



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA

CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MAURÍCIO KASSAR PALURI

**APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA MINIMIZAÇÃO DE PERDAS
DE BARRAS METÁLICAS EM UMA INDÚSTRIA DE CORTE E DOBRA**

PESQUISA OPERACIONAL

Campo Grande – MS

Junho de 2024

MAURÍCIO KASSAR PALURI

**APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA MINIMIZAÇÃO DE PERDAS
DE BARRAS METÁLICAS EM UMA INDÚSTRIA DE CORTE E DOBRA**

PESQUISA OPERACIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Produção da
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Orientador: Dr. João Batista Sarmiento dos
Santos Neto

Coorientadora: Dr^a Carolina Lino Martins

Campo Grande – MS

Junho de 2024

MAURÍCIO KASSAR PALURI

**APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA MINIMIZAÇÃO DE PERDAS
DE BARRAS METÁLICAS EM UMA INDÚSTRIA DE CORTE E DOBRA**

PESQUISA OPERACIONAL

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do estudante **Maurício Kassar Paluri**, apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Campo Grande, MS, 25 de Junho de 2024.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Batista Sarmiento dos Santos Neto

Presidente da Banca – Orientador

Avaliador

Avaliador

RESUMO

PALURI, Maurício Kassar. **APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA MINIMIZAÇÃO DE PERDAS DE BARRAS METÁLICAS EM UMA INDÚSTRIA DE CORTE E DOBRA: PESQUISA OPERACIONAL.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2024.

Este trabalho aborda a implementação efetiva da programação linear como uma ferramenta crucial para minimizar as perdas de metais em uma indústria de corte e dobra localizada em Campo Grande, Mato Grosso do Sul. A pesquisa operacional, ao empregar métodos matemáticos, desempenha um papel fundamental na resolução de dilemas complexos de tomada de decisões, resultando em eficiência operacional e redução de custos. Através de uma modelagem apropriada, levando em consideração restrições e a função objetivo, é possível derivar soluções ótimas que não apenas minimizam as perdas de metais, mas também contribuem para uma significativa redução dos custos de produção. A aplicação prática do Solver, uma ferramenta do Microsoft Excel dedicada à resolução de problemas de otimização, facilitou a identificação de configurações otimizadas. Isso se deu sem a necessidade de o usuário investir tempo considerável em testar variáveis e possibilidades, demonstrando a eficácia e a praticidade dessa abordagem. Os resultados obtidos foram notáveis, refletindo em uma significativa redução nos custos de produção da indústria de corte e dobra em Campo Grande - MS. Destaca-se, portanto, a importância crucial da programação linear neste contexto específico, uma vez que não apenas impulsionou ganhos econômicos, mas também otimizou operações para a indústria, consolidando-se como uma abordagem estratégica e eficiente para enfrentar desafios operacionais e econômicos.

Palavras-Chave: Programação Linear; Minimização de Perdas; Indústria de Corte e Dobra.

ABSTRACT

PALURI, Maurício Kassar. **APPLICATION OF LINEAR PROGRAMMING TO MINIMIZE LOSS OF METAL BARS IN A CUTTING AND BENDING INDUSTRY: OPERATIONAL RESEARCH.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2024.

This article addresses the effective implementation of linear programming as a crucial tool to minimize metal losses in a cutting and bending industry located in Campo Grande, Mato Grosso do Sul. Operational research, employing mathematical methods, plays a fundamental role in resolving complex decision-making dilemmas, resulting in operational efficiency and cost reduction. Through appropriate modeling, considering constraints and the objective function, it is possible to derive optimal solutions that not only minimize metal losses but also contribute to a substantial decrease in production costs. The practical application of Solver, an Excel tool dedicated to solving optimization problems, facilitated the identification of optimized configurations. This occurred without the need for the user to invest considerable time in testing variables and possibilities, demonstrating the effectiveness and practicality of this approach. The results obtained were remarkable, reflecting a significant reduction in production costs for the cutting and bending industry in Campo Grande, MS. It is noteworthy, therefore, the crucial importance of linear programming in this specific context, as it not only drove economic gains but also optimized operations for the industry, establishing itself as a strategic and efficient approach to addressing operational and economic challenges.

Keywords: Linear Programming; Metal Loss Reduction; Production Cost Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Problema Unidimensional (a) Padrões; (b) Itens da demanda; (c) Corte de padrões para atendimento da demanda.....	15
Figura 2 – Exemplo de Problema Bidimensional (a) Padrões; (b) Itens da demanda; (c) Corte de padrões para atendimento da demanda	16
Figura 3 – Exemplo de Problema Tridimensional (a) Padrões disponíveis; (b) Itens a serem carregados; (c) Carregamento dos itens no padrão	16
Figura 4 – Fluxograma do processo.....	26
Figura 5 – Medidas e quantidades de barras utilizadas.....	29
Figura 6 – Quantidade de sobra de acordo com o tamanho da barra.....	30
Figura 7 – Combinações possíveis de acordo com as dimensões das barras pedidas	30
Figura 8 – Modelagem do problema	31
Figura 9 – Dados inseridos no Solver	32
Figura 10 – Perda metálica gerada.....	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 OBJETIVOS.....	8
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	8
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 PESQUISA OPERACIONAL	9
2.2 PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	10
2.3 DESPERDÍCIO E A UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA O PROBLEMA DE CORTE.....	17
2.4 PROGRAMA DE PRODUÇÃO	21
3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	24
4 RESULTADO E DISCUSSÃO	29
5 CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1. INTRODUÇÃO

Falando sobre o corte e dobra, é um mercado que movimenta bilhões de reais no Brasil e Trilhões de dólares no mundo, emprega milhares de homens e mulheres, em variadas funções, desde administrativas, de planejamento e produção. Além disso, é importante ressaltar que esse tipo de material, tem sido cada vez mais utilizado, por conta das vantagens que ele apresenta: Economia, Produtividade e Segurança.

A pesquisa operacional, enquanto área científica, se destaca por empregar métodos e técnicas matemáticas na resolução de problemas inerentes à tomada de decisões (HILLIER; LIEBERMAN 2010; TAHA, 2011). Essa disciplina abrange uma ampla gama de abordagens analíticas e quantitativas, todas direcionadas para aprimorar a eficiência e eficácia das operações em diversos setores industriais e empresariais.

No âmbito da pesquisa operacional, a programação linear assume papel proeminente como uma técnica matemática amplamente aplicada, encontrando aplicações em setores tão variados como produção, logística, finanças e otimização de recursos (HILLIER; LIEBERMAN 2010; TAHA, 2011). Essa abordagem específica visa otimizar a alocação de recursos limitados, utilizando técnicas de minimização ou maximização de uma função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições lineares.

O escopo deste trabalho concentra-se na apresentação e modelagem de um problema de programação linear com o propósito de minimizar as perdas de metal em uma empresa específica de corte e dobra localizada em Campo Grande, MS. Serão abordadas as fases cruciais de formulação do problema, identificação de restrições e definição da função objetivo. Além disso, será realizada uma discussão aprofundada sobre as vantagens e a importância da aplicação das técnicas de programação linear na tomada de decisões estratégicas.

A modelagem adequada de problemas de programação linear emerge como uma ferramenta valiosa para as empresas, permitindo a otimização de processos, a redução de custos operacionais e a melhoria da eficiência dos recursos disponíveis (MARANZANA, 2016). Destaca-se a extrema relevância dessas técnicas na tomada de decisões assertivas em um ambiente empresarial competitivo e dinâmico (HILLIER; LIEBERMAN 2010; TAHA, 2011).

Assim, este trabalho visa não apenas contribuir para o entendimento teórico, mas também para a aplicação prática da programação linear como uma ferramenta crucial no contexto da pesquisa operacional, oferecendo soluções a problemas empresariais complexos. As referências citadas fornecem respaldo à fundamentação teórica e à relevância das técnicas apresentadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é utilizar a programação linear para minimizar as perdas de metais em uma indústria de corte e dobra localizada em Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I) Reduzir desperdícios em uma organização de dobra e corte.
- II) Desenvolver um modelo matemático para minimizar as perdas de metais durante o processo de corte e dobra.
- III) Testar o modelo desenvolvido com aplicação real.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico será conceitualizado temas relevantes para o entendimento do tema abordado.

2.1 PESQUISA OPERACIONAL

Uma importante ciência voltada para soluções de problemas através de modelos matemáticos é a Pesquisa Operacional. A ideia principal é estabelecer o melhor plano para utilização dos recursos disponíveis, os quais na maioria das vezes são limitados. A Pesquisa Operacional surgiu durante a segunda guerra mundial, onde equipes de cientistas motivados pelo objetivo de criar estratégias na tentativa de solucionar problemas de operações militares criaram os primeiros modelos de programação matemática. Devido ao desempenho dessa técnica, a mesma passou a ser aplicada por acadêmicos e empresários em problemas administrativos, pois trata-se de um método que facilita muito o processo de decisão (LONGARAY, 2017).

A Pesquisa Operacional, conforme descrita por Taha (2017), é uma disciplina que emprega métodos quantitativos e modelos matemáticos em busca de soluções para problemas complexos de tomada de decisão. Este campo, apoiado pelas contribuições de Hillier e Lieberman (2010), abrange uma gama de técnicas analíticas que potencializam decisões estratégicas e de planejamento em diversas áreas, desde a produção industrial até a prestação de serviços. Segundo Winston (2004), a programação linear destaca-se entre as ferramentas da Pesquisa Operacional, oferecendo uma estrutura para otimizar os processos e melhorar a eficiência organizacional, enfatizando a importância de alinhar práticas teóricas com desafios operacionais.

O impacto da Pesquisa Operacional no mundo empresarial e industrial é notável em sua capacidade de simplificar e resolver cenários complexos que são inerentemente cheios de variáveis e incertezas. Com o advento de tecnologias avançadas e software de análise, como o Solver no Excel, a aplicação prática dessas ferramentas tornou-se mais acessível e abrangente.

Isso permite que os gestores não apenas modelagem, mas também solucionem problemas de forma eficaz, garantindo que os recursos sejam utilizados da maneira mais eficiente possível e que as metas organizacionais sejam atingidas de maneira otimizada (RAGSDALE, 2011).

Além disso, a Pesquisa Operacional contribui significativamente para a formulação de estratégias empresariais, fornecendo uma base sólida para análise de risco e suporte à decisão em ambientes de incerteza. Por exemplo, os métodos de previsão e simulação que são parte integrante da Pesquisa Operacional ajudam as empresas a antecipar as mudanças do mercado e a responder a elas de forma proativa. A literatura nessa área, como os trabalhos de Winston (2004) e Hillier e Lieberman (2010), oferece um vasto conhecimento que fundamenta essas práticas, permitindo que teoria e aplicação andem de mãos dadas para enfrentar os desafios atuais e futuros do ambiente de negócios.

Uma importante ferramenta matemática para solucionar problemas da PO, é a Programação Linear, a qual consiste em um processo que envolve inversões sucessivas de matrizes, sendo assim uma técnica possível de ser computacionalmente programada (SILVA et al., 1998). Para que seja resolvido um problema de programação linear, este deve ser modelado definindo qual o objetivo do problema, se é maximizar lucros, ou minimizar custos ou desperdícios por exemplo (ANDRADE, 2011).

Uma das principais áreas de estudo e aplicação da Pesquisa Operacional são os chamados Problemas de Cortes, que consistem em utilizar padrões de cortes de modo a atender a demanda desejada com a mínima quantidade de desperdício de material possível, obtendo maiores resultados com relação à lucratividade em tempo de processos e economia de matéria-prima, contribuindo de forma importante para problemas ligados ao meio ambiente. (HEIN; LOESCH, 2017).

2.2 PROGRAMAÇÃO LINEAR

A otimização de processos pode ser efetuada em diferentes níveis de atuação, tais como logística, projetos, operações, e por meio de diferentes procedimentos de aplicação (PRADO, 2016). Independentemente do nível e do tipo de aplicação, a busca da programação matemática, como um caminho para a solução de problemas, fundamenta-se em três aspectos: (i) a criação

de uma função objetivo; (ii) a escolha das variáveis de decisão; e (iii) a apresentação do conjunto de restrições (BRONSON, 1985).

Segundo Bronson (1985), a função objetivo é composta por um número finito de variáveis na qual se deseja encontrar o valor máximo ou mínimo. As variáveis de decisão podem ser caracterizadas como independentes umas das outras ou podem ser relacionadas por meio de uma ou mais restrições. Já as restrições são compostas por um número finito de equações e inequações, que são estabelecidas em decorrência das particularidades inerentes a cada problema.

A programação linear apresenta-se neste contexto como uma das ferramentas destinadas a otimização de processos. Este modelo se caracteriza por resolver problemas com variáveis que possam ser mensuradas e cujos relacionamentos possam ser declarados por meio de expressões lineares (BRONSON, 1985; BRASIL; SILVA, 2019).

Brasil e Silva (2019) apontam que o modelo é uma representação aproximada da realidade através de equações matemáticas, a sua construção contribui para colocar as complexidades e possíveis incertezas de um problema em uma estrutura lógica, possibilitando uma análise mais ampla. Para Taha (2017) o modelo de programação linear é composto por três componentes básicos: (i) as variáveis de decisão, as quais se procura determinar; (ii) o objetivo, o qual é necessário otimizar; e (iii) as restrições que a solução deve satisfazer.

Em qualquer problema de programação linear, cujos modelos são representado por expressões lineares, na sua formulação matemática é necessário definir as variáveis de decisão, uma função matemática que representa a medida da vantagem (desvantagem) da tomada de decisão denominada função objetivo, sendo que pode ser de maximização ou de minimização, um conjunto de restrições associadas às variáveis de decisão denominadas restrições do modelo, um conjunto de constantes (coeficientes) da função objetivo e das restrições denominadas parâmetros do modelo, não esquecendo que tem de ser também definidos os limites das variáveis (TAHA, 2017).

Posteriormente, o problema vai ser resolvido pelo algoritmo, que é um procedimento iterativo e tem de verificar cinco propriedades: proporcionalidade; divisibilidade; não negatividade; aditividade; linearidade da função objetivo. A resolução do problema à forma padrão do Simplex obedece a quatro condições: variáveis não negativas; termos independentes das restrições não negativos; restrições sob a forma de igualdade; existir uma variável única

(variável básica inicial) em cada restrição, que não se inclua em mais nenhuma e apresente o coeficiente um (TAHA, 2017).

De acordo com Gassen et al. (2019), as variáveis que devem ser maximizadas ou minimizadas são denominadas variáveis de controle e terão determinado seu valor para uma solução ótima do caso a partir da função objetivo que expressa linearmente o problema. Essas variáveis também estão associadas com um conjunto de restrições, que se constituem por equações e inequações.

Silva et al. (1998), propõem seguir um caminho em três elementos básicos para a construção de modelos matemáticos com objetivo de ordenar o raciocínio. O primeiro elemento é relacionado com as variáveis de decisão onde devem ser apresentadas as possíveis decisões a serem tomadas. O segundo é qual o objetivo do problema onde são relatados e identificados os porquês da tomada de decisão. Nesse elemento o objetivo sempre será voltado para calcular o valor (lucro, custo, receita, perda, etc), e o terceiro elemento são as restrições, as quais caracterizam as limitações do problema.

Prado (2016) afirma que o método da programação linear deve observar os seguintes procedimentos, para solucionar um problema: Definir o problema - para isso, é preciso identificar o objetivo pretendido, as variáveis de decisão, ou seja, as variáveis que estão ligadas a esse objetivo e, ainda, quais as limitações e relações a que estas variáveis estão sujeitas. O objetivo, em geral, é maximizar ou minimizar um item, observando se os recursos disponíveis são escassos, ou seja, possuem condições restritivas. O modelo é codificado em uma linguagem simbólica, no caso, através de equações e inequações matemáticas lineares.

Dessa forma, o mundo real será representado através de um modelo matemático, permitindo que sobre ele se apliquem técnicas e métodos matemáticos que facilitem a solução do problema. Definido o problema, é preciso obter a solução desse por meio do modelo construído. Para a solução do problema, podem ser utilizados os seguintes métodos: gráfico, tentativa e erro, simplex, dentre outros. Hoje, existem diversos programas de computador, softwares disponíveis no mercado, para solucionar problemas de programação linear, fáceis de serem operados.

Para resolução destes modelos no cotidiano fabril, faz-se necessário o uso de ferramentas computacionais adequadas, capazes de solucionar os problemas em um curto espaço de tempo. Segundo Lachtermacher (2009), comumente são usados os programas Lottus

da Lotus/IBM, o Quattro-pro da Corel, o Excel da Microsoft e algumas aplicações com o Calc da suíte BOffice ou What's Best da LINDO. No presente trabalho, utilizou-se a ferramenta Solver do MS Excel, visto que se trata de uma ferramenta disponível na empresa objeto deste estudo, não demandando novos investimentos para a aplicação.

A programação linear é uma técnica de modelagem matemática amplamente utilizada para resolver problemas de otimização. Ela facilita a identificação da melhor maneira de distribuir recursos escassos para alcançar objetivos estabelecidos, dentro de um conjunto de restrições predeterminadas (CERQUEIRA; YANASSE, 2006; FRANCESCETTE, 2009).

Essa abordagem é particularmente valiosa em setores onde a eficiência material e operacional é primordial, como na indústria de corte e dobra, onde a minimização de desperdícios é crucial. A aplicação eficaz da programação linear nesse contexto pode resultar em economia significativa de custos e melhor aproveitamento dos insumos disponíveis (CERQUEIRA; YANASSE, 2006; FRANCESCETTE, 2009).

A robustez da programação linear decorre de sua base matemática sólida, que foi objeto de investigação e desenvolvimento intensivos desde a invenção do algoritmo simplex por Dantzig, e sua expansão para abordar problemas mais complexos e de larga escala (DANTZIG, 1963). Avanços subsequentes na teoria e prática foram documentados em trabalhos acadêmicos que expandiram o escopo da programação linear para englobar modelos de otimização não lineares e de grande escala, tornando-a uma ferramenta indispensável em pesquisa operacional e ciências de decisão (LUENBERGER; YE, 2008; VANDERBEI, 2008).

A programação linear é uma das técnicas da pesquisa operacional bastante utilizadas em se tratando de problemas de otimização. Os problemas de programação linear buscam a distribuição eficiente de recursos limitados para atender a um determinado objetivo, em geral, maximizar lucros ou minimizar custos.

Em se tratando de programação linear, esse objetivo é expresso através de uma função linear, denominada "função-objetivo". A finalidade da programação linear é encontrar o lucro máximo ou o custo mínimo em situações reais. De acordo com Gassen et al. (2019), a redução de custos proporcionada pela programação linear como ferramenta é de 1% a 5%, existindo casos que chegam até a 15%.

É necessário também que se definam quais as atividades que consomem recursos e em

que proporções são consumidos. Essas informações são apresentadas em forma de equações ou inequações lineares, uma para cada recurso. O conjunto dessas equações e/ou inequações denominam-se “restrições do modelo”. Normalmente, há inúmeras maneiras de distribuir os recursos escassos entre diversas atividades em estudo, bastando, para isso, que essas distribuições estejam coerentes com as restrições do modelo. No entanto, o que se busca, num problema de programação linear, é a função-objetivo, isto é, a maximização do lucro ou a minimização dos custos. A essa solução dá-se o nome de “solução ótima”. Assim, ela se incumbem de achar a solução ótima de um problema, uma vez definido o modelo linear, ou seja, a função-objetivo e as restrições lineares (GASSEN et al., 2019).

Além de sua aplicação em indústrias específicas, a programação linear também desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de estratégias em diversas outras áreas, como logística, serviços financeiros e gestão de saúde. A capacidade de processar e otimizar grandes conjuntos de dados para encontrar a solução mais eficiente faz da programação linear uma ferramenta inestimável na era do big data.

A introdução à otimização linear oferecida por Bertsimas e Tsitsiklis (1997) fornece uma base teórica para essas aplicações, enquanto a abordagem clássica de Chvátal (1983) destaca a permanência e relevância de longo prazo da programação linear em várias disciplinas. Para atingir determinados objetivos, sujeitos a restrições específicas. No contexto da indústria de corte e dobra, a programação linear pode ser aplicada para determinar a sequência de cortes que minimize as perdas de sucata, levando em consideração os comprimentos desejados para as peças finais (CERQUEIRA; YANASSE, 2006; FRANCESCHETTE, 2009).

2.3 DESPERDÍCIO E A UTILIZAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA O PROBLEMA DE CORTE

Hein e Loesch (2017) conceitua como sendo desperdício toda forma de custo que não adiciona qualquer valor ao produto sob a ótica do cliente. Por esta definição, contar e estocar partes componentes, qualquer forma de inspeção, testes, transportes, preenchimento de

controles internos, perdas durante o processo, atividades de reprocessamento e atendimento de garantias e outros, seriam formas de desperdícios.

Diferente deste pensamento, Prado (2016), diz que desperdício é a perda a que a sociedade é submetida devido ao uso de recursos escassos. Esses recursos escassos vão desde material, mão-de-obra e energia perdidos, até a perda de horas de treinamento e aprendizado que a empresa e a sociedade perdem devido, por exemplo, a um acidente de trabalho.

Segundo Melo et al. (2021), estima-se que desde muito tempo o desperdício seja um termo presente e constante no cotidiano das indústrias. Como exemplos clássicos de desperdícios, lista-se: matéria-prima, insumos, mão de obra, tempo, dinheiro, recursos tecnológicos, energia, combustível, resíduos, espaço físico e até potencial humano. Ainda segundo os autores, a matéria-prima em geral, pode ser proveniente de recurso natural ou obtida através de reprocessamento, ou seja, subprodutos.

Em uma fábrica, julga-se que os desperdícios mais significativos para a produção estão no que tangem os insumos e a matéria-prima. Para Corrêa e Corrêa (2017) eliminar desperdícios significa analisar todas as atividades realizadas na fábrica e descontinuar as que não agregam valor à produção. Neste contexto, ao pensar sobre a eliminação total do desperdício, precisa-se ter em mente os seguintes pontos:

- a) O aumento da eficiência só faz sentido quando está associado a redução de custos. Para obter isso, é necessário produzir apenas aquilo que é necessário, usando um mínimo de mão-de-obra;
- b) Observar a eficiência de cada operador e de cada linha. Observar então os operadores como um grupo, e depois a eficiência de toda a fábrica (todas linhas). A eficiência deve ser melhorada em cada estágio e, ao mesmo tempo, para a fábrica como um todo.

Ainda segundo Corrêa e Corrêa (2017), a verdadeira melhoria na eficiência surge quando se produz zero desperdício e leva-se a porcentagem de trabalho para 100%. Uma vez que, no sistema Toyota de produção deve-se produzir apenas a quantidade necessária a força de trabalho deve ser reduzida para cortar o excesso de capacidade e corresponder à quantidade necessária. De acordo com o mesmo autor, a eliminação completa desses desperdícios pode

umentar a eficiência de operação por uma ampla margem.

Trabalhos recentes na área da programação de cortes têm sido aplicados no ambiente industrial. Uma importante aplicação desta classe de problemas é encontrada em Loeblein et al. (2019). Neste trabalho os autores propõem um modelo voltado ao corte de tubos onde foram descritos 28 padrões de cortes distintos, onde o modelo matemático foi implementado com a utilização de planilhas usando a ferramenta Solver.

Os resultados foram aplicados em uma empresa fabricante de máquinas agrícolas e mostrou a viabilidade da implantação da pesquisa operacional na empresa. Silveira et al. (2013), destacaram em seu trabalho a aplicação da Pesquisa Operacional em uma indústria metalmeccânica com objetivo de otimizar uma operação de corte de barras de aço, onde foram criadas 137 combinações de corte. A ferramenta Solver do programa Microsoft® Office Excel 2007 foi utilizada para a resolução dos modelos e com isso atender a demanda necessária e minimizar o desperdício de materiais.

O estudo de Wavrzynczak, Ulbricht e Teixeira (2015) apresentou a aplicação da Pesquisa Operacional na otimização de processos fabris, focando na minimização do desperdício de matéria-prima e conseqüente redução de custos produtivos. O estudo aborda especificamente o problema de corte unidimensional de barras de aço cilíndricas para a fabricação de triângulos musicais.

O modelo matemático de otimização foi estruturado em dois estágios principais. No primeiro, foram estabelecidos o maior número possível de padrões de corte das barras de aço. No segundo estágio, foi definido quais padrões seriam utilizados e em que quantidades, para atender à demanda prevista de triângulos de diferentes medidas (WAVRZYNCZAK; ULBRICHT; TEIXEIRA, 2015).

Com a implementação do modelo, foi possível alcançar uma perda teórica de apenas 0,3% do total de barras de aço utilizadas, um índice significativamente menor do que o registrado atualmente pela empresa. Estes resultados preliminares indicam uma redução gradativa nos desperdícios, destacando o potencial do modelo como uma ferramenta eficaz na gestão de recursos e na tomada de decisões (WAVRZYNCZAK; ULBRICHT; TEIXEIRA, 2015).

Além de proporcionar uma redução no desperdício de matéria-prima, o modelo também permite ajustes na produção e no estoque de triângulos, conforme a demanda e as condições reais

de produção. Esta flexibilidade é importante para a programação eficiente da produção e pode servir de referência para a avaliação e otimização de novos produtos.

A pesquisa de Melo et al. (2021), teve como objetivo prever a quantidade necessária de serviços de corte, dobra e armação de aço para maximizar o lucro de uma empresa, considerando diversas restrições de produção e demanda de mercado. Utilizando a programação linear e a ferramenta Solver no Excel, foi possível obter resultados significativos.

Primeiramente, a pesquisa indicou que a empresa pode alcançar um lucro bruto de R\$ 568.320,00. Para atingir esse lucro, é necessário produzir 1900 unidades de corte e dobra de aço, com um custo ótimo de R\$ 267,66 por unidade. Além disso, é preciso prestar o serviço de armação com 100 unidades, onde o custo máximo permitido é de R\$ 597,66 por unidade (MELO et al., 2021).

A análise de preço-sombra revelou que aumentar a capacidade de executar o serviço de armação poderia incrementar o lucro em R\$ 330 por unidade adicional, até um limite de 1900 unidades. Da mesma forma, o material disponível para corte e dobra, e para armação, pode ser aumentado em até 100 unidades, elevando o lucro em R\$ 267,66 por unidade adicional (MELO et al., 2021).

A análise de sensibilidade mostrou que os valores ótimos das variáveis de decisão e os preços-sombra permanecem válidos dentro de certos limites de variação nos coeficientes objetivos e nas restrições. Por exemplo, a capacidade de corte e dobra pode ser aumentada até 2000 unidades sem afetar negativamente o lucro, e a capacidade de armadura pode ser aumentada até 1900 unidades, mantendo a mesma rentabilidade (MELO et al., 2021).

As conclusões destacaram que a modelagem do problema usando programação linear foi eficaz para determinar a melhor distribuição dos recursos e maximizar o lucro da empresa. A solução ótima encontrada é robusta e pode ser ajustada conforme as mudanças no mercado, permitindo uma gestão eficiente dos custos operacionais e materiais. A pesquisa sugere que a programação linear pode auxiliar significativamente os gestores do setor da construção civil na tomada de decisões sobre como gerir os custos e recursos da empresa (MELO et al., 2021).

Por fim, o estudo proposto por Silva et al. (2018), teve como principal objetivo desenvolver uma sistemática de produção para uma empresa, visando maximizar o uso de recursos e aumentar a rentabilidade. No contexto deste estudo, a análise linear para corte e dobra

desempenhou um papel crucial na otimização dos processos de produção. Esta análise envolveu a aplicação de técnicas matemáticas e estatísticas para entender e melhorar a eficiência das operações de corte e dobra de metais.

Ao incorporar essa análise ao modelo de produção, foi possível identificar padrões de desempenho e oportunidades de melhoria nos processos de corte e dobra. Por exemplo, por meio de análises estatísticas, pode-se determinar tempos médios de execução, taxas de falha e eficiência operacional em cada etapa do processo. Essa abordagem permitiu uma melhor compreensão dos gargalos e pontos de ineficiência nos processos de corte e dobra, possibilitando a implementação de estratégias para maximizar a produtividade e reduzir os custos (SILVA et al., 2018).

Além disso, ao integrar essa análise com a simulação de dados e a modelagem matemática do problema de produção, foi possível avaliar o impacto das melhorias propostas na rentabilidade global da empresa. Portanto, a análise linear para corte e dobra desempenhou um papel fundamental na identificação de oportunidades de otimização dos processos de produção, contribuindo para o aumento do lucro e da eficiência operacional da empresa (SILVA et al., 2018).

A partir desse modelo, foram realizadas simulações visando reduzir o tempo de produção e maximizar o lucro. Os resultados obtidos revelaram um aumento significativo no lucro após a implementação da programação linear. Isso demonstra a eficácia das medidas adotadas para otimizar a produção e a gestão dos recursos da empresa. Esses resultados destacam a importância de uma abordagem sistemática e analítica na gestão da produção, visando sempre a maximização dos resultados e a melhoria contínua dos processos (SILVA et al., 2018).

2.4 PROGRAMA DE PRODUÇÃO

A programação da produção é fundamental no gerenciamento operacional de qualquer empresa de manufatura ou serviço, assegurando que a produção seja alinhada com as demandas dos clientes e as capacidades operacionais da empresa. Esta harmonização é vital para manter altos níveis de satisfação do cliente e alcançar a excelência operacional. Técnicas

de programação linear são empregadas para planejar e executar a produção de maneira que maximize a utilização dos recursos e minimize os custos, abordando desafios como alocação de recursos, sequenciamento de tarefas e gerenciamento de inventário (LACHTERMACHER, 2009; OLIVEIRA; SILVEIRA; FERREIRA, 2010).

O crescente dinamismo dos mercados modernos e a complexidade dos processos de produção tornam a programação de produção uma área desafiadora e em constante evolução. Na busca pela vantagem competitiva, as empresas recorrem a métodos sofisticados como simulação e otimização estocástica para desenvolver programações robustas que possam se adaptar a incertezas e mudanças na demanda. Os princípios apresentados em "Factory Physics" (HOPP; SPEARMAN, 2011) estabelecem as bases para entender e aplicar leis científicas que governam as operações de produção, proporcionando um framework para melhorar a tomada de decisão operacional.

Além disso, a integração da programação da produção com as práticas de gerenciamento da cadeia de suprimentos é crucial para o desempenho eficiente dos sistemas produtivos. Livros como "Operations Management: Processes and Supply Chains" (KRAJEWSKI; RITZMAN; MALHOTRA, 2015) detalham como a coordenação efetiva entre as atividades de produção e os parceiros da cadeia de suprimentos é essencial para o fluxo contínuo de materiais e informações. Igualmente, "Inventory and Production Management in Supply Chains" (SILVE; PYKE; PETERSON, 2017) discute a interconexão entre a programação da produção e o gerenciamento de inventário, ressaltando a necessidade de um planejamento estratégico que aborde tanto os recursos internos quanto os fatores de mercado.

O principal desafio de um sistema de produção é o balanceamento entre a oferta e a procura. Tanto a demanda como a capacidade de produção são dimensões extremamente importantes, de forma que combiná-las é um desafio permanente da gerência de produção. Portanto, a programação linear é uma ferramenta que se pode utilizar para determinar a oferta e demanda dos produtos comercializados.

O processo de planejamento da produção exige um conjunto de decisões que devem ser tomadas para adaptar os recursos industriais da empresa de modo a satisfazer a demanda (BRASIL; SILVA, 2019). A programação linear pode auxiliar no planejamento da produção com a função de garantir que a produção ocorra eficazmente e produza produtos e serviços com qualidade e sem custos de desperdícios de material. Isto requer que os recursos produtivos

estejam disponíveis: na quantidade adequada, no momento certo e no nível de qualidade desejado.

De acordo com Prado (2016), a programação da produção é responsável por definir quando e quanto comprar, produzir ou montar de cada componente dos itens necessários para a composição dos produtos. Para isso são emitidas ordens de fabricação, ordens de compra, ordens de montagem. As atribuições da programação de produção podem ser divididas em três grupos: administração de estoques, sequenciamento e emissão e liberação de ordens.

No entanto, as empresas devem se preparar elaborando planos de longo prazo para dimensionamento de suas capacidades futuras, através de estudos de previsão de demanda. Além de que os seus objetivos devem ser formulados pelo planejamento estratégico, que serão definidos pela alta administração, com a finalidade de se fazer a previsão dos recursos. Estes devem ser distribuídos eficientemente para que não haja falhas no processo e desperdícios de matérias primas. Decisões devem ser tomadas pelos gestores da empresa e a programação linear é a ferramenta que encontra a maneira ideal ou mais eficiente de usar recursos limitados, principalmente na programação e controle da produção.

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para a elaboração deste trabalho, foram utilizados os métodos de abordagem dedutivo e quantitativo, sendo que método dedutivo, de acordo com o entendimento clássico, é o método que parte do geral e, a seguir, desce ao particular. A partir de princípios, leis ou teorias consideradas verdadeiras e indiscutíveis, prediz a ocorrência de casos particulares com base na lógica. Já o método de abordagem dedutivo parte de princípios reconhecidos como verdadeiros e indiscutíveis e possibilita chegar a conclusões de maneira puramente formal, isto é, em virtude unicamente de sua lógica (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Esta pesquisa é caracterizada como quantitativa, tendo em vista que está baseada na análise de dados numéricos relacionados aos planos de cortes e apuração dos desperdícios de matéria prima, para posterior elaboração dos modelos matemáticos. Em relação aos objetivos é exploratória e descritiva, sendo que a pesquisa exploratória é quando esta se encontra na fase preliminar, tendo como finalidade proporcionar mais informações sobre o assunto que será investigado, possibilitando sua definição e seu delineamento, isto é, facilitar a delimitação do tema da pesquisa; orientar a fixação dos objetivos e a formulação das hipóteses ou descobrir um novo tipo de enfoque para o assunto. Quanto a pesquisa descritiva observa, registra, analisa e ordena dados, sem manipulá-los, isto é, sem interferência do pesquisador. Procura descobrir a frequência com que um fato ocorre, sua natureza, suas características, causas, relações com outros fatos (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Assim, para coletar tais dados, utiliza-se de técnicas específicas, dentre as quais se destacam a entrevista, o formulário, o questionário, o teste e a observação. Esta pesquisa é caracterizada como descritiva uma vez que se buscou somente observar, registrar e analisar os dados repassados pela empresa sobre o cenário atual dos cortes de tubos, para que após isso fossem ordenadas e organizadas as informações coletadas, a fim de propor melhorias para a empresa.

Os métodos de procedimentos utilizados foram a pesquisa bibliográfica, documental e estudo de caso, sendo que a pesquisa bibliográfica é elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de: livros, revistas, publicações em periódicos e artigos científicos, jornais, boletins, monografias, dissertações, teses, material cartográfico, internet, com o objetivo de colocar o pesquisador em contato direto com todo material já escrito sobre o

assunto da pesquisa. Na pesquisa bibliográfica, é importante que o pesquisador verifique a veracidade dos dados obtidos, observando as possíveis incoerências ou contradições que as obras possam apresentar (PRODANOV; FREITAS, 2013).

O estudo de caso pode ser considerado um estudo profundo de um ou poucos objetos de maneira que permita o seu amplo e detalhado conhecimento. Possui uma metodologia de pesquisa classificada como Aplicada, na qual se busca a aplicação prática de conhecimentos para a solução de problemas sociais. Os resultados deste tipo de estudo, em sua maior parte, estão voltados para a aplicação imediata de conhecimentos em uma realidade circunstancial, destacando o desenvolvimento de teorias (PRODANOV; FREITAS, 2013).

O estudo de caso consiste em coletar e analisar informações sobre determinado indivíduo, uma família, um grupo ou uma comunidade, a fim de estudar aspectos variados de sua vida, de acordo com o assunto da pesquisa. É um tipo de pesquisa qualitativa e/ou quantitativa, entendido como uma categoria de investigação que tem como objeto o estudo de uma unidade de forma aprofundada, podendo tratar-se de um sujeito, de um grupo de pessoas, de uma comunidade etc. São necessários alguns requisitos básicos para sua realização, entre os quais, severidade, objetivação, originalidade e coerência. Este é um estudo de caso, pois se aplica somente a esta situação específica, devido suas particularidades (GIL, 2002).

A técnica de coleta de dados utilizada neste estudo foi a entrevista, que pode ser caracterizada pela obtenção de informações de um entrevistado sobre determinado assunto ou problema. É necessário ter um plano para a entrevista, visto que, no momento em que ela está sendo realizada, as informações necessárias não deixem de ser colhidas. As entrevistas podem ter o caráter exploratório ou ser de coleta de informações. Se a de caráter exploratório é relativamente estruturada, a de coleta de informações é altamente estruturada. A entrevista se deu de forma informal com o gerente industrial e com o analista responsável pelo corte de tubos (PRODANOV; FREITAS, 2013).

As técnicas de análise de dados utilizadas na pesquisa foram o Excel, para elaborar os planos de cortes e o suplemento Solver do Excel para a resolução dos modelos matemáticos, sendo que foi utilizada a modelagem através da Programação Linear para o problema de corte.

Diante do exposto, a Figura 4 apresenta o fluxograma do processo de pesquisa adotado neste trabalho.

Figura 4 – Metodologia



Fonte: Autor (2024)

i) OBSERVAÇÃO

Nesta etapa, foi analisada a rotina do operador, que primeiramente pega o conjunto de plaquetas que serão produzidas, leva até a bancada da máquina e separa elas de acordo com os tamanhos, fazendo assim o que chamamos de ‘casamento de plaquetas’. Posteriormente, ele vai até a baia de matéria prima, separa os ‘pacotes’ de barra, que irá utilizar para o pedido que será cortado e por fim, através da ponte rolante, abastece a máquina com o material.

ii) TESTES DE AMOSTRAGEM

Testes práticos com amostras representativas são fundamentais para identificar oportunidades de melhoria e obter resultados tangíveis. Esses testes permitem a análise de diferentes sequenciamentos de produção, possibilitando a identificação de padrões e a estimativa preliminar de redução de perdas. É por meio desses testes que podemos validar e ajustar as estratégias de otimização em um ambiente controlado (GOLDRATT, 1992).

iii) ENTREVISTA

Paralelamente aos testes de amostras, são conduzidas entrevistas com operadores, supervisores e demais profissionais envolvidos no processo produtivo. Essas entrevistas visam coletar informações sobre desafios operacionais, restrições técnicas, sugestões de melhorias e percepções gerais relacionadas ao corte de vergalhões de aço. As respostas obtidas nas entrevistas fornecem insights valiosos para o desenvolvimento de estratégias eficazes de otimização do processo de corte de vergalhões de aço.

Conforme destacado por Womack e Jones (2003), a participação ativa dos colaboradores envolvidos na linha de produção é fundamental para identificar oportunidades de aprimoramento e implementar mudanças efetivas. As entrevistas permitem uma compreensão mais abrangente das necessidades e perspectivas dos profissionais que lidam diariamente com o processo de corte, possibilitando a integração de suas ideias e experiências no planejamento estratégico. Além disso, as informações coletadas por meio das entrevistas contribuem para uma abordagem mais alinhada às demandas operacionais e aos desafios específicos enfrentados pela fábrica de corte e dobra de vergalhões de aço.

iv) CRIAÇÃO DA MODELAGEM

Neste procedimento, seguimos uma abordagem em duas etapas para criar a modelagem de um Programa Linear (PL) em Pesquisa Operacional. Primeiro, definimos o problema e formulamos sua representação matemática, identificando variáveis de decisão, função objetivo e restrições lineares. Em seguida, implementamos o PL usando uma linguagem de programação ou software adequado, resolvendo-o com um solver e analisando os resultados obtidos. Este procedimento se baseia nas contribuições de autores como Hillier e Lieberman (2010), Taha (2017), Pindyck e Rubinfeld (2013), e Winston (2004).

v) APLICAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Este procedimento consiste em duas etapas para aplicar o estudo de caso. Primeiro, realiza-se o planejamento, que envolve definir o objetivo, selecionar o caso apropriado e coletar dados relevantes. Em seguida, realiza-se a análise e relato, onde os dados são organizados, analisados e interpretados, culminando em um relatório detalhado. Autores como Yin (2018), Stake (2013), Eisenhardt (1989) e Flyvbjerg (2006) contribuem com suas perspectivas sobre a aplicação do estudo de caso em pesquisas e análises.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, foi realizada uma discussão dos resultados encontrados após a aplicação da metodologia. O comprimento padrão das barras na fábrica é de 1200 cm. A indústria estudada tem a necessidade de cortar os vergalhões em diferentes tamanhos, para a fabricação de diversos itens de produção. Sem uma programação nos cortes, há grande perda de matéria-prima, as sobras das barras são encaminhadas para o estoque para uma futura reutilização ou então vendidas como sucata, a um preço muito inferior ao que foi pago. O problema desta pesquisa consiste em programar de forma mais eficaz o sequenciamento do corte de tubos para que haja menor perda de matéria-prima.

Para demonstração da resolução do problema neste trabalho, utilizou-se a programação da produção de corte de um pedido. Na qual, tem-se a produção de 9 itens diferentes com a barra, nomeadas de “A” a “I”. A Figura 5 apresenta as medidas e quantidades de cada produto utilizado para estudo.

Figura 5 – Medidas e quantidades de barras utilizadas

Produtos	Comprimento(cm)	Quantidade
A	1197	24
B	365	8
C	1200	27
D	1200	27
E	1200	2
F	692	24
G	463	48
H	353	48
I	331	48

Fonte: Autor (2024)

Primeiramente analisou-se como os comprimentos das barras podem ser combinados para que haja menor perda de material. Para cada uma das 9 combinações feitas, foi registrado

a soma dos comprimentos das barras para que pudesse ter o quanto sobrou de cada barra de 1200 cm utilizada, os grupos pertencentes a cada combinação estão representados na Figura 6, apresentada a seguir.

Figura 6 – Quantidade de sobra de acordo com o tamanho da barra

Compr. max:	12	
	Comb.	Sobra
x1	1200	0
x2	1200	0
x3	1200	0
x4	1181	19
x5	1155	45
x6	1049	151
x7	1197	3
x8	1193	7
x9	1147	53

Fonte: Autor (2024)

De acordo com a tabela 3 apresentada logo a seguir, observa-se quais produtos foram combinados para que fosse obtido os valores da tabela apresentada na Figura 6. Foi feito uma tabela com a descrição dos produtos para facilitar o entendimento, como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Combinações possíveis de acordo com as dimensões das barras pedidas

Combinação	Descrição
x1	1 Produto C
x2	1 Produto D
x3	1 Produto E
x4	1 Produto B, 1 Produto G, 1 Produto H
x5	1 Produto F, 1 Produto G
x6	1 Produto B, 1 Produto H, 1 Produto I
x7	1 Produto A
x8	2 Produtos B, 1 Produto G
x9	1 Produto G, 1 Produto H, 1 Produto I

Fonte: Autor (2024)

A modelagem é composta por 9 variáveis de decisão, na qual buscam minimizar as sobras das barras utilizadas na produção e para isso, necessitou-se de 9 restrições, onde cada uma representa a quantidade utilizada de cada produto em cada material, tendo em vista que a quantidade total do produto não ultrapasse a quantidade solicitada pelo cliente, a figura 1 ilustrará de maneira que fique mais claro o entendimento. Desse modo, podemos definir a função objetivo como $\text{Min } Z = 0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 19x_4 + 45x_5 + 151x_6 + 3x_7 + 7x_8 + 53x_9$ e as restrições da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 s_1 &= 1x_7 = 24 & s_6 &= 1x_5 = 24 \\
 s_2 &= 1x_4 = 1x_6 = 2x_8 = 8 & s_7 &= 1x_4 + 1x_5 + 1x_8 + 1x_9 = 48 \\
 s_3 &= 1x_1 = 27 & s_8 &= 1x_4 + 1x_6 + 1x_9 = 48 \\
 s_4 &= 1x_2 = 27 & s_9 &= 1x_6 + 1x_9 = 48 \\
 s_5 &= 1x_3 = 2
 \end{aligned}$$

Figura 8 – Modelagem do problema

	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1		Compr. max:	12				Min Z =	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9			
2			Comb.	Sobra				0	0	0	19	45	151	3	7	53			
3		x1	1200	0				27	27	2	0	24	8	24	0	40	152		
4		x2	1200	0				Perda	0	0	0	0	1080	1208	72	0	2120		
5		x3	1200	0			Z =	4480											
6		x4	1181	19			s.a:												
7		x5	1155	45			x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9				
8		x6	1049	151			A						1			24	=	24	
9		x7	1197	3			B			1		1		2		8	=	8	
10		x8	1193	7			C	1								27	=	27	
11		x9	1147	53			D		1							27	=	27	
12							E			1						2	=	2	
13							F				1					24	=	24	
14							G			1	1			1	1	48	=	48	
15							H			1		1			1	48	=	48	
16							I					1			1	48	=	48	

Fonte: Autor (2024)

Para as combinações de x_1 a x_3 , não é obtido sobra, pois as combinações possuem o tamanho exato das barras, já para as combinações de x_4 , x_5 , x_6 , x_7 , x_8 e x_9 há uma sobra de 19, 45, 151, 3, 7 e 53 centímetros respectivamente. Para encontrar a quantidade total em metros

de sobras, necessita-se encontrar a soma do produto entre as sobras geradas por cada combinação e quantas vezes cada combinação foi feita, a Figura 2 apresentada abaixo representará as definições.

Figura 9 – Dados inseridos no Solver

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para: Máx. MÍN. Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

\$L\$3:\$T\$3 = número inteiro
 \$U\$8:\$U\$16 = \$W\$8:\$W\$16

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

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

Fonte: Autor (2024)

Utilizando a ferramenta *solver* do *software* Microsoft Excel, foi definido para que ele faça os cálculos com o objetivo de encontrar o menor resultado possível, podendo alterar as quantidades utilizadas de cada combinação. Porém, o software deveria encontrar a solução dentro das restrições estabelecidas, onde as quantidades para utilização de cada combinação deveria ser números inteiros e que as quantidades dos produtos criados fossem iguais à quantidade de produtos solicitados.

Figura 10 – Perda metálica gerada

Peso p/ metro(kg):	2,46
Barras utilizadas (un):	152
Peso total Pedido(kg):	4487,04
Qtd de sobras em metros:	44,8
Peso Total sobras (kg):	110,208
Percentual de perda:	2,46%

Fonte: Autor (2024)

Após resolução do solver, foi feito uma análise sobre o procedimento para encontrarmos a perda metálica sobre esse pedido. Sabendo que o peso de uma barra de 1200 cm é de 29,592 kg, fazendo $\frac{29,592}{12}$ chegamos ao peso de 2,46 kg por metro de cada barra.

Como cada combinação representa a utilização de 1 barra de 1200 cm, somando a quantidade de vezes em que cada combinação foi feita, encontraremos o total de barras utilizadas.

Para isso, foram necessárias as quantidades (em unidades) de 27, 27 2, 0, 24, 8, 24, 0 e 40 das variáveis x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , x_6 , x_7 , x_8 e x_9 respectivamente, desse modo, foi encontrado o valor de 152 barras. Através da fórmula $152 \times (2,46 \times 12)$ é encontrado o peso total de matéria prima utilizada de 4.487,04 kg.

Para descobrirmos a perda metálica obtida durante o processo, multiplica-se a quantidade em metros pelo peso por metro da barra, para este trabalho, faz-se $44,8 \times 2,46$, obtendo o valor de 110,208 kg perdidos. Caso seja feita a divisão do peso perdido pelo peso

total utilizado, $\frac{110,208}{4487,04}$ descobre-se que o percentual da perda é de 2,46%.

5. CONCLUSÃO

A pesquisa operacional, com sua abordagem matemática e aplicação prática, tem se destacado como uma ferramenta eficiente para a melhoria de processos e a redução de custos em diversas indústrias. Este trabalho se concentra na aplicação específica da Programação Linear como uma solução para minimizar perdas de matéria-prima em uma indústria de corte e dobra localizada em Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

O Baseado nos resultados obtidos, objetivo principal deste trabalho que era encontrar a melhor combinação entre as barras, e assim, termos uma perda metálica dentro do esperado, foi atingido. A Programação Linear é uma técnica que visa otimizar a alocação de recursos limitados para atingir um objetivo específico, neste caso, minimizar as perdas durante o processo de corte e dobra de metais. O resultado alcançado foi a identificação de uma combinação de corte de barras que atendeu a todas as restrições estabelecidas, culminando na sua efetiva implantação no processo produtivo.

A eficácia dessa abordagem vai além da simples redução de perdas. Ao possibilitar o melhor aproveitamento da matéria-prima, a empresa alcança uma economia significativa de recursos. Isso se reflete não apenas no armazenamento otimizado de barras já cortadas, mas também na minimização da geração de sucata, cujos preços de venda geralmente são substancialmente inferiores em comparação com o valor dos produtos cortados e dobrados. Essa economia de recursos não apenas beneficia a empresa em termos financeiros, mas também contribui para práticas mais sustentáveis e responsáveis.

O presente estudo destaca a importância crítica do tema, ressaltando a necessidade contínua de esforços no sentido de aprimorar a qualidade do produto final, reduzir perdas e otimizar os custos de produção. A implementação bem-sucedida da Programação Linear neste contexto específico serve como um exemplo claro de como a pesquisa operacional pode ser uma aliada valiosa na busca por eficiência e competitividade no mercado.

Considerando os resultados obtidos e as conclusões da pesquisa, surge uma recomendação estratégica para a empresa em questão. Propõe-se que os gestores e responsáveis da área invistam em um software, programa ou aplicativo com um banco de dados vinculado ao software de produção utilizado pela empresa. Essa integração permitiria que,

automaticamente, as melhores combinações possíveis fossem geradas em resposta às medidas do pedido do cliente. Isso não apenas reduziria os custos operacionais, mas também otimizaria o tempo do operador, eliminando a necessidade de cálculos manuais para encontrar a melhor combinação possível.

Em suma, este estudo destaca não apenas os benefícios imediatos da aplicação da Programação Linear na indústria de corte e dobra, mas também aponta para possíveis futuros trabalhos, como a implementação de tecnologias adicionais para aprimorar ainda mais a eficiência e a competitividade da empresa no mercado. A empresa operacional, quando aplicada estrategicamente, demonstra seu potencial para impulsionar melhorias significativas em processos industriais, oferecendo uma abordagem sistemática e baseada em dados para enfrentar desafios operacionais e econômicos.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. **Introdução à Pesquisa Operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- ARENALES, Marcos Nereu. et al. **Pesquisa Operacional**. 4ª reimpressão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- BERTSIMAS, D.; TSITSIKLIS, J. N. **Introduction to Linear Optimization**. Belmont. MA: Athena Scientific, 1997.
- BRASIL, R. M. L. R. F.; SILVA, M. A. **Otimização de projetos de engenharia**. São Paulo: Editora Blucher, 2019.
- BRESSAN, Glauca Maria; BELINELLI, Eduardo Oliveira. Modelagem e solução de problemas de corte e empacotamento por meio da programação linear. **Revista Eletrônica Paulista de Matemática**, v. 2, n, 6, p. 147-166, 2016.
- BRONSON, R. **Pesquisa Operacional**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.
- CERQUEIRA, G. R. L.; YANASSE, H. H. **Linear Programming Models for the One-Dimensional Cutting Stock Problem**. INPE ePrint, 2006.
- CHVÁTAL, V. **Linear Programming**. New York: W. H. Freeman and Company, 1983.
- CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de Produção e Operações: o essencial**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- DANTZIG, G. B. **Linear Programming and Extensions**. Princeton: Princeton University Press, 1963.
- EISENHARDT, Kathleen M. Building theories from case study research. **Academy of management review**, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.
- FLYVBJERG, Bent. Five misunderstandings about case-study research. **Qualitative inquiry**, v. 12, n. 2, p. 219-245, 2006.
- FRANCESCHETTE, A. N. **Otimização no corte de metais: um estudo de caso**. São Paulo: Atlas, 2009.
- GASSEN, Gustavo et al. Proposta de um modelo de programação linear para otimização do planejamento agregado de produção de brocas para empresa multinacional. **Revista Produção Online**, v. 19, n. 1, p. 21-43, 2019.
- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 2002.
- GOLDRATT, E. M. **A Meta: Um Processo de Melhoria Contínua**. São Paulo: Nobel. Hillier, 1992.
- HEIN, N.; LOESCH, C. **Pesquisa Operacional**. São Paulo: Saraiva Educação, 2017.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 9. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

- HOFFMANN, Fábio Moacir et al. Otimização de padrões de cortes bidimensionais guilhotinados restritos. **Revista Espacios**, v, 36, n. 09, 2015.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory Physics**. 3rd ed. Long Grove, IL: Waveland Press, 2011.
- KRAJEWSKI, L. J.; RITZMAN, L. P.; MALHOTRA, M. K. **Operations Management: Processes and Supply Chains**. 11th ed. New York: Pearson, 2015.
- LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. São Paulo: Atlas, 2009.
- LOEBLEIN, L. C. et al. Aplicação da programação linear para minimização de perdas de aparas em indústria metal-mecânica. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, PR, v. 8, n. 4, p. 14-29, 2013.
- LONGARAY, André Andrade. **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: Saraiva Educação, 2017.
- LUENBERGER, D. G.; YE, Y. **Linear and Nonlinear Programming**. 3. ed. New York: Springer, 2008.
- MARANZANA, F. E. **Pesquisa operacional: métodos e modelos para a análise de decisões**. Elsevier Brasil, 2016.
- MELO, Fagner José Coutinho et al. O uso da programação linear para maximização de lucros em uma empresa de serviço de corte e dobra de aço para a construção civil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e32110313402-e32110313402, 2021.
- MOREIRA, D. A. **Pesquisa operacional: curso introdutório**. São Paulo: Thomson Learning, 2017.
- OLIVEIRA, F. F.; SILVEIRA, R. R.; FERREIRA, RJP. Pesquisa operacional como apoio na tomada de decisões em gestão da produção. **SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XVII SIMPEP**, 2010.
- PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Microeconomics**. New York: Eight edition. Yhdysvallat. 2013.
- POLDI, Kelly Cristina; ARENALES, Marcos Nereu. Heurísticas para o problema de corte de estoque unidimensional inteiro. **Pesquisa Operacional**, v. 26, p. 473-492, 2006.
- POLDI, Kelly Cristina; ARENALES, Marcos Nereu. O problema de corte de estoque unidimensional multiperíodo. **Pesquisa Operacional**, v. 30, p. 153-174, 2010.
- PRADO, D. **Programação Linear**. São Paulo: Falconi Editora, 2016.
- PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2 ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.
- RAGSDALE, C. T. **Spreadsheet Modeling and Decision Analysis: A Practical Introduction to Business Analytics**. 6. ed. Mason: South-Western Cengage Learning, 2011.
- SILVA, M., et al. **Pesquisa Operacional**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1998.

- SILVA, Angélica Pio et al. Otimização da produção em sistemas puxados: análise em uma fábrica de móveis de aço. **Revista Científica Hermes**, v. 20, p. 62-85, 2018.
- SILVEIRA, G. M. et al. Aplicação da programação linear para otimização de cortes de eixos na indústria automotiva. **Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, v. 33, 2013.
- SILVER, E. A.; PYKE, D. F.; PETERSON, R. *Inventory and Production Management in Supply Chains*. 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2010.
- STAKE, R. E. **Multiple case study analysis**. New York: Guilford press, 2013.
- TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. São Paulo: Pearson Education, 2017.
- VANDERBEI, R. J. **Linear Programming: Foundations and Extensions**. 3. ed. New York: Springer, 2008.
- WAVRZYNCZAK, Hione Cleder; ULBRICHT, Gerson; TEIXEIRA, Edson Sidnei Maciel. Modelo matemático para cortes de barras de aço no processo de fabricação de triângulos. **Holos**, v. 8, p. 252-261, 2015.
- WINSTON, W. L. **Operations Research: Applications and Algorithms**. 4. ed. Belmont: Thomson/Brooks/Cole, 2004.
- WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A Mentalidade Enxuta nas Empresas: Elimine o Desperdício e Crie Riqueza**. Rio de Janeiro: Campus, 2003.
- YIN, Robert K. **Case study research and applications**. Thousand Oaks, CA: Sage, 2018.