de Dados

A pesquisa bibliográfica foi a primeira técnica utilizada, consistindo na consulta a materiais teóricos já publicados. Conforme Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa bibliográfica é elaborada a partir de livros, artigos, dissertações e outras fontes com o objetivo de colocar o pesquisador em contato direto com o material já produzido sobre o tema, auxiliando na construção do referencial teórico e no direcionamento da pesquisa. Dessa forma, essa etapa permitiu fundamentar a aplicação da Programação Linear Inteira no contexto industrial e embasar as decisões metodológicas adotadas ao longo do estudo.

A observação direta foi utilizada para acompanhar o processo de corte de ripas de madeira na empresa. Essa técnica consiste em analisar os fenômenos no momento em que ocorrem, permitindo identificar práticas, tempos e fluxos produtivos de forma realista e detalhada. Conforme Prodanov e Freitas (2013), a observação é uma forma de coleta de informações que permite registrar fatos tal como acontecem, contribuindo para uma compreensão mais precisa da realidade investigada.

As entrevistas informais foram realizadas com gestores e colaboradores do setor produtivo. Conforme Prodanov e Freitas (2013), a entrevista é uma técnica que permite obter informações diretamente com os participantes, podendo ser conduzida de forma flexível para explorar melhor o tema estudado. Assim, esse método possibilitou compreender percepções, dificuldades e sugestões relacionadas ao processo analisado. Os dados utilizados na pesquisa foram levantados, em grande parte, por meio dessas entrevistas, complementando as demais fontes de informação.

O levantamento documental envolveu a análise de registros internos, como ordens de produção. Conforme Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa documental utiliza materiais que ainda não receberam tratamento analítico, como arquivos, relatórios e registros institucionais, permitindo ao pesquisador organizar e interpretar informações já existentes. Dessa forma, essa técnica possibilitou extrair dados registrados pela empresa, contribuindo para validar informações quantitativas e históricas sobre o processo produtivo.

Essas técnicas, em conjunto, forneceram informações sobre as medidas das ripas de madeira, dimensões das caixas, demanda, restrições operacionais e custos associados ao processo, permitindo uma visão abrangente e fundamentada da realidade estudada. Com base nesses dados levantados, foi possível realizar a análise e aplicação dos modelos de otimização, identificando as combinações de corte mais eficientes e economicamente viáveis.

3.1.4 Técnicas de Análise de Dados

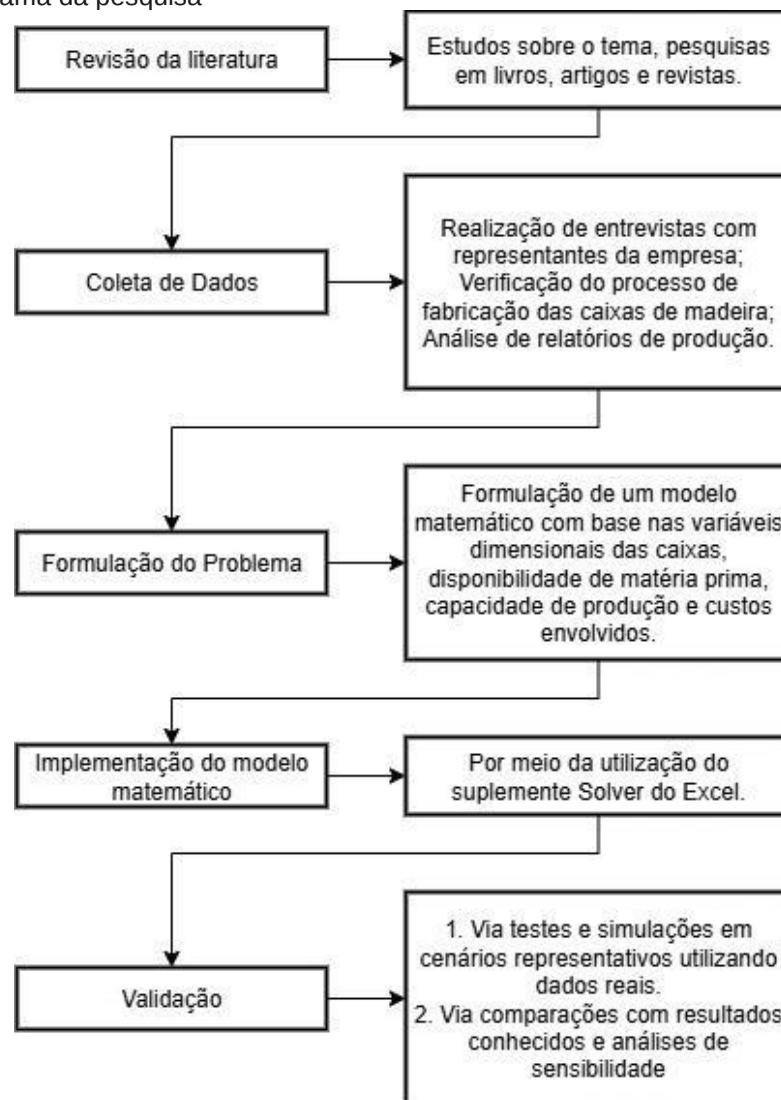
Os dados coletados foram organizados e tratados por meio de ferramentas computacionais, com destaque para o uso de planilhas eletrônicas, que permitiram a sistematização das informações e a execução dos cálculos necessários. A análise quantitativa foi utilizada para mensurar o impacto dos desperdícios e identificar as variáveis críticas do processo produtivo, fornecendo subsídios para a construção do modelo de otimização.

Em seguida, foram formulados seis modelos matemáticos baseados em Programação Linear Inteira, implementados no suplemento *solver* do *Microsoft Excel*. Esses modelos possibilitaram a simulação de diferentes cenários de produção, permitindo comparar os resultados obtidos e avaliar a eficiência das soluções propostas quanto ao aproveitamento da matéria-prima e à redução dos custos operacionais.

3.1.5 Delineamento do Estudo

O desenvolvimento desta pesquisa foi estruturado em fases, que visaram garantir consistência metodológica e coerência entre os objetivos propostos e os resultados esperados. As etapas seguiram o fluxo apresentado na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autor (2025).

Conforme pode ser observado na Figura 2, a primeira fase compreendeu a revisão da literatura, na qual foram investigados estudos anteriores sobre o tema, com base em livros acadêmicos, artigos científicos, dissertações e publicações técnicas. Essa etapa permitiu consolidar os fundamentos teóricos relacionados à otimização de processos produtivos, redução de desperdícios e aplicação de modelos matemáticos na indústria madeireira.

Em seguida, foi realizada a coleta de dados diretamente na empresa analisada. Para isso, foram conduzidas entrevistas com os responsáveis pelas operações produtivas, além da observação do processo de fabricação das caixas de madeira. Também foram analisados documentos internos, como relatórios de produção, planilhas de controle de matéria-prima e ordens de corte, de modo a obter informações concretas sobre a rotina de produção, os recursos disponíveis e as restrições existentes.

Com base nas informações obtidas, foi elaborada a formulação do problema, estruturando-se modelos matemáticos por meio da Programação Linear Inteira. Para estes modelos foram consideradas variáveis como as dimensões das caixas, a disponibilidade de ripas de madeira, a capacidade produtiva e os custos envolvidos na operação. O objetivo foi propor uma solução otimizada para o planejamento de cortes, visando à redução de perdas e o aproveitamento mais eficiente da matéria-prima.

A implementação dos modelos foi realizada por meio do suplemento *solver*, no ambiente do *Microsoft Excel*. Essa ferramenta permite simular diferentes combinações de corte, respeitando as restrições impostas e identificando a alternativa com menor desperdício. Na etapa final, foi feita a validação dos modelos desenvolvidos. Essa validação ocorreu por meio de simulações em cenários representativos, utilizando dados reais da empresa. Além disso, os resultados obtidos com os modelos propostos foram comparados aos métodos então utilizados. Essas ações permitiram verificar se os modelos são robustos e aplicáveis à realidade produtiva da organização estudada.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos com a aplicação dos modelos de PLI desenvolvidos para otimizar o processo de corte de ripas de madeira da empresa analisada. Inicialmente, é realizada a caracterização da organização e do seu processo produtivo, destacando-se a forma como o corte é executado atualmente e os principais pontos de desperdício identificados ao longo das etapas de fabricação.

Para melhor compreensão dos resultados, são apresentados a seguir os planos de corte elaborados a partir dos dados coletados, bem como as variáveis consideradas na construção dos modelos matemáticos. Por fim, discutem-se os resultados obtidos com a aplicação dos modelos propostos, comparando-os com a prática atual da empresa e avaliando os ganhos de eficiência, redução de sobras e o melhor aproveitamento da matéria-prima.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA

A empresa analisada neste estudo é a filial da Artefacto, pertencente à razão social Kohler & Kohler Indústria Metalúrgica Ltda., localizada na Avenida Engenheiro Leonel de Moura Brizola, Lote 5, Horizontina – RS, CEP 98920-000. A unidade iniciou suas atividades em 2017, com o propósito de atender a demanda crescente por caixas de madeira destinadas ao transporte logístico, tanto em âmbito nacional quanto internacional.

A empresa atua de forma especializada na fabricação de caixas de madeira sob medida, desenvolvidas conforme as especificações técnicas e necessidades dos clientes, principalmente indústrias da região Noroeste do Rio Grande do Sul. O portfólio de produtos é composto por modelos de caixas totalmente fechadas e caixas em grade, utilizadas para o transporte de peças, componentes e equipamentos industriais. As caixas destinadas à exportação passam por tratamento fitossanitário (HT – *Heat Treatment*), em conformidade com as normas internacionais de transporte de madeira, garantindo a integridade do material e a segurança durante o envio. A Figura 3 apresenta exemplos dos principais modelos de caixas produzidos pela empresa.

Figura 3: Modelos de caixas



Fonte: Autor (2025).

Atualmente, a empresa conta com aproximadamente 24 colaboradores, distribuídos em setores de recebimento de matéria-prima, plainamento, corte, pré-montagem, montagem final e expedição. O processo produtivo inicia-se com o recebimento das ripas de madeira, que passam pelo setor de plainamento, onde são regularizadas e preparadas para o corte. Em seguida, ocorre o dimensionamento das peças nas serras, seguido da pré-montagem das partes estruturais e, posteriormente, da montagem final das caixas, etapa que demanda precisão e padronização para atender às exigências técnicas e de segurança logística dos clientes.

4.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE ESTUDO

No cenário atual, o planejamento do corte das caixas de madeira na empresa é realizado de forma totalmente manual, sem o apoio de um sistema ou ferramenta de otimização que auxilie na definição das melhores combinações de cortes. O processo inicia quando o encarregado de produção recebe as ordens de produção do dia, contendo as quantidades e modelos de caixas que precisam ser fabricadas. A partir dessas informações, ele seleciona o número de unidades de cada modelo e encaminha uma folha com as especificações para o setor de corte, onde um operador experiente é responsável por planejar as etapas de corte das ripas de madeira.

Esse operador realiza uma análise manual de todos os desenhos técnicos e das respectivas medidas dos componentes de cada modelo de caixa. Em seguida, ele

efetua cálculos manuais para determinar a quantidade de cortes necessários de cada tamanho, considerando o comprimento disponível das ripas de matéria-prima. Essa atividade consome, em média, 30 minutos por modelo, variando conforme a complexidade e o número de peças envolvidas na produção.

O processo depende fortemente da experiência e do conhecimento empírico desse colaborador, que busca intuitivamente as combinações de cortes que resultem no melhor aproveitamento da madeira. Entretanto, como a empresa trabalha com diversos comprimentos de matéria-prima, o operador precisa testar mentalmente várias possibilidades de combinações para tentar reduzir as sobras e evitar desperdícios. Essa variabilidade torna o processo suscetível a erros, retrabalhos e perdas de material, além de comprometer a padronização e a previsibilidade da produção.

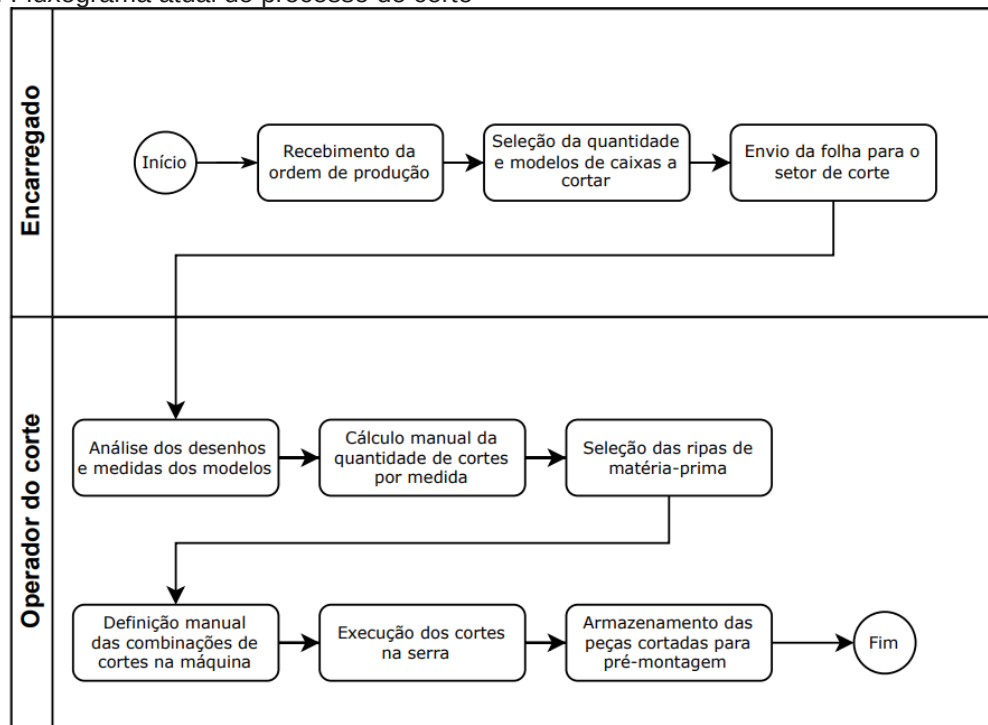
Além disso, a ausência de um planejamento estruturado de cortes gera impactos diretos no tempo de preparação e na eficiência operacional. Cada novo lote de produção exige uma nova análise manual, o que resulta em atrasos nas etapas de corte e, conseqüentemente, na montagem das caixas. A inexistência de uma metodologia sistematizada também dificulta a análise de desempenho do processo, impossibilitando a mensuração precisa do índice de aproveitamento da matéria-prima e do percentual de perdas.

Dessa forma, identifica-se como principal problema a dependência do planejamento manual e subjetivo, que não garante o melhor aproveitamento da madeira nem a repetibilidade das decisões. A falta de padronização e otimização nos planos de corte resulta em desperdícios de material, aumento de custos e uso ineficiente do tempo produtivo. Tais fatores evidenciam a importância da implementação de um modelo de PLI, capaz de automatizar o cálculo das combinações de corte e propor soluções que minimizem as sobras e maximizem o aproveitamento da matéria-prima.

4.3 PROCESSO ATUAL DE CORTE DE RIPAS DE MADEIRA

Para melhor compreensão das etapas envolvidas na execução das tarefas do setor de corte, apresenta-se a seguir uma descrição do fluxo operacional do processo. A Figura 4 apresenta o fluxograma do processo atual de corte de madeira, destacando as atividades realizadas pelo encarregado e pelo operador, desde o recebimento da ordem de produção até o armazenamento das peças cortadas.

Figura 4: Fluxograma atual do processo de corte



Fonte: Autor (2025).

Conforme demonstrado no fluxograma, o processo de corte de ripas de madeira ocorre de forma manual e segue uma sequência padronizada de etapas. Com base na Figura 4, observa-se que o encarregado de produção recebe a ordem de produção diária, define as quantidades e modelos de caixas a fabricar e encaminha uma folha com essas informações ao setor de corte. O operador responsável analisa os desenhos e as medidas de cada modelo, etapa que demanda cerca de 30 minutos, incluindo a interpretação das especificações técnicas, o cálculo manual da quantidade de cortes por dimensão e a definição das transferências de corte a serem realizadas na máquina.

Após essa etapa de planejamento manual, o operador seleciona as ripas de madeira mais adequadas para o melhor aproveitamento da matéria-prima, executa os cortes na serra e, em seguida, encaminha as peças resultantes para a etapa de pré-montagem. A Figura 5, mostra a folha utilizada pelo operador de corte, a qual é usada como referência para o cálculo manual das quantidades e tamanhos das peças que compõem cada modelo de caixa. Esse documento orienta o planejamento e a configuração posterior da máquina de corte.

Após a configuração da máquina e a definição das combinações de corte, o operador inicia a execução do processo. Nessa etapa, as ripas de madeira são posicionadas na serra e cortadas conforme as medidas estabelecidas no planejamento. A Figura 7 apresenta o momento do corte da matéria-prima, evidenciando o procedimento realizado de forma manual pelo operador, que acompanha a operação e garante o cumprimento das dimensões especificadas.

Figura 7: Corte da matéria-prima na serra



Fonte: Autor (2025).

Após a etapa de corte, as peças resultantes são organizadas e armazenadas temporariamente em uma área específica do setor, onde permanecem até serem encaminhadas para o processo de pré-montagem das caixas. Essa organização é essencial para manter a sequência produtiva e evitar misturas entre peças de modelos diferentes. A Figura 8 apresenta o armazenamento das peças cortadas, ilustrando a disposição adotada no setor de corte para facilitar a identificação e o fluxo interno de materiais.

Figura 8: Armazenamento de peças cortadas



Fonte: Autor (2025).

Essas etapas complementam o fluxo descrito no fluxograma da Figura 4, demonstrando a sequência operacional do setor de corte, desde o recebimento da ordem de produção, passando pela análise, cálculo, configuração e execução dos cortes, até o armazenamento das peças que seguem para as próximas fases de produção.

4.3.1 Identificação de desperdícios e ineficiência

No processo de fabricação das caixas de madeira na empresa, um dos principais desperdícios identificados está relacionado ao aproveitamento da matéria-prima durante a etapa de corte das ripas. Atualmente, o corte é realizado de forma manual e empírica, sem o apoio de um sistema automatizado que define as combinações ideais para maximizar o uso da madeira. Essa prática faz com que o aproveitamento do material dependa unicamente da experiência do operador, o que torna o processo sujeito a variações e perdas significativas.

Ao receber as ordens de produção, o operador utiliza sua experiência prática para realizar as combinações de corte que considera mais eficientes, tentando ajustar o comprimento das ripas às dimensões das peças necessárias para a montagem das caixas. No entanto, como o processo não é padronizado nem baseado em cálculos

matemáticos, parte da madeira acaba sendo desperdiçada em forma de sobras que não possuem dimensões adequadas para reutilização em outros modelos. Essas sobras são descartadas após o corte, representando perdas diretas de matéria-prima e redução da eficiência produtiva.

Além disso, a dependência do conhecimento do operador faz com que a eficiência varie conforme o profissional responsável pelo corte. Pequenas diferenças na forma de calcular e configurar os cortes podem resultar em níveis distintos de desperdício, comprometendo a padronização e dificultando o controle de desempenho do setor.

Durante as observações do processo, verificou-se que o material excedente é separado e armazenado temporariamente, contudo, uma parcela significativa acaba sendo inutilizada ou descartada devido à falta de planejamento para reaproveitamento. A Figura 9 apresenta um registro visual do desperdício gerado durante o processo de corte, evidenciando o acúmulo de sobras de madeira que não possuem destino produtivo.

Figura 9: Sobras de madeira para descarte



Fonte: Autor (2025).

Além do impacto econômico associado ao descarte das sobras, há um relevante impacto ambiental, resultante do uso ineficiente de recursos naturais e da geração desnecessária de resíduos. Observou-se, ainda, que o baixo aproveitamento das ripas e o tempo elevado dedicado aos cálculos e à programação manual dos cortes contribuem diretamente para reduzir a eficiência produtiva e dificultar o atendimento ágil das ordens de produção.

4.4 VARIÁVEIS DO PROCESSO DE CORTE DE MADEIRA

O processo de corte das ripas de madeira utilizadas na fabricação das caixas envolve um conjunto de variáveis fundamentais, que influenciam diretamente o planejamento de produção, o aproveitamento da matéria-prima e o resultado do processo de otimização. As principais variáveis observadas são as dimensões das ripas, as medidas dos cortes que compõem cada modelo de caixa e os custos associados ao uso do material e ao tempo de operação.

A primeira variável considerada é o comprimento das ripas de madeira disponíveis em estoque. A empresa utiliza predominantemente ripas com comprimentos de 3,0 metros e 4,5 metros, que servem como base para o processo de corte. Em alguns períodos, o estoque contém apenas um dos tamanhos, e em outros, ambos estão disponíveis simultaneamente, o que oferece maior flexibilidade para gerar combinações de cortes mais eficientes. Essa variação no comprimento das ripas exerce influência direta sobre o aproveitamento da madeira e sobre a quantidade de sobras geradas no processo.

Outra variável importante é o conjunto de cortes necessários para a produção de cada modelo de caixa. Cada modelo possui medidas e quantidades específicas de peças, exigindo que o operador defina combinações adequadas dentro do comprimento total da ripa, buscando minimizar o desperdício. As dimensões das peças utilizadas nos principais modelos fabricados pela empresa estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Cortes de peças necessários para cada modelo de caixa

Modelo	Cortes e dimensões (cm)
NP2626	10 cortes de 40 cm; 4 cortes de 148 cm; 3 cortes de 66 cm; 6 cortes de 58 cm.
NP2628	10 cortes de 96 cm; 9 cortes de 230 cm; 12 cortes de 67 cm; 6 cortes de 63 cm.
NP2293	10 cortes de 68 cm; 6 cortes de 110 cm; 3 cortes de 43 cm; 6 cortes de 35 cm.
NP2294	10 cortes de 68 cm; 6 cortes de 110 cm; 3 cortes de 58 cm; 6 cortes de 54 cm.
NP2699	10 cortes de 78 cm; 10 cortes de 124 cm; 9 cortes de 84 cm; 6 cortes de 80 cm.
NP2700	10 cortes de 50 cm; 8 cortes de 124 cm; 9 cortes de 84 cm; 4 cortes de 80 cm.

Fonte: Autor (2025).

Essa tabela reúne as diferentes combinações de medidas utilizadas nos modelos de caixas produzidos, essas combinações demonstram a complexidade do processo de corte, já que cada modelo requer um conjunto distinto de dimensões. Quando o operador precisa cortar várias caixas de diferentes modelos no mesmo dia, torna-se possível criar diversas combinações entre as medidas, de modo que as somas dos cortes não ultrapassem o comprimento total disponível da ripa (3,0 m ou 4,5 m). Essa condição representa a principal restrição do processo, sendo o ponto central para a aplicação da Programação Linear Inteira, que buscará a melhor combinação possível para reduzir as sobras e aumentar o aproveitamento do material.

Além das dimensões e restrições físicas do processo, há também variáveis relacionadas aos custos de produção, que englobam o custo da matéria-prima, o tempo de preparação e corte, e as perdas geradas por sobras não aproveitáveis. Esses fatores são essenciais para avaliar o impacto econômico das decisões de corte e orientar o desenvolvimento do modelo de otimização proposto neste trabalho.

4.4.1 Elaboração dos planos de corte

A empresa analisada nesta pesquisa produz diversos modelos de caixas de madeira, com diferentes dimensões e finalidades, abrangendo tanto modelos fechados quanto modelos abertos do tipo grade. Neste estudo, a otimização do processo de corte foi aplicada exclusivamente às caixas do modelo aberto (grade), destinadas a um cliente específico que utiliza ripas de madeira com 10 cm de largura e 2 cm de espessura. A análise concentrou-se nas peças utilizadas nas laterais e tampas das caixas, visto que são as partes que demandam maior volume de cortes e, consequentemente, maior potencial de desperdício de material.

Foram selecionados seis modelos de caixas para compor a análise de otimização: NP2626, NP2628, NP2293, NP2294, NP2699 e NP2700. A definição desses modelos foi realizada em conjunto com o gestor da fábrica, considerando que essas caixas são destinadas a um cliente específico e apresentam características semelhantes e padronizadas em relação às dimensões e configurações de corte. Esse conjunto foi selecionado por representar um padrão de produção mais estável e recorrente dentro da empresa, diferentemente das caixas fabricadas para outros clientes, que variam com maior frequência em tamanho e estrutura.

Como descrito anteriormente, as ripas de matéria-prima utilizadas nestes modelos possuem dois comprimentos principais, de 3,0 metros e 4,5 metros, que representam as dimensões disponíveis em estoque. Essas duas medidas serviram como base para o desenvolvimento dos planos de corte e para a formulação dos modelos matemáticos aplicados.

Para a elaboração dos planos, foi necessário gerar diversas combinações possíveis de cortes ao longo do comprimento total de cada ripa. Devido à grande variedade de tamanhos e quantidades de peças que compõem os modelos, tornou-se necessário desenvolver seis planos de corte e seis modelos matemáticos distintos, agrupando os modelos de caixas de acordo com suas dimensões e utilizando os dois comprimentos de ripas disponíveis. Essa separação foi necessária para reduzir a complexidade computacional e garantir resultados mais precisos. A Tabela 2 apresenta a combinação dos modelos de caixas utilizados em cada simulação de otimização.

Tabela 2: Cortes necessários para cada modelo de caixa

Descrição	Grupo de modelos	Comprimento da ripa
Modelo matemático para ripas de 3 m	NP 2626 / NP 2628	3,0 m
Modelo matemático para ripas de 4,5 m	NP 2626 / NP 2628	4,5 m
Modelo matemático para ripas de 3 m	NP 2293 / NP 2294	3,0 m
Modelo matemático para ripas de 4,5 m	NP 2293 / NP 2294	4,5 m
Modelo matemático para ripas de 3 m	NP 2699 / NP 2700	3,0 m
Modelo matemático para ripas de 4,5 m	NP 2699 / NP 2700	4,5 m

Fonte: Autor (2025).

Para cada um desses modelos, foram geradas diversas combinações de cortes possíveis, de forma manual e com apoio de uma ferramenta de inteligência artificial, que auxiliou na identificação de todas as configurações viáveis ao longo do comprimento total da ripa. Em alguns casos, as combinações ultrapassaram 500 variáveis de decisão, representando diferentes formas de dispor os cortes para o melhor aproveitamento da madeira. Na Figura 10 é possível visualizar um exemplo das primeiras combinações de corte para as caixas do modelo NP 2626 e NP 2628, utilizando ripas de madeira com comprimento de 4,5 metros.

Figura 10: Planos de corte dos modelos NP 2626 e NP 2628

Cortes das caixas	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
Dimensão em cm / corte	450	450	450	450	450	450	450	450	450
96,50		4						1	
230,50									1
67,50			6						
63,50					7				
40,50							11		
148,00	3								
66,50				6					
58,50						7			
Desperdício em cm	6,0	64,0	45,0	51,0	5,5	40,5	4,5	353,5	219,5

Fonte: Autor (2025).

Para o desenvolvimento dos planos de corte, foi necessário acrescentar 0,5 cm ao comprimento nominal de cada peça, de modo a compensar a perda de material ocasionada pela espessura da lâmina de serra durante o corte. Esse ajuste foi essencial para garantir que as dimensões finais das ripas cortadas correspondam exatamente às medidas especificadas no projeto das caixas, evitando variações nas montagens posteriores. Além disso, foi calculado o desperdício gerado em cada combinação de corte, considerando a diferença entre o comprimento total da ripa e a soma das medidas efetivamente utilizadas.

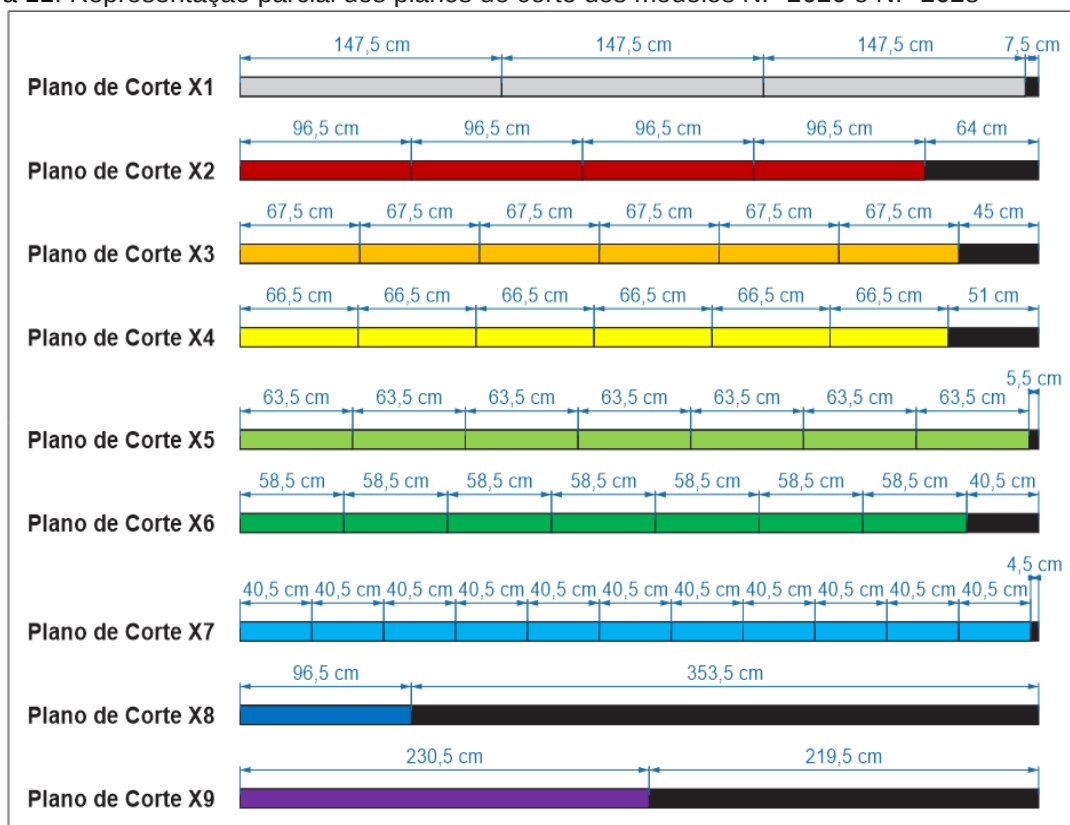
Conforme demonstrado na sequência de planos apresentados na Figura 10, o plano de corte X₁ (na cor cinza) possibilitou o seccionamento de três peças de 148 cm

cada, totalizando 444 cm de aproveitamento e resultando em apenas 6 cm de desperdício. O plano X₂ (em vermelho escuro) apresentou quatro cortes de 96 cm, alcançando 386 cm de uso e 64 cm de sobra. Já o plano X₃ (na cor laranja) proporcionou seis cortes de 67,5 cm, com 405 cm de aproveitamento e 45 cm de desperdício.

O plano X₄ (em amarelo) também foi composto por seis cortes, de 66,5 cm cada, resultando em 399 cm de utilização e 51 cm de perda. O plano X₅ (em verde claro) apresentou bom desempenho geral, com sete cortes de 63,5 cm, totalizando 444,5 cm de uso e apenas 5,5 cm de sobra. Em sequência, o plano X₆ (em verde forte) contemplou sete cortes de 58,5 cm, atingindo 409 cm de aproveitamento e 40,5 cm de desperdício.

O plano X₇ (em azul claro) demonstrou excelente eficiência, com onze cortes de 40,5 cm, totalizando 445,5 cm de uso e apenas 4,5 cm de perda. Em contrapartida, os planos X₈ (em azul forte) e X₉ (na cor roxa) registraram os menores índices de aproveitamento, com 96,5 cm e 230,5 cm utilizados, respectivamente, e desperdícios de 353,5 cm e 219,5 cm. A Figura 11 apresenta de forma ilustrativa os planos de corte descritos, destacando suas combinações, cores e dimensões correspondentes.

Figura 11: Representação parcial dos planos de corte dos modelos NP 2626 e NP 2628



Fonte: Autor (2025).

Observando a Figura 11, nota-se que a representação gráfica dos planos de corte facilita a comparação entre as diferentes combinações analisadas, permitindo identificar de forma clara quais delas proporcionam o melhor aproveitamento da matéria-prima. As cores atribuídas a cada plano auxiliam na visualização das proporções de uso e de sobra de madeira, evidenciando visualmente o desempenho de cada configuração em relação à eficiência produtiva. As partes em preto nas ripas representam as sobras de material, indicando a parte não aproveitada do comprimento total de 450 cm e, portanto, o volume de desperdício gerado em cada plano.

Percebe-se que os planos com maior número de cortes de menor comprimento (como os planos X_1 , X_5 e X_7) resultam em melhor aproveitamento da madeira, apresentando sobras mínimas e maior uniformidade no preenchimento da matéria-prima total. Já os planos com cortes mais longos, como X_8 e X_9 , demonstram um rendimento significativamente inferior, devido à limitação de encaixe das medidas dentro do comprimento disponível.

Conforme mencionado anteriormente, alguns modelos de caixas apresentaram mais de 500 combinações diferentes de corte. Entretanto, o *Microsoft Excel* — ferramenta utilizada para a aplicação do *Solver* — possui uma limitação operacional de até 200 variáveis, o que restringe o processamento correto dos cálculos.

Conforme mencionado anteriormente, alguns modelos de caixa apresentaram mais de 500 combinações diferentes de corte. No entanto, o *Microsoft Excel*, ferramenta utilizada para a aplicação do *Solver*, possui uma limitação operacional de 200 variáveis, o que restringe o processamento dos cálculos. Diante dessa restrição, foi necessário realizar uma seleção das 200 melhores combinações, aquelas que apresentaram maior aproveitamento da matéria-prima e menor volume de sobras. Mesmo assim, foram mantidas no conjunto algumas combinações com baixo aproveitamento, contendo apenas um corte de cada tamanho, para garantir que todas as medidas necessárias aos modelos de caixas estivessem contempladas no plano final.

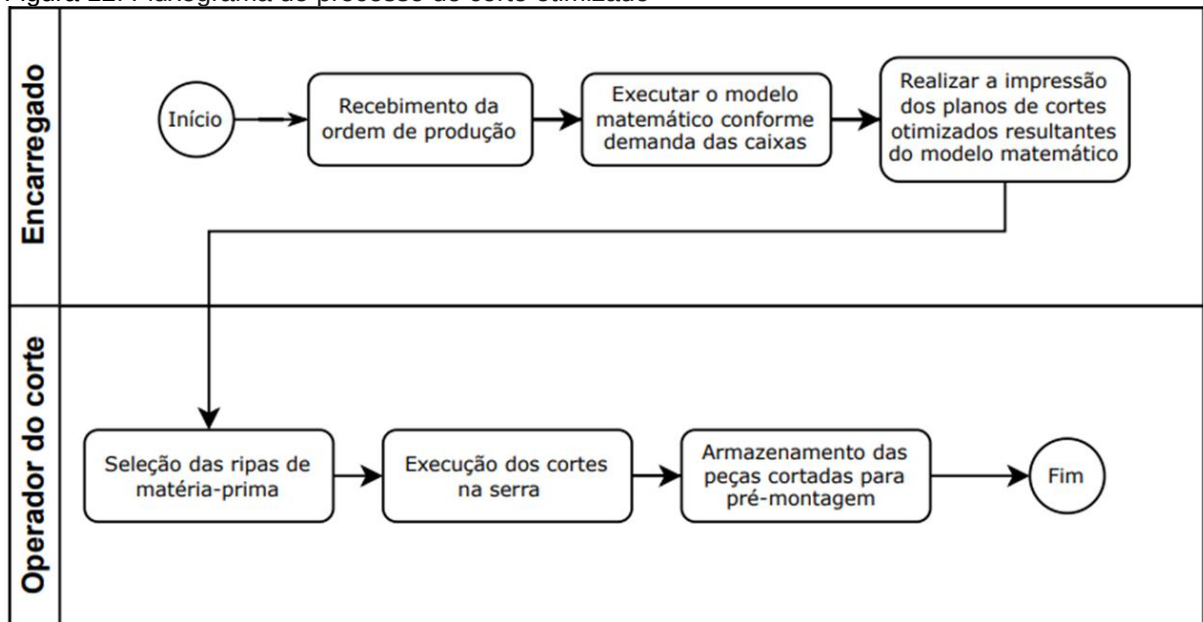
Esse processo de filtragem garantiu um equilíbrio entre representatividade e desempenho do modelo matemático, permitindo a realização das simulações de otimização dentro dos limites técnicos do *software* e assegurando resultados confiáveis quanto ao aproveitamento de material e redução de desperdícios. Além disso, optou-se pela utilização do *Excel* devido ao fato de ser uma ferramenta

amplamente acessível e de baixo custo, não gerando nenhum investimento adicional para a empresa, o que torna a aplicação prática do modelo mais viável e sustentável no ambiente produtivo.

4.5 PROCESSO DE CORTE OTIMIZADO

Com a implementação dos planos de corte e dos modelos matemáticos de otimização, o fluxo de trabalho do setor de corte passou por uma reestruturação significativa, resultando em maior padronização, confiabilidade e redução do tempo gasto na etapa de planejamento manual. O novo processo pode ser visualizado na Figura 12, que apresenta o fluxograma do processo de corte otimizado.

Figura 12: Fluxograma do processo de corte otimizado



Fonte: Autor (2025).

Nesse novo cenário, apresentado na Figura 12, o encarregado recebe a ordem de produção contendo as especificações dos modelos de caixas e suas respectivas quantidades. Após isso, ele executa o modelo matemático considerando as medidas das peças, a disponibilidade da matéria-prima e a demanda produtiva. O sistema retorna os planos de corte ideais, que são então impressos e disponibilizados ao operador da serra.

A partir dessa etapa, a função do operador de corte torna-se mais objetiva e padronizada. Ele recebe a folha com os planos otimizados, realiza a seleção das ripas de madeira conforme especificado e executa os cortes diretamente na serra, seguindo

as instruções predefinidas. Após o corte, as peças são organizadas e encaminhadas para a etapa de pré-montagem.

Esse novo fluxo elimina a necessidade de o operador realizar análises técnicas e cálculos manuais, atividades que anteriormente demandavam cerca de 30 minutos por ordem de produção, tornando o processo mais rápido, padronizado e menos sujeito a falhas humanas. Após a implantação do modelo, constatou-se uma redução efetiva desse tempo, o que resultou em ganhos diretos de produtividade, maior agilidade no atendimento das ordens de produção e menor dependência da experiência empírica do colaborador, garantindo assim maior eficiência operacional e previsibilidade dos resultados.

4.6 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

Nesta etapa do estudo, foram desenvolvidos os modelos matemáticos baseados em PLI, com o objetivo de otimizar o plano de corte das ripas de madeira utilizadas na fabricação das caixas do tipo grade. A criação dos modelos teve como foco minimizar o desperdício, considerando as restrições impostas pelo comprimento das ripas (3,0 m e 4,5 m) e pelas dimensões específicas das peças que compõem cada modelo de caixa.

Devido à existência de dois comprimentos distintos de matéria-prima, foram elaborados seis modelos matemáticos independentes, sendo um para cada par de caixas e para cada comprimento de ripa. Essa divisão foi necessária para que o modelo refletisse de forma mais realista as condições operacionais da empresa e as variações do estoque de madeira disponíveis. Cada modelo foi projetado para simular o processo de corte e identificar as combinações que proporcionam o melhor aproveitamento possível da ripa, respeitando as restrições de comprimento e as quantidades de cortes necessárias para cada modelo de caixa. Dessa forma, o modelo permite avaliar diferentes cenários produtivos e apoiar decisões voltadas à redução de desperdícios e aumento da eficiência no uso da matéria-prima.

Para representar matematicamente o problema de otimização do corte de madeira, foi elaborada a função objetivo e suas respectivas restrições, conforme os princípios da PLI. O modelo tem como finalidade minimizar o desperdício de matéria-prima (Z), identificando a combinação de cortes que melhor aproveita o comprimento total das ripas disponíveis (3 m e 4,5 m), atendendo simultaneamente à demanda

mínima de produção de cada peça necessária para a fabricação dos modelos de caixas.

A seguir, apresenta-se a formulação matemática do problema de corte de madeira, construída a partir das combinações de corte desenvolvidas e implementadas no *software Microsoft Excel*:

$$\text{Minimizar } Z = 6 X_1 + 64 X_2 \dots 24,5 X_{200} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\text{Peça de 96 cm} \quad 0 + 4 X_2 \dots 0 \geq 10 \quad (2)$$

$$\text{Peça de 230 cm} \quad 0 + 0 \dots 0 \geq 9 \quad (3)$$

$$\text{Peça de 67 cm} \quad 0 + 0 \dots 0 \geq 12 \quad (4)$$

$$\text{Peça de 63 cm} \quad 0 + 0 \dots 0 \geq 6 \quad (5)$$

$$\text{Peça de 40 cm} \quad 0 + 0 \dots 0 \geq 10 \quad (6)$$

$$\text{Peça de 147,5 cm} \quad 1X_1 + 0 \dots \geq 4 \quad (7)$$

$$\text{Peça de 66 cm} \quad 0 + 0 \dots 2X_{200} \geq 3 \quad (8)$$

$$\text{Peça de 58 cm} \quad 0 + 0 \dots 5X_{200} \geq 6 \quad (9)$$

$$\text{Peça de 96 cm} \quad 0 + 4 X_2 \dots 0 \leq 11 \quad (10)$$

$$\text{Peça de 230 cm} \quad 0 + 0 \dots 0 \leq 10 \quad (11)$$

$$\text{Peça de 67 cm} \quad 0 + 0 \dots 0 \leq 13 \quad (12)$$

$$\text{Peça de 63 cm} \quad 0 + 0 \dots 0 \leq 7 \quad (13)$$

$$\text{Peça de 40 cm} \quad 0 + 0 \dots 0 \leq 11 \quad (14)$$

$$\text{Peça de 147,5 cm} \quad 1X_1 + 0 \dots \leq 5 \quad (15)$$

$$\text{Peça de 66 cm} \quad 0 + 0 \dots 2X_{200} \leq 4 \quad (16)$$

$$\text{Peça de 58 cm} \quad 0 + 0 \dots 5X_{200} \leq 7 \quad (17)$$

$$\text{Não Negatividade} \quad X_1 ; X_2 ; X_{200} \geq 0 \text{ e inteiro} \quad (18)$$

Sendo que:

- Equação 1: A função objetivo Z busca minimizar o desperdício total de matéria-prima, representado pelo somatório dos desperdícios associados a cada combinação de corte selecionada. O modelo identifica as configurações que proporcionam o melhor aproveitamento das ripas de madeira, reduzindo as sobras não utilizadas;

- Equações 2 a 9: As restrições de demanda mínima ($\geq$) garantem que seja produzida a quantidade mínima necessária de cada tipo de peça, atendendo às exigências de produção de todos os modelos de caixas considerados. Dessa forma, assegura-se que o processo de otimização não gere planos de corte que deixem de atender à quantidade total requerida de cada medida;
- Equações 10 a 17: As restrições de demanda máxima ($\leq$) limitam a quantidade de peças produzidas para que não ultrapassem os volumes planejados, evitando a geração de excedentes e o uso desnecessário de matéria-prima. Essa condição assegura o equilíbrio entre o atendimento da produção e a eficiência no consumo do material;
- Equação 18: A última restrição estabelece que as variáveis de decisão $X_1, X_2, \dots, X_{200}$ sejam maiores ou iguais a zero e assumam apenas valores inteiros, uma vez que cada variável representa a escolha de uma combinação específica de corte. Essa condição é fundamental para que o modelo de Programação Linear Inteira reflita corretamente a realidade física do processo produtivo, garantindo que apenas soluções viáveis sejam obtidas.

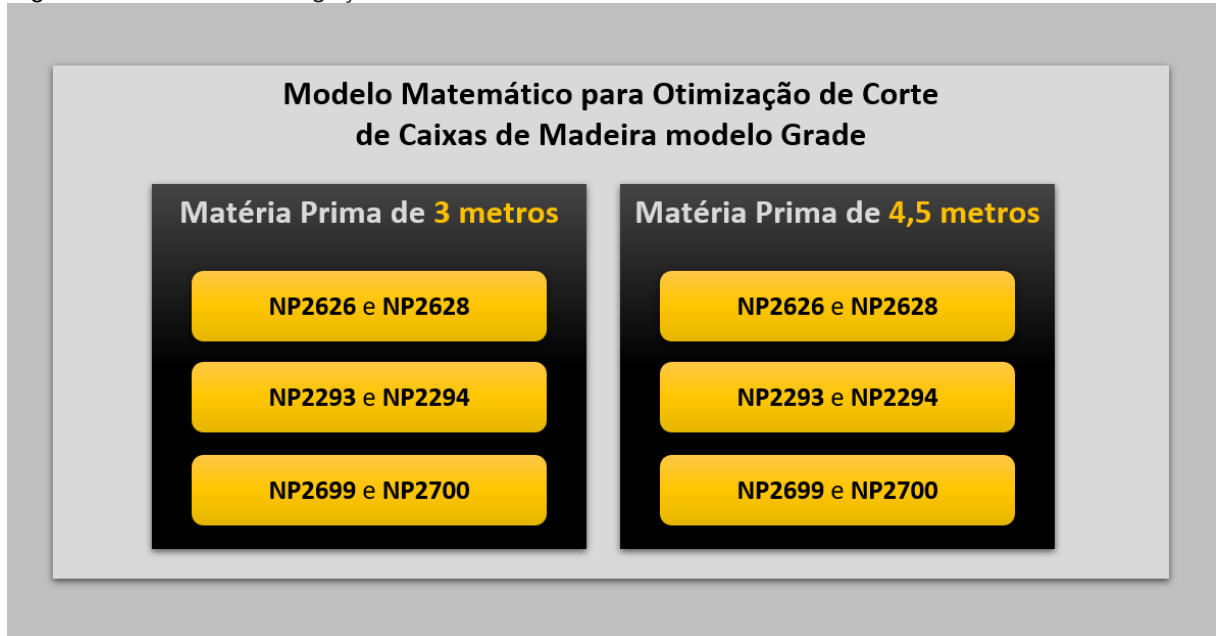
A estrutura do modelo matemático foi desenvolvida de maneira a tornar sua aplicação prática e intuitiva para o operador responsável pelo planejamento de corte. O formato adotado permite que o usuário insira apenas as informações essenciais, como a demanda de produção de cada peça e, quando necessário, a quantidade de cortes que deseja manter em estoque. A partir desses dados, o próprio sistema realiza o processamento automático das combinações, determinando a quantidade ideal de cortes que melhor se ajusta às restrições informadas.

Dessa forma, o operador pode executar o cálculo diretamente no *Solver*, utilizando o modelo previamente configurado, sem a necessidade de reformulações manuais ou ajustes adicionais. Essa metodologia proporciona agilidade no planejamento, maior padronização nos resultados e eficiência na tomada de decisão durante o processo produtivo.

Com o objetivo de facilitar a navegação entre as planilhas e conferir um aspecto mais profissional e intuitivo ao arquivo, foi desenvolvida uma página inicial denominada “Início”, que funciona como um painel de navegação semelhante à tela principal de um sistema computacional. Essa estrutura torna o uso do modelo mais

organizado, dinâmico e acessível, além de contribuir para uma melhor experiência de interação e apresentação visual, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13: Painel de navegação do usuário



Fonte: Autor (2025).

Nessa interface, o usuário encontra o título do modelo matemático: “Modelo Matemático para Otimização de Corte de Caixas de Madeira modelo Grade”, centralizado na parte superior da tela. Logo abaixo, foram inseridos dois quadros principais, correspondentes às matérias-primas de 3 metros e 4,5 metros. Cada quadro contém três botões interativos, que representam as combinações de caixas disponíveis para aquele comprimento de ripa. Ao clicar em qualquer um desses botões, o usuário é direcionado automaticamente para a planilha correspondente, onde estão configurados os modelos matemáticos específicos de cada grupo de caixas e o respectivo comprimento da matéria-prima selecionada.

Após selecionar o botão com as caixas que serão cortadas e suas respectivas matérias-primas utilizadas, na Figura 14, é possível visualizar a planilha de apoio ao modelo matemático de Programação Linear Inteira, contendo os campos de entrada de demanda, quantidade de cortes em estoque e as variáveis que compõem o cálculo da otimização.

Figura 14: Modelo matemático de corte para caixas NP 2626 e NP 2628 utilizando matéria-prima de 4,5 metros

	A	GL	GM	GN	GO	GP	GQ	GR	GS	GT	GU	GV	GW	GX
1	Cortes das caixas	X ₁₉₃	X ₁₉₄	X ₁₉₅	X ₁₉₆	X ₁₉₇	X ₁₉₈	X ₁₉₉	X ₂₀₀		Demanda caixa NP 2628	0		Deixar estoque de cada corte
2	Dimensão em cm / corte	450	450	450	450	450	450	450	450		Demanda caixa NP 2626	0		
3	96,50	1					2	4			Total de cortes	0		0
4	230,50										Total de cortes	0		0
5	67,50					2					Total de cortes	0		0
6	63,50			1							Total de cortes	0		0
7	40,50			9	4			1			Total de cortes	0		0
8	148,00		2								Total de cortes	0		0
9	66,50	5	2		4					2	Total de cortes	0		0
10	68,50					5	4			5	Total de cortes	0		0
11	Desperdício em cm	21,0	21,0	22,0	22,0	22,5	23,0	23,5	24,5		Total de cortes	0		
12														Ocultar Colunas
13	Desperdício em cm	21,0	21,0	22,0	22,0	22,5	23,0	23,5	24,5		Desperdício em cm	Desp. em m		Mostrar Colunas
14	Células variáveis	0	0	0	0	0	0	0	0					
15														

Fonte: Autor (2025).

Como pode ser observado na Figura 14, que apresenta o modelo matemático desenvolvido para o corte das caixas NP2626 e NP2628 utilizando ripas de 4,5 metros, os dados foram organizados na planilha de forma a permitir uma visualização clara e objetiva de todas as informações necessárias para a elaboração dos planos de corte.

Na célula GV1 é inserida a quantidade desejada de caixas do modelo NP2628, enquanto na célula GV2 é informada a quantidade de caixas do modelo NP2626 a serem produzidas. A partir dessas informações, o modelo calcula automaticamente a demanda total de cortes necessários para cada medida de peça, conforme apresentado na coluna GU, entre as linhas 3 e 10, onde são exibidos os totais de cortes exigidos para atender à produção programada.

Na coluna A, entre as linhas 3 e 10, estão listadas as dimensões de cada corte, já considerando o acréscimo de 0,5 cm correspondente à perda de material causada pela espessura da serra. Já na coluna GX, no mesmo intervalo de linhas, o operador pode inserir manualmente a quantidade de cortes que pretende deixar em estoque após a otimização, possibilitando maior flexibilidade no planejamento da produção.

Da coluna C até a coluna GS, estão dispostas as combinações de cortes possíveis, representando os diferentes planos de corte simulados no modelo. Cada coluna corresponde a uma configuração específica de corte, indicando quantas peças de cada dimensão podem ser obtidas a partir de uma ripa de 4,5 metros. Na linha 11 encontram-se os valores de desperdício associados a cada plano, expressos em centímetros, os quais indicam o comprimento não aproveitado da madeira após o corte. Esses dados são essenciais para a análise de eficiência dos planos de corte, permitindo identificar as combinações que apresentam menor desperdício e maior aproveitamento da matéria-prima.

Após a execução da otimização no *Solver*, o resultado final é exibido na célula GU14, onde aparece o desperdício total obtido em centímetros, e simultaneamente

na célula GV14, onde o mesmo valor é apresentado em metros. Esses resultados sintetizam o nível de eficiência alcançado pelo modelo, permitindo avaliar o quanto da ripa foi efetivamente aproveitado e quantificar o resíduo gerado em cada simulação. Essas informações são fundamentais para a análise de desempenho dos planos de corte, possibilitando a identificação das combinações com menor perda de material e o melhor aproveitamento da matéria-prima disponível.

Nas células de C14 até GS14, encontram-se os valores correspondentes à quantidade de vezes que cada combinação de corte deve ser aplicada para atender à demanda estabelecida. Esses valores são o resultado direto do cálculo de otimização realizado pelo *Solver*, indicando quantas ripas devem ser cortadas conforme cada plano de corte possível. Como o modelo matemático contempla 200 combinações distintas, e nem todas são utilizadas no resultado final, foram desenvolvidas duas macros para facilitar a análise e visualização dos dados.

O primeiro botão, denominado “Ocultar Colunas”, permite esconder automaticamente as colunas referentes às combinações que não foram selecionadas pelo *Solver*, exibindo apenas aquelas efetivamente utilizadas na otimização. O segundo botão, chamado “Mostrar Colunas”, tem a função inversa, reexibindo todas as colunas quando necessário. Essa automação proporciona agilidade na interpretação dos resultados, mantendo a planilha organizada e de fácil leitura, especialmente durante a validação e comparação entre diferentes cenários de corte.

Para complementar a análise dos resultados obtidos com as diferentes combinações de corte, foi desenvolvida uma interface interativa que apresenta, de forma clara e organizada, as informações referentes a cada otimização. Essa funcionalidade auxilia na tomada de decisão mais precisa, possibilitando priorizar as combinações que proporcionam o melhor equilíbrio entre aproveitamento de matéria-prima e custo de produção, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15: Modelo matemático das caixas NP 2626 e NP 2628 utilizando matéria-prima de 4,5 metros – demanda e instruções

	A	GU	GV	GW	GX	GY	GZ	HA	HB	HC	HD	HE
1	Cortes das caixas	Demanda caixa NP 2628	0		Estoque de cada corte		Instruções de uso do modelo matemático: 1 - Digitar a demanda das caixas; 2 - Digitar a quantidade aceitável de estoque para cada corte de madeira; 3 - Ir na aba "Dados", clicar no suplemento "Solver" e na janela que abrir clicar no botão "Resolver"; (Meu excel não tem solver?! Saiba como habilitar clikando aqui . 4 - O Botão "Ocultar Colunas" serve para ocultar as colunas de configurações de corte que não foram utilizadas na melhor recelta; 5 - O Botão "Mostrar Colunas" serve para mostrar todas as colunas ocultas.					
2	Dimensão em cm / corte	Demanda caixa NP 2626	0									
3	96,50	Total de cortes	0		0							
4	230,50	Total de cortes	0		0							
5	67,50	Total de cortes	0		0							
6	63,50	Total de cortes	0		0							
7	40,50	Total de cortes	0		0							
8	148,00	Total de cortes	0		0							
9	66,50	Total de cortes	0		0							
10	58,50	Total de cortes	0		0							
11	Desperdício em cm	Total de cortes	0									
12					Ocultar Colunas							
13	Desperdício em cm	Desperdício em cm	Desp. em m									
14	Células variáveis	31,5	0,315		Mostrar Colunas							
15												
16		Utilizado		Demanda	Estoque							
17	96,5	10	≥	0	10							
18	230,5	9	≥	0	9							
19	67,5	12	≥	0	12							
20	63,5	6	≥	0	6							
21	40,5	11	≥	0	11							

Fonte: Autor (2025).

Na parte direita dos botões de “Ocultar Colunas” e “Mostrar Colunas”, foi inserido um quadro de cálculo do desperdício em valores monetários, que realiza automaticamente o cálculo do custo total do desperdício, multiplicando o valor do resíduo gerado (em metros) pelo custo unitário de R\$ 2,10 por metro de ripa de madeira. Dessa forma, o operador pode visualizar de forma imediata o impacto financeiro das sobras de material resultantes de cada otimização, permitindo comparar os diferentes planos de corte não apenas sob o aspecto técnico, mas também sob a perspectiva econômica.

Para automatizar essas funções e tornar o modelo mais dinâmico, foi desenvolvido um código em VBA (*Visual Basic for Applications*) responsável pela execução dos botões de comando. O código-fonte completo dessas macros está apresentado no Apêndice A deste trabalho, onde é possível verificar a estrutura lógica utilizada para ocultar e exibir colunas, bem como para atualizar os cálculos de desperdício de forma automática.

Nessa mesma imagem, também é possível observar o botão “Voltar para Início”, localizado próximo ao quadro de cálculo do desperdício. Esse recurso foi desenvolvido para retornar o usuário à página principal de navegação da planilha, denominada “Início”, onde estão organizadas as opções de acesso aos diferentes modelos e comprimentos de matéria-prima. Essa funcionalidade está alinhada à estrutura explicada anteriormente, que visa tornar a utilização do modelo mais profissional, dinâmica e intuitiva, permitindo que o operador retorne rapidamente à tela inicial para selecionar outras combinações de caixas ou comprimentos de ripas. Esse recurso contribui para uma melhor experiência de uso e maior fluidez na navegação entre as planilhas.

Em todas as páginas do modelo matemático foi inserido um guia prático com o passo a passo de utilização da planilha, com o objetivo de padronizar o uso do modelo e facilitar o entendimento do processo de otimização por qualquer operador. Esse painel de instruções está localizado na parte superior de cada aba e orienta o usuário quanto às etapas necessárias para a execução correta do cálculo. A Figura 16 apresenta o painel de instruções de uso inserido nas planilhas do modelo matemático, destacando o *layout* organizado e a sequência de passos numerados, que auxiliam o operador durante a aplicação prática da otimização e asseguram a correta utilização da ferramenta.

Figura 16: Instruções de uso do modelo matemático

Instruções de uso do modelo matemático:

- 1 - Digitar a demanda das caixas;
- 2 - Digitar a quantidade aceitável de estoque para cada corte de madeira;
- 3 - Caso a empresa já possua algum estoque de algum corte, deve adicionar na coluna "Estoque de cada corte antes do corte"
- 4 - Ir na aba "Dados", clicar no suplemento "Solver" e na janela que abrir clicar no botão "Resolver"; (Meu excel não tem solver?! Saiba como habilitar [clikando aqui](#)).
- 5 - O Botão "Ocultar Colunas" serve para ocultar as colunas de configurações de corte que não foram utilizadas na melhor receita;
- 6 - O Botão "Mostrar Colunas" serve para mostrar todas as colunas ocultas.

Fonte: Autor (2025).

Nas instruções de uso do modelo matemático (Figura 16), foi incluído um recurso interativo para auxiliar o operador caso o suplemento *solver* não esteja disponível em seu *Excel*. Ao clicar no *link* destacado nas instruções, o usuário é direcionado automaticamente para uma página explicativa, criada dentro do próprio arquivo, que apresenta o passo a passo detalhado de como habilitar o *Solver* em seu dispositivo.

Essa página de suporte contém orientações tanto para sistemas *Windows* quanto para *Mac*, garantindo que o modelo possa ser utilizado de forma adequada em diferentes plataformas. Essa funcionalidade reforça a usabilidade e acessibilidade do modelo, permitindo que qualquer operador consiga configurar corretamente o suplemento necessário para a execução da otimização, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17: Instruções de uso do modelo matemático

1. O que é o Solver

O Solver é um suplemento do Excel usado para **otimização matemática** — ele encontra o melhor valor possível (máximo, mínimo ou específico) para uma célula, alterando variáveis dentro de restrições.

☒ Muito usado em **Pesquisa Operacional, Planejamento de Produção, Logística, e Análise de Custos** — como no seu TFC de otimização de cortes 🍷

2. Como habilitar o Solver no Excel (Windows)

1. Abra o Excel
2. Vá em **Arquivo** → **Opções**
3. No menu lateral, clique em **Suplementos**
4. Na parte inferior, procure o campo **Gerenciar**:
 - Escolha **Suplementos do Excel** e clique em **Ir...**
5. Na lista que aparecer, **marque a caixa "Solver"**
6. Clique em **OK**

☒ O Solver agora aparecerá na guia **Dados**, no grupo **Análise** (ao lado de "Análise de Hipóteses").

3. Como habilitar o Solver no Excel (Mac)

1. Vá em **Ferramentas** → **Suplementos do Excel**
2. Na janela que abrir, marque **Solver.xlam**
3. Clique em **OK**

• Ele será exibido na guia **Dados**, seção **Análise**, com o nome **Solver**.

4. Como verificar se está funcionando

1. Abra a guia **Dados**
2. No canto direito, localize o botão **Solver**
3. Clique nele — se abrir a janela "Parâmetros do Solver", está tudo certo ✅

Voltar para Início

Fonte: Autor (2025).

Após a organização e estruturação dos dados na planilha, foram configurados os parâmetros necessários para a aplicação do suplemento *solver*, responsável pela execução do cálculo de otimização do modelo matemático. A Figura 18 apresenta a janela de configuração dos parâmetros do *Solver*, preenchida com as informações do modelo desenvolvido.

Figura 18: Parâmetros do Solver

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para:

☐ Máx.☒ Mín.☐ Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

\$B\$14:\$G\$14 = número inteiro
\$GU\$17:\$GU\$24 >= \$GW\$17:\$GW\$24
\$GU\$26:\$GU\$33 <= \$GW\$26:\$GW\$33

Adicionar

Alterar

Excluir

Redefinir Tudo

Carregar/Salvar

☒ Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

LP Simplex

Opções

Método de Solução

Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Ajuda

Resolver

Fechar

Fonte: Autor (2025).

Conforme ilustrado na Figura 18, a célula de destino da otimização foi definida como GU14, onde é exibido o valor total do desperdício em centímetros, calculado

após a execução do modelo. Na configuração do *Solver*, foi selecionada a opção “*Min*” (Minimizar), com o objetivo de reduzir ao máximo o desperdício de matéria-prima. As células variáveis, localizadas entre B14 e GS14, representam as quantidades de cada combinação de corte que podem ser escolhidas pelo sistema.

Além disso, foram estabelecidas restrições específicas para garantir a coerência do modelo com o processo produtivo real: as variáveis foram definidas para assumir apenas valores inteiros, evitando frações de cortes; o número total de cortes não pode ultrapassar o somatório da demanda de produção e da quantidade máxima permitida em estoque; e, simultaneamente, a quantidade mínima de cortes não pode ser inferior ao número de peças necessárias para atender à demanda. Essas condições asseguram que a otimização ocorra dentro dos limites operacionais da fábrica, garantindo resultados matematicamente consistentes e fisicamente aplicáveis.

Por fim, na configuração do *Solver*, foi selecionado o método *Simplex LP*, indicado para modelos lineares, por apresentar maior estabilidade e eficiência no processamento das variáveis de decisão, permitindo a obtenção da solução ótima de forma rápida e precisa. A seguir, na Figura 19, pode-se observar a resolução do modelo matemático desenvolvido para a matéria-prima de 3 metros, considerando a demanda de cinco caixas NP2699 e cinco caixas NP2700, com estoque igual a zero, ou seja, toda a produção foi destinada ao atendimento direto da demanda.

Figura 19: Modelo matemático para matéria-prima de 3 metros com demanda de 5 caixas NP2699 e 5 caixas NP2700

	A	Z	AC	AE	BC	BH	BJ	BK	BL	BM	BN	BO
1	Cortes das caixas	x25	x28	x30	x54	x59	x61		Demanda caixa NP 2699	5		Estoque de cada corte
2	Dimensão em cm / corte	300	300	300	300	300	300		Demanda caixa NP 2700	5		
3	78,50	1			1		1		Total de cortes	50		0
4	124,50		1	1	1	1	1		Total de cortes	90		0
5	84,50		2		1	1			Total de cortes	90		0
6	80,50			2					Total de cortes	50		0
7	50,50	4				1	1		Total de cortes	50		0
8	Desperdício em cm	19,5	6,5	14,5	12,5	40,5	46,5		Total de cortes	330		
9												
10	Desperdício em cm	19,5	6,5	14,5	12,5	40,5	46,5		Desperdício	Desp. em m		
11	Células variáveis	12	26	25	37	1	1		1315	13,15		
12												

Fonte: Autor (2025).

Pode-se verificar na Figura 19 que, para essa demanda, é necessário realizar 50 cortes de 78 cm, 90 cortes de 124 cm, 90 cortes de 84 cm, 50 cortes de 80 cm e 50 cortes de 50 cm. Com base nessas exigências, o *Solver* processou as variáveis e identificou as melhores combinações de corte que atendem à produção com o menor desperdício possível. As configurações encontradas foram as seguintes:

- Cortar 12 vezes o plano de corte X25, composta por 1 corte de 78 cm e 4 cortes de 50 cm, resultando em 19,5 cm de desperdício por ripa;
- Cortar 25 vezes o plano de corte X28, com 1 corte de 124 cm e 2 cortes de 84 cm, gerando 6,5 cm de desperdício;
- Cortar 25 vezes o plano de corte X30, contendo 1 corte de 124 cm e 2 cortes de 80 cm, com 14,5 cm de desperdício;
- Cortar 37 vezes o plano de corte X54, composta por 1 corte de 78 cm, 1 corte de 124 cm e 1 corte de 84 cm, gerando 12,5 cm de desperdício;
- Cortar 1 vez o plano de corte X59, formada por 1 corte de 124 cm, 1 corte de 84 cm e 1 corte de 50 cm, com 40,5 cm de desperdício;
- E, por fim, cortar 1 vez o plano de corte X61, com 1 corte de 78 cm, 1 corte de 124 cm e 1 corte de 50 cm, apresentando 46,5 cm de desperdício.

O resultado total obtido com a otimização foi de 1.315 centímetros de desperdício, o que equivale a 13,15 metros de sobras de madeira — valor considerado significativamente reduzido em comparação ao processo manual tradicional, evidenciando a eficiência e aplicabilidade prática do modelo matemático desenvolvido.

O custo em reais por metro de ripa de madeira foi definido em R\$ 2,10, valor utilizado como base para o cálculo econômico do modelo. No modelo matemático, além de apresentar o desperdício total em centímetros e metros, também é possível calcular automaticamente o valor financeiro correspondente a esse desperdício, possibilitando uma análise completa tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Essa funcionalidade está ilustrada na Figura 20, que mostra o campo de cálculo do custo total do desperdício.

Figura 20: Valor monetário do desperdício da produção de 5 caixas NP2699 e NP2700

	A	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV
1	Cortes das caixas		Demanda caixa NP 2699	5		Estoque de cada corte		Instruções de uso do modelo matemático: 1 - Digitar a demanda das caixas; 2 - Digitar a quantidade aceitável de estoque para cada corte de madeira; 3 - Ir na aba "Dados", clicar no suplemento "Solver" e na janela que abrir clicar no botão "Resolver"; (Meu excel não tem solver?! Saiba como habilitar clique aqui . 4 - O Botão "Ocultar Colunas" serve para ocultar as colunas de configurações de corte que não foram utilizadas na melhor receita; 5 - O Botão "Mostrar Colunas" serve para mostrar todas as colunas ocultas.					
2	Dimensão em cm / corte		Demanda caixa NP 2700	5									
3	78,50		Total de cortes	50		0							
4	124,50		Total de cortes	90		0							
5	84,50		Total de cortes	90		0							
6	80,50		Total de cortes	50		0		Custo do Desperdício R\$ 27,62					
7	50,50		Total de cortes	50		0							
8	Desperdício em cm		Total de cortes	330				Mostrar Colunas					
9													
10	Desperdício em cm		Desperdício		Desp. em m			Volta para Início					
11	Células variáveis		1315		13,15								
12													
13			Utilizado		Demanda	Estoque							
14	78,50		50	≥	50	0							
15	124,50		90	≥	90	0							
16	84,50		90	≥	90	0							
17	80,50		50	≥	50	0							
18	50,50		50	≥	50	0							

Fonte: Autor (2025).

Com base na otimização realizada, o modelo (Figura 20) apresentou um valor total de desperdício equivalente a R\$ 27,62, representando o impacto financeiro das sobras de madeira geradas na produção simulada. Esse resultado reforça a importância do modelo matemático não apenas para reduzir perdas físicas, mas também para quantificar o custo econômico associado ao desperdício.

4.7 SIMULAÇÕES DO CENÁRIO DA EMPRESA

Com o objetivo de validar o modelo desenvolvido e verificar sua aplicabilidade prática, foram realizadas simulações considerando um cenário real da empresa. Ambas as simulações utilizaram uma demanda de 20 caixas do modelo NP2628, com matéria-prima de 3 metros de comprimento, diferenciando-se apenas pela condição de estoque adotada no cálculo.

Na primeira simulação, foi configurada a opção de estoque igual a zero, ou seja, o modelo não poderia gerar cortes adicionais além da quantidade necessária para atender à produção. Nessa configuração, o modelo apresentou um desperdício total de 1.490 cm, equivalente a 14,9 metros de madeira, resultando em uma perda financeira de R\$ 31,29. A Figura 21 apresenta o resultado obtido nesta simulação, evidenciando a distribuição dos cortes e o valor total de desperdício calculado pelo modelo.

Figura 21: Resultado da simulação 1 com estoque igual a zero

	A	C	Y	AC	AU	BI	BM	BW	EZ	GT	GU	GV	GW	GX	GY	GZ
1	Cortes das caixas	X ₂	X ₃₄	X ₃₈	X ₄₈	X ₆₀	X ₆₄	X ₇₄	X ₁₅₅		Demanda caixa NP 2628	20		Deixar estoque de cada corte		Estoque de cada corte antes do c
2	Dimensão em cm / corte	300	300	300	300	300	300	300	300		Demanda caixa NP 2626	0				
3	96,50		1		1	1	3	1			Total de cortes	200		0		0
4	230,50	1		1							Total de cortes	180		0		0
5	67,50		3	1	2	1			1		Total de cortes	240		0		0
6	63,50				1	2		3	3		Total de cortes	120		0		0
7	40,50										Total de cortes	0		0		0
8	148,00										Total de cortes	0		0		0
9	66,50										Total de cortes	0		0		0
10	58,50										Total de cortes	0		0		0
11	Desperdício em cm	69,5	1,0	2,0	5,0	9,0	10,5	13,0	42,0		Total de cortes	740				
12														Ocultar Colunas		
13	Desperdício em cm	69,5	1,0	2,0	5,0	9,0	10,5	13,0	42,0		Desperdício em cm	1490	Desp. em m	Mostrar Colunas		Custo do Desperdício
14	Células variáveis	1	7	179	15	9	47	28	1							R\$ 31,29
15											Utilizado		Demanda			
16											200	≥	200			Estoque
17	96,50		1		1	1	3	1			180	≥	180	0		
18	230,50	1		1							240	≥	240	0		
19	67,50		3	1	2	1			1		120	≥	120	0		
20	63,50				1	2		3	3		0	≥	0	0		
21	40,50										0	≥	0	0		
22	148,00										0	≥	0	0		
23	66,50										0	≥	0	0		
24	58,50										0	≥	0	0		

Fonte: Autor (2025).

Conforme pode ser observado na Figura 21, o modelo gerou uma configuração de corte ajustada estritamente à demanda, sem gerar peças excedentes para armazenamento. Esse comportamento reflete um cenário de produção enxuta, porém, com maior índice de desperdício devido à limitação de flexibilidade nas combinações possíveis.

Na segunda simulação, manteve-se a mesma demanda e o mesmo conjunto de restrições, porém foi permitida a produção de até uma unidade excedente de cada corte, destinada ao estoque. Essa modificação possibilitou ao modelo reorganizar as combinações de forma mais eficiente, resultando em um desperdício total de 1.393,5 cm, correspondente a 13,935 metros de madeira, e um custo de R\$ 29,26 em perdas. A Figura 22 apresenta o resultado dessa segunda simulação, destacando a redução obtida no total de desperdício e a inclusão de uma peça excedente de 96 cm para estoque.

Figura 22: Resultado da simulação 2 com estoque de uma unidade

	A	C	Y	AC	AU	BI	BM	BW	EZ	GT	GU	GV	GW	GX	GY	GZ
1	Cortes das caixas	X ₂	X ₃₄	X ₃₅	X ₃₆	X ₃₇	X ₃₈	X ₃₉	X ₃₁₀		Demanda caixa NP 2628	20		Deixar estoque de cada corte		Estoque de cada corte antes do corte
2	Dimensão em cm / corte	300	300	300	300	300	300	300	300		Demanda caixa NP 2626	0				
3	96,50		1		1	1	3	1			Total de cortes	200		1		0
4	230,50	1		1							Total de cortes	180		1		0
5	67,50		3	1	2	1			1		Total de cortes	240		1		0
6	63,50				1	2		3	3		Total de cortes	120		1		0
7	40,50										Total de cortes	0		0		0
8	148,00										Total de cortes	0		0		0
9	66,50										Total de cortes	0		0		0
10	58,50										Total de cortes	0		0		0
11	Desperdício em cm	69,5	1,0	2,0	5,0	9,0	10,5	13,0	42,0		Total de cortes	740				
12																
13	Desperdício em cm	69,5	1,0	2,0	5,0	9,0	10,5	13,0	42,0		Desperdício em cm	1393,5	Desp. em m			Custo do Desperdício
14	Células variáveis	0	20	180	0	0	47	40	0							R\$ 29,26
15																
16											Utilizado		Demanda		Estoque	
17	96,50		1		1	1	3	1			201	≥	200	1		
18	230,50	1		1							180	≥	180	0		
19	67,50		3	1	2	1			1		240	≥	240	0		
20	63,50				1	2		3	3		120	≥	120	0		
21	40,50										0	≥	0	0		
22	148,00										0	≥	0	0		
23	66,50										0	≥	0	0		
24	58,50										0	≥	0	0		

Fonte: Autor (2025).

Conforme ilustrado na Figura 22, ao permitir a geração de uma peça adicional por tipo de corte, o modelo obteve uma melhor distribuição das combinações e reduziu o desperdício total de madeira. Essa análise demonstra que pequenas flexibilizações nas restrições de estoque podem gerar ganhos expressivos no aproveitamento da matéria-prima, reforçando o potencial do modelo matemático como ferramenta de apoio à tomada de decisão no planejamento de cortes.

4.8 COMPARATIVO DA SITUAÇÃO ATUAL X PROCESSO OTIMIZADO

Para comparar a situação atual com o processo otimizado, foi realizado um acompanhamento prático do processo de corte na empresa, durante um dia normal de produção. O objetivo foi observar o método atualmente utilizado pelo operador e coletar dados reais sobre o desperdício de matéria-prima, gerado na fabricação de caixas de madeira. Nesse período, acompanhou-se a produção de uma demanda específica, composta por 20 caixas do modelo NP2628 e, posteriormente, 10 caixas do modelo NP2293 e 10 caixas do modelo NP2294, todas produzidas com ripas de madeira de 3 metros de comprimento.

Durante o acompanhamento, não houve intervenção no processo — o operador seguiu seu método habitual de trabalho. Primeiramente, ele recebeu a ordem de produção e, em seguida, consultou seu fichário físico, onde constam os desenhos e as medidas de corte de cada modelo. A partir dessas informações, o operador realizou cálculos manuais multiplicando a quantidade de cortes por peça de acordo com a demanda total, e então, com base em sua experiência prática, buscou organizar as combinações de cortes que julgava serem mais adequadas para o aproveitamento da madeira.

A cada corte finalizado, os restos de matéria-prima (ripas) foram armazenados em uma mesa. Em seguida, cada pedaço foi medido individualmente e seu comprimento anotado. Ao final da produção, todas as medidas foram somadas, resultando em um total aproximado de 130 metros de desperdício para a confecção das 20 caixas do modelo NP2628. O mesmo procedimento foi repetido para a produção das 10 caixas NP2293 e 10 caixas NP2294, nos quais foi registrado um desperdício total aproximado de 42 metros de madeira.

Por outro lado, os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo matemático de otimização implementado neste estudo demonstraram uma redução expressiva no desperdício de matéria-prima. Para a mesma demanda de 20 caixas NP2628, o modelo indicou um total de 13,935 metros de desperdício, enquanto para as 10 caixas NP2293 e 10 caixas NP2294, o desperdício foi reduzido para 7,175 metros. Considerando o custo de R\$ 2,10 por metro de ripa, foi possível calcular também o impacto financeiro dessas perdas, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Custo do desperdício da situação atual

Modelo de caixa	Quantidade produzida (un)	Desperdício da situação atual (m)	Desperdício do modelo matemático (m)	Custo do desperdício da situação atual (R\$)	Custo do desperdício do modelo matemático (R\$)	Redução (%)
NP2628	20	130	13,935	273,00	29,26	89,28%
NP2293 / NP2294	10+10	42	7,175	88,20	15,07	82,92%
Total	40	172	21,11	361,20	44,33	

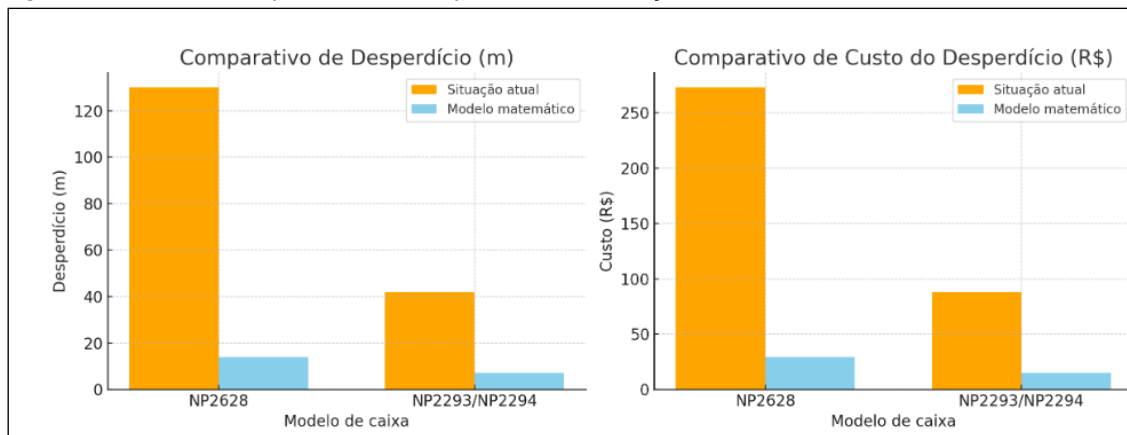
Fonte: Autor (2025).

Com base nos dados apresentados na Tabela 3, é possível observar uma redução média superior a 85% no desperdício de madeira, evidenciando a eficiência do modelo matemático desenvolvido. Além da economia direta de material, o modelo contribui para a redução dos custos de produção, uma vez que o desperdício tem impacto financeiro proporcional ao valor da matéria-prima.

Para ilustrar de forma visual esta diferença entre o processo atual e o processo otimizado, a Figura 23 apresenta um gráfico comparativo do desperdício (em metros)

e do custo equivalente (em reais) para os modelos NP2628, NP2293 e NP2294, considerando os dois cenários analisados: situação atual e modelo matemático.

Figura 23: Gráfico comparativo do desperdício da situação atual versus o modelo matemático



Fonte: Autor (2025).

Ao comparar o desperdício total obtido na situação atual com os resultados do modelo matemático, observa-se uma diferença expressiva no aproveitamento da matéria-prima. Considerando apenas a produção de 20 caixas do modelo NP2628, o processo manual gerou aproximadamente 130 metros de madeira desperdiçada, enquanto o modelo otimizado reduziu esse valor para 13,935 metros, representando uma economia de 116,065 metros de madeira em uma única semana de produção parcial.

Com base no custo médio de R\$ 2,10 por metro de ripa, a redução obtida representa uma economia semanal de R\$ 243,73 apenas com a aplicação do modelo NP2628. Projetando esse valor para um mês de operação (quatro semanas), a economia alcançaria R\$ 974,92, e em um ano, ultrapassaria R\$ 11.700,00 em redução de desperdício de matéria-prima. Esses resultados evidenciam o impacto financeiro acumulado ao longo do tempo, reforçando o potencial do modelo matemático como uma ferramenta de grande relevância para o controle de custos e para a sustentabilidade operacional da empresa.

Os resultados evidenciados no estudo, reforçam que a substituição do método manual de corte por uma abordagem estruturada e baseada em otimização matemática traz benefícios significativos à empresa, tanto em termos econômicos quanto operacionais. A adoção do modelo proposto permite melhor planejamento dos cortes, padronização das combinações e minimização das sobras, além de facilitar a tomada de decisão e o controle produtivo. Dessa forma, a empresa passa a operar

com maior eficiência no uso da matéria-prima, reduzindo custos, evitando desperdícios desnecessários e melhorando sua competitividade no mercado.

4.9 RECOMENDAÇÕES PARA A EMPRESA

A partir da análise dos resultados obtidos com a aplicação do modelo matemático, uma das principais recomendações é que o responsável pela operação do modelo realize simulações considerando ambos os cenários, com e sem estoque. Essa prática possibilita comparar os resultados e escolher a alternativa mais vantajosa de acordo com o contexto produtivo e a demanda vigente. Embora o trabalho com estoque igual a zero apresenta, na maioria dos casos, melhor desempenho em termos de redução de desperdício, é importante que cada situação seja avaliada individualmente, de forma que a decisão leve em conta também fatores operacionais, como disponibilidade de matéria-prima, tempo de produção e capacidade de armazenamento.

O trabalho com estoque zero mantém como principais vantagens a redução de espaço físico necessário para armazenamento, eliminação de riscos de danos ou perdas de peças estocadas e maior fluidez no controle do processo produtivo, já que toda a matéria-prima é convertida diretamente em produto acabado conforme a demanda real. Além disso, sugere-se a implementação de um controle sistematizado das peças cortadas e armazenadas, para que eventuais sobras geradas em um modelo matemático possam ser reaproveitadas em demandas futuras, reduzindo ainda mais o desperdício de matéria-prima.

Outra sugestão relevante é a expansão do uso do modelo matemático para outros tipos de caixas produzidas pela empresa, além das caixas em modelo grade analisadas neste estudo. A criação de novos modelos de otimização permitirá abranger toda a linha de produtos, proporcionando padronização nos planos de corte, melhor aproveitamento de matéria-prima e uniformidade nos indicadores de eficiência produtiva. Essa ampliação também contribuirá para a consolidação de uma base de dados de cortes otimizados, que poderá ser utilizada como referência em futuras demandas.

Atualmente, cada modelo desenvolvido apresenta uma limitação de 200 variáveis, decorrente da capacidade de cálculo do *Microsoft Excel* em conjunto com o suplemento *Solver*. Como aprimoramento, sugere-se avaliar a adoção de um *software* especializado em otimização de cortes, capaz de lidar com um número maior de

variáveis e restrições. É importante destacar, entretanto, que essa alternativa implicaria no uso de uma ferramenta paga, o que deve ser considerado pela empresa em termos de custo-benefício. Ainda assim, a utilização de um sistema dedicado poderia proporcionar ganhos expressivos de desempenho, permitindo simulações mais complexas, resultados mais rápidos e maior precisão na definição dos planos de corte.

CONCLUSÃO

A minimização de desperdícios é um desafio presente em praticamente todos os setores industriais, sendo um dos principais caminhos para aumentar a eficiência produtiva, reduzir custos e promover a sustentabilidade. Na indústria de fabricação de caixas de madeira, esse desafio assume ainda maior relevância, uma vez que o processo envolve o aproveitamento de matérias-primas naturais e de alto custo, exigindo precisão no corte e planejamento adequado para evitar perdas significativas de material.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como propósito aplicar a Programação Linear Inteira como ferramenta de otimização no processo de corte de ripas de madeira destinadas à fabricação de caixas, com o objetivo de minimizar desperdícios na empresa analisada, contribuindo para um processo produtivo mais eficiente e sustentável.

A partir do diagnóstico inicial realizado na empresa, verificou-se que o processo de corte era executado de forma manual e empírica, sem padronização e sem o uso de ferramentas quantitativas de apoio. Essa prática resultava em elevados índices de desperdício, variação nos resultados entre operadores e aumento dos custos operacionais.

Diante desse cenário, o estudo atingiu seu objetivo geral ao aplicar a Programação Linear Inteira como método de otimização no processo de corte de madeira, possibilitando a utilização mais eficiente da matéria-prima, a redução das perdas e o suporte à tomada de decisão com base em dados concretos. Esse resultado foi alcançado por meio do mapeamento do processo atual, da identificação dos principais pontos de desperdício, elaboração de planos de corte, do desenvolvimento e implementação dos modelos matemáticos e da posterior comparação com o método manual, contemplando, de forma gradual, todos os objetivos específicos propostos na pesquisa.

As simulações realizadas no suplemento *Solver* do *Microsoft Excel* comprovaram a eficácia do modelo matemático desenvolvido, evidenciando reduções superiores a 85% no desperdício de madeira e praticamente 100% de ganho no tempo de planejamento, confirmando as hipóteses formuladas neste estudo. Os resultados demonstraram que a aplicação da PLI padronizou e agilizou o processo decisório, tornando o corte mais previsível, consistente e eficiente. Dessa forma, o problema de

pesquisa foi respondido, uma vez que o uso da PLI demonstrou ser eficaz para otimizar os planos de corte de ripas de madeira, reduzir desperdícios, maximizar o aproveitamento da matéria-prima bem como, diminuir os custos operacionais.

Apesar dos resultados positivos, observou-se uma limitação no número de variáveis suportadas pelo *Microsoft Excel*, o que restringe a complexidade dos cálculos. Dessa forma, recomenda-se que, em etapas futuras, a empresa avalie a adoção de *softwares* especializados em otimização de cortes, que suportem modelos mais robustos e detalhados. É importante salientar, entretanto, que essa alternativa implica em investimentos adicionais, uma vez que tais ferramentas são geralmente pagas.

Conclui-se que a aplicação da PLI é uma solução eficaz para a minimização de desperdícios na produção de caixas de madeira, trazendo benefícios econômicos, operacionais e ambientais. O modelo proposto contribui diretamente para o uso racional dos recursos, a redução de custos e a sustentabilidade do processo produtivo, reforçando o papel da Engenharia de Produção na promoção de melhorias contínuas e na integração entre tecnologia, eficiência e gestão industrial.

REFERÊNCIAS

APOLINÁRIO, Valdênia. Análise do Toyotismo e dos seus Princípios Racionalizantes Aplicados à Gestão da Produção e do Trabalho. **Revista INTERFACE-UFRN/CCSA** ISSN Eletrônico 2237-7506, v. 13, n. 2, 2016.

ARAÚJO, Pedro Felipe da Silva. **Programação linear e suas aplicações**: definição e métodos de soluções. 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade Federal de Goiás, Brasília, 2012.

BELISARIO, Douglas Jhonata; RODOLPHO, Daniela. **A gestão de inventário para eficiência operacional e eficácia da empresa**: um estudo de caso. Interface Tecnológica, Taquaritinga: Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga (Fatec), v. 19, n. 1, p. 400-412, 2022. DOI: 10.31510/inf. v19i1.1391.

BORGES, Luiz Fernando Mello. **Qualidade e eficiência**: estratégias para um ambiente produtivo saudável. Belém: Home, 2023.

BRITO, Tiago Miguel de Jesus. **Aplicações de instrumentos de Gestão Lean para a melhoria da qualidade numa empresa de transformação de madeira**. 2023. 24 f. Relatório de Estágio (Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Viseu, 2023.

CARMO, Lucas Henrique Santos do. **Modelo de otimização para problema de corte em tubos**. 2016. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) — Centro Universitário Eurípides de Marília – UNIVEM, Marília, 2016.

CECHIN, R. B. *et al.* **Otimização de corte para embalagens**: um estudo de caso. 2020.

CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. D. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativos, quantitativos e mistos**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021. E-book. pág.11. ISBN 9786581334192. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786581334192/>. Acesso em: 06 dez. 2025.

DANTAS, Ana Paula dos Santos. **Modelos de Programação Linear Inteira para o Problema de Programação de Tripulação**. 2017. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Ceará, Quixadá, 2017.

DAVID, Hélio Caquelengo. **Melhoria de processos e fluxos num parque de madeiras**: integração de metodologias Kaizen e eficiência energética. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2024.

FAGUNDES, Hilton Albano Vieira. **Diagnóstico da produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. 2003. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FONTANA, Marcele Elisa. **Fundamentos da Gestão da Produção e Operações: Estratégias para o sucesso empresarial**. Freitas Bastos, 2024.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. E-book. pág.42. ISBN 9788580551198. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580551198/>. Acesso em: 26 de maio. 2025.

HILLIG, Éverton; SCHNEIDER, Vania Elisabete; PAVONI, Eloide Teresa. Geração de resíduos de madeira e derivados da indústria moveleira em função das variáveis de produção. **Production**, v. 19, p. 292-303, 2009.

HOOSE, Anderson; KRIPKA, Moacir. Programação linear aplicada na indústria e suas conexões com os objetivos de desenvolvimento sustentável: uma revisão bibliométrica e sistemática. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 23, n. 3, e-4866, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i3.5004>. Acesso em: 16 jun. 2025.

IBEIRO, Tales Santos. **O processo do corte de madeira**: elencando oportunidades de melhorias. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

LOEBLEIN, Lucinéia Carla; GODOY, Leoni Pentiado; TABORDA, Loana Wollmann; OLIVEIRA, Diane Cristina Scheer de. **Aplicação da programação linear para minimização de perdas de aparas em indústria metal mecânica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – CONBREPRO, 2., 2012, Ponta Grossa. Anais... Ponta Grossa: Associação Paranaense de Engenharia de Produção – APREPRO, 2012. Disponível em: <https://anteriores.aprepro.org.br/conbrepro/2012/anais/artigos/pesquisaope/6.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2025.

LONGARAY, André A. **Introdução à Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Saraiva, 2013. E-book. pág.53. ISBN 9788502210844. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788502210844/>. Acesso em: 03 nov. 2025.

MARCONI, Marina de A.; LAKATOS, Eva M. **Metodologia Científica**. 8. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2022. E-book. p.Capa. ISBN 9786559770670. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786559770670/>. Acesso em: 03 nov. 2025.

MARCIS, Jaqueline; LIMA, Edson Pinheiro de; TRENTIN, Marcelo Gonçalves. Desperdícios e sustentabilidade nas indústrias moveleiras de pequeno porte do Sudoeste do Paraná. **Journal of Lean Systems**, v. 2, n. 1, p. 68–81, 2017.

NASCIMENTO, S. M.; DUTRA, R. I. J. P.; NUMAZAWA, S. **Resíduos de indústria madeireira**: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso. **HOLOS Environment**, v. 6, n. 1, p. 8-21, 2006. Disponível em: <https://holos.emnuvens.com.br/holos/article/view/177/161>. Acesso em: 15 de junho de 2025.

NAKAJIMA, Seiichi. **TPM: Total Productive Maintenance**. Cambridge, MA: Productivity Press, 1988.

OHNO, Taiichi. **O Sistema Toyota de Produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997.

OLIVEIRA, Angelita Brandi de. **Programação linear: conceitos teóricos e utilização de ferramentas computacionais**. 2023. 99 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2023.

PAIVA, Dênis Mateus de; PAPANDREA, Pedro José; BAISSE, Aline de Cássia; CHAGAS, Cristiane Aparecida Gonçalves das; SILVA, Rita Gabriela da. Lean Manufacturing: redução de desperdícios e padronização do processo. **Journal of Open Research, Itajubá: Universidade Federal de Itajubá**, v. 1, n. 1, 2020. ISSN 2675-293X.

PRATES, Caroline Chagas; BANDEIRA, Denise Lindstrom. Aumento de eficiência por meio do mapeamento do fluxo de produção e aplicação do Índice de Rendimento Operacional Global no processo produtivo de uma empresa de componentes eletrônicos. **Gestão & Produção**, v. 18, p. 705-718, 2011.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013. E-book. Disponível em: <https://www.feevale.br/Comum/midias/8807f5c7-2f4b-4da4-bebc-0f5d1b85f177/ebookmetodologiadotrabalhocientifico.pdf>. Acesso em: **03 nov. 2025**.

RAMOS, W. F. *et al.* **Análise da indústria madeireira na Amazônia: gestão, uso e armazenamento de resíduos**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB), n. 43, p. 1–16, mar. 2017. DOI: 10.5327/Z2176-947820170057.

RASEIRA, Cristine Bassols. **Design e tecnologia aplicados a resíduos de madeira: especificações para o processo de corte a laser em marchetaria**. 2013. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ROQUE, Matilde Esteves. **Implementação de ferramentas lean e de indicadores de desempenho na indústria corticeira**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2023.

SILVA, M. E.; BARBIERI, J. C.; LIMA, R. G. S. Gestão da cadeia de suprimentos sustentável: práticas e perspectivas no Brasil. **Revista de Administração e Inovação (RAI)**, v. 16, n. 3, p. 183–200, 2019. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6635110>.

SOUZA, André Matos de; JACINTO, Flávia Morgana de Oliveira. Fundamentos Matemáticos da Programação Linear. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 6, n. 1, 2018. Trabalho apresentado no XXXVII CNMAC – São José dos Campos, SP, 2017. Disponível em: <https://proceedings.sbmam.org.br/sbmam/article/view/1760>. Acesso em: 03 nov. 2025.

SOUZA, Diego Camilo Ferreira; CLAUDINO, Calline Neves de Queiroz; MELO, Fagner José Coutinho. Aplicação da gestão da qualidade para melhoria da eficiência produtiva e de longo prazo em uma indústria de reciclagem. **Exacta – Engenharia de Produção**, São Paulo, v. 14, n. 4, p. 661–676, 2016. DOI: 10.5585/ExactaEP.v14n4.6594.

SOUZA, João Victor Machado de; STELA, Victor; FERREIRA, Débora Meyhofer. **Medição de eficiência de produção na Indústria 4.0**. Universidade São Francisco – Campus Itatiba. [S.l.], s.d.

STEIN, Ronei; GEHLEN, Rubens Z C.; AFONSO, Lígia M F. *et al.* **Modelagem e otimização de sistemas de produção**. Porto Alegre: SAGAH, 2018. E-book. pág.34. ISBN 9788595024151. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595024151/>. Acesso em: 25 de maio. 2025.

ULIANA, M. R.; NOLASCO, R. C.; CAIXETA FILHO, J. V. **O uso da Programação Linear como ferramenta de otimização na indústria moveleira**. Revista Produção Online, v. 6, n. 2, p. 1–21, 2006.

VIASIMINSKI, Renata *et al.* Proposta de redução de perdas operacionais em uma indústria moveleira de médio porte. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 8, p. 82939–82960, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n8-480.

WEINGARTEN, Tiago; DALLA VECCHIA, Rodrigo. **Modelagem matemática e pesquisa operacional**: uma possibilidade. In: XII Encontro Nacional de Educação Matemática – Educação Matemática na Contemporaneidade: Desafios e Possibilidades. Sociedade Brasileira de Educação Matemática. São Paulo, 2016.

APÊNDICE A - CÓDIGO VBA

```

Sub OcultarColunas_np2699_np2700_300()
    Dim ws As Worksheet
    Dim linhaAlvo As Long
    Dim i As Long
    Dim ultimaColuna As Long
    Set ws = ActiveSheet
    If TypeName(Selection) <> "Range" Then Exit Sub
    ' A linha de referência é a da célula atualmente selecionada
    linhaAlvo = 11
    ' Verifica da coluna 1 até a 63 (ajuste se necessário)
    ultimaColuna = 62
    Application.ScreenUpdating = False
    Application.Calculation = xlCalculationManual
    For i = 1 To ultimaColuna
        With ws.Cells(linhaAlvo, i)
            ' Considera apenas valores numéricos exatamente iguais a 0
            If IsNumeric(.Value) Then
                If CDbl(.Value) = 0 Then
                    ws.Columns(i).Hidden = True
                End If
            End If
        End With
    Next i
    Application.Calculation = xlCalculationAutomatic
    Application.ScreenUpdating = True
End Sub

Sub MostrarTodasAsColunas_np2699_np2700_300()
    ActiveSheet.Columns.Hidden = False
End Sub

```