



ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ

ANALYSIS OF DIFFERENT METHODOLOGIES FOR OPTIMIZATION OF THE STEEL BARS CUTTING PROCESS IN A METALMECHANICAL INDUSTRY LOCATED IN THE WESTERN REGION OF PARANÁ

ANÁLISIS DE DIFERENTES METODOLOGÍAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CORTE DE BARRAS DE ACERO EN UNA INDUSTRIA METALMECÁNICA UBICADA EN LA REGIÓN OESTE DE PARANÁ

Sergio Gabriel Senderski¹, Floriano Luiz Suszek²

e3112284

<https://doi.org/10.47820/recima21.v3i11.2284>

PUBLICADO: 11/2022

RESUMO

O presente estudo busca comparar diferentes metodologias para otimizar o processo de corte de barras de aço em uma indústria metalmeccânica localizada na região Oeste do Paraná. Atualmente, não é utilizada nenhuma forma de planejamento para a execução dos cortes, e isso acaba ocasionando a geração de perdas de matéria-prima no processo. Foram analisadas três metodologias para a minimização do desperdício, sendo elas o método utilizado por Sturmer (2020), que consiste em criar um modelo de programação linear para resolver problemas de corte. Este método consiste em elaborar diversos modelos de corte combinando de diversas formas a quantidades obtidas de cada item por barra, e solucioná-los por meio do Solver do Excel, encontrando qual seria o plano de corte que apresenta o menor desperdício possível. As outras duas metodologias consistem em aplicar os mesmos dados no *software* 1D Cutting Optimizer e no suplemento 1D CutX e verificar em qual metodologia é apresentado o menor desperdício e o menor custo possível. Feita a análise, a ferramenta ideal dentre as três opções é o suplemento 1D CutX que além de gerar o plano de corte em poucos segundos, zera o desperdício e é economicamente viável, promovendo uma economia de 1,45% em seus custos em relação ao não planejamento.

PALAVRAS-CHAVE: Minimização de desperdício. Redução de custo. Programação Linear.

ABSTRACT

The present study seeks to compare different methodologies to optimize the cutting process of steel bars in a metalworking industry located in the Western region of Paraná. Currently, no form of planning is used for the execution of the cuts, and this ends up causing the generation of raw material losses in the process. Three methodologies were analyzed for the minimization of waste, which is the method used by Sturmer (2020), which consists of creating a linear programming model to solve cutting problems. This method consists of elaborating several cutting models combining in various ways the quantities obtained from each item per bar, and solving them through excel Solver, finding which cutting plane would be that presents the least waste possible. The other two methodologies consist of applying the same data in the 1D Cutting Optimizer software and the CutX 1D add-in and verifying in which methodology the lowest waste and the lowest possible cost is presented. After the analysis, the ideal tool among the three options is the 1D CutX supplement that in addition to generating the cutting plan in a few seconds, zeroes waste and is economically viable, promoting a savings of 1.45% in its costs in relation to non-planning.

KEYWORDS: Waste minimization. Cost reduction. Linear Programming.

¹ Centro Universitário Univel

² Graduação em Engenharia Agrícola pela Unioeste (Cascavel-PR), Doutorado em Engenharia Agrícola pela Unioeste (Cascavel-PR), Docente na Univel (Cascavel-PR) nas áreas de Engenharia e Agronomia. Centro Universitário Univel



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

RESUMEN

El presente estudio busca comparar diferentes metodologías para optimizar el proceso de corte de barras de acero en una industria metalmeccánica ubicada en la región occidental de Paraná. Actualmente, no se utiliza ninguna forma de planificación para la ejecución de los cortes, y esto termina causando la generación de pérdidas de materia prima en el proceso. Se analizaron tres metodologías para la minimización de residuos, que es el método utilizado por Sturmer (2020), que consiste en crear un modelo de programación lineal para resolver problemas de corte. Este método consiste en elaborar varios modelos de corte combinando de diversas maneras las cantidades obtenidas de cada artículo por barra, y resolverlos a través de Excel Solver, encontrando qué plano de corte sería el que presenta el menor desperdicio posible. Las otras dos metodologías consisten en aplicar los mismos datos en el software 1D Cutting Optimizer y el complemento CutX 1D y verificar en qué metodología se presenta el menor desperdicio y el menor costo posible. Tras el análisis, la herramienta ideal entre las tres opciones es el suplemento 1D CutX que además de generar el plan de corte en pocos segundos, pone a cero el desperdicio y es económicamente viable, promoviendo un ahorro del 1,45% en sus costes en relación a la no planificación.

PALABRAS CLAVE: *Minimizar el desperdicio. Reducción de costes. Programación lineal.*

INTRODUÇÃO

O constante crescimento populacional nas últimas décadas, vem se tornando cada vez mais motivo de preocupação devido ao fato de que com seu aumento altera-se o crescimento da demanda de diversos recursos naturais, que, em muitas das vezes, são escassos (BAPTISTA, 2010). Fica visível que há um aumento da quantidade de indústrias que utilizam novos avanços tecnológicos para buscar atender essas novas demandas, tendo em vista que 22,2% da participação do Produto Interno Bruto (PIB), correspondeu ao setor industrial no ano de 2021, sendo 1,7% maior que no ano anterior (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2022). Esse aumento das atividades industriais apresenta problemas que estão relacionados a eficiência produtiva, essa que está diretamente conectada ao crescimento do consumo de matéria-prima, energia e outros recursos industriais, que resultam na geração de resíduos e desperdícios (SOARES; ARAÚJO, 2016).

Muitos processos industriais demandam da utilização abundante de recursos para a transformação da matéria-prima até o produto final. Tais recursos são considerados gastos necessários para o desenvolvimento da empresa, mas que, quando não utilizados de forma eficiente, tornam-se desperdícios. A ineficiência da produção e a geração descontrolada de resíduos, provocam o desperdício dos materiais e a poluição do meio ambiente, quando o material não é descartado da forma correta (SOARES; ARAÚJO, 2016). Portanto, é visível a crescente necessidade de as indústrias buscarem uma melhor alocação dos recursos, a fim de reduzir os desperdícios e os resíduos gerados, promovendo também a redução dos custos.

Este processo de encontrar alternativas para o uso eficiente dos recursos em suas atividades, pode ser aprimorado por meio da programação matemática, possibilitando encontrar a solução ótima para cada cenário estudado (BRONSON, 1985). Nesse contexto, a Pesquisa Operacional (PO) se torna útil, tendo em vista que ela viabiliza a aplicação de soluções práticas que reduzem os custos e



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

desperdícios, e conseqüentemente otimizam a utilização dos recursos produtivos disponíveis (LOEBLEIN *et al.*, 2013). Essa ciência possui como objetivo inicial uma análise previa do cenário, para que então, por meio de modelos matemáticos possa se encontrar a melhor solução possível para o problema, atendendo as condições restritivas da situação (MESQUITA, 2015).

A indústria está incessantemente sendo obrigada a otimizar seus processos produtivos para se manter altamente competitiva no mercado (STURMER, 2020). E um problema comum que há dentro do ambiente industrial, e que muitas vezes necessita de passar por melhorias, é o de corte de matéria-prima, tais como vidro, papel, madeira, tubos, chapas, entre outros (CHERRI; VIANNA 2010).

Este problema se baseia em cortar peças maiores para fabricar peças menores, tendo como objetivo definir a programação ótima de corte, seguindo certas restrições. Portanto, otimizar os processos de corte e reduzir o desperdício de matéria-prima, afeta a composição do custo final dos produtos, melhorando assim a gestão, o desenvolvimento e a competitividade da organização em seu mercado (SANTOS, 2014).

Perante o exposto, este trabalho tem como objetivo propor um modelo de programação linear inteira, que reduza o desperdício de matéria-prima no corte de barras de aço em uma empresa fabricante de peças agrícolas, localizada na região Oeste do Paraná, e comparar com os resultados obtidos de outros dois *softwares*. E por meio da análise dos resultados dessas ferramentas, busca-se responder a seguinte pergunta: Qual seria o plano ótimo de cortes de barras de aço que apresente o menor desperdício possível, e também, o menor custo?

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, será demonstrado em seis tópicos todo o embasamento teórico necessário para a construção deste artigo.

1.1 Pesquisa Operacional

Segundo Silva *et al.*, (1998), a Pesquisa Operacional (PO) surgiu em meados da Segunda Guerra Mundial, sendo “resultado de estudos realizados por equipes interdisciplinares de cientistas contratados para resolver problemas militares de ordem estratégica e tática”. De acordo com Hillier e Lieberman (2006), nessa época “havia uma necessidade premente de se alocar de forma eficiente os escassos recursos para as diversas operações militares e atividades internas a cada operação”.

Foi em 1941, que a força aérea de combate inglesa criou a Seção de Pesquisa Operacional, essa que desenvolvia equipes para trabalhar com problemas de operações militares, como inspeção e manutenção de veículos militares, designação de aviões para as missões de combate e otimização da probabilidade de destruição de submarinos (ARENALES *et al.*, 2007). Essas equipes eram compostas por matemáticos, físicos, engenheiros, cientistas sociais, e outros, e elas disponibilizavam de um arsenal maior de técnicas de investigação e auxílio para estabelecer conexões entre a teoria e a prática



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

(CHAVES, 2011).

De acordo com Arenales *et al.*, (2007), a PO evoluiu rapidamente na Inglaterra e nos Estados Unidos após a Segunda Guerra Mundial, onde os indivíduos que participaram das equipes interdisciplinares, visualizaram a possibilidade de empregar a PO em diversas organizações nos setores comerciais, industriais e governamentais. Diversos modelos foram estudados e desenvolvidos para a resolução de problemas nas áreas de planejamento e programação da produção, transporte de mercadorias, programação de refinarias e petróleo, planejamento agrícola, entre outros (LOPES; GALVÃO; FOGAÇA, 2015).

Os problemas abordados pela PO necessitam de uma grande quantidade de dados e processamento para sua resolução, e fazer tais tarefas a mão é uma hipótese fora de cogitação (HILLER; LIEBERMAN, 2006). O avanço computacional e metodológico, além do surgimento de demandas de outros campos, proporcionou o aumento do espaço de atuação da PO para além do campo militar (NETO, 2020). E essa Revolução Computacional deu um impulso na utilização da PO, já que, o avanço tecnológico dos computadores tornou possível a realização de cálculos matemáticos milhares de vezes mais rápido que o ser humano (DE ANDRADE, 2018).

De acordo com Belfiore e Fávero (2013), a pesquisa operacional se baseia em um método científico para auxiliar na tomada de decisão. Alguns métodos científicos como modelos matemáticos, modelos estatísticos e algoritmos computacionais auxiliam na busca por resultados mais assertivos e otimizados.

Para Arenales *et al.* (2007), a PO possui o objetivo de determinar a forma de otimizar um projeto e operar um sistema que possui condições restritivas, devendo melhorar a alocação de recursos escassos. É amplamente utilizada em problemas complexos ao qual o alcance dos objetivos enfrenta limitações ou restrições, tais como: econômica, demandas, técnica, temporal, de mão de obra, etc (LOPES; GALVÃO; FOGAÇA, 2015).

Segundo Hiller e Lieberman (2006), a PO é aplicada a problemas que aborda como conduzir, coordenar e gerenciar sistemas complexos, como as operações e atividades de uma empresa. E por ser uma área abrangente, pode ser aplicada nos mais diversos segmentos como: transportes; manufatura; planejamento financeiro; serviços públicos; entre outros.

De acordo com De Andrade (2018), este novo campo para análise de tomada de decisão caracteriza-se pelo "(...) uso de técnicas e métodos científicos quantitativos por equipes interdisciplinares, no esforço de determinar a melhor utilização de recursos limitados e para a programação otimizada das operações de uma empresa".

De acordo com Silva *et al.*, (1998), um estudo para resolução de problemas por meio da PO deve seguir 6 fases. A primeira fase é a formulação do problema, ao qual ocorre a definição exata dos objetivos de estudo, identificação das alternativas de decisões possíveis e reconhecimento das limitações, restrições e exigências do sistema. A segunda fase é a construção do modelo, onde é



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

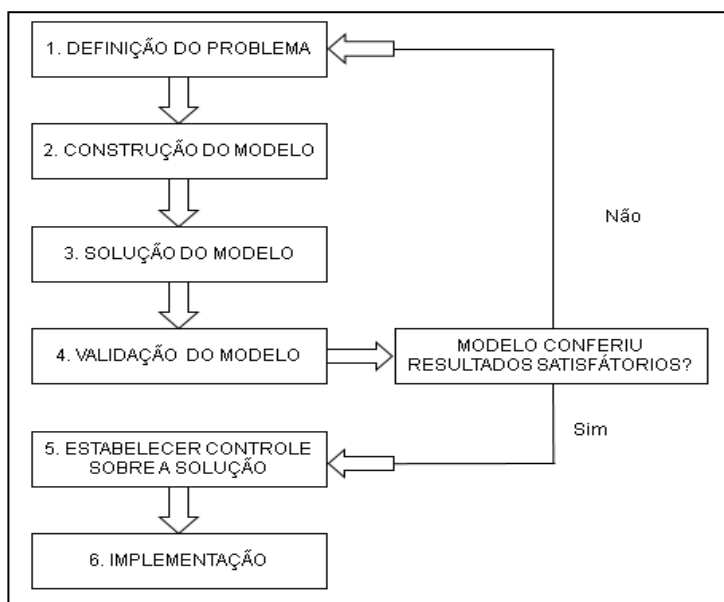
necessário formular um modelo matemático (baseado em equações e inequações) para representar o problema. A função objetivo é uma das equações e ela tem o objetivo de medir a eficiência do sistema para cada solução proposta. As demais equações representam as limitações ou restrições do sistema.

Para a terceira fase, é necessário utilizar técnicas matemáticas específicas, seja através de processos analíticos ou numéricos, a fim de derivar soluções para o problema a partir do modelo. Logo em sequência é executado a quarta fase, que é testar o modelo com dados empíricos do sistema e verificar se é gerado um desempenho que é condizente ao desempenho real apresentado pelo sistema. A aceitação do modelo ocorre quando ele possui a capacidade de prever os efeitos da variação do sistema, auxiliando então, na qualidade da decisão a ser tomada.

Na quinta etapa, deve-se estabelecer controle sobre a solução, onde ocorre a preparação para aplicação do modelo de forma contínua conforme prescrito. Após a construção e experimentação do modelo, é identificado seus parâmetros fundamentais para a solução. Caso haja algum desvio além do esperado nesses parâmetros, deverá ser realizado uma reformulação e um novo cálculo para o modelo. Por fim, a sexta fase é a da implementação, ao qual deve-se estabelecer e acompanhar e implementação da solução no sistema real para verificação do seu comportamento. Essa etapa deverá ocorrer de forma controlada e monitorada de forma a identificar e corrigir possíveis variações nos valores da solução.

A Figura 1 demonstra de forma clara e visual, as seis fases do estudo de Pesquisa Operacional.

Figura 1 — Seis fases para um estudo de Pesquisa Operacional.



Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (1998).

1.2 Programação Linear

Para Hiller e Lieberman (2006), a Programação Linear (PL) significa “planejamento de



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

atividades para obter um resultado ótimo, isto é, um resultado que atinja o melhor objetivo especificado (de acordo com o modelo matemático) entre todas as alternativas viáveis”. Essa ferramenta trabalha com problemas onde deve-se alocar da melhor forma possível, recursos que são limitados para as atividades que competem entre si.

De acordo com Prado (2016) PL “é uma ferramenta utilizada para encontrar o lucro máximo, ou o custo mínimo em situações nas quais temos diversas opções de escolha sujeitas a algum tipo de restrição ou regulamentação”. Ou seja, é uma técnica de planejamento fundamentada em matemática e economia.

Carvalho (2014) explica que a PL se adentra em um cenário de certeza, onde é utilizado modelos determinísticos lineares de otimização, aplicado a problemas combinatórios com uma grande quantidade de resoluções, mas submetido a restrições, e solucionando-se por meio de técnicas algorítmicas. Os modelos determinísticos são definidos como um tipo de modelo matemático, esse que é classificado quanto ao nível de incerteza existente entre as relações das variáveis (LACHTERMACHER, 2007).

Modelos em que todos os dados e parâmetros relevantes são assumidos como conhecidos são denominados determinísticos, ou seja, não se faz uso de variáveis aleatórias que possuem algum grau de incerteza (LEDERMANN; KINALSKI, 2012). Para cenários onde há incerteza ou riscos com grande variabilidade, se utiliza outras técnicas de PO para encontrar valores estimados que solucionam o problema analisado, tais como: Cadeias de Markov, Simulação de Monte Carlo, Teoria das filas, entre outras (AOKI, 2018).

Segundo Abensur (2018), as funções matemáticas que compõem um modelo de PL são como, propriamente já ditas, lineares, ou seja, a função objetivo e as restrições são representadas por uma função de primeiro grau, como demonstrado na Equação 1:

$$f(x) = ax \tag{1}$$

Onde “a” é um coeficiente de número real diferente de zero, e “x” é a variável de decisão.

Garcia, Guerreiro e Corrar (1998) estabelecem que um modelo de PL deve ser formulado definindo a função objetivo (Equação 2), as restrições (Equação 3) e a condição de não negatividade das variáveis (Equação 4).

$$\text{Maximizar ou minimizar: } Z = C_1 x_1 + C_2 x_2 + \dots + C_n x_n \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeito as restrições: } & a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n \geq b_1 \\ & a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2n} x_n \geq b_2 \\ & \dots \\ & a_{m1} x_1 + a_{m2} x_2 + \dots + a_{mn} x_n \geq b_n \end{aligned} \tag{3}$$



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

$$x_i \geq 0, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

A função objetivo é representada pela letra “Z”. As letras “C₁, C₂, ..., C_n” representam os coeficientes de cada variável da função objetivo. As letras “a₁₁, a₁₂, ..., a_{mn}” representam os coeficientes de cada variável das restrições do modelo. As letras “x₁, x₂, ..., x_n” representam as variáveis de decisão do modelo. E por fim, as letras “b₁, b₂, ..., b_n” representam a quantidade em um valor numérico a qual cada restrição deve atender. Esse valor em quantidade poderá ser mínimo, máximo ou exato, dependendo do problema e da restrição em questão.

De acordo com Moreira (2007), um problema de PL é composto por duas grandes partes, sendo que, uma delas é a função objetivo, e essa representa a expressão que se deseja maximizar ou minimizar uma combinação de variáveis de decisão, cuja quantidade a ser definida será a solução do problema. A outra parte é as restrições, que são equações ou inequações matemáticas que representam as limitações e situações que restringem o número de combinações das variáveis de decisão. As restrições estão associadas a recursos limitados, a demandas estipuladas, disponibilidade de tempo, mão de obra, máquinas, entre outras.

A resolução de um modelo de programação linear busca retornar os valores ótimos para as variáveis de decisão que maximize ou minimize a função objetivo, atendendo e respeitando todas as restrições que estão limitando a solução do problema. De acordo com Lachtermacher (2007), existem diversas terminologias que são utilizadas para as resoluções na PL, como por exemplo, a solução é a especificação dos valores dentro da Função Objetivo, para as variáveis de decisão, não considerando a solução desejável ou permissível. Já a solução viável, é a solução em que todas as restrições são respeitadas e a solução ótima é a solução mais eficiente e adequada à função objetivo.

Lisboa (2002) cita que para formular um problema de programação linear, é necessário primeiro definir o objetivo do problema, ou seja, decidir qual será a melhor alternativa para solução ótima do problema. Opta-se por maximização quando há a necessidade que se retorne o maior valor possível da solução, como em casos de lucro ou receita. E é utilizado minimização quando se necessita que a solução retorne o menor valor possível, como em casos que envolvam custos, desperdício e perdas.

Após isso, deve-se descrever as variáveis de decisão, e esclarecer de forma explícita o que cada variável significa, definir as suas grandezas e dependendo do caso, a qual período se refere. Por exemplo: Se o problema se refere a *mix* de produção, as variáveis de decisão serão as quantidades produzidas de cada item em um determinado período (semanal, mensal, anual) (LACHTERMACHER, 2007).

Por fim, a última etapa é a de especificar as restrições, ou seja, declarar as equações ou inequações que irão compor as restrições e que irão limitar a solução e as variáveis de decisão.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

Algumas restrições são: disponibilidade da mão de obra, material, recursos, tempo, demanda mínimas e máximas de produção, capacidade de produção etc.

Belfiore e Fávero (2013) determinam que para solucionar um problema de programação linear, os valores das variáveis de decisão devem ser constantes, não negativas e o valor das restrições e o valor da função objetivo devem ser proporcionais ao valor das variáveis de decisão. Também é determinado que não deve haver a existência de termos cruzados na função objetivo e nas restrições. Ou seja, a totalidade dos valores da função objetivo é definido pela soma das contribuições das variáveis de decisão.

Dependendo de cada problema, as variáveis de decisão podem adotar valores fracionados e inteiros, desde que sejam valores maiores ou igual a zero e que satisfaçam as restrições do problema. Afirma-se que todos os parâmetros (coeficientes) do modelo são determinísticos, ou seja, são conhecidos, determinados e constantes (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

1.3. Simplex

Segundo Belfiore e Fávero (2013), para que uma solução ótima seja alcançada, podem ser aplicado diversos algoritmos ou metodologias sendo o algoritmo Simplex, que foi desenvolvido por George B. Dantzig em 1947, o mais difundido e popular. Ainda segundo Belfiore e Fávero (2013), esse método pode ser definido como um “procedimento algébrico iterativo que parte de uma solução básica factível inicial e busca, a cada iteração, uma nova solução básica factível com melhor valor na função objetivo, até que o valor ótimo seja atingido”. Atualmente, esse algoritmo é o mais utilizado para a resolução de problemas de programação linear (LUNA; GOLDBARG, 2005).

Hiller e Lieberman (2006) definem simplex como um algoritmo iterativo, ou seja, é um “procedimento sistemático para solução que fica a repetir uma série de passos, chamado iteração, até que se chegue a um resultado desejado”. Segundo Taha (2007), apesar de simples, a sequência de passos e cálculos são tediosas e maçantes, e para problemas que envolvem três ou mais variáveis de decisão, o processo se torna ainda mais moroso e massivo, podendo-se facilmente errar em alguma etapa e invalidar o resultado obtido. Para corrigir isso, foram desenvolvidos ao longo dos anos programas de computadores cada vez mais sofisticados para trabalhar com modelos cada vez mais robustos (MOREIRA, 2007).

Apesar de ser uma ferramenta que busca otimizar os resultados de um modelo, o método simplex em alguns casos pode não acabar demonstrando a solução ótima ao problema. Essa situação ocorre quando o modelo apresenta restrições que possuem incompatibilidade entre si, ou seja, não é formado uma região de soluções viáveis, visto que as restrições são muito limitantes (BARBOSA e ZANARDINI, 2015). Nesse caso, seria necessário acatar um resultado bom e não ótimo para solucionar o problema, ou flexibilizar as restrições do modelo para ser gerado uma região de soluções viáveis, conseguindo assim chegar a um resultado ótimo.

Barbosa e Zanardini (2015) ainda afirmam que não é possível encontrar um valor máximo ou



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

mínimo que seja ótimo quando uma das variáveis de decisão se estende ao infinito. Nesse caso, por mais que as restrições sejam todas satisfeitas, será impossível chegar a um resultado conclusivo e exato, visto que, teremos um valor que tenderá ao infinito e não a um número acurado. Em alguns casos, isso acontece quando existe algum erro no modelo que o torna ilógico e inconclusivo, como quando se tende a maximizar o custo, por exemplo. Por isso, é necessário revisar meticulosamente o modelo em questão, visto que ele tende a simular um sistema real e caso ocorra algum erro ou incompatibilidade com a realidade, a solução não resultará em valores ótimos e assertivos.

Conforme Silva (1998):

Esse método é formado por um grupo de critérios para escolha de soluções básicas que melhorem o desempenho do modelo, e também de um teste de otimalidade. Para isso, o problema deve apresentar uma solução básica inicial. As soluções básicas subsequentes são calculadas com a troca de variáveis básicas por não básicas, gerando novas soluções. Os critérios para a escolha de vetores e conseqüentemente das variáveis que entram e saem para a formação da nova base constituem o centro do simplex.

Segundo Barbosa e Zanardini (2015), para aplicar o método simplex é necessário realizar uma seqüência de 9 passos, sendo necessário inicialmente, adicionar as variáveis de folga no modelo caso o sinal seja \leq , e diminuir as variáveis caso o sinal for de \geq . Após isso, é necessário montar uma tabela com os coeficientes da função objetivo, das restrições e dos termos independentes. Por meio de recursos matemáticos, são identificadas as variáveis básicas e não básicas e já é conferido qual é o coeficiente que irá apresentar o maior valor negativo, visto que será variável desse valor que entrará na base. A coluna dessa variável será chamada coluna pivô.

Na próxima etapa, é necessário identificar qual variável sairá da base, sendo necessário dividir cada termo independente pelos coeficientes positivos da coluna pivô, e selecionar a variável cujo valor da divisão seja o menor obtido. Após isso, verifica-se qual será o elemento pivô, esse que se encontra na interseção da coluna pivô com a linha da variável que irá sair da base.

O próximo passo é de multiplicar a linha dessa variável pelo inverso multiplicativo do pivô, e transformar em zero os elementos da coluna pivô da variável que está a entrar na base, exceto o pivô, colocando os resultados obtidos em uma nova tabela. Para realizar essas operações é necessário multiplicar as linhas por um escalar, e em seqüência somá-las. Por fim, deve-se repetir os passos até que não haja nenhum número negativo na linha da função objetivo.

1.4 Programação Linear Inteira

De acordo com Lachtermacher (2007), a programação linear inteira está relacionada a problemas em que as variáveis de decisão deverão ser representadas por apenas números inteiros. A função objetivo e as restrições continuam a ser lineares, mas, nesse tipo de programação ao menos uma variável é representada por um valor discreto.

Para Hillier e Lieberman (2006), existem muitos problemas práticos na programação linear que



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

só irão fazer sentido se as variáveis de decisão assumirem valores inteiros. Como em casos em ser necessário alocar pessoas, máquinas e veículos a operações em quantidades inteiras.

Segundo Belfiore e Fávero (2013), os problemas de programação linear inteira podem ser classificados como problemas de programação inteira pura, que é quando todas as variáveis de decisão assumem valores inteiros e discretos. Já os problemas de programação inteira mista ocorrem quando algumas variáveis assumem valores inteiros e as outras assumem valores contínuos. E a outra classificação é a de problemas de programação inteira com variáveis binárias, onde todas as variáveis assumem apenas valores de 0 ou 1.

De acordo Arenales *et al.*, (2007), existe uma grande variedade de aplicações para resolução de problemas de otimização discreta, ocorrendo nas mais diversas áreas como: transportes, criptografia, aviação, finanças e telecomunicações. A programação linear inteira é amplamente utilizada na área da engenharia da produção, visto que ela pode ser aplicada para otimização e melhoria em diversas situações das quais um indivíduo formado nessa área pode atuar, como em planejamento e programação da produção, onde é necessário decidir se um produto deve ser fabricado em um período ou não.

Essa ferramenta também é amplamente aplicada em localização de instalações e distribuição de produtos, onde é necessário escolher o melhor local a instalar um novo centro de distribuição ou uma nova fábrica, e determinar as melhores rotas de distribuição dos produtos ou recursos. Ela também é amplamente utilizada em projetos de layout de sistemas de produção, determinando qual é a melhor sequência de itens que devem ser processados em uma máquina (ARENALES *et al.*, 2007)

1.5 Problemas de Corte

Os modelos de otimização linear têm sido cada vez mais utilizados em situações práticas no meio industrial nas mais diversas áreas, e frequentemente representam subproblemas de casos mais complexos (ARENALES *et al.*, 2007). Exemplos de problemas que podem ser formulados como um problema de otimização linear aparecem nas mais variadas áreas, tais como no planejamento da produção, logística, finanças, e muitas outras. Alguns dos principais problemas que a otimização linear trata são: mistura, transporte, planejamento da produção, programação de projetos, fluxo de caixa, meio ambiente, corte, empacotamento, entre outros (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Segundo Poldi e Arenales (2010), por motivos econômicos e sociais, as empresas vêm buscando cada vez mais tornar seus processos produtivos mais eficientes, e que conseqüentemente reduzam o desperdício da matéria-prima e a geração de resíduos. Nesse contexto, a implementação da otimização linear através da aplicação de modelos de problemas de corte objetiva encontrar a melhor maneira de se obter os itens demandados a partir do corte de peças maiores, minimizando o custo e o desperdício (GOLFETO *et al.*, 2007).

O problema de corte consiste então, em cortar uma unidade grande (objeto) para a produção de um conjunto de unidades pequenas que estão sendo requisitadas (CHERRI; VIANNA, 2010). A fim



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

de se definir uma solução para o problema, são usados padrões de corte, elaborados por meio das diferentes formas de obter os itens a partir da unidade grande e o número de vezes que estes serão usufruídos (MARTINS, 2019).

Dependendo dos itens solicitados, é possível combiná-los dentro de um objeto de diferentes maneiras, e essas combinações são chamadas de planos de corte (ABUABARA; MORABITO, 2008). O plano de corte que é considerado ótimo é aquele que gera a menor perda no processo, e o número de planos de corte que podem ser elaborados é demasiadamente elevado, sendo necessário técnicas mais elaboradas para determinar o plano ótimo. Dentre essas técnicas é possível citar: relaxação Lagrangeana, enumeração implícita, busca em grafos e heurísticas, programação dinâmica, entre outras (CHERRI; VIANNA, 2010).

Arenales *et al.*, (2007) afirmam que:

O problema de corte pode ser unidimensional, isto é, apenas uma dimensão é relevante no processo de corte, por exemplo, barras de aço, bobinas e papel, rolos de filme etc., ou bidimensionais, isto é, duas dimensões são relevantes, por exemplo, placas de madeira, tecido, chapas de aço etc., ou tridimensionais, quando três dimensões são relevantes, por exemplo, cortes de bloco de espuma para a produção de colchões e travesseiros.

Segundo Martins (2019), os problemas de corte surgem com mais frequência em setores da indústria siderúrgica e metalmeccânica, através de cortes de barras de aço, chapas metálicas e bobinas. Também são aplicados recorrentemente na indústria têxtil, na indústria de celulose, na produção de plásticos, móveis, vidros, entre outros. Por exemplo, algumas indústrias de usinagem produzem eixos e buchas, cortando barras de aço de tamanho grande em partes menores, com o intuito de se utilizar a quantidade mínima de barras grandes para obter as peças menores nos tamanhos e demandas exigidas (ARENALES *et al.*, 2007).

Alguns trabalhos na área da programação de cortes têm sido aplicados no ambiente industrial. Uma aplicação desse tipo de subproblemas é encontrada em Loeblein *et al.*, (2013), ao qual os autores propõem um modelo voltado ao corte de tubos onde foram apresentados 28 padrões de cortes diferentes, onde o modelo foi executado com a aplicação da ferramenta *solver*. Os resultados foram empregados em uma fábrica de máquinas agrícolas e demonstrou a efetividade da implantação da PO na indústria.

Já Silveira *et al.* (2013), demonstraram em seu estudo a aplicação da PO em uma indústria metalmeccânica com o intuito de melhorar uma operação de corte de barras de aço, onde foram elaboradas 137 combinações de corte diferentes. Nesse caso, também foi utilizado a ferramenta *solver* para a resolução do modelo, e com isso atender a demanda solicitada e minimizar o desperdício dos materiais.

1.6 Desperdícios

Para Santos (2014), verifica-se que há muito tempo é presente e constante o termo



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

“desperdício” no ambiente da indústria. Santos (2014) também afirma que a matéria-prima é, de forma geral, proveniente de recursos naturais ou adquirida por meio de reprocessamento, e em uma fábrica, os desperdícios mais relevantes para a produção estão associados a esse recurso e também aos insumos utilizados nos processos produtivos.

De acordo com Robles Júnior (1994), o desperdício é definido como a perda que a sociedade está submetida devido à utilização de recursos que são escassos. Tais recursos vão desde a mão de obra, material, energia, potencial humano até perda de horas, ou seja, o tempo que foi necessário para treinamento e aprendizado de um ou mais indivíduos.

Segundo Shingo (1996), o desperdício ou a perda é definido como “qualquer atividade que não contribui para as operações, tais como espera, acumulação de peças semiprocessadas, recarregamentos, passagem de materiais de mão em mão, entre outras”. Shingo (1996) ainda afirma que as operações que não agregam valor são consideradas perdas, como andar para coletar as peças, desembulhar os materiais vindo dos fornecedores, operar chaves, entre outras.

Para Nakagawa (1993), o desperdício é toda forma de custo que não atribui valor ao produto do ponto de vista do cliente. Tendo isso em vista, atividades como estocar, inspecionar, testar, transportar, reprocessar, atender garantias e outras são formas de desperdício. De acordo com Corrêa e Corrêa (2017), acabar com os desperdícios representa analisar todas as atividades e operações realizadas na indústria e interromper as que não agregam valor ao produto que está a ser fabricado.

Segundo Ohno (1997), “A eliminação completa desses desperdícios pode aumentar a eficiência de operação por uma ampla margem. Para fazê-lo, devemos produzir apenas a quantidade necessária, liberando assim a força de trabalho extra”. Ainda segundo Ohno (1997), para que aconteça a eliminação total dos desperdícios, é necessário entender que o aumento da eficiência só irá fazer sentido quando o mesmo estiver associado a redução de custos. Nesse caso, é preciso fabricar apenas o que é necessário, utilizando o mínimo da mão de obra e observar a eficiência de cada operador e de cada linha de produção.

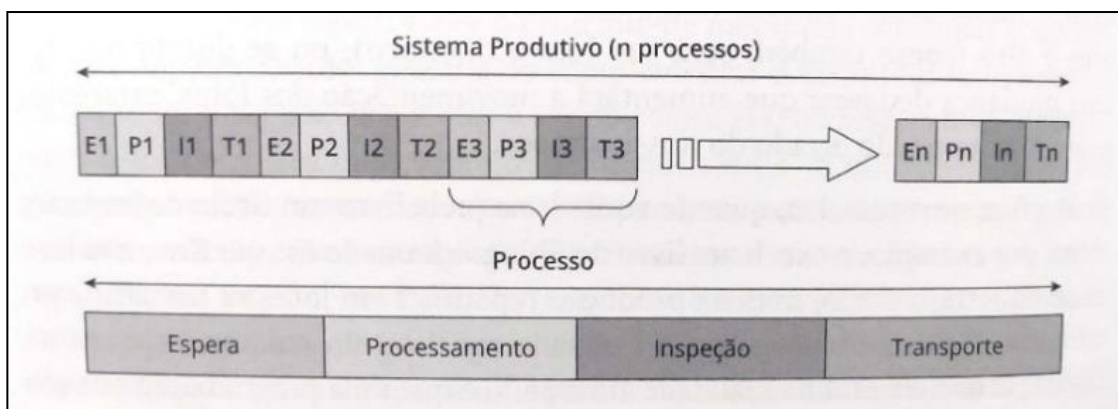
De acordo com Tubino (2015), os principais desperdícios encontrados dentro da indústria estão relacionados as atividades de espera, inspeção e transporte e eventualmente em atividades que envolvem processamento mal dimensionado. A Figura 2 demonstra quais atividades estão incluídas em cada etapa de um sistema produtivo em lotes, e por meio desta, pode-se verificar que quanto maior a quantidade de processos separados, mais desperdícios ocorrerão.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

Figura 2 — Atividades presentes em lotes repetidos.



Fonte: Tubino (2015).

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo será realizado em uma indústria metalmeccânica fornecedora de peças agrícolas, tendo como principal foco o desenvolvimento de componentes para plantadeiras, colheitadeiras e pulverizadores. Essa empresa fica localizada na cidade de Cascavel, situada na região Oeste do Paraná, e sua especialidade é a produção de eixos e buchas que são fabricadas a partir de barras de aço cilíndricas.

Na empresa de estudo deste trabalho, há a crescente demanda para fabricação de eixos e buchas de diversos tamanhos em um mesmo período, a partir de barras de aço de 6000 mm. Nessas situações, a empresa opta por atender os pedidos por ordem de chegada, buscando evitar atrasos com a entrega das solicitações. No modelo atual proposto pela empresa, cada item do pedido é fabricado sequencialmente até que se atinja a quantidade exigida do mesmo. Esse método de programação de corte acaba gerando elevado descarte e desperdício de material, visto que, não se tem planejamento para desenvolver um modelo que utiliza de forma otimizada, o comprimento inteiro da barra.

As barras são compostas de aço mecânico 1045, possuem o diâmetro de 1 1/8" (28,575 mm) e são fornecidas por uma empresa localizada na cidade de Cascavel/PR. O padrão de comprimento das barras é de 6000 mm, e para o processo existe a necessidade de cortá-las em unidades menores para produção das peças solicitadas. Os pedidos dessas barras são feitos de forma a atender a necessidade de material para um mês de produção, trabalhando com uma quantidade mínima de barras em estoque.

As peças analisadas neste estudo são eixos e buchas de uma grande variedade de aplicações nos maquinários agrícolas. Essas peças são réplicas das peças originais produzidas pelas fabricantes dos maquinários. A empresa tem disponibilidade de 16 opções entre eixos e buchas que possuem ocorrência frequente de venda, e informações cadastradas no sistema. Mas, caso haja a necessidade do cliente, a empresa poderá fabricar as peças sob medida. A Figura 3 demonstra alguns modelos de



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

eixos que são utilizados em plantadeiras da marca John Deere.

Figura 3 — Tipos de eixos utilizados em plantadeiras da John Deere.



Fonte: O autor (2022).

Esses itens são cortados a partir de barras metálicas permitindo uma sobra, que mede cerca de 2,5 mm. Essa sobra é chamada sobremetal, e é deixada propositalmente para que após o corte das peças, possa ser conferida acabamento na peça através da usinagem. Os tamanhos de cada peça e as respectivas medidas de corte (considerando o sobremetal e outros desperdícios) são demonstradas na Quadro 1.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

Quadro 1 — Tamanho e comprimento de corte dos itens.

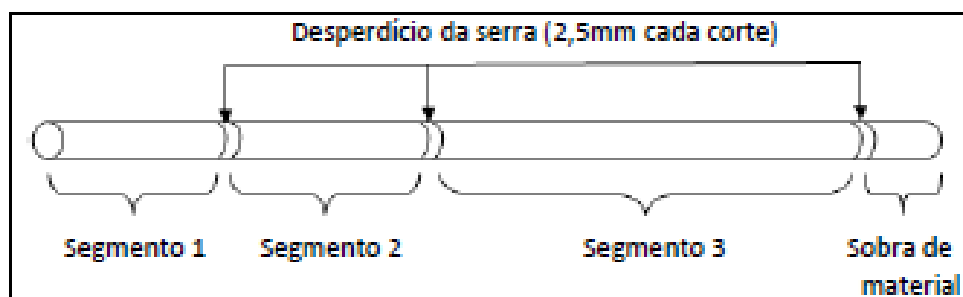
Itens	Tamanho de corte (mm)	Tamanho final (mm)
CQ 16817	18	13
CQ 27934	74	69
CQ 27935	65	60
CQ 29852	74	69
CQ 29853	64,5	59,5
CQ 47945	71,5	66,5
CQ 47946	71,5	66,5
CQ 48794	70,5	65,5
CQ 48795	70,5	65,5
CQ 54027	108,5	103,5
CQ 54028	108,5	103,5
H 156100	18,5	13,5
H 156101	10	5
KK 41024	74	69
KK 41031	63,5	58,5
N 302245	248	243

Fonte: O autor (2022).

Ao analisar o processo de produção desses itens, se verificou que existem três tipos de desperdícios gerados no processo de corte pela serra. O primeiro desperdício é referente pela não utilização das aparas das barras que não alcançam o tamanho mínimo desejado. Esse caso acontece quando o modelo de corte realizado possibilita que sobre uma apara, de tamanho que não atenda nenhuma das medidas dos itens que podem ser fabricados.

O segundo tipo de perda está relacionado com o tamanho da serra que realizará o corte. Esta retira aproximadamente 2,5 mm de comprimento da barra por corte. A Figura 4 ilustra dois tipos de desperdícios nesse processo.

Figura 4 — Tipos de perda no processo de corte.



Fonte: WAVRZYNCZAK, ULBRICHT, TEIXEIRA (2015).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

Na execução do processo de corte, é necessário alocar a barra na mesa da serra, e imputar o setup conforme a necessidade do tamanho de corte. A serra irá executar os cortes na barra e já reajustará automaticamente a barra no local correto para executar o processo corte, até que se consuma toda a barra, ou seja parada para executar um novo *setup*. No entanto, há uma distância de 100 mm entre a serra e a morsa que fixa a barra, ou seja, quando se consome 5900 mm da barra já não há mais espaço suficiente para que a barra seja fixada e se execute o corte. Portanto, o terceiro tipo de perda se dá pelo fato de que em toda barra haverá um desperdício de pelo menos 100 mm devido a essa limitação da máquina.

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos por meio de procedimento de coleta dos dados, documentos e registros internos da empresa. Foram coletadas todas as informações sobre os pedidos de cada item, a sequência dos itens produzidos e seus respectivos desperdícios, referentes ao mês de janeiro até o mês de setembro de 2022. A grande parte dos pedidos são solicitados com um mês de antecedência até a sua entrega, visto que, eles são realizados por empresas que possuem um planejamento anual da sua demanda. Segundo os funcionários da empresa, as decisões eram tomadas buscando produzir a quantidade total solicitada de um determinado item, para que então, começasse a ser produzida quantidade total solicitada de outro item, e assim sucessivamente até que se produzisse toda a demanda solicitada.

Os dados foram tabelados do Excel de acordo com a quantidade solicitada de cada item no período de estudo. Com as demandas já estabelecidas e já sabendo a perda de material por item, foi executado o método proposto por Sturmer (2020) que consiste em criar um modelo matemático de programação linear, que busca minimizar o desperdício de barras, por meio dos diversos tipos possíveis de cortes.

Será utilizado a Programação Linear, pois, além de ser uma ferramenta prática, segundo Hiller e Lieberman (2006), ela trabalha com problemas onde deve-se alocar da melhor forma possível, recursos que são limitados para as atividades que competem entre si. Conforme demonstrado por Lisboa (2002), para se formular um problema de PL, deve-se realizar três passos: Descrever as variáveis de decisão, definir o objetivo do problema e especificar as restrições.

O modelo de PL foi plotado no *software Microsoft Office Excel 2013*, e alimentado com os dados obtidos da empresa. Após alimentado o modelo com os dados obtidos, foi utilizado o suplemento *solver* para solucionar o problema, e demonstrar o plano ótimo de corte que irá minimizar o desperdício de barras na produção de eixos e buchas. Foram feitas 9 execuções no *solver*, uma para cada mês com suas respectivas demandas.

Os dados também foram tratados em outros *softwares* que geram o otimizam os planos de cortes, tais como *1D Cutting Optimizer* e *1D CutX*. Após a geração de todos os resultados, foi possível comparar os desperdícios gerados por cada ferramenta e compará-las ao real desperdício em cada mês do ano de 2022, para que então possa-se definir qual seria o melhor método para a geração de planos de corte para esse processo.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para esse trabalho, foram selecionadas as demandas de 4 grandes empresas que realizam os seus pedidos mensalmente e com antecedência a empresa desse estudo. Tais pedidos representam a maior parte da demanda da empresa para fabricação desses itens, e a menor parte é referente a pedidos pequenos que são realizados no decorrer do mês.

Atualmente, a empresa não utiliza nenhum método de programação para cortar as barras. Os cortes são realizados buscando atender toda a demanda de cada item por vez, e devido a isso, são geradas sobras para cada barra cortada. Essas sobras, também chamada de aparas, surgem quando a apara é tão pequena que não pode ser mais utilizada para a fabricação de nenhum item. Nesse caso, ela é descartada e se tratada então de um desperdício. Ela também surge quando é utilizado uma barra para o atendimento de uma demanda pequena, ao qual, acaba por sobrar uma parcela grande da barra que poder ser reutilizada futuramente. Nesse caso, não se trata de um desperdício, mas sim, de uma sobra.

Para que o desperdício e a sobra de uma barra sejam zerados, deve-se gerar um modelo de corte que irá combinar diferentes quantidades de cada item para ser consumido o comprimento pleno da barra. No entanto, considerando diversos pedidos diferentes, esse processo se torna ainda mais complexo, tendo em vista que, seria necessário que a quantidade consumida de matéria-prima para atender esse pedido fosse exatamente igual a um múltiplo do tamanho útil da barra. Como é improvável que haja uma quantidade exata de pedidos no mês que vai consumir em milímetros uma quantidade de material que seja multiplicador de 5900 mm, sendo o comprimento útil da barra, é natural que haja sobras, ou no pior dos casos, desperdícios.

Em meses em que a demanda é muito alta, o consumo de material também é elevado, e conseqüentemente o desperdício gerado no corte das barras é maior. Nesses casos, utilizando-se de um plano de corte otimizado, poderá ser reduzido a quantidade de matéria-prima empregada, ou seja, a quantidade de barras que é utilizada para se atender uma demanda. Reduzindo esse consumo, naturalmente se reduz o custo gerado nesse processo.

A sobra ainda deve ocorrer no processo considerando que não haverá uma quantidade específica de pedidos que irá consumir o total da barra, mas, ao invés de sobrarem pequenas porções por barra ocasionando desperdício, é concebido uma parcela maior de sobra em apenas uma barra. Isso é benéfico porque o desperdício será minimizado, ou até mesmo zerado, e a sobra em grandes parcelas são armazenadas e reutilizadas em futuros pedidos.

No processo atual, para atender todos os pedidos foram executados 236 modelos de cortes, sendo utilizado 571 barras de aço, cujo seu custo é de R\$ 361,28 por barra. Como foram utilizadas 571 barras, este custo é correspondente a R\$206.290,88. Considerando apenas o comprimento linear utilizável da barra que é de 5900 mm, o não aproveitamento da barra foi de 50680 mm, em termos percentuais, equivale-se a 1,50% de perda, e já em termos financeiros, custou à empresa um valor de



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

R\$3.051,61 ao longo desses 9 meses. No entanto, desse não aproveitamento, 22418 mm não foram desperdiçados, já que, as aparas que somadas geraram esse montante podem ser reutilizadas. Com isso, verifica que o desperdício gerado por esse processo é de 28262 mm, equivalendo-se a 0,84% de perda, e já em termos financeiros, custou à empresa um valor de R\$1.701,74 ao longo desses 9 meses.

A primeira metodologia utilizada para a redução dos desperdícios foi à aplicação do Sturmer (2020), ao qual foi modelado o sistema por meio das técnicas da programação linear, para sua resolução pelo suplemento *Solver* do Excel. Para executar essa metodologia neste trabalho, foi necessário a elaboração de 134 modelos de cortes diferentes, ao qual, em cada modelo era formado por uma combinação diferente de itens que seriam fabricados, e também, a quantidade de cada item era diferente.

As variáveis de decisão foram definidas como a quantidade a ser fabricada de cada modelo de corte existente. Foram obtidas então 134 variáveis de decisão, uma para cada modelo de corte criado.

- x_1 – Quantidade de barras a serem cortadas seguindo o modelo de corte 1.
- x_2 – Quantidade de barras a serem cortadas seguindo o modelo de corte 2.
- ..
- x_{134} – Quantidade de barras a serem cortadas seguindo o modelo de corte 134.

Dos 134 modelos, 86 geram desperdício caso sejam executados e 48 não geram. Ou seja, quanto menor for a quantidade executada de modelos que geram desperdício, menor será a perda total gerada. O desperdício total é definido como a soma do valor do desperdício em cada modelo de corte multiplicado pela quantidade total de vezes que o modelo de corte será executado.

Portanto, a função objetivo desse modelo é de minimizar o desperdício gerado no processo de corte, e é definida como a soma dos produtos das variáveis de decisão pelos coeficientes que representam o quanto de desperdício cada modelo gera, conforme Equação (5). As restrições foram formadas visando estabelecer de forma matemática, o cumprimento da demanda de cada item requisitado, por meio da produção dos modelos de corte gerados. Como a houve demanda dos 16 itens em todos os meses, exceto em abril, haverá 16 restrições técnicas em todos os meses, exceto em abril, que terá 14 restrições técnicas. Isso ocorre, visto que no mês de abril nenhuma empresa solicitou os itens CQ 27934 e CQ 27935.

Haverá então, uma restrição para cada item requisitado. As restrições foram formuladas a partir da Equação (6), onde as variáveis de decisão que apresentam em seu modelo de corte o item requisitado, devem ser multiplicadas pela quantidade de vezes que esse item será produzido por cada modelo de corte. As somas dos produtos de todas as variáveis deverão ser iguais ao valor da demanda solicitada.

E é explícito que os valores que irão compor as variáveis de decisão deverão assumir valores



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

que pertençam ao conjunto dos números inteiros, já que não é possível dividir ou fracionar a quantidade a ser produzida de um item. Outra condição restritiva naturalmente imposta pela Programação Linear, é a da não negatividade, ao qual impõem que as variáveis de decisão devem assumir valores maiores ou igual a zero, conforme Equação (7).

$$\text{Minimizar: } Z = C_1 x_1 + C_2 x_2 + \dots + C_{134} x_{134} \quad (5)$$

$$\text{Sujeito as restrições: } \begin{aligned} a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1,134} x_{134} &\geq b_1 \\ a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{2,134} x_{134} &\geq b_2 \end{aligned} \quad (6)$$

...

$$a_{16,1} x_1 + a_{16,2} x_2 + \dots + a_{16,134} x_{134} \geq b_{16}$$

$$x_i \geq 0, \text{ para } i = 1, 2, \dots, 134 \quad (7)$$

Onde Z é uma letra arbitraria que representa o desperdício total gerado; x_1, x_2, \dots, x_{134} são as variáveis de decisão e c_1, c_2, \dots, c_{134} são os coeficientes representados pelo desperdício gerado por cada modelo de corte. As letras “ $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1,134}$ ” representam os coeficientes de cada variável das restrições do modelo. E por fim, as letras “ b_1, b_2, \dots, b_{16} ” representam a quantidade em um valor numérico a qual cada restrição deve atender.

Após ser elaborado o modelo matemático e dispor ele no Excel, os dados foram introduzidos no suplemento *solver*. Nos parâmetros do *solver*, em “Definir Objetivo”, foi colocado para obter-se o valor da função objetivo, que neste caso, será o valor do desperdício total para a obtenção dos itens solicitados, pertencendo à célula “D6”. Em “Para” é definido se a função objetivo busca minimizar, maximizar ou definir um valor determinado. Foi selecionado então a opção “Min”, visto que, essa aplicação busca minimizar o desperdício gerado. Em “Alterando Células Variáveis”, foram atribuídas as 134 variáveis de decisão que mostrarão a quantidade de barras de aço que devem ser cortadas em cada uma das possibilidades para a obtenção das unidades dos pedidos.

Já em “restrições”, como se trata de um modelo de P.L.I., todas as variáveis de decisão (células D4 a EG4) devem ser do tipo de inteiros, pois se deve ser utilizado uma barra inteira para o corte. As restrições do lado esquerdo, (células EH10 a EH25) é a quantidade de unidades que serão cortadas e devem ser iguais às do lado direito, (células EJ10 a EJ25) sendo a quantidade exata de itens solicitados.

Em “Selecionar um Método de Solução” foi selecionado o LP Simplex para resolver o problema, já que, se tratava de um problema de programação linear. Após isso, foi pressionado o botão “Resolver”, e então, o modelo matemático foi solucionado. Esse procedimento de resolução foi executado uma vez para cada mês de janeiro a setembro. Como os modelos de corte e os coeficientes



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

da função objetivo eram os mesmos para todos os meses, foi necessário alterar apenas as demandas em cada modelo de programação linear, visto que, houve solicitações em quantidades diferentes dos itens em cada mês analisado.

Na Figura 5 é demonstrado no Excel o modelo matemático elaborado, com os 5 primeiros e os 5 últimos modelos de cortes dos 134 existentes, e a demanda respectiva do mês de setembro como exemplo.

Figura 5 – Modelo matemático plotado no Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	EC	ED	EE	EF	EG	EH	EI	EJ
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																

Fonte: O autor (2022)

A célula D6 é a célula de destino, ou seja, ela foi atribuída para receber o valor da função objetivo que será o valor total do desperdício.

Nas Células D4 até EG4 foram representadas pelas variáveis de decisão e demonstraram quantas barras serão cortadas de acordo com os modelos de cortes.

As Células D3 até EG3 foram representadas pelos coeficientes das variáveis de decisão e demonstram o desperdício gerado por cada modelo de corte.

As células EJ10 até EJ25 representam as restrições do modelo. Nelas, estão descritas as quantidades mínimas de itens que devem ser fabricados.

Como as células EH10 a EH25 representa a quantidade de itens que serão fabricados, elas devem ser iguais às células EJ10 até EJ25.

E por fim, os coeficientes das restrições demonstram o quanto será fabricado de cada item (representado na linha), em cada modelo de corte (representado na coluna).

Após executado a resolução para todos os 9 meses, foram tabelados os desperdícios e as sobras. Com esse planejamento, a quantidade de barras necessárias para se atender a demanda, seria



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

de 567 unidades, reduzindo então o não aproveitamento das barras de 50680 mm para 27080 mm, sendo que 26168 mm são sobras, ou seja, podem ser reutilizadas. Nota-se que, o desperdício gerado seria de 912 mm, em termos percentuais, seria desperdiçado apenas 0,02% do total das barras utilizadas, e em termos financeiros, custaria a empresa R\$54,97 nesses 9 meses. Verifica-se que com a aplicação desta metodologia, haveria uma redução em termos percentuais de 96,77% de desperdício de matéria-prima e já em termos financeiros corresponderia a uma redução de R\$ 1.646,77 em relação ao cenário atual da empresa, onde não há planejamento.

Em comparação aos resultados obtidos pelo Mesquita (2015) utilizando essa mesma ferramenta, nota-se que o desperdício gerado no processo de cortes diminuiu de 7,95% para 2,60%, e o custo de perda caiu de R\$218,40 para R\$71,60. Em ambos os casos verificamos que essa ferramenta de fato contribui para a mitigação dos custos no processo. É possível verificar que os resultados obtidos pelo Mesquita (2015) foram mais expressivos proporcionalmente. Isso ocorre porque o objeto de estudo deste autor são chapas de vidro, e as peças obtidas a partir dessas chapas são itens grandes, que recombinados de diversas formas diferentes, podem de maneira mais volumosa reduzir o desperdício gerado no processo de corte.

A segunda ferramenta utilizada para a redução dos desperdícios foi o *1D Cutting Optimizer*, sendo um *software* que permite resolver problemas de programação linear por meio da utilização de algoritmos matemáticos e heurísticos que calculam a melhor combinação de padrões de corte para ser produzido a demanda solicitada com o menor desperdício possível. Esse *software* proporciona a lista de cortes ideais em poucos segundos, além de oferecer uma interface intuitiva, simples e prática, gerando relatórios claros e completos para análise e tomada de decisão.

Abrindo o *software 1D Cutting Optimizer*, já na tela inicial foi criado um novo projeto, sendo informado na aba "PARTS REQUESTED", as descrições dos itens, seu tamanho e sua demanda. Na aba "SOURCE BARS" foi informada a descrição da matéria-prima, "Barra de aço – SAE1045", seu tamanho utilizável, quantidade em estoque e custo. A unidade de medida utilizada foi milímetros, mas, como estavam ocorrendo divergências com resultados que apresentavam uma casa após a vírgula, foi aumentado em uma casa decimal os tamanhos de cada item e da barra de aço, corrigindo essa divergência, sendo necessário desconsiderar essa casa decimal a mais para análise dos dados.

Na Figura 6 é apresentada a interface inicial do *software 1D Cutting Optimizer*, alimentado com as demandas do mês de setembro como exemplo.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

Figura 6 – Interface do *1D Cutting Optimizer* com os dados do mês de setembro.

Job : Trabalho de Conclusão de Curso Project :

Description :

PARTS REQUESTED (16/16)			
	Parts Id.	Length	Quantity
1.	N 302245	2480	100
2.	CQ 54027	1085	1000
3.	CQ 54028	1085	1000
4.	KK 41024	740	500
5.	CQ 27934	740	250
6.	CQ 29852	740	300
7.	CQ 47945	715	100
8.	CQ 47946	715	100
9.	CQ 48794	705	500
10.	CQ 48795	705	500
11.	CQ 27935	650	250
12.	CQ 29853	645	300
13.	KK 41031	350	500
14.	H156100	185	300
15.	CQ 16817	180	2000
16.	H 156101	100	500

SOURCE BARS (1)				
	Bar Id.	Length	Quantity	Cost/Mt
1.	Barra de aço - SAE1045	59000	99000	0

Units: Millimetres

Cut thickness

Bar ends Trim

Recycle waste longer than

Fonte: O autor (2022)

Logo seguida, foi clicado em “Optimize”, para a obtenção dos cortes que foram gerados e apresentados em relatórios.

Na Figura 7 é apresentado uma página do relatório gerado para os resultados do mês de setembro (como exemplo), exibindo alguns modelos de corte juntamente com os detalhes e informações desse plano de corte.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

comprimento linear total para todos os meses, considerando que haveria 3339400 mm de mm utilizáveis, o não aproveitamento seria equivalente a 0,63% e representa um valor total de R\$1.275,32, sendo reduzido 58,23% em comparação com o cenário atual. No entanto, esse material poderia ser reutilizado, ou seja, não se enquadra como custo para a empresa.

A terceira ferramenta utilizada para a redução dos desperdícios foi o suplemento para Excel *1D CutX*, sendo uma ferramenta que possibilita a resolução de problemas de corte linear por meio da utilização de algoritmos matemáticos e automação VBA, calculando de forma otimizada a combinação de padrões de corte para ser produzido os pedidos solicitados com o desperdício reduzido. Esse suplemento lê os dados diretamente de planilhas do Excel e gera instantaneamente os *layouts* gráficos e um relatório de corte detalhado na pasta de trabalho do Excel. A principal característica dessa ferramenta é de trazer informações mais completas e detalhadas do plano de corte gerado em diversas planilhas diferentes, gerando relatório de custos, estoque, resíduo, sobra, e também ilustra os modelos de corte longitudinais criados.

Após instalado o *software*, foi necessário entrar no Excel, abrir a aba “Suplementos”, e executar o aplicativo clicando no botão “1D CutX - Linear Cut Optimizer”. Foi então aberto uma janela, nela foi informado em quais células se encontram as descrições dos itens, os tamanhos e suas demandas. Também foi necessário informar as células em que se encontra o tamanho e nome da matéria-prima utilizada. Após informado os dados, foi necessário clicar em “Run” para ser gerado o plano de corte, junto com os relatórios.

Após gerado os planos de corte para todos os 9 meses, foram computados todos os dados, e foi possível verificar a quantidade total de desperdício e sobra que foi gerada. Analisando todos os planos de cortes, verifica-se que foram gerados 566 modelos de cortes, sendo utilizado 566 barras de aço, custando um total de R\$ 204.484,48 de matéria-prima a empresa. Nesse cenário, também foi constatado que não houve geração de desperdício, somente de sobras, tendo em vista que, nos planos de cortes todos os modelos foram otimizados para não gerar nenhum milímetro de desperdício. Portanto, nesse caso também houve uma redução de 100% de desperdício.

Nos planos de corte de cada mês havia apenas um modelo de corte que gerava sobra, enquanto em todos os outros havia o consumo total da barra. A sobra gerada seria igual ao da ferramenta anterior, que no caso é de 21180 mm de comprimento linear total para todos os meses, considerando que haveria 3339400 mm utilizáveis, o não aproveitamento seria equivalente a 0,63% e representa um valor total de R\$1.275,32, sendo reduzido 58,26% em comparação com o cenário atual. No entanto, esse material poderia ser reutilizado, ou seja, não se enquadra como custo para a empresa.

Nota-se que os resultados em relação ao consumo de matéria-prima, desperdícios e sobras geradas pelas ferramentas *1D Cutting Optimizer* e *1D CutX* são idênticos, diferenciando-se apenas na quantidade de modelos de cortes gerados, na medida que o *software 1D Cutting Optimizer* gerou 189 modelos e o suplemento *1D CutX* gerou 566 modelos. Isso ocorre porque ambas as ferramentas encontraram o resultado ótimo do problema, no caso, o plano de corte que irá minimizar o desperdício



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

no processo de cortes. E essa diferença da quantidade de modelos de corte criados se dá pela diferença de metodologia para execução e resolução dos planos de cada ferramenta, e demonstra que não há apenas um plano de cortes que alcança o desperdício mínimo.

Após obter os resultados referentes aos planos de cortes gerados por cada ferramenta, foi possível tabelar esses dados e comparar ar o quanto cada ferramenta reduz os desperdícios, as sobras, o consumo de matéria-prima, e também, verificar as vantagens e desvantagens de aplicação para cada ferramenta. No Quadro 2 é possível verificar os dados comparativos dos métodos aplicados, demonstrando quantas barras foram utilizadas, o comprimento linear disponível, o consumo, o não aproveitamento, as sobras e os desperdícios gerados por cada método.

Quadro 2 – Dados comparativos entre os métodos aplicados.

Dados	Sem planejamento	Solver – Excel	1D Cutting Optimizer	1D Cut x
Barras utilizadas	571	567	566	566
Modelos de corte	236	134	189	566
Comprimento linear disponível (mm)	3.368.90	3.345.30	3.339.400	3.339.40
Consumo (mm)	3.318.22	3.318.22	3.318.22	3.318.22
Não aproveitamento (mm)	50680	27.080	21.180	21.180
Sobras (mm)	22.418	26.168	21.180	21.180
Desperdício (mm)	28.262	912	0	0

Fonte: O autor.

O método proposto por Sturmer (2020), utilizando o solver para resolver problemas de corte em um modelo de programação linear, mostra-se eficaz utilizando-se de poucas encomendas como no caso de Loeblein (2013). No entanto, para uma grande quantidade de pedidos de diferentes itens, como é o caso desse estudo, utilizando-se dessa metodologia, devido as inúmeras possibilidades de modos de corte, geraria dias para o seu planejamento, sendo que, o tempo de entrega mais ágil e com



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

a mesma qualidade, se torna cada vez mais crucial e imprescindível para manter o nível de competitividade da empresa. Portanto, para grandes quantidades de encomenda, mesmo com o planejamento de 134 modelos de cortes possíveis e havendo uma redução de 96,77% de desperdício de matéria-prima, ainda torna esse método não recomendável para empresa, devido ao tempo necessário para executá-lo, e o fato de que ele não garante o menor desperdício possível.

Pode-se verificar que as ferramentas *1D Cutting Optimizer* e *1D CutX* cumpriram com o objetivo proposto que era de minimizar o máximo possível o desperdício gerado no processo de corte, tendo em vista que ambas as ferramentas zeraram o número de aparas que seriam perdidas nesses 9 meses analisados. Outra vantagem da aplicação dessas duas ferramentas é de que a quantidade de barras necessárias para se atender a demanda seria menor, logo, o gasto total com a utilização da matéria-prima seria reduzido. Além disso, ambos *softwares* geram os relatórios dos planos de cortes em poucos segundos, informando todos os dados relativos à execução dos modelos de corte, como consumo, custos e desperdícios.

Ao fazer a análise dos custos para implementação e utilização de cada uma das ferramentas, verificou-se que sem planejamento o custo do desperdício seria de R\$1701,74 para esses 9 meses analisados. Já, utilizando-se do método proposto pelo Sturmer (2020), o mesmo custo de desperdício seria de R\$54,91. Com a utilização do *software 1D Cutting Optimizer* seriam gastos R\$965,07 apenas uma vez para adquirir a licença de uso do aplicativo, no entanto, não haveria custo com desperdício. Já com a utilização do suplemento *1D CutX*, haveria também somente o custo para adquirir a licença de uso, que seria uma taxa única R\$490,49, e que também não apresentaria custos com desperdícios.

Conforme são aplicadas as ferramentas é verificado que a quantidade de barras necessárias para atender a demanda é menor, tendo em vista que, o rearranjo das sequências das peças fabricadas faz com que não ocorra mais desperdícios, e isso acumulado ao longo do mês, promove a redução da quantidade de matéria-prima utilizada. Conseqüentemente, essas metodologias irão apresentar uma redução maior nos custos da empresa, tendo em vista que haverá uma menor quantidade de matéria-prima utilizada. No Quadro 3 são especificados os custos envolvidos na contratação e implantação para cada ferramenta.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

Quadro 3 – Custos para implantação e utilização das metodologias

Custos	Sem planejamento	Solver – Excel	1D Cutting Optimizer	1D CutX
Aquisição	R\$0,00	R\$0,00	R\$965,07	R\$490,49
Desperdício	R\$1701,74	R\$54,91	R\$0,00	R\$0,00
Matéria Prima	R\$206,29 0,88	R\$204,84 5,76	R\$204,48 4,48	R\$204,48 4,48
Total	R\$207,99 2,62	R\$204,90 0,67	R\$205,44 9,55	R\$204,97 4,97

Fonte: O autor.

Verifica-se então, que a melhor opção para a empresa seria a aquisição do suplemento *1D CutX*, tendo em vista que seu custo de aquisição é menor que o do *software 1D Cutting Optimizer*, e seu desempenho é semelhante em relação à redução de desperdício e velocidade de geração dos resultados. Com a aquisição desse suplemento, seria economizado R\$2.543,07 ao longo desses 9 meses, representando uma economia de 1,45 % em relação à não utilização de um planejamento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Pesquisa Operacional, devido a sua característica multidisciplinar, vem cada vez mais sendo utilizada nas indústrias, onde suas ferramentas de otimização, como a programação linear, vêm sendo aplicadas para a resolução de problemas rotineiros, auxiliando os gestores na tomada de decisão. Essas ferramentas visam otimizar os recursos disponíveis, e ajudam a desenvolver métodos e estratégias eficientes para o crescimento da empresa, tornando-a mais competitiva e agindo como instrumento para redução de desperdícios e, conseqüentemente, de custos.

Este estudo teve como premissa elaborar um modelo de programação linear inteira que reduzisse o desperdício de matéria-prima no corte de barras de aço em uma empresa fabricante de peças agrícolas, e comparar com os resultados obtidos nos *softwares 1D Cutting Optimizer* e no suplemento *1D CutX*. E por meio da análise dos resultados dessas ferramentas, buscou-se verificar qual seria o plano ótimo de cortes de barras de aço que apresentasse o menor desperdício e o menor custo possível.

Entre os três métodos analisados para uma grande quantidade de pedidos, o método manual proposto por Sturmer (2020) seria economicamente a melhor opção para a empresa, porém, devido a um fator relevante como às inúmeras possibilidades de corte, causaria à empresa um grande tempo



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

perdido para a realização do planejamento desses cortes, o que torna esse método inviável. A aquisição do suplemento *1D CutX* seria a melhor maneira de atender a empresa para uma melhor adequação em seu processo produtivo, pois, além de zerar os desperdícios zerados, o método apresentou menores custos nos 9 meses analisados, alcançando-se assim uma redução em termos financeiros de 1,45% comparado a não realização de qualquer planejamento.

REFERÊNCIAS

ABENSUR, E. O. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia de produção**. São Paulo: Blucher, 2018.

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, p. 605-617, 2008.

AOKI, R. M. **Pesquisa Operacional: Simulação**. Londrina: Editora e Distribuidora S.A., 2018.

ARENALES, M. *et al.* **Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BAPTISTA, V. F. A relação entre o consumo e a escassez dos recursos naturais: uma abordagem histórica. **Saúde & Ambiente em Revista**, v. 5, n. 1, p. 8-14, 2010.

BARBOSA, M. A.; ZANARDINI, R. A. D. **Iniciação à pesquisa operacional no ambiente de gestão**. 3. ed. Curitiba: Intersaberes, 2015.

BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BRONSON, R. **Pesquisa Operacional**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

CARVALHO, J. M. S. **Programação Linear: Algoritmos simplex primal, dual, transporte e afetação**. Porto: Vida Econômica Editorial, 2014.

CHAVES, V. H. C. **Perspectiva histórica da Pesquisa Operacional**. São Paulo. Unesp. 2011. 117f. Dissertação (Mestrado em Educação Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Educação Matemática, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus Rio Claro, São Paulo, 2011.

CHERRI, A. C.; VIANNA, A. C. G. Minicurso: Introdução a problemas de corte de estoque. Apostila do curso. *In: V SMAT, Simpósio de matemática*. Presidente Prudente (SP), 2010.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de Produção e Operações: o essencial**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

DE ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional**. 5. ed. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2018.

GARCIA, S.; GUERREIRO, R.; CORRAR, L. Teoria das restrições e programação linear. **Revista de Contabilidade do CRC-SP**, v. 2, n. 4, p. 47-61, 1998.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

GOLFETO, R. R.; MORETTI, A. C.; SALLES NETO, L. L. Algoritmo genético simbiótico aplicado ao problema de corte unidimensional. **Anais [...] do XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2007.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw Hill, 2006.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LEDERMANN, M.; KINALSKI, N. M. **Pesquisa operacional**. Ijuí: Ed. Unijuí, 2012.

LISBOA, E. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Facom, 2002. (Apostila do curso). Disponível em: http://www.facom.ufms.br/~ricardo/Courses/OR-2009/Materials/apostila_po.pdf. Acesso em: 13 abr. 2022.

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.

LOPES, A. L. M.; GALVÃO, A. L. M. D. V.; FOGAÇA, M. **Pesquisa operacional: livro didático**. Palhoça: UnisulVirtual, 2015.

LUNA, H. P. L.; GOLDBARG, M. C. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

MARTINS, E. R. **Pesquisa operacional e sua atuação multidisciplinar**. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019.

MESQUITA, G. M. **Análise de diferentes metodologias para redução de desperdícios no processo de corte de chapas de vidro**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Centro Universitário de Formiga – UNIFOR, MG. Formiga, MG, 2015.

MOREIRA, D. A. **Pesquisa operacional: curso introdutório**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

NAKAGAWA, M. **Gestão estratégica de custos: Conceitos, Sistemas e implementação**. São Paulo: Atlas, 1993.

NETO, J. S. L. **Pesquisa Operacional**. Curitiba: Contentus, 2020.

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997.

POLDI, K. C.; ARENALES, M. N. O problema de corte de estoque unidimensional multiperíodo. **Pesquisa Operacional**, v. 30, p. 153-174, jan./abr. 2010.

PORTAL DA INDÚSTRIA. Indústria em números. **Portal da Indústria**, 2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/industria-em-numeros/>. Acesso em: 31 ago. 2022.

PRADO, D. S. **Programação linear**. 7. ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2016.

ROBLES JÚNIOR, A. **Custos da qualidade: Uma Estratégia para competição Global**. São Paulo: Atlas, 1994.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE DIFERENTES METODOLOGIAS PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE CORTE DE BARRAS DE AÇO EM UMA INDÚSTRIA METAL-MECÂNICA LOCALIZADA NA REGIÃO OESTE DO PARANÁ
Sergio Gabriel Senderski, Floriano Luiz Suszek

SANTOS, J. C. O. **Redução de desperdício no processo de corte de vidros via programação linear inteira**: um estudo de caso em uma empresa do centro-oeste de Minas Gerais. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -. Centro Universitário de Formiga – UNIFOR. Formiga, MG, 2014.

SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção**: do ponto de vista da Engenharia de Produção. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 1996.

SILVA, E. M. et al. **Pesquisa Operacional**. 3. ed. São Paulo: Atlas S.A, 1998.

SOARES, E. A.; DE ARAÚJO, G. C. Gestão de resíduos sólidos no processo produtivo: um estudo de caso em uma indústria calçadista. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 14, n. 2, p. 171-181, 2016.

STURMER, G. **Aplicação da programação linear para redução de desperdício no processo de corte de tubos**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Faculdade Fahor, Horizontina, RS, 2020.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2007.

TUBINO, D. F. *et al.* **Manufatura enxuta como estratégia de produção**: a chave para a produtividade industrial. São Paulo: Atlas, 2015.