

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO SOROCABA

MARCIO CEZAR FLAMINI FILHO

**ESTUDO DOS PROBLEMAS DE CORTE UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL
NA FABRICAÇÃO DE SALAS SEGURAS PARA ARMAZENAMENTO DE DADOS**

SOROCABA

2025

MARCIO CEZAR FLAMINI FILHO

**ESTUDO DOS PROBLEMAS DE CORTE UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL
NA FABRICAÇÃO DE SALAS SEGURAS PARA ARMAZENAMENTO DE DADOS**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção, para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos.

Orientadora: Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso

SOROCABA

2025

Filho, Marcio Cezar Flamini

Estudo dos problemas de corte unidimensional e bidimensional na fabricação de salas segura para armazenamento de dados / Marcio Cezar Flamini Filho -- 2025.
69f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Eli Angela Vitor Toso
Banca Examinadora: Mateus Pereira Martin, João Paulo Barbosa Falleiros
Bibliografia

1. Problema de corte. 2. Programação por metas. 3. Estudo de caso. I. Filho, Marcio Cezar Flamini. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - CCEP-So/CCGT

Rod. João Leme dos Santos km 110 - SP-264, s/n - Bairro Itinga, Sorocaba/SP, CEP 18052-780

Telefone: (15) 32296002 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 25/2025/CCEP-So/CCGT

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARCIO CEZAR FLAMINI FILHO

ESTUDO DOS PROBLEMAS DE CORTE UNIDIMENSIONAL E BIDIMENSIONAL NA FABRICAÇÃO DE SALAS SEGURAS PARA ARMAZENAMENTO DE DADOS

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba

Sorocaba, 17 de julho de 2025

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Eli Angela Vitor Toso
Membro da Banca 1	Mateus Pereira Martin
Membro da Banca 2	João Paulo Barbosa Falleiros



Documento assinado eletronicamente por **Eli Angela Vitor Toso, Professor(a) do Ensino Superior**, em 17/07/2025, às 14:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mateus Pereira Martin, Professor(a) do Ensino Superior**, em 17/07/2025, às 15:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1916315** e o código CRC **B985D14C**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.022537/2025-25

SEI nº 1916315

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos meus pais, Marcio e Marília, que estiveram ao meu lado durante toda essa jornada. Sempre me apoiaram incondicionalmente para que eu pudesse me dedicar aos estudos e construir uma formação sólida. Sem o suporte deles, nada disso teria sido possível. À minha mãe, agradeço pelos esforços diários, pelo carinho, pela paciência e por sempre me incentivar a ser uma pessoa melhor, oferecendo a base necessária para que eu me mantivesse focado. Ao meu pai, sou grato pelas orientações e pelos constantes incentivos ao longo da graduação.

À minha namorada, Poliane, que sou grato por todo o apoio, paciência e incentivo durante o curso, especialmente nos momentos mais exigentes.

Agradeço ao meu irmão, Henrique, pelos momentos que vivemos juntos e pelas responsabilidades que assumi por ser o irmão mais velho.

Aos colegas de turma, deixo meu reconhecimento por toda a parceria e companheirismo no dia a dia acadêmico. Tornaram a caminhada mais leve e colaboraram muito, especialmente nas disciplinas mais desafiadoras.

Por fim, agradeço profundamente à minha orientadora, Profa. Dra. Eli Angela Vitor Toso, por toda a dedicação, conhecimento compartilhado e confiança depositada em mim, especialmente durante o período em que atuei como monitor de sua disciplina, em 2023. Essa experiência foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Nos últimos anos, o aumento exponencial na geração global de dados, proveniente de transações online, redes sociais e dispositivos conectados à internet, trouxe desafios significativos para a gestão eficaz de grandes volumes de informações digitais. Esse cenário impulsionou o crescimento do setor de construção de salas seguras, especialmente em empresas que necessitam armazenar dados sensíveis, como em *data centers*. Este estudo concentra-se na dinâmica do processo de produção de módulos destinados a salas seguras e cofres de uma empresa sediada em Sorocaba, São Paulo. Nesse contexto, o sistema de produção adotado é baseado em projetos, apresentando desafios particulares, especialmente no que diz respeito ao corte preciso de chapas e barras. O objetivo central é estudar modelos de otimização para os cortes unidimensional e bidimensional, para avaliar o potencial de redução de desperdícios de materiais, com ênfase na diminuição de custos associados. Além disso, pretende-se analisar a viabilidade de se trabalhar com peças em estoque, que podem proporcionar benefícios tanto financeiros quanto ambientais. Para isso, foram definidos diferentes cenários que representam possíveis decisões dentro da empresa, estruturados principalmente por meio de modelagens multiobjetivo orientadas por metas. Os resultados indicam que tanto a quantidade de matéria-prima utilizada quanto o volume de peças estocadas variam conforme o cenário adotado, cabendo à gestão de produção a escolha da alternativa mais adequada, de acordo com as prioridades e restrições do contexto produtivo.

Palavras-chave: Problema de corte de estoque; Corte unidimensional; Problema de corte bidimensional guilhotinado; Programação por metas; Fabricação de salas seguras para *data centers*.

ABSTRACT

In recent years, the exponential increase in global data generation—driven by online transactions, social networks, and internet-connected devices—has posed significant challenges for the effective management of large volumes of digital information. This scenario has fueled the growth of the secure room construction sector, especially among companies that need to store sensitive data, such as data centers. This study focuses on the production dynamics of modules intended for secure rooms and vaults in a company based in Sorocaba, Brazil. In this context, the adopted production system is project-based, presenting specific challenges, particularly in the precise cutting of sheets and bars. The main objective is to study optimization models for one- and two-dimensional cutting to assess the potential for reducing material waste, with an emphasis on reducing associated costs. Furthermore, the aim is to analyze the feasibility of working with stock parts, which can provide both financial and environmental benefits. To this end, different scenarios were defined to represent possible decision-making alternatives within the company, primarily structured through goal-programming models. The results indicate that both the amount of raw material used and the volume of stored parts vary depending on the scenario adopted, leaving it up to production management to choose the most appropriate alternative according to the company's operational priorities and constraints.

Keywords: Cutting stock problem; One-dimensional cutting; Two-dimensional guillotine cutting problem; Goal programming; Secure room manufacturing for data centers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corte de barras.....	18
Figura 2 - Corte de chapas.....	19
Figura 3 - Exemplo de corte guilhotinado e não guilhotinado.	21
Figura 4 - Exemplo da constituição de um módulo.....	30
Figura 5 - Fluxo geral da produção de módulos.....	31
Figura 6 - a) Perfis de arremate; b) Chapas isolantes utilizadas na confecção dos módulos.	32
Figura 7 - Ilustração dos isolantes e perfis de arremates na estrutura de uma sala segura.	33
Figura 8 - Setor de corte dos perfis de arremate.....	33
Figura 9 - Setor de corte das chapas isolantes.....	34
Figura 10 - Exemplos de peças maiores que o objeto disponível para corte.....	35
Figura 11 - Resultados individuais de cada cenário para a quantidade de barras utilizadas.....	43
Figura 12 - Resultados individuais de cada cenário para quantidade de peças em estoque.	44
Figura 13 - Resultados individuais de cada cenário para perdas.....	45
Figura 14 - Comparação dos cenários para cada análise do problema de corte unidimensional.....	47
Figura 15 - Resultados individuais de cada cenário para quantidade de placas utilizadas.	53
Figura 16 - Resultados individuais de cada cenário para quantidade de peças em estoque.	55
Figura 17 - Aproveitamento de Material para cada cenário analisado.....	57
Figura 18 - Comparação dos cenários para cada análise do problema de corte bidimensional.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações de tamanho e demanda de cada peça por período.	40
Tabela 2 - Matriz pay-off de objetivos – Modelo Unidimensional	42
Tabela 3 - Matriz pay-off de objetivos - Modelo Bidimensional.....	53
Tabela 4 - Informações de tamanho e demanda de cada peça por período	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 PROBLEMA DE CORTE	16
2.2 PROBLEMA DE CORTE DE ESTOQUE	17
2.1.1 Geração de Padrões de Corte	20
2.3 MÉTODO PROGRAMAÇÃO POR METAS (GOAL PROGRAMMING)	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL	24
3.2 PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL	26
3.3 CONTRIBUIÇÕES DA REVISÃO	28
4 O PROBLEMA NA EMPRESA ESTUDADA	29
5 PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL	36
5.1 CONSIDERAÇÕES DO PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL	36
5.2 MODELO INICIAL PARA O PROBLEMA DE CORTE DE BARRAS	38
5.3 DADOS DO PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL	40
5.4 CENÁRIOS PARA O PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL	41
5.5 RESULTADOS OBTIDOS DOS CENÁRIOS - UNIDIMENSIONAL	42
5.6 DISCUSSÃO PARA O PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL	46
6 PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL	48
6.1 CONSIDERAÇÕES DO PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL	48
6.2 MODELO INICIAL PARA O PROBLEMA DE CORTE DE PLACAS	48
6.3 DADOS DO PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL	51
6.4 CENÁRIOS PARA O PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL	51
6.5 RESULTADOS OBTIDOS DOS CENÁRIOS – BIDIMENSIONAL	53
6.6 DISCUSSÃO PARA O PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL	58
7 CONCLUSÃO	60

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve um aumento exponencial na geração global de dados, impulsionado por diversas fontes, como transações *online*, redes sociais e dispositivos conectados à internet. Esse crescimento pode ser comprovado por projeções da *International Data Corporation* (IDC), que estima que a quantidade global de dados criados, capturados e consumidos deverá atingir 175 zettabytes até 2025. Esse número evidencia a aceleração no volume de dados digitais, já que representa um crescimento significativo em comparação com anos anteriores, e reflete o impacto direto de tecnologias como dispositivos conectados, redes sociais, comércio eletrônico e serviços em nuvem (IDC, 2018). A gestão eficaz desse grande volume de dados tornou-se um desafio considerável, incluindo questões relacionadas à retenção, acessibilidade e segurança de informações digitais. Neste contexto, o segmento de construção de salas seguras e salas cofres vem crescendo significativamente devido à necessidade das empresas manterem suas informações confidenciais em dispositivos físicos de armazenamento, próprios ou contratados, como por exemplo, grandes *data centers*. Segundo Martins, Carneiro e Mergulhão (2023), a informação é considerada um recurso essencial para as organizações, sendo estratégica para a tomada de decisão, e conseguir garantir a sua segurança é um dos principais desafios gerenciais atuais.

A fabricação de salas de segurança, também conhecidas como salas cofre ou salas seguras, é um exemplo clássico de um sistema de produção por projeto, pois cada unidade é desenvolvida de acordo com as especificidades e necessidades únicas do cliente. Esse tipo de produção possui características particulares, já que o produto é altamente customizado, exigindo um planejamento detalhado para garantir que atenda aos requisitos específicos do comprador. De acordo com Muralidharan et al. (2010), a demanda no mercado atual está mudando rapidamente devido à crescente individualização, o que faz com que as empresas precisem desenvolver múltiplos planejamentos simultaneamente para garantir a diversidade de produtos e uma melhor adaptação às exigências do mercado. Dessa forma, esse sistema se torna ainda mais complexo, exigindo flexibilidade e precisão para acompanhar essas transformações e atender a essa demanda crescente por soluções personalizadas.

A partir dos materiais fornecidos pela empresa estudada neste trabalho, foi possível entender as etapas de produção das salas seguras. O processo começa com o corte de chapas em peças menores, que serão utilizadas para formar as camadas que compõem as paredes, o piso e o teto das salas. Além disso, as barras de metal são cortadas em perfis menores, nos quais essas peças são encaixadas para garantir a fixação das diferentes camadas de material.

O processo de corte de chapas e barras apresenta desafios significativos para os planejadores, devido às diversas configurações possíveis para se obter as peças menores exigidas por cada projeto. No caso das chapas, o planejamento de cortes envolve decisões sobre a orientação, posição e quantidade de cortes necessários, o que aumenta a complexidade do problema. Esse cenário é característico do problema de corte de estoque (*cutting stock problem*), que visa encontrar as melhores configurações de corte para minimizar o desperdício de matéria-prima e, assim, reduzir os custos de produção. A aplicação dessa abordagem ao corte de chapas e barras permite otimizar a alocação do material, garantindo maior eficiência no uso dos recursos.

O problema de corte tem sido amplamente discutido na literatura, sendo abordado sob diferentes perspectivas quanto à sua complexidade, às restrições envolvidas e às estratégias de resolução. Dyckhoff (1990) apresenta uma classificação das variantes do problema de corte conforme as dimensões dos objetos a serem processados. Cherri et al. (2014) e Martin (2019) destacam a importância da decisão sobre como os objetos devem ser divididos para atender à demanda, considerando fatores operacionais. Mais recentemente, Assis e Rangel (2022) discutem a viabilidade de padrões de corte no contexto bidimensional, ressaltando a necessidade de planos adequados para a alocação eficiente dos itens. Este trabalho concentra-se nos problemas de corte unidimensionais e bidimensionais, os quais serão detalhados ao longo da revisão bibliográfica.

Desta forma, o foco deste trabalho é o estudo do problema de corte unidimensional e bidimensional em uma empresa do setor de infraestrutura para *data centers*, situada na cidade de Sorocaba, SP. A unidade estudada da empresa é voltada para a produção de salas seguras e salas cofres, usando estruturas modulares que podem ser combinadas e adaptadas de acordo com a necessidade de cada cliente. Um dos desafios apresentados é a dificuldade de definir métodos adequados para o corte de barras nos perfis demandados (corte unidimensional) e para o corte das chapas (bidimensional), pois a quantidade e as dimensões das peças a serem cortadas variam bastante de um período para outro, ou seja, uma produção por projeto. Atualmente, o planejamento dos cortes na empresa, tanto de barras quanto de chapas, é baseado na experiência dos próprios operadores pelo qual tem gerado desperdícios. Uma premissa, a partir de observações iniciais dos processos de produção e de planejamento, é que um planejamento mais adequado da etapa de corte possa reduzir esses desperdícios. No contexto atual, as perdas em barras variam entre 6 e 12 %, dependendo das características estruturais de cada projeto. Já as perdas em chapas ainda não foram sequer mensuradas, mas os gestores estimam que são

maiores, assim como é maior o desafio de encontrar um plano adequado para cortar as chapas nas diferentes medidas necessárias em cada projeto.

Em particular no problema de corte de chapas, um desafio adicional é que algumas peças têm dimensões maiores que as chapas em estoque. Assim, é preciso juntar peças para formar os módulos usados para montar as salas. Como são necessárias várias camadas de peças de diferentes materiais para formar a estrutura dos módulos, é necessário que as uniões das peças não sejam sobrepostas, de forma a evitar fragilidades técnicas e comprometer aspectos de segurança, como em caso de incêndio, por exemplo, permitir a propagação do fogo.

O objetivo principal deste estudo é analisar o problema de corte de materiais, com foco específico no problema de corte de estoque multiperíodo, tanto na sua forma unidimensional, referente ao corte de barras para gerar perfis menores, quanto na bidimensional, aplicada ao corte de chapas para obtenção de peças com dimensões específicas. A partir das características dos processos de corte e produção da empresa em estudo, buscou-se identificar, na literatura, modelos e métodos de otimização que possam ser aplicados, com ou sem adaptações, para oferecer soluções eficazes a esses desafios operacionais.

O foco do trabalho está em encontrar abordagens que permitam minimizar a quantidade de matéria-prima utilizada ao longo do tempo, considerando as demandas de múltiplos períodos e as condições operacionais da empresa. Para isso, foi adotada uma abordagem baseada em modelos matemáticos multiobjetivos, utilizando a técnica de programação por metas (*Goal Programming*), amplamente reconhecida por sua capacidade de lidar com objetivos conflitantes. No contexto deste estudo, essa metodologia permite tratar de maneira simultânea metas como a redução do desperdício de material, o controle do uso de matéria-prima e o atendimento às demandas produtivas em diferentes períodos. As variáveis de decisão podem ser ajustadas para refletir essas prioridades, penalizando os desvios conforme a importância atribuída a cada objetivo (Sundaram, 1978).

Os objetivos secundários do trabalho são:

- Caracterização do processo de corte para a produção de salas de segurança, buscando sua classificação de acordo com diversos aspectos da literatura de planejamento da produção em problemas de corte;
- Estudar a literatura sobre problemas de corte unidimensional e corte bidimensional, em específico quando envolvem a produção de lotes para atender demandas por diferentes produtos;

- Investigar a adequação de modelos e métodos da literatura para o problema de corte de peças para a montagem de salas de segurança, buscando identificar novos desafios e oportunidades de pesquisa nesta área.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROBLEMA DE CORTE

O problema de corte de objetos é amplamente estudado na literatura. De acordo com Cherri et al. (2014), o problema de corte de materiais envolve a otimização do corte de um conjunto de peças disponíveis em estoque (objetos) para produzir peças menores (itens) em quantidades especificadas ou demandadas. Segundo Martin (2019), a eficiência do processo de corte está diretamente ligada à tomada de decisões sobre como os objetos devem ser divididos, considerando fatores como a demanda dos consumidores e as restrições operacionais, o que torna esse processo decisório fundamental para o sucesso da operação.

O problema de corte pode variar conforme restrições como o tipo de material, as características dos processos produtivos e os objetivos definidos, que podem incluir a minimização das perdas de material, a redução dos custos de produção ou a maximização do lucro. Uma das classificações mais relevantes foi proposta por Dyckhoff (1990), que categoriza esse problema segundo critérios como a dimensionalidade — unidimensional, bidimensional, tridimensional ou N-dimensional (com $N > 3$) —, o tipo de itens a serem cortados e a obrigatoriedade de uso dos objetos.

Com base nessa proposta, Wäscher et al. (2007) realizaram uma revisão e expansão da tipologia de Dyckhoff, identificando cinco subproblemas fundamentais para o problema de corte: a seleção de grandes objetos, a seleção de itens pequenos, a formação de grupos, a alocação desses grupos aos objetos e o layout final dos itens, todos resolvidos simultaneamente para alcançar uma solução ótima. Essa estrutura refinada evidencia que a complexidade do problema está tanto na sua geometria quanto nas decisões combinatórias envolvidas. Neste trabalho, o foco será nos problemas unidimensionais e bidimensionais, correspondentes, respectivamente, ao corte de barras e de chapas.

O problema de corte unidimensional representa uma das formas mais simples dos problemas de corte, sendo caracterizado pela necessidade de cortar objetos, como barras ou bobinas, ao longo de seu comprimento, a fim de obter itens menores com dimensões previamente definidas. Para Cherri e Vianna (2010), o problema de corte unidimensional pode ser interpretado como uma variação do problema da mochila, uma vez que envolve a escolha de itens a serem inseridos em um espaço limitado de forma a maximizar sua utilidade, respeitando a capacidade disponível. Embora simplificado, esse modelo fornece a base para a

formulação de problemas mais complexos e está presente como subestrutura na resolução de versões mais completas do problema de corte.

Ao contrário do corte unidimensional, o problema bidimensional exige a consideração de aspectos geométricos adicionais, como a orientação das peças e o melhor aproveitamento da área disponível. Como descrito por Assis e Rangel (2022), o problema de corte bidimensional se torna mais desafiador devido à necessidade de otimizar a distribuição das peças ao longo da superfície, levando em consideração não apenas a quantidade de material utilizado, mas também a posição e a orientação das peças para minimizar o desperdício e melhorar a eficiência. Esse tipo de problema é particularmente comum em indústrias como móveis, metalurgia e papel, onde o corte de grandes chapas ou painéis precisa ser otimizado para maximizar o aproveitamento do material.

2.2 PROBLEMA DE CORTE DE ESTOQUE

Quando se introduz a necessidade de atender a uma demanda conhecida para cada tipo de item, o problema torna-se mais abrangente, configurando o chamado problema de corte de estoque (*cutting stock problem*). Para o problema de corte de estoque unidimensional, considera-se um número suficientemente grande de objetos disponíveis em estoque (como barras ou bobinas) de comprimento L , e um conjunto de pedidos de itens menores, com demandas conhecidas d_i , para $i = 1, \dots, m$, cujos comprimentos l_i respeitam a restrição $l_i \leq L$ (POLDI; ARENALES, 2006). Diferentemente do problema da mochila, o desafio aqui não está apenas na escolha dos itens, mas em definir quantos objetos devem ser cortados e como esses cortes devem ser feitos, de forma a atender toda a demanda com o mínimo desperdício ou custo.

A combinação desses itens menores α_i alocados a uma determinada barra de comprimento L , é chamado de padrão de corte. Segundo Poldi e Arenales (2006) é possível representar a quantidade de itens produzidos por meio de um vetor m -dimensional:

$$\mathbf{a} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \quad ,$$

sendo que α_i corresponde à quantidade de itens do tipo i no padrão de corte \mathbf{a} . Esse vetor \mathbf{a} é vinculado a um padrão de corte se e somente se satisfizer a seguinte restrição:

$$l_1\alpha_1 + l_2\alpha_2 + \dots + l_m\alpha_m \leq L$$

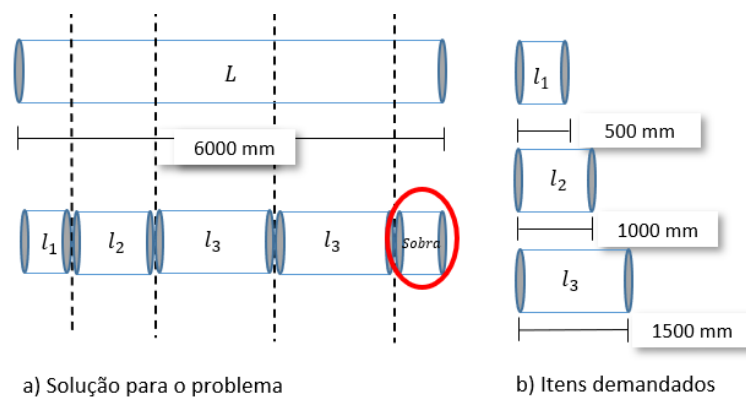
Onde $0 \leq \alpha_i \leq d_i$, para todo $i = 1, \dots, m$ e $\alpha_i \in \mathbb{Z}^+$.

Neste trabalho, para fins de notação e alinhamento com a modelagem adotada – conforme será apresentado adiante –, os itens serão representados por j ao invés de i , conforme comumente utilizado na literatura.

Além disso, durante o processo de corte, geralmente há uma perda inevitável decorrente das características do equipamento utilizado, como a largura da serra de corte, também chamado de *kerf*. Segundo França (2023), quando o *kerf* é parametrizado de forma inadequada, pode inviabilizar o plano de corte e gerar erros dimensionais nas peças produzidas. Assim uma solução é definida por Cherri e Vianna (2010), somando-se o valor da largura da serra σ ao comprimento de cada item, ou seja, cada item passa a ser tratado como tendo comprimento $l_i + \sigma$. No presente trabalho, considerou-se uma perda de 5 mm devido à largura da serra, aplicada apenas no corte unidimensional.

Para ilustrar melhor o problema de corte de estoque unidimensional, segue-se um exemplo prático (sem perda pelo corte da serra) : considera-se uma barra de comprimento $L = 6000$ mm e um conjunto de 3 itens i com comprimentos $l_1 = 500$ mm, $l_2 = 1000$ mm e $l_3 = 1500$ mm, como ilustrado na Figura 1. O objetivo é alocar esses itens na barra de forma que o comprimento total ocupado pelos itens não ultrapasse o comprimento da barra disponível, respeitando as dimensões de cada objeto.

Figura 1 – Corte de barras.



Fonte: Autor, 2025.

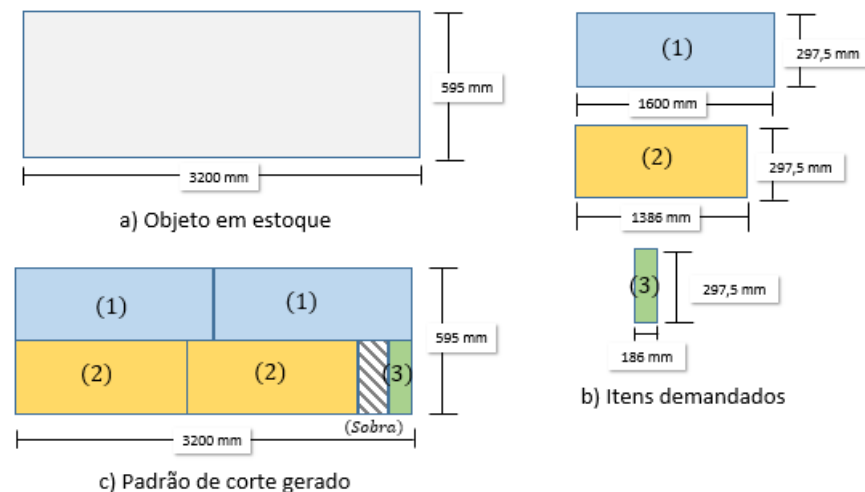
No exemplo da Figura 1, o padrão de corte gerado atende à demanda sem ultrapassar o limite da barra, sendo $a = (1, 1, 2)$ e que ainda, circulado em vermelho, gera uma sobra de 500 mm. No entanto, em contextos produtivos mais realistas, em que a produção ocorre ao longo de vários períodos, sobras como essa podem ser armazenadas e reaproveitadas futuramente — especialmente quando coincidem com as dimensões de itens demandados em outros períodos.

Nesse cenário, surge o problema de corte de estoque multiperíodo, que estende a formulação tradicional ao considerar múltiplos períodos de planejamento, como dias, semanas ou turnos, com demandas e estoques específicos em cada período. Segundo Poldi e Arenales (2010), essa abordagem visa definir, para cada período, como os objetos disponíveis devem ser cortados a fim de atender às demandas previstas, aproveitando de forma eficiente os recursos disponíveis — inclusive sobras remanescentes —, e minimizando tanto as perdas de material quanto os custos de armazenamento de objetos e itens ao longo do tempo.

Assim como no problema de corte de estoque unidimensional, o problema de corte de estoque bidimensional também busca minimizar o número de objetos utilizados para atender à demanda dos itens menores, porém respeitando as restrições de tamanho em duas dimensões: comprimento (L) e largura (W) (VIANA; POLDI, 2005). Para esse problema, também é utilizado a solução por meio de padrões de corte e é possível representar a quantidade de itens produzidos por meio de um vetor m-dimensional. Porém, não apenas as dimensões dos itens devem ser respeitadas, mas também outros fatores, como a disposição no objeto, evitando sobreposições e considerando a geometria de cada item.

Um exemplo de padrão de corte bidimensional é apresentado na Figura 2. Suponha-se a demanda de três tipos de peças j , sendo necessárias 2 unidades do tipo 1, 2 do tipo 2 e 1 do tipo 1.

Figura 2 – Corte de chapas.



Fonte: Autor, 2025.

No exemplo da Figura 2, o padrão de corte gerado atende à demanda sem ultrapassar as dimensões da chapa, sendo $a = (2, 2, 1)$ e que ainda, gera uma sobra de 242 X 595 mm.

2.2.1 Geração de Padrões de Corte

A definição de padrões de corte é uma etapa fundamental na resolução de problemas de corte, pois determina como os itens menores serão dispostos dentro dos objetos maiores, buscando o melhor aproveitamento do material disponível. No caso do corte unidimensional, essa geração ocorre de forma mais intuitiva e direta, já que os itens são dispostos linearmente ao longo do comprimento da barra. Cada combinação viável de itens que respeite a limitação do comprimento total resulta automaticamente em um padrão de corte. Apesar de ser menos complexo que em problemas de outras dimensões, o corte unidimensional ainda exige uma geração eficiente e estruturada de padrões, especialmente quando há grande variedade de itens e demandas elevadas, para garantir soluções otimizadas e viáveis do ponto de vista produtivo.

Já para o problema de corte bidimensional, a geração de padrões se torna mais complexa, exigindo a consideração de restrições geométricas e operacionais adicionais, que variam conforme o contexto de cada indústria. Segundo Assis e Rangel (2022), fatores como a geometria das peças, o posicionamento sobre a chapa e a possibilidade de rotação devem ser levados em conta na construção dos padrões viáveis. Essa complexidade decorre da necessidade de explorar eficientemente duas dimensões (comprimento e largura), o que amplia o espaço de busca por soluções e torna o problema mais desafiador do ponto de vista computacional.

No caso da empresa estudada, todos os cortes realizados são do tipo guilhotinado ortogonal, o que impõe restrições adicionais à geração dos padrões. Segundo Andrade, Birgin e Morabito (2016), esse tipo de corte é caracterizado por ser feito ao longo de toda a extensão da peça, de uma extremidade à outra, e sempre paralelo à borda remanescente da chapa.

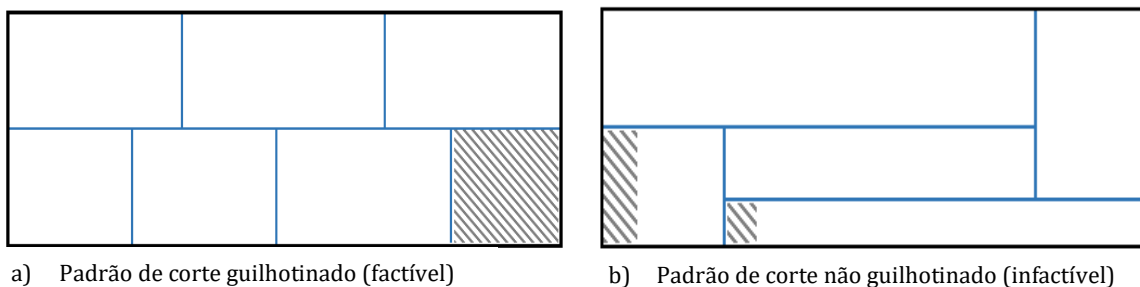
Vale ressaltar que, para a realização dos cortes, a chapa (objeto) pode ser girada em 90° , permitindo cortes em diferentes direções. Cada rotação é considerada, na literatura, como um "estágio". Segundo Martin (2019), o número de estágios de um padrão de corte está associado ao número de rotações de 90° realizadas pela serra. Embora o autor relacione os estágios à rotação da serra, o conceito pode ser igualmente aplicado à rotação da chapa (objeto), como ocorre no presente trabalho, em conformidade com os procedimentos adotados pela empresa. Assim, quando não há limite para o número de estágios guilhotinados, o padrão é denominado não estagiado, o que significa que ele é infinitamente estagiado. No caso estudado, não há limite para o número de rotações das chapas, aumentando a diversidade dos padrões de corte.

Além disso, o processo de corte adotado neste trabalho considera um modelo irrestrito, no qual um mesmo item pode ser retirado múltiplas vezes de um único objeto, sem qualquer

limitação quanto à sua repetição dentro do padrão de corte. Essa abordagem permite explorar plenamente a capacidade do objeto, aumentando o número de padrões viáveis e favorecendo um melhor aproveitamento do material. Por outro lado, segundo Cherri e Vianna (2010), há situações práticas em que se impõe um limite à frequência de repetição de certos itens dentro de um padrão. Nestes casos, denominados de restritos, a quantidade máxima de vezes que um item pode ser incluído no padrão é previamente definida, limitando a combinação possível de cortes. A escolha entre o modelo restrito ou irrestrito depende diretamente das condições operacionais e das exigências do processo produtivo. Um outro ponto importante é que o material utilizado pela empresa para corte não possui limitações de defeitos ou imperfeições,

Essas restrições são essenciais para a definição dos padrões de corte, pois todas as peças retiradas das chapas devem seguir essas diretrizes para garantir a viabilidade do processo. A Figura 3a mostra um corte que é viável dentro das restrições dos processos da empresa, ou seja, um corte guilhotinado. Em contrapartida, a Figura 3b apresenta um exemplo de corte inviável, devido às limitações do processo utilizado pela empresa, note que não existe corte que atravesse a chapa, por onde o operador possa começar e cortar de “borda a borda”, portanto, este é um arranjo impossível.

Figura 3 - Exemplo de corte guilhotinado e não guilhotinado.



Fonte: Autor, 2025.

A geração de padrões de corte que respeitem simultaneamente todas essas restrições — como cortes exclusivamente guilhotinados, ausência de defeitos no material, possibilidade de múltiplas rotações da chapa e repetição ilimitada de itens — representa um desafio significativo do ponto de vista computacional. À medida que a quantidade de itens e a complexidade das combinações aumentam, torna-se inviável, na prática, recorrer a métodos exatos para encontrar a solução ótima. Nesse cenário, métodos heurísticos e meta-heurísticos destacam-se como ferramentas eficazes para a obtenção de boas soluções dentro de prazos computacionais viáveis. Conforme destacado por Velasco, Junior e Neto (2008), tais métodos constituem uma

alternativa válida, especialmente por buscarem soluções de qualidade compatíveis com as exigências operacionais dos setores produtivos.

Entre os métodos mais utilizados para lidar com essa complexidade, destaca-se a meta-heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), que combina elementos de busca construtiva gulosa com mecanismos de aleatoriedade e adaptação. Essa abordagem vem sendo amplamente aplicada em problemas de otimização combinatória, justamente por sua capacidade de produzir boas soluções em tempos computacionais reduzidos, sem necessariamente garantir a optimalidade. Conforme apresentado por Resende e Ribeiro (2003), o GRASP se estrutura em duas fases principais: uma construção gulosa aleatorizada e uma busca local, sendo frequentemente aprimorado por técnicas como religamento de caminhos e estratégias híbridas.

No contexto do problema de corte bidimensional, essa meta-heurística também tem demonstrado resultados promissores. Segundo MirHassani e Bashirzadeh (2015), a GRASP foi eficaz na resolução do problema de corte bidimensional irregular (2DICSP), alcançando soluções de alta qualidade e tempos computacionais competitivos mesmo em instâncias com grande variedade de peças e formatos geométricos complexos. A flexibilidade da GRASP em adaptar-se a diferentes configurações de entrada e restrições operacionais confirma seu potencial como uma ferramenta robusta para problemas reais de corte em larga escala. Apesar de a literatura abordar também o problema de corte bidimensional com formas irregulares — como peças curvas ou polígonos não convexos —, o presente trabalho se restringe ao corte bidimensional regular, em que tanto as chapas quanto as peças possuem formato retangular. Essa definição permite uma modelagem mais direta e está em conformidade com os padrões operacionais da empresa estudada.

Diante do exposto, observa-se que a definição de padrões de corte viáveis, respeitando as restrições impostas pelo processo produtivo — como cortes exclusivamente guilhotinados, ausência de defeitos no material, possibilidade de rotação das chapas e irrestrrição na repetição de itens —, configura um problema de elevada complexidade combinatória. Nesse cenário, a adoção da meta-heurística GRASP mostra-se particularmente adequada, pois equilibra a qualidade das soluções com a viabilidade computacional exigida pelas aplicações industriais. Ao focar no problema de corte bidimensional regular, este trabalho busca explorar ao máximo as características do processo de corte da empresa estudada, permitindo o desenvolvimento de uma abordagem mais direcionada, eficiente e alinhada com a realidade operacional.

2.3 MÉTODO PROGRAMAÇÃO POR METAS (GOAL PROGRAMMING)

Em muitos problemas de otimização, especialmente em contextos industriais como o corte de materiais, surgem múltiplos objetivos que frequentemente entram em conflito. De acordo com Sundaram (1978), nos modelos matemáticos clássicos aplicados a processos industriais, como a usinagem, a otimização costuma focar em um único critério — como maximizar a produção, minimizar o custo ou aumentar o lucro —, desconsiderando o fato de que, na prática, esses objetivos frequentemente entram em conflito. Essa limitação torna-se ainda mais evidente quando os objetivos possuem unidades de medida distintas, como tempo, custo e volume de produção, o que dificulta comparações diretas. Isso evidencia a complexidade dos cenários reais, onde múltiplos objetivos precisam ser equilibrados simultaneamente por meio de abordagens específicas de otimização multiobjetivo. Segundo Marler e Arora (2004), a programação por metas, conhecido também como *goal programming*, é uma extensão da programação linear que lida com problemas de decisão envolvendo múltiplos objetivos conflitantes e surge como uma solução mais adequada, permitindo que múltiplos objetivos sejam tratados simultaneamente por meio da inclusão de variáveis de desvio (positivas e negativas) que representam o quanto cada meta está sendo superada ou não atingida. No entanto, neste estudo, optou-se por considerar apenas uma variável de desvio positiva. Isso se deve ao fato de que uma variável de desvio negativa não seria apropriada, pois ela indicaria que o valor real seria menor que a meta estabelecida, o que é impossível dentro do contexto do problema.

Em modelos lineares com múltiplos objetivos de interesse, o objetivo geral é minimizar o somatório das variáveis de desvio y_i que representam o quanto cada função objetivo $f_i(x)$ se distancia de sua respectiva meta m_i . Para isso, cada função é vinculada à sua meta por meio de uma variável de folga y_i permitindo mensurar esse distanciamento. Tem-se, então, uma estrutura de modelagem baseada em metas, onde a minimização conjunta desses desvios busca atender, da melhor forma possível, os múltiplos critérios estabelecidos.

Portanto, o objetivo é minimizar o somatório de y_i , tem-se então:

$$\min z = \sum_i y_i$$

s. a:

$$f_i(x) + y_i = m_i \quad \forall_i = 1, \dots, k$$

No contexto da otimização do corte de materiais, há múltiplos critérios que precisam ser considerados simultaneamente, como minimizar o desperdício de material e minimizar o número de peças em estoque. Esses objetivos frequentemente entram em conflito, pois a redução do desperdício pode gerar sobras de materiais que não atendem à demanda, enquanto a tentativa de atender exatamente à demanda pode resultar em um aumento no desperdício. A programação por metas é uma ferramenta eficiente para lidar com esses conflitos, permitindo que diferentes objetivos sejam equilibrados. Ao definir metas específicas para cada critério (como redução de desperdício e minimização de estoques), a programação por metas permite otimizar a produção ao minimizar os desvios em relação a essas metas, proporcionando uma solução mais realista e flexível.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema de corte de materiais é uma classe bem estabelecida de problemas combinatórios que busca otimizar o uso de matéria-prima em processos industriais, comumente categorizado como Problema de Corte e Empacotamento (*Cutting and Packing Problem – C&P*). Dentro dessa categoria, o Problema de Corte de Estoque (*Cutting Stock Problem – CSP*), tanto unidimensional quanto bidimensional, é amplamente estudado na literatura. A presente revisão enfoca um viés aplicado, com ênfase em estudos que propõem modelos matemáticos, heurísticas e meta-heurísticas, e estudos de caso reais, com destaque para abordagens voltadas à redução de perdas e ao aproveitamento eficiente do material em diferentes setores industriais.

3.1 PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL

O Problema de Corte Unidimensional trata da divisão de objetos lineares, como barras, tubos ou bobinas, em segmentos menores, de forma a atender a demandas específicas, minimizando o desperdício de material ou o número de objetos utilizados. Esse problema é frequentemente formulado como um Problema de Programação Inteira (PPI), conforme proposto por Gilmore e Gomory (1961, 1963), cuja abordagem de Programação Linear Inteira tornou-se um marco fundamental no estudo do Problema de Corte de Estoque.

Em 1990, Stadtler abordou o problema em um contexto industrial, focando na produção de perfis de alumínio. O objetivo era calcular o número mínimo de perfis de comprimento padrão necessários para atender a uma demanda de cortes, minimizando o desperdício de material. Inicialmente, foi aplicada a heurística *First Fit Decreasing* (FFD), técnica comum

para problemas de corte unidimensional, onde os itens são ordenados de forma decrescente e alocados no primeiro perfil disponível que comporte o item. Embora eficiente em muitos casos, a heurística FFD não garantiu soluções ideais em todas as situações, levando o fabricante a buscar uma alternativa mais robusta. A solução encontrada foi uma abordagem baseada em relaxação de Programação Linear (LP), combinada com um procedimento de ramificação em uma única passagem.

O método proposto por Stadtler se mostrou eficaz. O autor comparou o desempenho dessa nova heurística com a FFD por meio de diversos casos de estudo, validando os resultados com 66 problemas reais de corte fornecidos pelo fabricante. A pesquisa contribuiu de forma significativa para a área ao demonstrar que, mesmo em contextos industriais com máquinas de corte variadas e precisão limitada, abordagens matemáticas mais robustas podem fornecer resultados superiores, especialmente no que tange à confiabilidade e à otimização do uso do material.

A pesquisa de Abuabara e Morabito (2008) foca no Problema de Corte Unidimensional de Tubos Metálicos na indústria aeronáutica agrícola, com o objetivo de otimizar o processo de corte de tubos estruturais metálicos utilizados na fabricação de aeronaves leves. Os autores propuseram dois modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para minimizar as perdas de material, considerando ainda a possibilidade de gerar retalhos – sobras de material com tamanho suficiente para reaproveitamento em cortes futuros. Esses modelos foram testados e validados com dados reais da Neiva/Embraer, que fabrica o avião agrícola Ipanema. Os resultados obtidos foram comparados com soluções de uma heurística residual de arredondamento guloso da literatura, além das soluções utilizadas pela própria empresa.

No estudo de Matsumoto et al. (2010), a pesquisa foca na otimização do corte unidimensional na indústria de tubos de papel, visando reduzir desperdícios e melhorar a eficiência do processo. Para atingir esses objetivos, os autores utilizaram duas abordagens heurísticas: *First Fit Decreasing* (FFD) e Busca Tabu. A principal vantagem da Busca Tabu é sua capacidade de evitar a repetição de soluções previamente visitadas, superando a limitação da busca local clássica, que pode facilmente convergir para soluções subótimas. Essa abordagem é especialmente útil no Problema de Corte de Tubos de Papel - *Paper tube cutting stock problem* (PTCSP) -, pois minimiza interrupções no processo de corte, como aquelas causadas pela troca frequente de rolos de papel. Além disso, a técnica contribui para reduzir o número de pilhas abertas de peças, um ponto crítico na indústria de tubos de papel, onde o espaço disponível para armazenar as peças cortadas é limitado.

Com o avanço dessas abordagens, Poldi e Arenales (2010) propõem uma versão mais sofisticada do problema de corte de estoque: o problema de corte de estoque multiperíodo. Essa versão leva em conta o horizonte de planejamento finito, permitindo antecipar ou adiar a produção de itens ao longo de vários períodos, dependendo da demanda. O modelo desenvolvido por esses autores oferece flexibilidade na produção de itens, possibilitando que itens com uma demanda menor em um determinado período sejam produzidos antecipadamente, se essa estratégia reduzir as perdas de material no processo. Ao integrar o problema de corte com decisões relacionadas ao planejamento de produção, como a quantidade de objetos a serem adquiridos ou fabricados, o modelo busca minimizar as perdas de material, os custos de estocagem e os custos associados à estocagem de objetos.

Poldi e Arenales (2010) propõem um modelo matemático para o problema de corte de estoque unidimensional multiperíodo, considerando múltiplos períodos e diversos tipos de objetos com comprimentos diferentes. A função objetivo do modelo visa minimizar os custos totais relacionados aos cortes, à estocagem de itens e à estocagem de objetos. A antecipação de produção pode gerar custos adicionais de estocagem, mas também resulta em uma melhor combinação dos itens ao longo dos períodos, diminuindo o desperdício de material. Além disso, o modelo aborda as restrições de capacidade tanto dos itens em estoque quanto dos períodos de produção, tornando-o aplicável a cenários reais de produção.

Essa abordagem avançada trouxe uma nova perspectiva ao problema de corte de estoque, permitindo resolver problemas em grande escala com maior eficiência, equilibrando melhor os custos de produção e as necessidades de estoque, e oferecendo uma estratégia robusta para otimização de recursos em contextos industriais complexos.

3.2 PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL

No problema de corte bidimensional, que lida com a otimização do uso de materiais em duas dimensões, o foco está na gestão da distribuição e aproveitamento de áreas de materiais, como chapas ou placas. As contribuições relevantes incluem:

Viana e Poldi (2005) focaram no problema de corte bidimensional de esquadrias metálicas, com o objetivo de minimizar o desperdício e maximizar a utilização do material, especialmente em materiais rígidos como o metal. Para isso, modelaram o problema usando Programação Linear Inteira (PLI), formulando-o como um problema de bin packing, onde o desafio era otimizar a disposição das peças em chapas de formato fixo. A metodologia visava

reduzir ao máximo o desperdício de material, respeitando as restrições geométricas de forma e orientação das peças.

A solução proposta foi uma heurística baseada em busca local, que considerava a ordem de corte, além de permitir rotações e reflexões das peças para otimizar o uso da área disponível nas chapas. Também foi implementado um algoritmo First Fit Decreasing (FFD), para organizar as peças de acordo com suas dimensões, buscando minimizar o número de chapas utilizadas, um fator crítico para reduzir custos e melhorar a eficiência no corte.

Os resultados foram validados com dados reais de uma indústria de esquadrias metálicas de pequeno porte, demonstrando que a técnica proposta conseguiu reduzir significativamente o desperdício de material em comparação com métodos tradicionais. Essa abordagem mostrou-se particularmente eficaz em contextos industriais com baixa demanda e produtos personalizados, evidenciando a aplicabilidade de estratégias de otimização matemática mesmo em ambientes menos padronizados e com demandas variadas.

Rangel e Figueiredo (2008) investigaram o problema de corte bidimensional na indústria moveleira, com foco nas empresas de pequeno e médio porte localizadas principalmente no Pólo de Votuporanga, em São Paulo. Essas empresas enfrentam grandes desafios devido à heterogeneidade do material (principalmente madeira) e à diversidade de peças necessárias para a produção de móveis. O estudo abordou como as dificuldades operacionais, como a falta de um sistema computacional eficiente, podem impactar negativamente o aproveitamento da matéria-prima e a produtividade.

A pesquisa dos autores detalhou o processo de produção de móveis de madeira, que envolve diversas etapas e equipamentos, desde o corte primário da matéria-prima até a montagem final. Uma das principais dificuldades observadas foi a elaboração manual dos padrões de corte, que muitas vezes não consideravam variações nas dimensões dos objetos disponíveis no estoque. Para resolver esse problema, Rangel e Figueiredo propuseram um algoritmo sistematizado para a construção de padrões de corte que otimizasse o uso do material e reduzisse os desperdícios, considerando as características específicas da indústria moveleira de pequeno porte.

Além disso, o estudo propôs uma abordagem de análise computacional, comparando o novo algoritmo com métodos tradicionais de corte, como o método de Gilmore e Gomory (1961). A aplicação dessa abordagem foi validada com dados reais fornecidos pela Fábrica V, uma empresa representativa do Pólo de Votuporanga. O algoritmo desenvolvido permitiu um

melhor aproveitamento do material, ajudando a reduzir os desperdícios de madeira e melhorar a eficiência da produção em um setor marcado pela diversidade de processos e recursos limitados. As soluções propostas têm grande aplicabilidade para outras empresas do setor moveleiro que buscam aumentar sua produtividade sem grandes investimentos em novos equipamentos.

Alem e Morabito (2012) desenvolveram uma abordagem de otimização robusta para resolver o problema combinado de planejamento de produção e corte de estoque (CLC) sob incerteza, com foco em ambientes industriais caracterizados pela variabilidade dos dados. A metodologia proposta utiliza a otimização robusta para lidar com incertezas em parâmetros críticos, como demanda, custos, e recursos disponíveis, que são variáveis e muitas vezes imprevisíveis. Ao contrário das abordagens tradicionais de programação estocástica, a otimização robusta não requer um conhecimento preciso das distribuições de probabilidade, o que facilita sua aplicação em contextos industriais reais, onde a previsão de variáveis pode ser difícil ou impossível.

No modelo de otimização robusta proposto, os parâmetros de incerteza são representados por intervalos de valores possíveis, o que permite que o modelo considere variações tanto nos custos quanto nas demandas sem exigir um número grande de cenários possíveis, como nas abordagens estocásticas convencionais. Isso reduz significativamente a complexidade computacional do problema, permitindo soluções mais rápidas e práticas. A metodologia, portanto, busca um equilíbrio entre robustez — garantindo que as decisões sejam eficazes mesmo em face da incerteza — e eficiência computacional, algo essencial para ambientes industriais com restrições de tempo e recursos.

3.3 CONTRIBUIÇÕES DA REVISÃO

A literatura sobre problemas de corte unidimensional e bidimensional apresenta uma série de abordagens que buscam otimizar o uso de materiais e reduzir desperdícios em diferentes contextos industriais. As técnicas de otimização discutidas nos estudos revisados, como as abordagens de Programação Linear Inteira (PLI) e heurísticas como o GRASP, tratam não só da maximização do aproveitamento material, mas também da precisão nos cortes. A adaptação dessas soluções ao contexto específico de cada indústria é crucial, permitindo a construção de modelos de otimização que não só aumentam a produtividade, mas também promovem a sustentabilidade dos processos produtivos.

Essa perspectiva de otimização é ainda mais fortalecida com os avanços mais recentes, como os propostos por Poldi e Arenales (2010), que introduzem o conceito de corte de estoque multiperíodo. Esse modelo considera não apenas as demandas de corte no presente, mas também as necessidades de futuros períodos de produção, permitindo uma melhor alocação de materiais ao longo do tempo. Com a introdução do horizonte de planejamento finito, torna-se possível antecipar ou adiar a produção de itens de acordo com a demanda futura, ajustando a produção para reduzir perdas de material. Essa flexibilidade se traduz em uma maior eficiência, pois possibilita uma gestão mais estratégica dos recursos, equilibrando os custos de produção com os de estocagem, especialmente em indústrias com ciclos de produção variados.

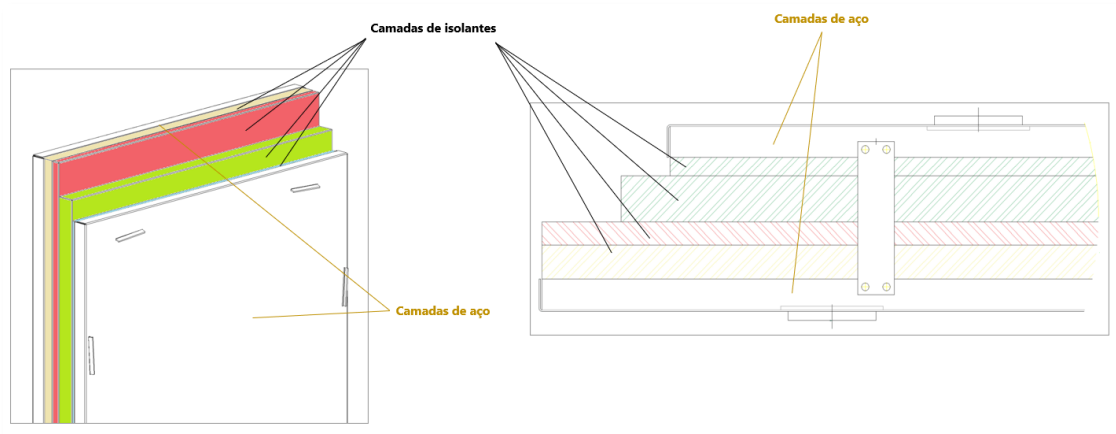
No contexto deste estudo, a implementação de uma abordagem multiperíodo será fundamental para melhorar o aproveitamento dos materiais ao longo do tempo. Ao integrar essas técnicas com a meta-heurística GRASP, será possível gerar padrões de corte bidimensionais mais otimizados, não só considerando a demanda atual, mas também antecipando necessidades futuras, ajustando a produção de forma a minimizar o desperdício material e os custos operacionais. Essa combinação de Programação Linear Inteira com técnicas heurísticas oferece uma solução prática e adaptada à realidade do setor, atendendo tanto às demandas de produção quanto às necessidades de otimização do uso de recursos.

4 O PROBLEMA NA EMPRESA ESTUDADA

Este trabalho é baseado no estudo de caso de uma empresa do setor de elaboração e execução de soluções modulares para *data centers*, com foco na otimização da disponibilidade e redução do custo total das instalações de armazenamento de dados. Como mencionado anteriormente, a fabricação das salas seguras e salas cofres utiliza módulos modulares, que proporcionam flexibilidade na montagem, adaptando-se aos espaços disponíveis nos clientes. Essa flexibilidade torna-se atrativa para as empresas, incentivando-as a armazenar suas informações em dispositivos de armazenamento seguro. Embora muitas dessas empresas optem por contar com *data centers* especializados, que atendem às rigorosas regulamentações de segurança e proteção de dados, a crescente demanda por ambientes de armazenamento físico seguro tem levado as organizações a considerar essas soluções para cumprir com as normas de conformidade, como a LGPD (Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais) no Brasil e o GDPR (Regulamento Geral de Proteção de Dados) na União Europeia.

Os módulos produzidos são compostos por camadas de aço e isolantes, como ilustra a Figura 4, unidos por cunhas que posteriormente são revestidas pelos perfis de arremate para compactar a união e melhorar a estética do produto.

Figura 4 - Exemplo da constituição de um módulo



Fonte: Imagem cedida pela empresa estudada.

Para a fabricação dos módulos utilizados nas salas seguras e salas cofres, são adotados processos industriais específicos que variam conforme o nível de proteção exigido em cada tipo de sala. A principal diferença entre uma sala segura e uma sala-cofre certificada está nas exigências construtivas e nos critérios normativos aplicáveis. As salas seguras seguem os requisitos da norma ABNT NBR 10636, enquanto as salas-cofre são projetadas e testadas segundo os critérios da norma ABNT NBR 15247, que estabelece padrões rigorosos de resistência a incêndios, impactos, calor e outros eventos extremos (MARSCHNER, 2022). Ambas podem compartilhar a mesma infraestrutura e subsistemas, como redes elétricas, climatização, cabeamento estruturado e automação (CFTV, controle de acesso, entre outros).

Para garantir essa resistência, a confecção dos módulos envolve etapas detalhadas e técnicas, como o corte de chapas de aço nas dimensões necessárias, o corte dos materiais isolantes e dos perfis de arremate, a dobra do aço para conformação das peças, além de processos de soldagem e montagem que garantem a vedação e a rigidez estrutural dos painéis. Essas etapas são realizadas de acordo com as especificações técnicas de cada projeto, garantindo que os módulos atendam aos requisitos de segurança física e funcionalidade esperados.

A produção dos módulos para salas seguras é organizada em etapas específicas, realizadas por setores distintos da empresa, como apresenta a Figura 5. Inicialmente, após o

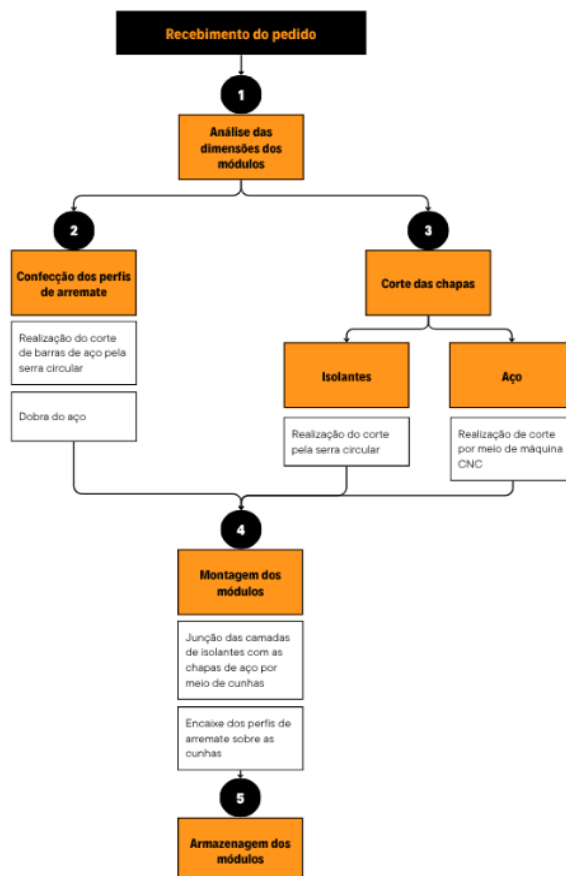
recebimento de um pedido, ocorre sua análise e o planejamento da produção, considerando a data prevista para entrega.

Em seguida, inicia-se o processo de corte bidimensional das chapas de aço que compõem as faces externas dos módulos — como ilustrado na Figura 4, nas áreas destacadas em amarelo. Paralelamente, realiza-se o corte bidimensional das camadas de material isolante (destacadas em rosa, verde e vermelho), que formam o núcleo interno dos módulos e são responsáveis por garantir o isolamento térmico, acústico e a segurança estrutural.

Simultaneamente, também ocorre o corte unidimensional das barras de aço utilizadas para a fabricação dos perfis de arremate. Esses perfis são projetados para se encaixar perfeitamente sobre cunhas metálicas, unindo de forma segura todas as camadas — tanto de aço quanto de isolante — e garantindo a integridade estrutural do módulo.

Em alguns casos pode haver o processo de soldagem tanto do aço quanto dos perfis de arremate, quando há a necessidade de se aproveitar sobras para geração de novas peças.

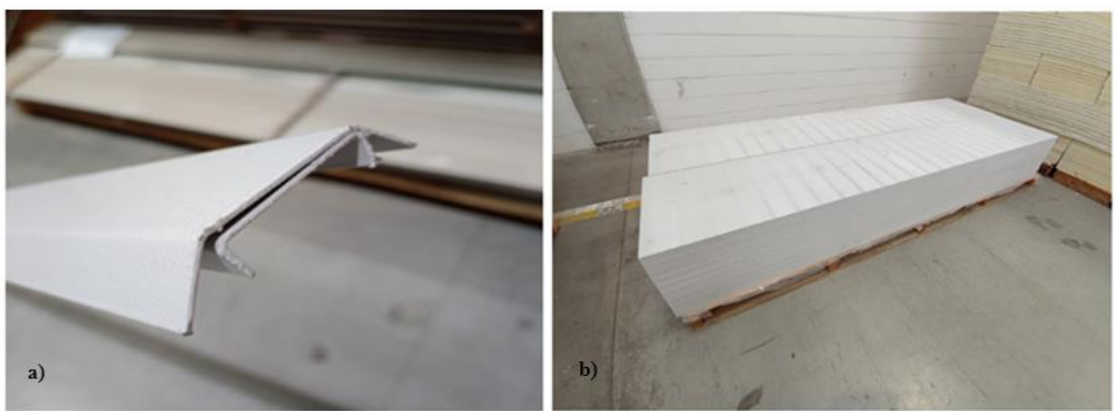
Figura 5 - Fluxo geral da produção de módulos.



Dentro dos processos de corte, o único que já possui uma certa otimização é o corte da chapa de aço, que é processado por uma máquina de corte CNC (Controle Numérico Computadorizado), permitindo que os cortes sejam realizados com precisão milimétrica, de acordo com o design e as especificações do projeto. Esse nível de automação não só aumenta a velocidade do processo, mas também reduz significativamente os desperdícios de material, uma vez que as máquinas podem calcular o melhor aproveitamento da chapa em tempo real, ajustando automaticamente os cortes conforme as necessidades. Contudo, os outros dois processos de corte, que são dos isolantes e barras, não têm um planejamento otimizado e ainda são realizados com base na experiência dos funcionários. Portanto, o corte de isolantes e de perfis de arremate se destacam como áreas com grande potencial de melhoria, podendo reduzir os custos, principalmente pelos gastos com materiais indesejados na forma de sobras geradas por cortes sem um planejamento adequado.

Desta forma, o foco deste trabalho são os processos de cortes bidimensionais e unidimensionais, especificamente o corte de chapas isolantes e de perfis de arremate, respectivamente. As chapas isolantes, ilustradas na Figura 6 (b), são muito importantes para a confecção dos módulos, pois elas irão dar toda a proteção necessária ao produto final, como isolamento térmico, acústico e elétrico. Já os perfis de arremate, ilustrados na Figura 6 (a), possuem função de acabamento (estética) para a junção dos módulos, uma vez que ficam sobre as cunhas que os unem, ajudando ainda na compactação das chapas.

Figura 6 - a) Perfis de arremate; b) Chapas isolantes utilizadas na confecção dos módulos.

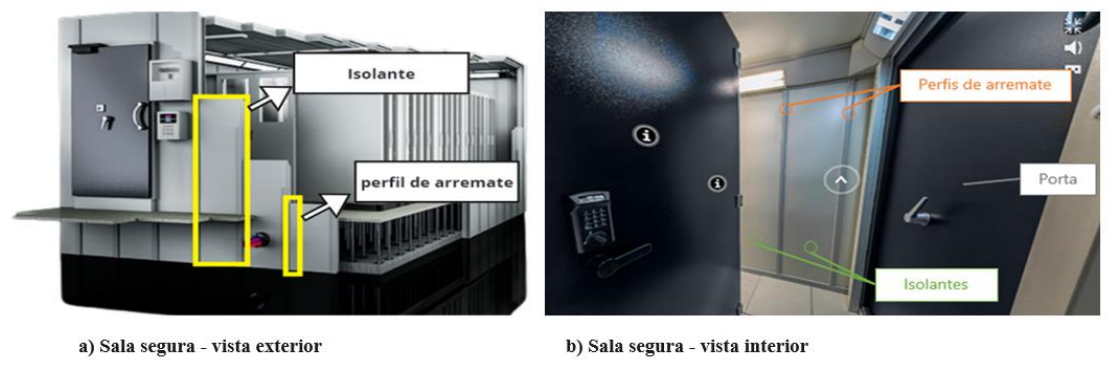


Fonte: Imagem cedida pela empresa estudada

Atualmente a empresa trabalha com diferentes produtos, que atendem diversos tipos de clientes, o que muda entre eles é basicamente o tamanho das peças e o tipo de material que é utilizado em sua produção, ainda que em todos seja necessário o uso de peças isolantes e perfis

de arremate. A Figura 7 destaca os isolantes e os perfis de arremate na parte exterior e interior de uma sala segura.

Figura 7 - Ilustração dos isolantes e perfis de arremates na estrutura de uma sala segura.



Fonte: Imagem cedida pela empresa estudada

As barras utilizadas para a produção dos perfis de arremate possuem um comprimento máximo de 6000 mm, valor padrão de mercado. Durante o processo de corte, ocorre uma perda de 5 mm devido à serra circular. A Figura 8 ilustra o setor em que o processo ocorre. Além disso, o processo pode gerar sobras, que só podem ser reaproveitadas caso tenham um comprimento superior a 1590 mm, que é a dimensão mínima exigida para novos pedidos.

Figura 8 - Setor de corte dos perfis de arremate.



Fonte: Imagem cedida pela empresa estudada

A respeito do corte bidimensional, as perdas de matéria podem ser maiores do que no corte unidimensional, pois há sobras em duas dimensões. Ressaltando que todos os cortes

realizados na empresa são guilhotinados, ou seja, o corte é efetuado até o final da chapa. Essa restrição é essencial para a definição dos padrões de corte, pois todas as peças retiradas das chapas devem seguir essas diretrizes para garantir a viabilidade do processo. A Figura 9 mostra o setor de corte das chapas isolantes, onde uma serra circular realiza a operação.

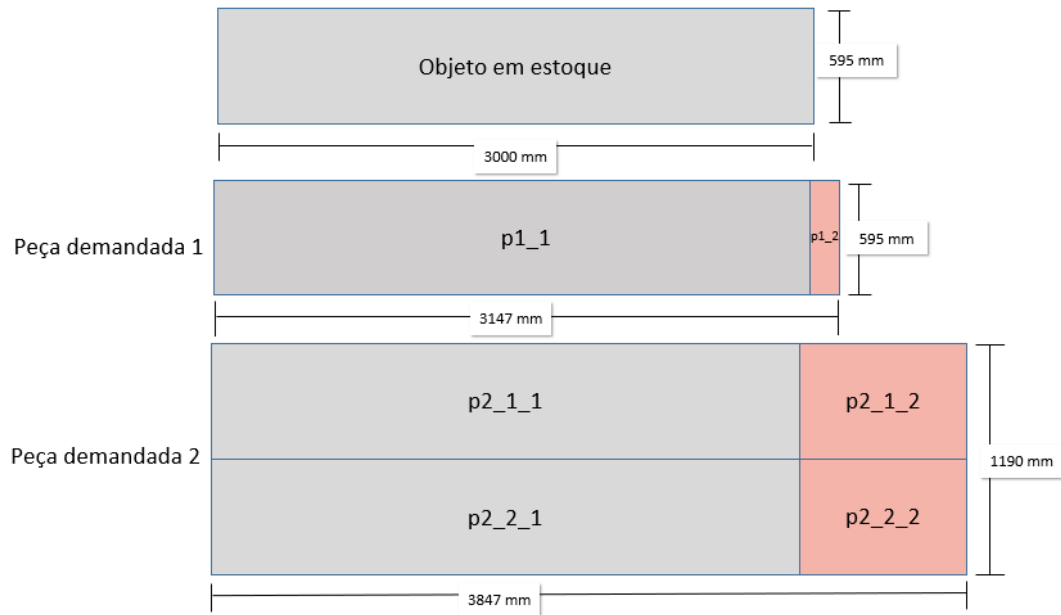
Figura 9 - Setor de corte das chapas isolantes.



Fonte: Imagem cedida pela empresa estudada

As chapas isolantes adquiridas pela empresa possuem 595 mm de largura e 3000 mm de comprimento. De acordo com a carteira de pedidos, algumas dimensões de peças são mais recorrentes, o que também é comum em outras aplicações do problema de corte. No entanto, observa-se que a empresa demanda peças com dimensões superiores às chapas disponíveis no mercado, como ilustrado na Figura 10. Atualmente, não há um método sistematizado ou otimizado para lidar com esse tipo de situação, o que pode comprometer tanto o aproveitamento do material quanto a eficiência do processo produtivo.

Figura 10 - Exemplos de peças maiores que o objeto disponível para corte.



Fonte: Imagem cedida pela empresa estudada

Como é possível observar na Figura 10, ambas as peças demandadas possuem dimensões superiores ao objeto disponível para corte, o que implica na necessidade de utilizar mais de um objeto para atender às dimensões completas das peças.

Por exemplo, na peça demandada 1 (p1), é possível utilizar um objeto inteiro (p1_1) e complementar com um corte adicional de outro objeto, com dimensões de 147 mm por 595 mm (p1_2), obtendo assim, por meio de uma junção, a peça final com 3147 mm por 595 mm. Já na peça demandada 2 (p2), as dimensões excedem os limites do objeto tanto em comprimento quanto em largura, de forma que são necessárias quatro partes distintas para compô-la. Para isso, podem ser utilizados dois objetos inteiros (p2_1_1 e p2_2_1) e duas peças adicionais com dimensões de 847 mm por 595 mm (p2_1_2 e p2_2_2), formando a peça final com 3847 mm de comprimento por 1190 mm de altura. Além dessas opções, diversas possibilidades poderiam ser consideradas ao invés de dividir a peça nesses tamanhos, como por exemplo considerar que a peça possa ser dividida em outras dimensões e incluí-las em diferentes planos de corte. Isso implica em diferentes formas de combinar o corte dos objetos para obter peças que atendam as dimensões demandas, resultando em um desafio a mais para o problema.

Na literatura estudada, não foram encontrados trabalhos que considerem explicitamente a possibilidade de as peças demandadas possuírem dimensões superiores às do objeto

disponível para corte. A maior parte dos estudos parte do pressuposto de que todas as peças podem ser obtidas integralmente a partir de um único objeto, sem a necessidade de junções ou montagens. Assim, este trabalho contribui ao abordar essa característica específica, mais alinhada com situações reais de produção, ampliando o escopo tradicionalmente tratado nos problemas de corte bidimensional.

Em síntese, o estudo de caso revela os principais desafios enfrentados pela empresa, especialmente relacionados à otimização dos processos de corte e à adaptação às diversas demandas dos clientes. A falta de um planejamento mais eficiente nos cortes de isolantes e barras resulta em desperdícios e custos adicionais, enquanto a necessidade de realizar junções de peças devido às limitações das chapas disponíveis torna o processo ainda mais complexo. Além disso, a gestão inadequada das sobras de material impede uma utilização mais eficiente dos recursos. A empresa também enfrenta dificuldades na produção simultânea de módulos de diferentes projetos devido às especificidades de cada pedido e aos prazos de entrega. Dessa forma, a implementação de um planejamento integrado, que considere a diversificação dos pedidos, balanço de estoque de peças e a minimização da utilização de matérias primas, pode contribuir significativamente para a redução de custos e aumento da eficiência operacional, além de melhor atender às exigências de um mercado em constante evolução.

5 PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL

5.1 CONSIDERAÇÕES DO PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL

Dentre as considerações da aplicação do problema de corte unidimensional, foi assumido que as sobras das barras não podem ser reaproveitadas em períodos futuros, sendo permitido apenas o balanço de estoque entre os diferentes tamanhos de peças obtidas durante os períodos. Essa decisão foi tomada devido à complexidade logística de se armazenar barras com comprimentos variados.

Além disso, uma das análises fundamentais do estudo está relacionada à avaliação das perdas do material ao final de cada horizonte de planejamento, com o intuito de verificar a aderência dos planejamentos de corte e mensurar a eficiência no aproveitamento do material disponível, além das perdas inerentes ao processo produtivo. No escopo do modelo de otimização aplicado ao problema de corte unidimensional, as perdas de material podem ser classificadas em duas categorias distintas:

i) Perdas das barras utilizadas:

As perdas das barras são as sobras correspondentes às partes das barras que permanecem após o corte das peças do padrão de corte. Devido às diferenças entre as dimensões das peças requisitadas e o tamanho padrão das barras de matéria-prima, é natural que ocorram essas sobras ao final do processo. Mesmo em um modelo otimizado, é difícil eliminá-las por completo, mas a intenção é sempre as reduzir ao mínimo possível. A presença de sobras impacta diretamente na eficiência do aproveitamento do material e pode gerar custos adicionais, seja pelo desperdício, pelo retrabalho necessário para reaproveitamento, ou pela necessidade de gestão desse material excedente.

ii) Perdas pelos cortes da serra (*kerf*):

Em cada operação de corte realizada na barra, ocorre uma perda inevitável de material devido à espessura da lâmina da serra — conhecida tecnicamente como "*kerf*". No contexto analisado, essa perda foi considerada como sendo de aproximadamente 5 mm por corte. Embora esse valor possa parecer pequeno de forma isolada, seu impacto acumulado ao longo de múltiplos cortes se torna bastante relevante, principalmente em cenários de produção com grande volume de peças. Essa perda não apenas reduz o aproveitamento da barra, como também influencia diretamente na quantidade total de matéria-prima necessária para atender à demanda. Quanto maior o número de cortes, maior será o desperdício agregado, elevando o custo de produção e afetando a eficiência do processo. Por esse motivo, a consideração da perda de serra no modelo de otimização é fundamental para garantir que as soluções propostas sejam viáveis na prática e reflitam com precisão as condições reais de produção, no caso estudado a perda de 5 mm já foi incluída no tamanho das peças.

Dessa forma, a principal aplicação do modelo proposto é minimizar a quantidade total de barras utilizadas ao longo de todos os períodos analisados. Para isso, considera-se a possibilidade de realizar balanço de estoque entre os períodos, ou seja, permitir que peças cortadas em excesso em um período possam ser utilizadas para atender à demanda de períodos seguintes. Esse balanceamento contribui para uma maior flexibilidade na produção e pode reduzir a necessidade de cortes adicionais. Além disso, o modelo também busca minimizar o volume de peças armazenadas, evitando a formação de estoques excessivos, que podem representar custos logísticos e operacionais. Com isso, pretende-se alcançar um equilíbrio entre o uso eficiente da matéria-prima e a gestão racional dos estoques, promovendo maior eficiência e menor desperdício ao longo do horizonte de planejamento.

5.2 MODELO INICIAL PARA O PROBLEMA DE CORTE DE BARRAS

Para formular um modelo matemático para o problema de corte de barras (unidimensional) da empresa estudada, foi utilizada a seguinte notação:

Índices/conjuntos:

i barras a serem cortadas $i \in \{1, 2, \dots, n\}$

j peças demandadas $j \in \{1, 2, \dots, m\}$

t períodos $t \in \{1, 2, \dots, o\}$

Parâmetros:

C tamanho fixo das barras

l_j tamanho da peça j

d_{jt} demanda da peça j no período t

Variáveis de decisão:

x_{ijt} número de peças j cortadas na barra i no período t

$y_{it} \begin{cases} 1 & \text{se a barra } i \text{ é cortada no período } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$

e_{jt} número de peças j em estoque no período t

z total de barras a serem cortadas

Modelo matemático:

$$\min z = \sum_i \sum_t y_{it} \quad (1)$$

sujeito a

$$\sum_i x_{ijt} + e_{j(t-1)} = d_{j,t} + e_{jt} \quad \forall j, t \quad (2)$$

$$\sum_j l_j x_{ijt} \leq C y_{it} \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$x_{ijt} \in \mathbb{Z}_+^{nmo} \quad \forall i, j, t \quad (4)$$

$$y_i \in \mathbb{B}^n \quad \forall i \quad (5)$$

A equação (1) representa a função objetivo, que visa minimizar o número total de barras a serem cortadas. A restrição (2) impõe que a demanda de cada peça j deve ser atendida, com balanço de estoque por meio de peças em estoque e_{jt} entre os períodos. A restrição (3) limita o número de peças cortadas ao comprimento de cada barra. As restrições (4) e (5) definem o tipo das variáveis.

Alteração para função multiobjetivo

Todos os índices são mantidos, mas agora é incorporado duas funções objetivos ao problema, com variáveis de folga y_1 e y_2 e metas para ambas, sendo m_1 e m_2 .

a) f_1 - Minimizar barras utilizadas

A **primeira função objetivo** é mesma do modelo base, que visa minimizar as barras usadas, como é apresentado abaixo:

$$\min z_1 = \sum_{i,t} y_{it}$$

b) f_2 - Minimizar peças em estoque

A **segunda função objetivo** do modelo foi a de minimizar peças em estoque como é apresentado abaixo:

$$\min z_2 = \sum_{j,t} e_{jt}$$

Além disso, as metas m_1 e m_2 foram estabelecidas com base na modelagem individual de cada função objetivo, permitindo identificar os melhores resultados possíveis para cada uma de forma isolada. Embora cada meta tenha sido definida de forma independente, o objetivo principal dominou o objetivo secundário em cada caso. Ou seja, na modelagem focada na minimização das barras, a minimização das peças em estoque foi considerada, mas com um impacto reduzido, e, na modelagem focada na minimização do estoque, a minimização das barras foi mantida com menor prioridade, mas sem ser totalmente ignorada.

Assim, no modelo matemático, as restrições (1) e (4) são alteradas, e outras duas restrições (6) e (7) são adicionadas:

$$\min z = y1 + y2 \quad (1)$$

$$\sum_{i,t} y_{it} - y1 = m1 \quad (6)$$

$$\sum_{j,t} e_{jt} - y2 = m2 \quad (7)$$

$$x_{ijt}, e_{jt}, y1, y2 \in \mathbb{Z}_+^{nmo} \quad \forall i, t \quad (4)$$

5.3 DADOS DO PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL

No contexto do problema de corte unidimensional, definiu-se a utilização de barras com comprimento de 6000 mm como matéria-prima principal, e, foram considerados 20 tipos diferentes de peças, cada uma com um comprimento específico, variando entre 1590 mm e 3900 mm. Essas peças são demandadas ao longo de 7 períodos, representando um horizonte de planejamento dentro da produção. A Tabela 1 mostra em detalhes tanto o tamanho de cada peça quanto a quantidade exigida em cada um dos períodos. Essas informações são essenciais para o funcionamento do modelo, já que é com base nelas que se definem as combinações de corte. A ideia é encontrar formas de atender toda a demanda utilizando o menor número possível de barras, ao mesmo tempo em que se evita acúmulo desnecessário de peças em estoque e se busca o melhor aproveitamento do material disponível.

Tabela 1 - Informações de tamanho e demanda de cada peça por período.

Peça	Tamanho (mm)	Demanda de peças j por período t						
		t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
p1	1590		9	30				
p2	1810		9	75				
p3	1892		18				10	18
p4	1965			15				
p5	2115				11			
p6	2135		18		11			18
p7	2195						10	
p8	2215	20						
p9	2415	20			22			
p10	2465			30			35	
p11	2497	20				35		
p12	2615	55	40					32
p13	2740	20			11			
p14	2800				60			
p15	2965			100				
p16	3000				55	35	40	
p17	3065					10		
p18	3200	55	21				30	32
p19	3500				60			
p20	3900			5				

Fonte: Autor, 2025.

5.4 CENÁRIOS PARA O PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL

Cenário 1: Minimizar barras utilizadas:

Este cenário representa a primeira função objetivo definida no problema: minimizar o número total de barras utilizadas ao longo de todos os períodos. O foco principal aqui está no aproveitamento máximo da matéria-prima, buscando reduzir ao mínimo possível o número de barras inteiras que precisam ser utilizadas para atender à demanda de peças.

A lógica por trás dessa abordagem está diretamente relacionada à redução de desperdícios e ao uso eficiente dos recursos. Quanto menos barras forem consumidas, menor será o custo associado à aquisição de matéria-prima, e menor também será o volume de sobras geradas — que, neste modelo, são consideradas como perdas, já que não podem ser reaproveitadas em períodos futuros.

Neste cenário, o modelo atua de forma a encontrar as melhores combinações de corte entre os períodos, respeitando as demandas estabelecidas, mas priorizando soluções que resultem no menor consumo total de barras. Para isso, ele pode explorar diferentes formas de agrupar peças em uma mesma barra, mesmo que isso signifique, em alguns casos, produzir peças que ainda não são imediatamente necessárias, desde que elas possam ser estocadas para uso posterior.

Essa estratégia é especialmente relevante em contextos onde o custo da matéria-prima representa uma parcela significativa do custo de produção, ou onde há uma preocupação com sustentabilidade e redução de resíduos industriais. Assim, este cenário oferece uma visão importante sobre a eficiência do processo produtivo sob o ponto de vista do consumo de recursos.

Cenário 2: Minimizar estoques:

Este cenário representa a segunda função objetivo do problema: minimizar a quantidade de peças estocadas ao longo dos períodos. A ideia aqui é evitar produzir peças com muita antecedência, mantendo o estoque o mais baixo possível e produzindo apenas o que for realmente necessário, no momento certo.

Um estoque elevado pode gerar custos extras com espaço, controle e até perda de peças. Por isso, nesse cenário, o modelo busca atender à demanda de forma mais precisa, produzindo as peças próximas ao período em que serão usadas — mesmo que isso signifique acabar utilizando mais barras no total.

Cenário 3: Modelo multiobjetivo:

No Cenário 3, foi desenvolvido um modelo que combina as duas funções objetivo anteriores: minimizar a quantidade de barras utilizadas e minimizar a quantidade de peças estocadas. A ideia é encontrar um equilíbrio entre os dois extremos, buscando uma solução eficiente tanto no uso da matéria-prima quanto na gestão dos estoques, sem atribuir um peso maior a nenhum dos dois aspectos, uma vez que não foram fornecidos valores de custo para as barras ou para o estoque.

Para isso, foram definidas duas metas, m_1 e m_2 , com base nos melhores resultados obtidos após a execução individual de cada função objetivo, considerando a dominância de cada uma. Ou seja, foram modelados cenários em que cada objetivo foi priorizado individualmente, para identificar os resultados mais eficientes em cada caso, como mostra a Tabela 2. A partir disso, o modelo tentou se aproximar ao máximo dessas metas, levando em conta tanto o número de barras quanto o estoque gerado em cada período. Essa abordagem permite trabalhar com uma visão mais completa do processo, considerando os impactos dos dois lados e evitando que a otimização de um aspecto comprometa o outro.

Tabela 2 - Matriz pay-off de objetivos – Modelo Unidimensional

	Quantidade de barras cortadas	Quantidade de peças em estoque
Minimizar barras - fo1	518	708
Minimizar peças em estoque - fo2	537	0

Fonte: Autor, 2025.

Na prática, esse cenário reflete melhor a realidade da produção, onde é necessário considerar múltiplas decisões simultaneamente. Assim, o modelo multiobjetivo oferece uma solução mais equilibrada e alinhada à operação da empresa.

5.5 RESULTADOS OBTIDOS DOS CENÁRIOS - UNIDIMENSIONAL

A implementação computacional do modelo matemático foi realizada no ambiente *GAMSIDE (General Algebraic Modeling System)*, utilizando o solver Cplex para resolução dos problemas de programação inteira. As simulações foram executadas em um computador com sistema operacional Windows 10 (64 bits), processador Intel Celeron N4020 @ 1.10GHz e 4 GB de memória RAM.

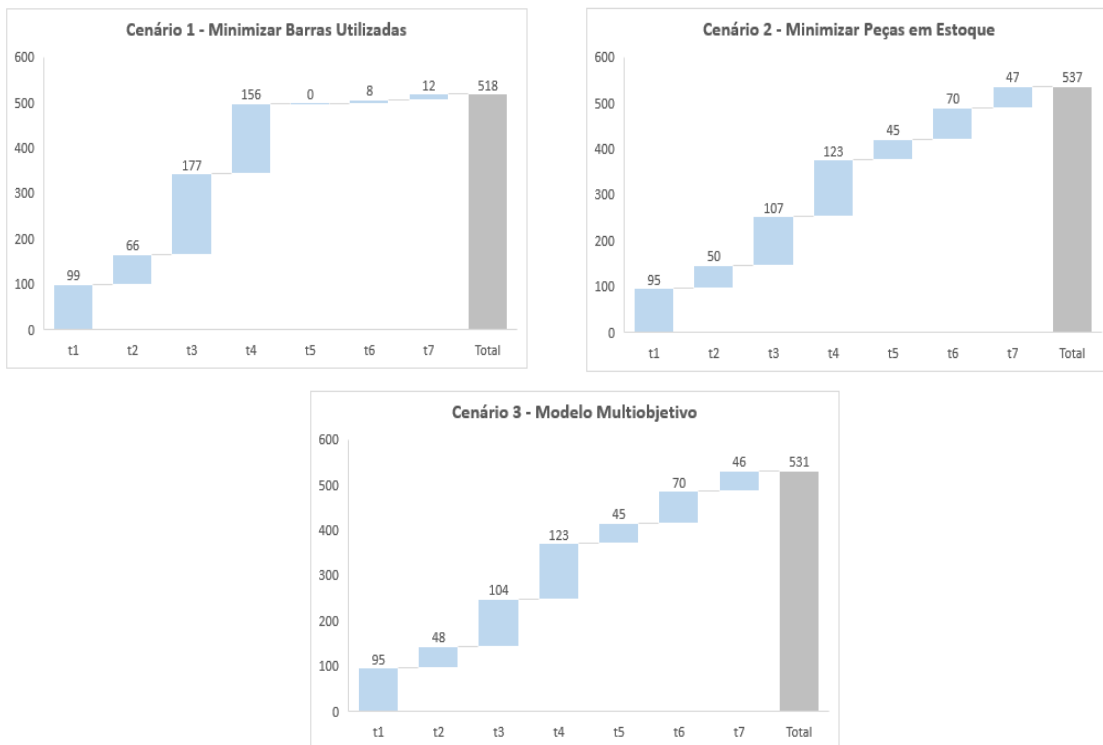
A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos com a aplicação dos três cenários propostos, com foco nos indicadores mais relevantes para análise do desempenho do

modelo: **quantidade de barras utilizadas, quantidade de peças em estoque e aproveitamento do material.**

a) Quantidade de barras utilizadas

Na Figura 11 será apresentado os resultados de cada cenário quanto a utilização de barras durante todos os períodos.

Figura 11 - Resultados individuais de cada cenário para a quantidade de barras utilizadas.



Fonte: Autor, 2025.

O **Cenário 1**, que tem como foco principal a minimização do número de barras utilizadas, apresentou o melhor resultado nesse critério, com um total de apenas 518 barras. Esse desempenho se deve, principalmente, à grande concentração da produção no terceiro e quarto período. Essa antecipação das peças permitiu aproveitar melhor o material disponível, reduzindo desperdício e evitando cortes menos eficientes nos períodos seguintes. No entanto, essa estratégia pode não ser viável em um ambiente produtivo com restrições operacionais ou limitação de espaço para estocagem.

Em contrapartida, o **Cenário 2**, que prioriza minimizar peças em estoque, apresentou o maior consumo total de barras, com 537 unidades. Isso se deu porque o modelo restringiu a produção antecipada, fazendo com que os cortes fossem feitos de forma mais pontual e

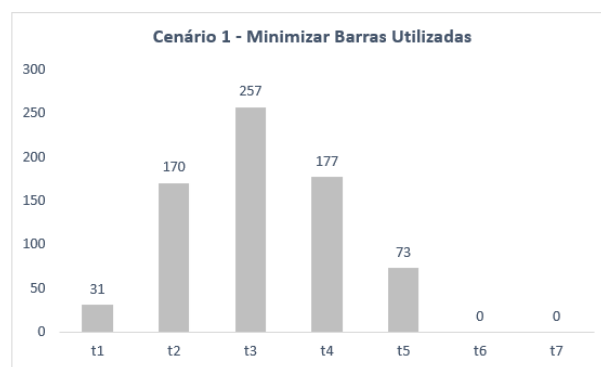
distribuída, o que limitou as combinações possíveis dentro de cada barra. O aproveitamento do material ficou comprometido, mas os estoques foram zerados.

Por fim, no **Cenário 3**, que propõe uma modelagem multiobjetivo, o objetivo é buscar o equilíbrio entre o consumo de barras e o controle de estoque. As metas estabelecidas para este cenário são: utilizar 518 barras e manter o estoque de peças igual a 0. Esse cenário apresentou um desempenho intermediário, com 531 barras utilizadas, o que representa uma diferença de 13 unidades em relação à meta para o consumo de barras. Embora tenha se desviado ligeiramente da meta de barras, o cenário procurou também minimizar o estoque, atendendo à meta de manter o estoque o mais próximo possível de zero, o que foi um avanço significativo no equilíbrio entre as duas metas.

b) Quantidade de peças em estoque

Em relação a quantidade de peças que ficam armazenadas por período, apenas o cenário 1 que obteve resultados, sendo que para os cenários 2 e 3 os estoques foram zerados, como ilustra a Figura 12.

Figura 12 - Resultados individuais de cada cenário para quantidade de peças em estoque.



Fonte: Autor, 2025.

O **Cenário 1**, voltado à minimização do número de barras, apresentou os maiores volumes de peças estocadas, especialmente nos primeiros períodos. Nos períodos t3 e t4, por exemplo, foram geradas muitas peças para estoque, número que vai diminuindo gradualmente até zerar em t6. Isso reforça a estratégia adotada nesse cenário, que concentrou a produção em alguns períodos para otimizar o uso do material, mesmo que isso resultasse em altos volumes de estoque temporário.

Por outro lado, os cenários 2 e 3 não apresentaram nenhuma peça em estoque, o que indica que a produção foi feita exatamente conforme a necessidade de cada período.

c) Aproveitamento de material

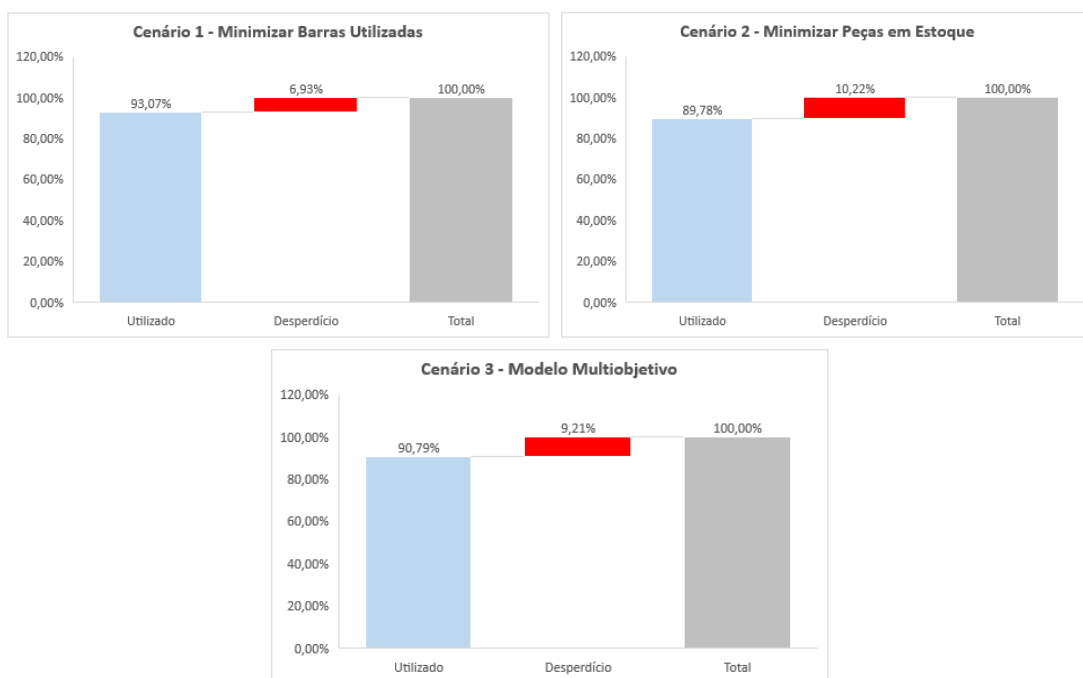
O aproveitamento de material, representado pelo percentual de perdas em cada período como apresenta a Figura 13, revela o quanto de cada barra foi efetivamente utilizado no corte das peças. Esse percentual reflete o quanto de cada barra de material foi efetivamente utilizado na produção das peças. Para calcular esse aproveitamento, leva-se em consideração tanto o comprimento total das peças extraídas quanto o comprimento das barras utilizadas, incluindo as perdas geradas pelo processo de corte.

A fórmula básica para calcular o aproveitamento é dada por:

$$\text{Aproveitamento} = \frac{\text{Comprimento Total das Peças Extraídas}}{\text{Comprimento Total das Barras Utilizadas}} \times 100$$

Ou seja, o aproveitamento é a razão entre o comprimento das peças cortadas e o comprimento total das barras usadas. Quanto menor for a perda, ou seja, a diferença entre o material utilizado nas peças e o material desperdiçado durante o corte, maior será o aproveitamento do material, refletindo uma maior eficiência no processo de produção.

Figura 13 - Resultados individuais de cada cenário para aproveitamento de material.



Fonte: Autor, 2025.

O **Cenário 1**, cujo objetivo era minimizar o número de barras utilizadas, obteve o menor desperdício, com 6,93% no total. Isso demonstra que, apesar de ter antecipado a produção em

alguns períodos, o modelo foi eficaz em encontrar combinações que maximizassem o uso de cada barra, contribuindo para um uso mais racional do material.

Por outro lado, o **Cenário 2**, voltado à minimização de peças em estoque, apresentou um maior desperdício, com um total de 10,22%. Esse número expressivo está associado ao foco do modelo em atender a demanda de forma precisa e pontual, mesmo que isso resultasse em combinações de corte menos eficientes. Em outras palavras, priorizou-se reduzir estoques, ainda que à custa do aproveitamento das barras, algo esperado uma vez que era dominante na função objetivo.

Já o **Cenário 3**, que buscou um equilíbrio entre os dois objetivos (minimizar barras e minimizar estoques), apresentou um desperdício de 9,21%, possuindo o segundo melhor desempenho de aproveitamento. Isso demonstra que é possível equilibrar a redução de barras e o estoque zero, mantendo ainda assim um nível eficiente de aproveitamento de material.

5.6 DISCUSSÃO PARA O PROBLEMA DE CORTE UNIDIMENSIONAL

A avaliação dos três cenários propostos para o problema de corte unidimensional trouxe uma visão abrangente sobre os impactos de diferentes estratégias de otimização. Cada cenário apresentou vantagens e desvantagens que devem ser consideradas de acordo com os objetivos operacionais e restrições do processo produtivo.

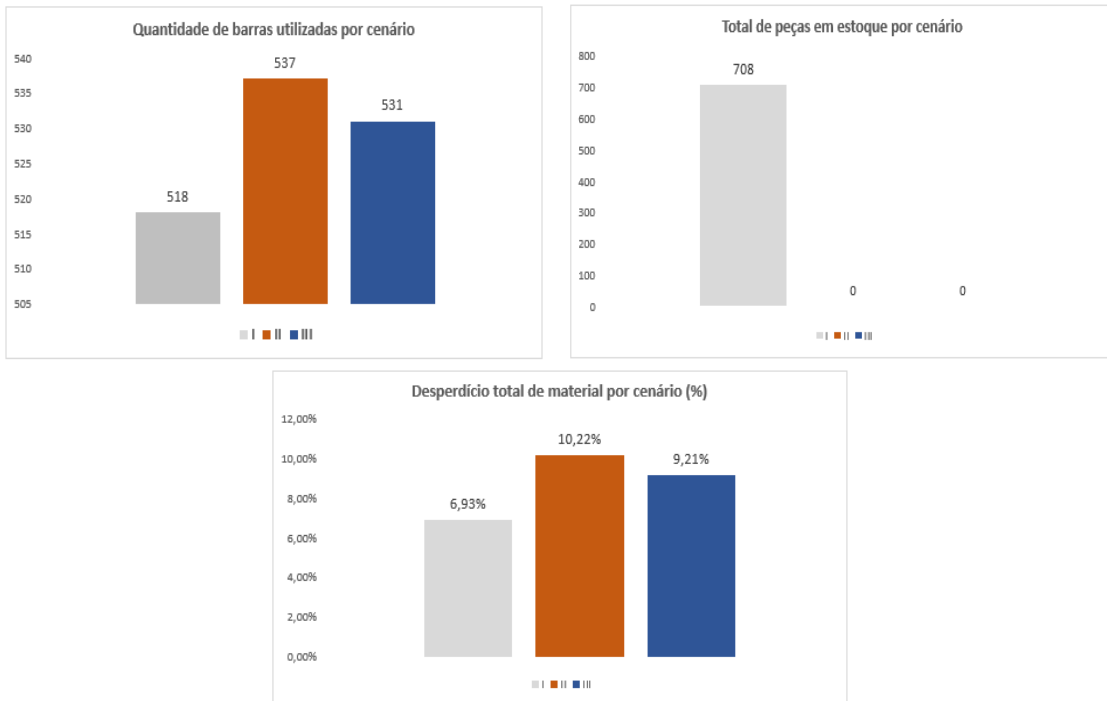
O **Cenário 1**, focado na minimização da quantidade de barras utilizadas, foi o que apresentou o menor número total de barras consumidas (518), conseqüentemente um menor desperdício (6,93%). Contudo, esse bom desempenho teve como consequência a formação de um estoque elevado de peças (708 unidades), o que pode ser um ponto negativo dependendo da capacidade de armazenagem e das políticas de estoque da empresa. Em linhas gerais, é uma solução altamente eficiente do ponto de vista de aproveitamento da matéria-prima, mas que exige uma boa gestão logística.

O **Cenário 2**, que priorizou a redução do número de peças em estoque, conseguiu zerar as peças armazenadas. No entanto, esse resultado foi alcançado com o maior uso de barras (537 no total) e resultando em um maior desperdício de material (10,22%), evidenciando um desequilíbrio importante em termos de eficiência de corte.

Já o **Cenário 3**, baseado em um modelo multiobjetivo, foi o que mais se aproximou de um equilíbrio entre os fatores analisados. Ele utilizou 531 barras e também conseguiu zerar o estoque, com uma perda de material de 9,21%. De maneira geral, esse cenário conseguiu

equilibrar as duas funções objetivo, mas não houve uma ponderação explícita entre elas, o que poderia ter favorecido uma redução no número de barras utilizadas em relação ao estoque de peças. Esse equilíbrio poderia ser mais ajustado se fosse possível incorporar os custos específicos de cada barra e os custos de manutenção de estoque, o que, infelizmente, não foi viável devido à falta dessas informações para o presente trabalho.

Figura 14 - Comparação dos cenários para cada análise do problema de corte unidimensional.



Fonte: Autor, 2025.

Diante dos resultados obtidos, como ilustra a Figura 14, fica claro que não existe uma solução única que atenda perfeitamente a todos os objetivos. A escolha do cenário mais apropriado vai depender muito do que a operação valoriza no momento. Em algumas situações, quando o custo da matéria-prima estiver mais elevado, faz mais sentido buscar alternativas que reduzam ao máximo o número de barras utilizadas. Já em outros casos, especialmente quando o espaço para armazenamento for limitado ou houver urgência na entrega dos pedidos, pode ser mais vantajoso priorizar um controle mais rígido do estoque.

Além disso, vale mencionar que o modelo pode ser ajustado para atender a outras necessidades específicas do processo produtivo. Seria possível, por exemplo, incluir restrições relacionadas ao tamanho das barras compradas, capacidade de produção por período, variações na demanda, custos extras com transporte ou até incertezas que podem surgir ao longo do

tempo. Com esses ajustes, o modelo se tornaria ainda mais completo e preparado para lidar com a dinâmica real do ambiente industrial.

6 PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL

6.1 CONSIDERAÇÕES DO PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL

Para o problema do corte bidimensional, foram utilizados diversos padrões possíveis de cortes, respeitando as seguintes dimensões de largura e comprimento, 595 mm e 3000 mm, respectivamente, além também de respeitar o processo de corte que é guilhotinado, de uma ponta a outra. Cada padrão de corte adotado no modelo representa o aproveitamento de uma única chapa — denominada “placa” para fins de modelagem — e é construído com o objetivo de otimizar o uso do material disponível, respeitando os limites operacionais previamente estabelecidos.

Como já mencionado anteriormente, as peças que possuem dimensões maiores que a dimensão da placa disponível para corte, foram divididas em mais de uma peça, ou seja, pode-se utilizar peças sendo o tamanho total da chapa (objeto) mais peças complementares, pelo qual podem ser retiradas por meio de diferentes padrões de cortes em que estejam incluídas, assim, posteriormente são unificadas por meio de cunhas gerando uma peça apenas.

Uma observação relevante para o problema é que as peças excedentes ao final do último período podem ser consideradas como perda, uma vez que não há possibilidade de utilizá-las em períodos futuros. No entanto, a decisão sobre o descarte ou aproveitamento dessas peças excedentes é exclusivamente da gestão da empresa. Da mesma forma, as sobras das placas também podem ser tratadas como perda do processo, compondo, juntamente com as peças excedentes, a base para o cálculo da taxa de aproveitamento do material. Isso porque, ainda que a área remanescente seja, em termos absolutos, equivalente ou superior ao tamanho mínimo de uma peça, sua forma e disposição geométrica podem impossibilitar o reaproveitamento. Ou seja, uma sobra com área suficiente, mas mal posicionada ou de geometria inadequada, não garante a viabilidade de corte de uma nova peça, sendo, portanto, considerada como desperdício no processo.

6.2 MODELO INICIAL PARA O PROBLEMA DE CORTE DE PLACAS

Para desenvolver um modelo matemático destinado a abordar o problema de corte de chapas isolantes (bidimensional) na empresa em estudo, emprega-se a seguinte notação:

Índices/ conjuntos:

i peças $i \in \{1, 2, \dots, n\}$

j padrões de corte $j \in \{1, 2, \dots, m\}$

t períodos $t \in \{1, 2, \dots, o\}$

Parâmetros:

a_{ij} quantidade de peças i obtidas no padrão j

d_{it} demanda da peça i no período t

Variáveis de decisão:

y_{jt} número de vezes que o padrão j é utilizado no período t

w_{it} peças i em estoque no período t

z total de placas isolantes a serem cortados

Modelo matemático:

$$\min z = \sum_{j,t} y_{jt} \quad (1)$$

sujeito a

$$\sum_j a_{ij} y_{jt} + w_{i(t-1)} = d_{it} + w_{it} \quad \forall i, t \quad (2)$$

$$y_{jt}, w_{it} \in \mathbb{Z}_+^{nmo} \quad \forall j, t \quad (3)$$

A equação (1) representa a função objetivo, que visa minimizar o número total de chapas isolantes a serem cortadas. A restrição (2) impõe que a demanda de cada peça i deve ser atendida, considerando os diferentes padrões de cortes existente, sendo eles bem definidos, ou seja, há a necessidade de que haja muitos valores para o parâmetro a_{ij} para que diferentes formas de se obter a peça demandada seja considerado no problema, trazendo melhores resultados. A restrição (3) define o tipo da variável.

Alteração para função multiobjetivo

Todos os índices são mantidos, mas agora é incorporado duas funções objetivos ao problema, com variáveis de folga y_1 e y_2 e metas para ambas, sendo m_1 e m_2 .

c) f_1 - Minimizar placas utilizadas

A **primeira função objetivo** é mesma do modelo base, que visa minimizar as placas usadas, como é apresentado abaixo:

$$\min z_1 = \sum_{j,t} y_{jt}$$

d) f_2 - Minimizar peças em estoque

A **segunda função objetivo** do modelo foi a de minimizar peças em estoque como é apresentado abaixo:

$$\min z_2 = \sum_{i,t} w_{it}$$

De maneira similar ao problema unidimensional, as metas m_1 e m_2 no contexto bidimensional também foram estabelecidas com base na modelagem individual de cada função objetivo, permitindo identificar os melhores resultados possíveis para cada uma de forma isolada. O objetivo principal dominou o objetivo secundário em cada modelagem, de forma que, ao focar na minimização das placas, a minimização do estoque de peças foi considerada com um impacto reduzido, e, ao focar na minimização do estoque, a minimização das placas teve um papel secundário, mas sem ser totalmente desconsiderada.

Assim, no modelo matemático, as restrições (1) e (3) são alteradas, e outras duas restrições (4) e (5) são adicionadas:

$$\min z = y_1 + y_2 \tag{1}$$

$$\sum_{j,t} y_{jt} - y_1 = m_1 \tag{4}$$

$$\sum_{i,t} w_{it} - y_2 = m_2 \tag{5}$$

$$x_{ijt}, y_1, y_2 \in \mathbb{Z}_+^{nmo} \quad \forall i, j, t \tag{3}$$

6.3 DADOS DO PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL

Para resolver o problema de corte bidimensional, foram considerados 300 padrões diferentes de corte, todos baseados nas dimensões fixas das placas utilizadas: 595 mm de largura por 3000 mm de comprimento. Um ponto importante é que todos os padrões respeitam o tipo de corte guilhotinado não estagiado, que exige que os cortes sejam feitos de forma contínua, de ponta a ponta da chapa, o que acaba restringindo um pouco as possibilidades de combinação entre as peças.

Cada padrão representa uma forma distinta de distribuir as peças sobre a superfície da placa, sempre tentando aproveitar ao máximo o material e evitar sobras. No total, foram consideradas 84 peças diferentes, cada uma com suas dimensões próprias, conforme apresentado na Tabela 4, localizada no Apêndice A.

Os dados utilizados no modelo, como os padrões de corte, as dimensões das peças e a demanda por período, foram as principais entradas para gerar as soluções analisadas. Parte dos padrões de corte foi definida manualmente pelos alunos do curso de Engenharia de Produção, durante a disciplina de Pesquisa Operacional 2, com base na demanda do problema em questão. Outra grande parte dos padrões foram geradas automaticamente por meio do código disponibilizado por Nathan Louzada no GitHub (https://github.com/natancl1/cutting_plan), que implementa a meta-heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) em Python. O código foi utilizado para gerar os padrões de corte conforme as necessidades específicas da demanda, atendendo tanto às dimensões das peças quanto às quantidades necessárias em cada período. O uso do código, baseado na meta-heurística GRASP, possibilitou explorar uma gama maior de combinações viáveis de padrões, o que contribuiu significativamente para o aumento da eficiência no aproveitamento do material.

6.4 CENÁRIOS PARA O PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL

Cenário 1: Minimizar placas utilizadas:

Neste cenário, o objetivo principal do modelo é reduzir ao máximo a quantidade de placas utilizadas para atender à demanda total do período analisado. A lógica dessa abordagem é priorizar padrões de corte que resultem em maior aproveitamento da área disponível em cada placa, mesmo que isso implique em produzir algumas peças antes do momento exato em que serão necessárias.

O modelo busca, portanto, agrupar a produção de peças de diferentes períodos, sempre que isso significar um uso mais eficiente da matéria-prima. Essa antecipação é permitida justamente para que se encontrem combinações que preencham melhor a superfície das placas, reduzindo perdas e minimizando o número total de chapas consumidas.

Esse tipo de estratégia costuma ser vantajoso em contextos onde o custo do material é relevante ou quando se deseja evitar desperdícios. Por outro lado, pode gerar um aumento temporário nos estoques de peças prontas, o que pode ser tratado em outros cenários com diferentes prioridades.

Cenário 2: Minimizar peças em estoque:

Neste cenário, o modelo é direcionado para reduzir ao máximo a quantidade de peças em estoque, ou seja, aquelas que são fabricadas antes do período em que realmente serão necessárias. A ideia é manter os estoques o mais enxutos possível, produzindo somente o necessário em cada etapa do planejamento.

A abordagem adotada busca alinhar a produção de peças ao seu período de demanda, evitando antecipações que poderiam resultar em acúmulo desnecessário. Dessa forma, o modelo tende a selecionar padrões de corte que atendam exatamente às necessidades do momento, mesmo que isso signifique um uso menos eficiente da área da chapa ou um aumento no número total de placas utilizadas.

Essa estratégia é especialmente útil quando há limitações de espaço físico para armazenamento, quando o custo de estocagem é relevante ou quando as peças produzidas têm características que dificultam seu armazenamento prolongado — como risco de deterioração, deformação ou obsolescência.

Cenário 3: Modelo multiobjetivo:

No Cenário 3, foi desenvolvido um modelo multiobjetivo, igual ao problema de corte unidimensional, que busca equilibrar dois critérios: minimizar a quantidade de placas utilizadas e reduzir o número de peças em estoque ao longo dos períodos. As metas m_1 e m_2 foram definidas com base nos melhores resultados obtidos nos cenários com dominância individual de cada função objetivo. A partir disso, o modelo foi estruturado para se aproximar desses valores, permitindo uma solução mais balanceada, que considere tanto a eficiência no uso do material quanto a gestão dos estoques, sem priorizar um aspecto em detrimento do outro. A Tabela 3 apresenta as metas para cada função, destacadas nas células em cinza.

Tabela 3 - Matriz pay-off de objetivos - Modelo Bidimensional.

	Quantidade de placas cortadas	Quantidade de peças em estoque
Minimizar placas - fo1	726	138
Minimizar peças em estoque - fo2	733	38

Fonte: Autor, 2025.

6.5 RESULTADOS OBTIDOS DOS CENÁRIOS – BIDIMENSIONAL

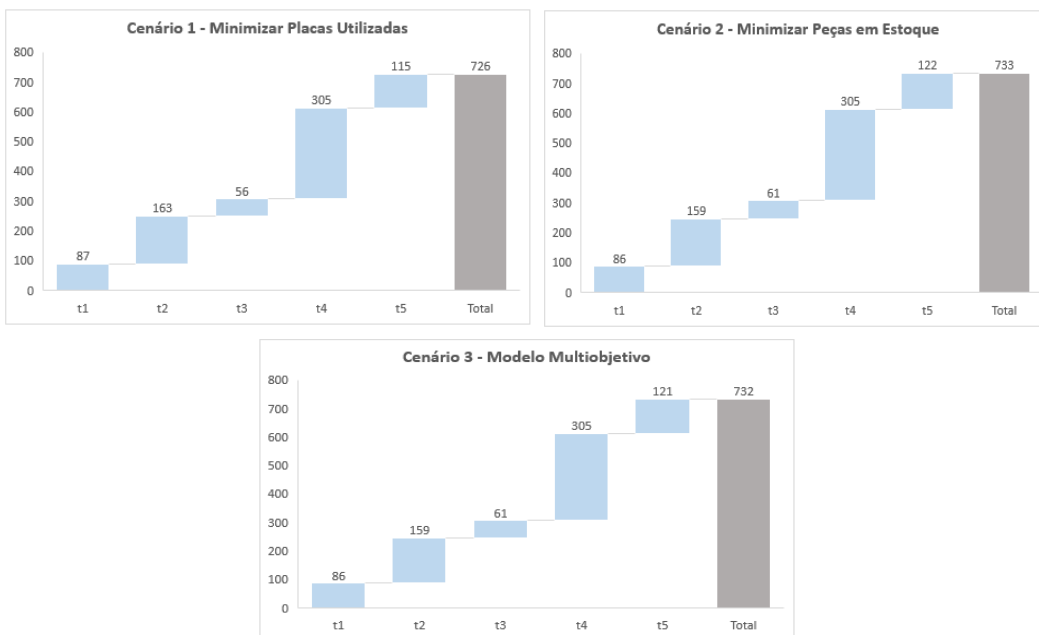
Assim como no problema unidimensional a implementação computacional do modelo matemático foi realizada no ambiente *GAMS IDE (General Algebraic Modeling System)*, utilizando o solver Cplex para resolução dos problemas de programação inteira. As simulações foram executadas no mesmo computador.

A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos com a aplicação dos três cenários propostos, com foco nos indicadores mais relevantes para análise do desempenho do modelo: **quantidade de placas utilizadas, quantidade de peças excedentes e aproveitamento do material.**

a) Quantidade de placas utilizadas

Na Figura 15 será apresentado os resultados de cada cenário quanto a utilização de placas durante todos os períodos.

Figura 15 - Resultados individuais de cada cenário para quantidade de placas utilizadas.



Fonte: Autor, 2025.

No **Cenário 1**, em que o objetivo é minimizar o número total de placas utilizadas, o modelo trabalha com o horizonte completo e pode antecipar cortes para formar composições mais vantajosas. Como resultado, há uma concentração significativa de cortes no período t2 (163 placas), permitindo uma redução nos cortes dos períodos seguintes, como t3 e t5. Com isso, o total de placas utilizadas cai para 726, evidenciando um ganho mesmo que modesto no aproveitamento global das chapas.

O **Cenário 2**, por sua vez, tem como foco a minimização de peças em estoque, pelo qual gerou uma maior utilização de placas cortadas, como esperado, pois, o seu objetivo é se aproximar de um estoque zero.

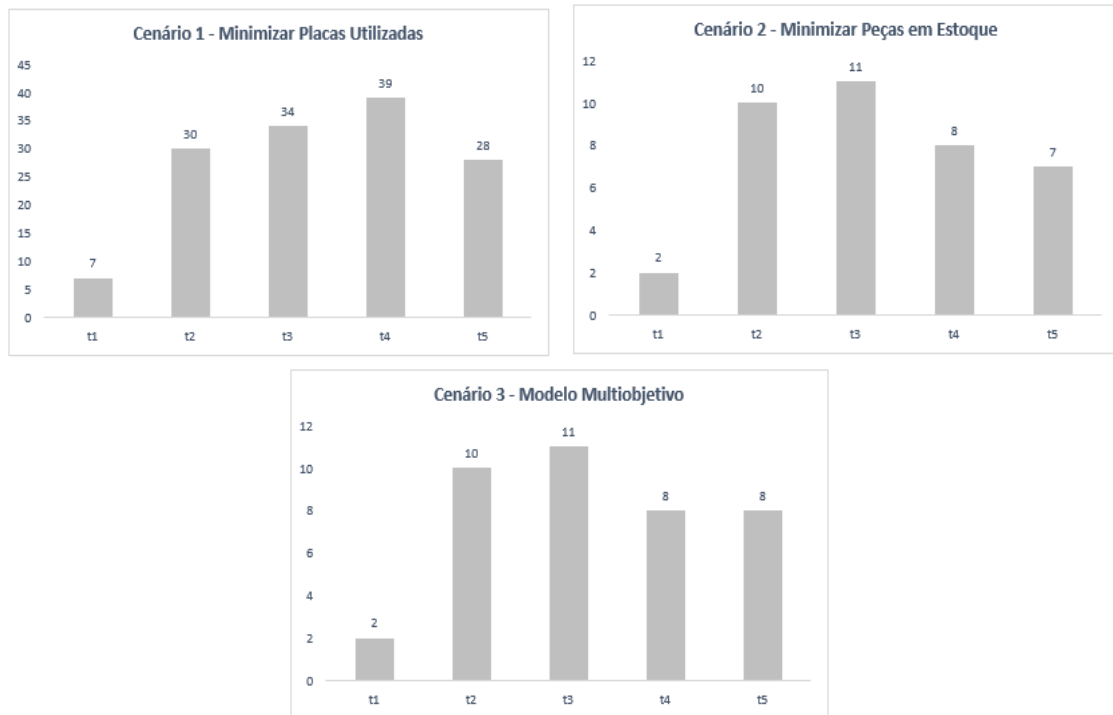
Por fim, o **Cenário 3** representa o modelo multiobjetivo, que busca equilibrar a redução de placas com o controle do estoque gerado. De modo geral, consegue trazer um valor razoável de placas utilizadas, 732, em comparação aos outros cenários e um baixo índice de peças em estoques, como será mostrado a seguir.

A análise dos diferentes cenários evidencia que a escolha de padrões de corte mais eficientes pode contribuir significativamente para a melhoria dos resultados, mesmo em modelos simples. A possibilidade de antecipar cortes e combinar demandas de diferentes períodos, como observado no Cenário 1, demonstrou ganhos no aproveitamento das chapas, ainda que modestos. Isso indica que a utilização de padrões de corte otimizados, considerando o horizonte global de produção, pode reduzir desperdícios e promover maior eficiência no uso de materiais.

b) Quantidade de peças em estoque

Em relação à quantidade de estoque, vale destacar que ele não será zero, pois não foram definidos padrões de corte exatos para a extração das peças. O modelo não assume que as peças demandadas sejam as únicas a serem extraídas das placas, mas sim que a disponibilidade de peças em estoque será influenciada pelos padrões de corte adotados, que nem sempre correspondem exatamente às demandas. Ou seja, o estoque final resultante do processo de corte estará sempre condicionado às restrições e variações nos padrões de corte, o que pode gerar a necessidade de manter peças em estoque para atender à demanda futura de forma eficiente.

Figura 16 - Resultados individuais de cada cenário para quantidade de peças em estoque.



Fonte: Autor, 2025.

A Figura 16 apresenta os resultados referentes à quantidade de peças em estoque geradas em cada cenário ao longo do horizonte de planejamento. De modo geral as peças que permanecem em estoque durante os períodos, são as que possuem menores dimensões possíveis, uma vez que estão presentes em muitos padrões de corte, pois dessa forma aproveitam melhor o material utilizado, evitando sobras rejeitadas. Porém nem sempre essas peças menores geradas, são utilizadas durante os períodos, tornando-as desperdício.

O **Cenário 1**, em que se busca minimizar a quantidade total de placas utilizadas, observa-se o maior volume de peças em estoque, chegando em 138 peças em estoque ao total. Isso ocorre porque o modelo antecipa cortes para formar composições mais eficientes, mas gera um acúmulo de peças que só serão utilizadas nos períodos futuros.

Já o **Cenário 2**, cujo objetivo é minimizar a quantidade de peças em estoque apresenta os menores valores de estoque entre os modelos com balanço entre períodos, totalizando 38 peças. O estoque permanece baixo na maioria dos períodos, demonstrando a efetividade do modelo em controlar estoque.

Por fim, o **Cenário 3**, que adota uma abordagem multiobjetivo, busca equilibrar o uso de placas e o controle de peças em estoque. Os resultados mostram um comportamento muito vantajoso, com valores de estoque bem parecidos aos do cenário 2, com 39 peças estocadas

durante os períodos — o que indica que o modelo foi capaz de manter um bom aproveitamento das placas sem gerar acúmulos peças.

c) Aproveitamento de material

O aproveitamento de material foi calculado com base na divisão da área das peças cortadas pela área total da matéria-prima disponível. O cálculo foi realizado considerando três componentes principais:

1. **Destinado à demanda:** Representa a área das peças que foram efetivamente extraídas e destinadas para atender à demanda, sendo calculado pela fórmula:

$$\text{Destinado à demanda} = \left(\frac{\text{Área das peças extraídas}}{\text{Área total da matéria-prima}} \right) \times 100$$

2. **Peças excedentes:** São as peças que foram cortadas, mas não foram utilizadas em nenhum período, ou seja, aquelas que permaneceram em estoque no último período. O cálculo para esse componente é feito com base na área das peças excedentes sem destinação:

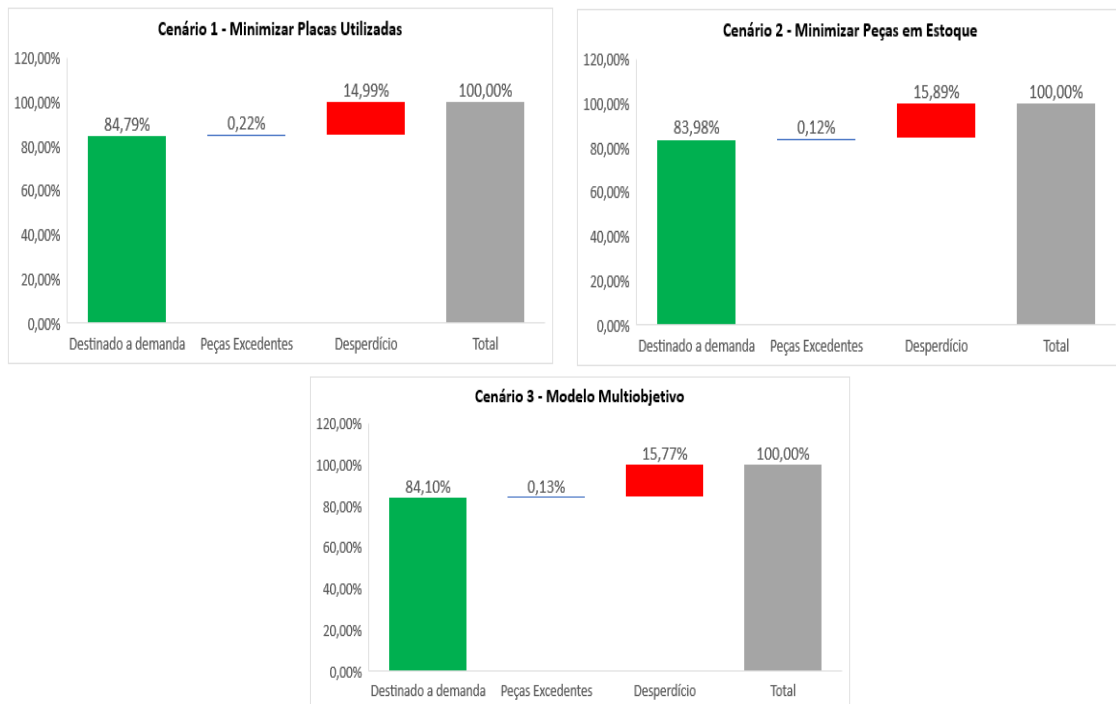
$$\text{Peças excedentes} = \left(\frac{\text{Área das peças excedentes}}{\text{Área total da matéria-prima}} \right) \times 100$$

3. **Desperdício:** Refere-se à quantidade de material não aproveitado, sendo calculada pela subtração do somatório das áreas destinadas à demanda e das peças excedentes da totalidade do material utilizado. O cálculo do desperdício de material é:

$$\text{Desperdício} = 1 - (\text{Destinado à demanda} + \text{Peças excedentes})$$

O aproveitamento de material é apresentado na Figura 17, e revela o quanto de cada placa foi efetivamente utilizada no corte das peças.

Figura 17 - Aproveitamento de Material para cada cenário analisado.



Fonte: Autor, 2025.

Em relação ao aproveitamento de material, os resultados obtidos revelam diferenças entre os cenários analisados.

O **Cenário 1**, cujo objetivo é minimizar a quantidade de placas utilizadas, apresentou o melhor desempenho em termos de aproveitamento, com 84,79% do material sendo efetivamente utilizado para atender à demanda 14,87% de perda. No entanto, houve 0,37% de peças excedentes, o que indica que, embora haja eficiência na utilização das placas, o modelo acumula sobras que não são reaproveitadas ao final dos períodos.

Já o **Cenário 2**, que visa minimizar as peças em estoque, apresentou 83,98% do material destinado à demanda, mas obteve a maior perda de material, com 15,89%. Além disso, o percentual de peças excedentes foi de 0,12%, confirmando o foco do modelo em reduzir o volume de sobras, mesmo que com uma redução na eficiência.

Por fim, o **Cenários 3**, baseado em um modelo multiobjetivo, apresentou um percentual de perda de material de 15,77%. A principal diferença entre eles está na alocação do material para atender à demanda.

De forma geral, os resultados mostram que há um trade-off entre minimizar perdas e controlar o estoque excedente. O modelo multiobjetivo oferece uma alternativa equilibrada,

ainda que com desempenho intermediário. A escolha do cenário ideal depende das prioridades estratégicas da empresa.

6.6 DISCUSSÃO PARA O PROBLEMA DE CORTE BIDIMENSIONAL

Assim como no problema de corte unidimensional, a avaliação dos três cenários analisados para o problema de corte bidimensional demonstrou diversas possibilidades de estratégias a serem adotadas, sendo que alguns deles são muito parecidos em questão de resultados. Dessa forma, os cenários apresentaram vantagens e desvantagens que devem ser consideradas de acordo com os objetivos operacionais e restrições do processo produtivo.

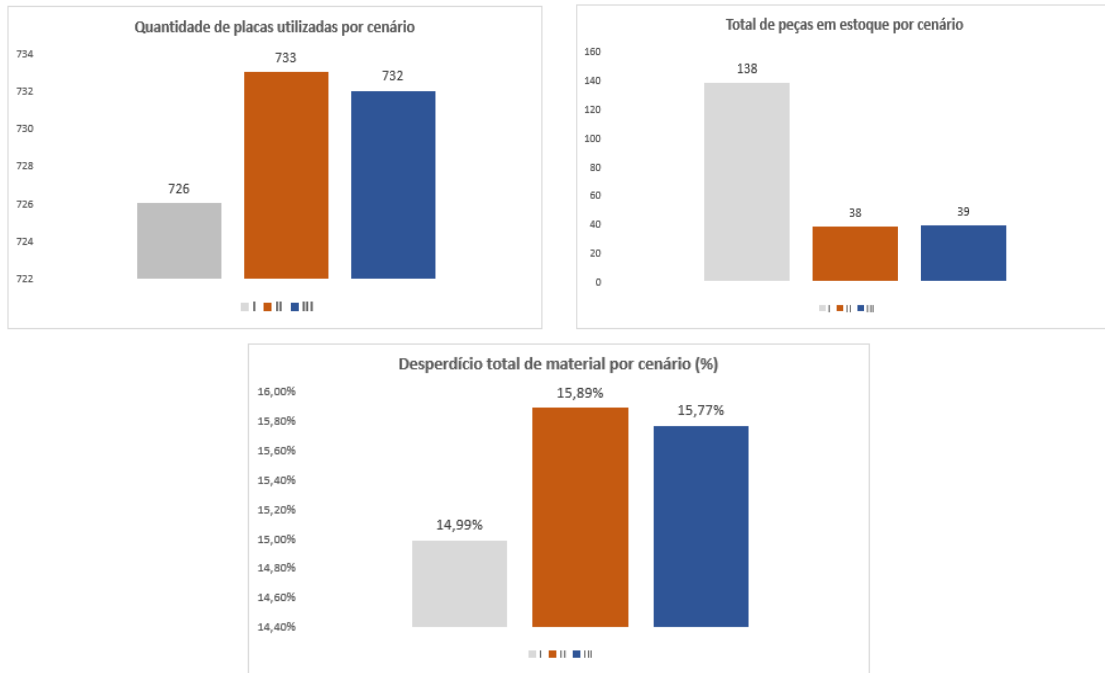
A partir da comparação entre os cenários propostos, é possível perceber diferenças importantes na forma como o material é aproveitado, tanto em termos de perda quanto em relação ao estoque de peças e ao número de placas utilizadas.

O **Cenário 1**, focado em minimizar a quantidade de placas utilizadas, consegue reduzir esse número para 726 — o menor entre todos os cenários — e também apresenta a menor perda de material (14,87%), o que mostra um excelente aproveitamento. No entanto, o ponto negativo é a quantidade muito alta de peças em estoque (138 unidades). Esse volume de estoque pode ser um problema tanto do ponto de vista logístico quanto econômico, exigindo mais espaço e controle.

Analisando o **Cenário 2**, é o que apresenta o menor valor de peças em estoque dentro dos cenários que possuem estoque, com 38 unidades. Em contrapartida, essa minimização de estoques contribui para aumentar a quantidade de placas utilizadas com 733 placas, a maior dentro dos cenários possíveis, e consequentemente aumentando o desperdício de material.

Por último, o modelo multiobjetivo, **Cenário 3**, é o que consegue trazer os pontos positivos dos cenários 1 e 2, com boa utilização de placas e baixo número de peças em estoque, resultando em um bom aproveitamento de material.

Figura 18 - Comparação dos cenários para cada análise do problema de corte bidimensional.



Fonte: Autor, 2025.

7 CONCLUSÃO

Este estudo abordou o problema de corte de materiais em uma empresa especializada na fabricação de salas de segurança para data centers, com foco em dois processos principais: o corte unidimensional de barras de perfis e o corte bidimensional de chapas. A análise de diferentes cenários de otimização permitiu identificar estratégias eficazes para reduzir desperdícios e aumentar a eficiência produtiva. No entanto, ficou evidente que a escolha da melhor abordagem depende diretamente das prioridades da empresa e de seu contexto operacional, já que os objetivos podem variar com o tempo.

No problema de corte unidimensional, foram avaliados três cenários distintos. O cenário 1 se destacou ao minimizar o número de barras utilizadas, alcançando uma perda de apenas 6,93%. Apesar da boa eficiência, essa configuração resultou em um estoque elevado de peças, o que pode ser problemático dependendo das limitações de armazenamento e das políticas de gestão interna. Já o cenário 3, com uma modelagem multiobjetivo, apresentou um equilíbrio mais consistente entre perdas (9,21%) e controle de estoque, mostrando que abordagens que conciliam múltiplos critérios tendem a ser mais versáteis frente às demandas variáveis da produção.

Quanto ao problema de corte bidimensional, o cenário 3 se destacou entre os demais por apresentar um bom equilíbrio entre a quantidade de placas utilizadas e o controle de estoque, como esperado. Além disso, a perda de material ficou em 15,77%, demonstrando uma boa eficiência no aproveitamento das placas.

Para futuras pesquisas, é possível expandir esses modelos, considerando a introdução de custos adicionais de armazenagem e materiais variados. Incorporar esses fatores pode resultar em uma otimização mais precisa, alinhada com as necessidades reais da operação. Também seria interessante investigar como diferentes tipos de matéria-prima (com propriedades distintas e custos variados) afetam a eficiência do corte e o processo de produção. Além disso, a introdução de variáveis de custo total, incluindo o custo de produção e armazenagem, pode fornecer uma visão mais holística do problema e resultar em soluções mais robustas.

De maneira geral, os resultados demonstram que não existe uma solução única ideal. A escolha da melhor estratégia depende diretamente das metas da empresa, sejam elas redução de perdas, controle de estoque ou flexibilidade na produção. Atualmente, o planejamento da empresa enfrenta uma fragilidade significativa, pois depende em grande parte da experiência

dos operadores. Esse modelo de operação pode ser arriscado, pois saídas inesperadas ou falhas na execução podem comprometer totalmente os planejamentos, gerando ineficiências e impactos negativos na produção.

Os modelos propostos neste trabalho, por outro lado, oferecem uma abordagem mais estruturada e estratégica, minimizando a dependência de fatores humanos e proporcionando um controle mais preciso sobre o processo de corte e a gestão de estoques. Essa transição para um modelo mais robusto pode resultar em maior estabilidade e previsibilidade, além de reduzir a vulnerabilidade da operação a erros ou imprevistos.

A capacidade de adaptar os modelos de otimização à realidade específica da operação é essencial para obter benefícios reais, e esse é um ponto forte da proposta deste estudo. Ao contrário do processo atual, que é mais reativo e menos previsível, a aplicação de modelos matemáticos permite uma otimização proativa, com decisões baseadas em dados reais e uma visão mais clara das variáveis envolvidas.

Por fim, este trabalho reforça o potencial do uso de modelos matemáticos de otimização como ferramenta estratégica para o setor produtivo. A flexibilidade na escolha dos modelos, aliada ao uso de dados reais da operação, pode apoiar decisões mais assertivas, promovendo ganhos relevantes em redução de custos, eficiência no uso de recursos e melhoria no planejamento de estoques. A contínua busca por padrões de corte otimizados representa um caminho promissor para elevar a competitividade e a sustentabilidade dos processos industriais, trazendo uma estrutura mais sólida e eficiente, em comparação com o planejamento atual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUABARA, A.; MORABITO, R. **Modelos de programação inteira mista para o planejamento do corte unidimensional de tubos metálicos na indústria aeronáutica agrícola.** *Gestão & Produção*, v. 15, n. 3, p. 605–617, dez. 2008.
- ALEM, D.J.; MORABITO, R. **Production planning in furniture settings via robust optimization.** *Computers & Operations Research*, v. 39, n. 2, p. 139–150, fev. 2012.
- ANDRADE, R.; BIRGIN, E. G.; MORABITO, R. **Two-stage two-dimensional guillotine cutting stock problems with usable leftover.** *International Transactions in Operational Research*, v. 23, n. 1, p. 121–145, 2016. DOI: 10.1111/itor.12077.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANNASSE, H. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia.** Editora Campus, 2007.
- ASSIS, N. S.; RANGEL, S. **Uma Heurística Baseada em Programação Dinâmica para o Problema de Corte Bidimensional.** *Trends in Computational and Applied Mathematics*, v. 23, n. 4, p. 683–703, 8 nov. 2022.
- CHERRI, A. C.; VIANNA, A. C. G. **Introdução a Problemas de Corte de Estoque.** Minicurso apresentado no V Simpósio de Matemática, Presidente Prudente, SP, 10 a 13 de agosto de 2010. Departamento de Matemática e Departamento de Computação, Universidade Estadual Paulista - Campus de Bauru.
- DYCKHOFF, H. **A typology of cutting and packing problems.** *European Journal of Operational Research*, v. 44, n. 2, p. 145–159, 1990. ISSN 0377-2217. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179090350K>. Acesso em: 24 jun. 2025.
- FRANÇA, Murilo Stall. **Análise das oportunidades de melhoria no processo de corte por plasma em uma indústria de implementos rodoviários.** Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, 2023.
- INTERNATIONAL DATA CORPORATION. **The digitization of the world: from edge to core.** Framingham: IDC, 2018. Disponível em: <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2025.

KOCH, S.; KÖNIG, S.; WÄSCHER, G. ***Integer linear programming for a cutting problem in the wood-processing industry: a case study***. *International Transactions in Operational Research*, v. 16, n. 6, p. 715–726, nov. 2009.

LOUZADA, Natan C. cutting_plan. Disponível em: https://github.com/natancl1/cutting_plan. Acesso em: 30 jun. 2025.

MAHDI MOSTAJABDAVEH; SALMAN, S.; TAHMASBI, N. ***Two dimensional guillotine cutting stock and scheduling problem in printing industry***. *Computers & Operations Research*, v. 148, p. 106014–106014, 1 dez. 2022.

MARSCHNER, Cintia. **A grande diferença entre a sala segura e a sala cofre**. Zeittec, 29 ago. 2022. Disponível em: <https://zeittec.com.br/sala-segura-sala-cofre/#:~:text=A%20grande%20diferen%C3%A7a%20entre%20esses,feitas%20com%20materiais%20n%C3%A3o%20propagantes>. Acesso em: 30 jun. 2025.

MARLER, R. T.; ARORA, J. S. ***Survey of Multi-Objective Optimization Methods for Engineering***. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, p. 369-395, 2004

MARTINS, T. M. .; CARNEIRO, R. N. .; MERGULHÃO, R. C. . **O conceito da segurança da informação como estratégia organizacional no contexto da Indústria 4.0**. *Revista de Gestão e Secretariado*, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 1068–1082, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v14i1.1571. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/1571>. Acesso em: 24 jun. 2025.

MARTIN, M. **Problemas de corte guilhotinado e restritos: formulações matemáticas e métodos de solução**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto. Coorientador: Prof. Dr. Pedro Augusto Munari Junior. Financiamento: CAPES, FAPESP (processo nº 2016/08039-1) e CNPq (processo nº 200745/2018-2).

MATSUMOTO, K.; SHUNJI UMETANI; HIROSHI NAGAMOCHI. ***On the one-dimensional stock cutting problem in the paper tube industry***. *Journal of Scheduling*, v. 14, n. 3, p. 281–290, 5 fev. 2010

MIRHASSANI, S. A.; JALAEIAN BASHIRZADEH, A. ***A GRASP meta-heuristic for two-dimensional irregular cutting stock problem***. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [S. l.], v. 80, p. 2011–2020, 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-

7107-1. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7107-1>. Acesso em: 30 jun. 2025.

MURALIDHARAN, C., ANANTHARAMAN, N. and DESHMUKH, S.G. *A Multi-Criteria Group Decision making Model for Supplier Rating*. *Journal of Supply Chain Management*, 38: 22-33, 2002. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2002.tb00140.x>

POLDI, K. C.; ARENALES, M. N. **Heurísticas para o problema de corte de estoque unidimensional inteiro**. *Pesquisa Operacional*, v. 26, n. 3, p. 473–492, 2006.

POLDI, K. C.; ARENALES, M. N. **O problema de corte de estoque unidimensional multiperíodo**. *Pesquisa Operacional*, v. 30, n. 1, p. 153–174, 2010.

RANGEL, S.; FIGUEIREDO, A. G. **O problema de corte de estoque em indústrias de móveis de pequeno e médio portes**. *Pesquisa Operacional*, v. 28, n. 3, p. 451–472, 2008.

RESENDE, M. G. C.; SILVA, R. M. A. **GRASP: procedimentos de busca gulosos, aleatórios e adaptativos**. In: *Metaheurísticas em Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SBPO), 2003. Cap. 1.

STADTLER, H. *A one-dimensional cutting stock problem in the aluminium industry and its solution*. *European Journal of Operational Research*, v. 44, n. 2, p. 209–223, jan. 1990.

SUNDARAM, R. M. *An application of goal programming technique in metal cutting*. *International Journal of Production Research*, v. 16, n. 5, p. 375–382, 1978. DOI: 10.1080/00207547808930029.

VELASCO, A. S.; PAULA JUNIOR, G. . G. de; NETO, E. V. **Um algoritmo heurístico baseado na GRASP para o problema de corte bidimensional guilhotinado e restrito**. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, [S. l.], n. 1, p. Pag. 129, 2008. DOI: 10.15675/gepros.v0i1.218. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/gepros/article/view/218>. Acesso em: 29 jun. 2025.

VIANNA, A.; POLDI, K. **O problema de corte de estoque bidimensional aplicado a uma indústria de esquadrias metálicas**. *Simpósio Brasileiro De Pesquisa Operacional*, 27 set. 2005. Disponível em: <<http://din.uem.br/sbpo/sbpo2005/pdf/arq0053.pdf>>. Acesso em: 02/11/2023.

WÄSCHER, G.; HAUSSNER, H.; SCHUMANN, H. *An improved typology of cutting and packing problems*. *European Journal of Operational Research*, v. 3, n. 183, p. 1109–1130, 2007.

APÊNDICE A – Demanda para o problema bidimensional

Tabela 4 - Informações de tamanho e demanda de cada peça por período

Peça	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Demanda de peças i por período t				
			t1	t2	t3	t4	t5
p1_1	3000	595	26				
p1_2	145	595	26				
p2_1	3000	274	4				
p2_2	145	274	4				
p3	2935	255	1				
p4	2411	255	4				
p5	2408	595	20				
p6	2128	595	16				
p7	2064	595	16				
p8	1198	311	3				
p9	595	75	26	48	30	70	46
p10	275	75	4	4			4
p11	200	75	4	4	4	2	4
p12_1_1	3000	595		1			
p12_1_2	3000	595		1			
p12_2_1	447	595		1			
p12_2_2	447	595		1			
p13_1	3000	595		48			
p13_2	447	595		48			
p14_1	3000	295		4			
p14_2	447	295		4			
p15	2735	595		9			16
p16	2735	315		2			
p17	2671	595		9			16
p18	2410	595		36	10		32
p19	2410	251		4	2		4
p20	2130	595		9			
p21	2110	595		18			
p22	2110	251		2			
p23	2066	595		9	6		
p24	2066	222		2			
p25	1365	431		3			
p26	1200	75		1			
p27	812	75		1			
p28_1	3000	595			25		46
p28_2	147	595			25		46
p29_1	3000	315			3		

p29_2	147	315			3		
p30_1	3000	296			2		
p30_2	147	296			2		
p31_1	3000	275			3		
p31_2	147	275			3		
p32_1	3000	221			4		
p32_2	147	221			4		
p33_1	3000	181			4		
p33_2	147	181			4		
p34	2747	595			5		
p35	2747	275			2		
p36	2130	595			6		
p37	2037	222			2		
p38	1805	251			1		
p39	1200	463			3		
p40	322	75			1		
p41	296	75			6		
p42	240	75			5		
p43_1_1	3000	595				2	
p43_1_2	3000	595				2	
p43_2_1	847	595				2	
p43_2_2	847	595				2	
p44_1	3000	595				70	
p44_2	847	595				70	
p45_1	3000	315				2	
p45_2	847	315				2	
p46_1	3000	295				11	
p46_2	847	295				11	
p47	2435	595				12	
p48	2435	315				2	
p49	2371	595				12	
p50	2371	222				2	
p51	2348	595				12	
p52	2348	295				1	
p53	2348	222				2	
p54	1805	595				120	
p55	1805	414				10	
p56	1505	595				48	
p57	1505	414				4	
p58	1505	251				4	
p59_1	1365	400				3	
p59_2	1365	268				3	
p60	295	75				11	

p61_1	3000	315					4
p61_2	147	315					4
p62	2735	315					4
p63	1200	313					3

Fonte: Autor, 2025.