

Otimização de cortes de barras de aço por meio de programação linear

Cássio Santos de Oliveira (UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL) financerio@aveirors.com.br

Guerbisson Simonvil (UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL) simonvil1995@gmail.com

Mateus Dall'Agnol (INSTITUTO FEDERAL DE TOCANTINS) mateus.agnol@ifto.edu.br

Wagner Lourenzi Simões (UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL) wagner.simoes@ulbra.br

Resumo:

A oscilação do mercado automotivo e necessidade de diminuir custos e otimizar processos é fundamental para sobrevivência das empresas no mercado de trabalho. Sendo assim o presente artigo tem o objetivo de por meio do uso de programação linear e auxílio da aplicação solver encontrado no software Excel, reduzir o desperdício e refugo de uma industrial metal mecânica. Para tal, padronizou-se o tamanho das barras de aço recebidas pela empresa e, foram mapeadas 184 combinações de corte entre 3 produtos diferentes e suas respectivas sobras ao final da operação de corte. O modelo linear construído tem por objetivo minimizar a sobra resultante do processo de corte das barras, respeitando as restrições de atendimento da demanda e de estoque máximo. Como resultado obteve-se planos de corte capazes de reduzir em até 92% o índice de refugos por sobras de barras após o processo de corte.

Palavras chave: Otimização de corte, Programação linear, redução de custos.

Steel bar cutting optimization using linear programming

Abstract

The automotive market oscillation and the need of to reduce and optimize costs and processes is fundamental for the survival of companies. Thus the present article aims, through the use of linear programming and solver application aid found in Excel software, reduce the waste and scrap of an industrial metal mechanic. For this, the size of the steel bars received by the company was standardized and 184 cutting combinations between 3 products and their respective leftovers were mapped at the end of the cutting operation. The linear model constructed has the objective of minimizing the leftovers resulting from the cutting process of the bars, respecting the demand and maximum stock supply constraints. As a result, cutting planes capable of reducing the scrap index by up to 92% after the cutting process were obtained.

Key-words: Cut optimization, Linear programming, costs reduce

1. Introdução

Atualmente a empresa objeto do estudo está se adequando ao conceito de redução de desperdícios e, com isso fazendo uma avaliação detalhada no setor de corte da empresa foi identificado um desperdício elevado no número de pontas de barras de aço descartadas, devido à forma como são programados os cortes das barras para a produção de determinados produtos.

Os problemas de maior impacto com esses cortes são constatados em três modelos de produtos.

Esses três modelos de peças representam o número maior de refugo devido à ausência de uma ferramenta adequada ao planejamento dos cortes, esse impacto elevado se dá devido ao seu diâmetro ter uma dimensão acima de 100mm, assim quando vendido como refugo esses itens tem impacto significativo, pelo fato de que, o valor repassado pelo refugo é em Kg de aço.

Atualmente essa sobra de pontas de barra são pesadas e caracterizadas como refugo, esse refugo é armazenado e uma vez por semana é vendido para siderúrgica com considerável perda financeira quando comparado com o valor que é comprado, conforme tabela abaixo:

Valores pagos pelo aço SAE 1043	
Valor de compra (Kg)	R\$ 3,20
Valor de venda sucata (Kg)	R\$ 0,95
Diferença/prejuízo (por Kg)	R\$ 2,25

Tabela 1 – Valores pagos pelo aço SAE 1043

A especificação do comprimento da barra é fundamental para um melhor controle dos cortes, atualmente o comprimento das barras utilizadas para o corte desses produtos varia entre 8m e 10m. Essa variação de comprimento da barra é um fator que contribui para o desperdício, pois a oscilação entre as barras cortadas chega a ser de 2m. Devido a essa variável o desperdício é maximizado. Com base nesses valores foi feito um levantamento do desperdício mensal/anual de cortes para cada modelo, apresentado na Tabela 2 e Figura 1.

Valores pagos pelo aço SAE 1043			
Demanda de peças (mensal)	9000	7000	1000
Modelo	16321	16328	16353
Comprimento da peça (mm)	114,64	116,65	170,96
Comprimento da barra (m)	1032	817	171
Nº barras utilizadas	116	91	20
Desperdício em Kg	676,2	163,08	218,77
Valor (desperdiçado)	R\$ 1.521,45	R\$ 367,00	R\$ 492,23
Total por mês			R\$ 2.380,68
Valor desperdiçado (anual)	R\$ 18.257,40	R\$ 4.404,00	R\$ 5.906,76
Total anual			R\$ 28.568,16

Tabela 2 – Levantamento do desperdício de barras peso x valor

DESPERDÍCIO ANUAL (R\$)

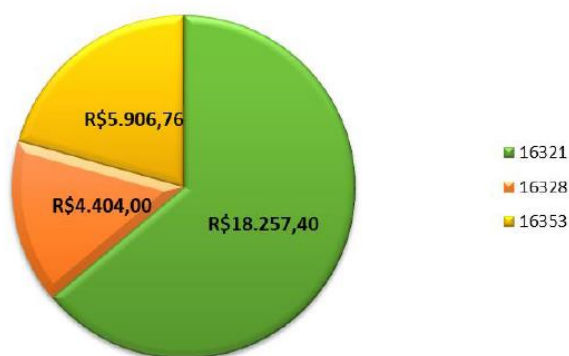


Figura 1 – Desperdício anual. Fonte: pesquisadores.

Após avaliação desse desperdício verificou-se que a melhoria nesse processo de corte é fundamental para obter maior resultado e reduzir os custos de refugos gerados no processo. Trabalho de corte de estoque unidimensional como o realizado por Simões, Dalla Vecchia e Da Silva (2013) demonstram o potencial que a pesquisa operacional, em especial o uso da programação linear tem na redução de sobras em situações onde se faz necessária a redução de perdas por sobras não aproveitáveis de material no processo de corte.

2. Referencial teórico

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 (MOREIRA, 2007). 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 (MOREIRA, 2007).

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; MOREIRA, 2007; COLIN, 2007).

Wagner (1986) aponta 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 (2008) 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.

De acordo com Moreira (2007), 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.

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 BROffice 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.

O problema tratado por este trabalho caracteriza-se como um problema de corte unidimensional. Conforme Cherri (2009), este tipo de problema envolve apenas uma das dimensões relevantes no processo de corte, neste caso, o comprimento das barras de pinos. Além disso, visa obter controle das sobras e eliminação de perdas. Assumem-se sobras como sendo os comprimentos suficientemente grandes para gerar uma nova peça aproveitável, e de forma complementar, entende-se perda como sendo todo comprimento insuficientemente grande para gerar a menor peça aproveitável (CHERRI; VIANNA, 2012).

Encontra-se farta literatura a respeito do corte de estoque unidimensional com sobras aproveitáveis (CERQUEIRA; YANASSE, 2006; BRESSAN; OLIVEIRA, 2004; SILVA, 2008; COSTA; SASSI; GUMARÃES, 2012; BIANCO; SILVA, 2010; LOEBLIN *et al.*, 2012; CHERRI; VIANNA, 2012; COROMINAS; BAUTISTA, 1991), tratados, na maioria das vezes, como o conhecido problema da mochila (CHERRI; VIANNA, 2012; COROMINAS; BAUTISTA, 1991). Marques e Arenales (2002) relatam que o problema da mochila trata de empacotar itens pequenos dentro de espaços bem definidos, ou de forma análoga, cortar objetos grandes para a produção de itens menores em quantidades bem definidas. Na especificidade desse trabalho, a situação avaliada diz respeito ao segundo caso.

3. Metodologia

O processo de busca por uma solução específica em uma situação contextualizada caracteriza essa investigação quanto a sua natureza como uma pesquisa aplicada (MANSON, 2006). Gil (2010) acrescenta, é aquela que busca resolver problemas, no ambiente em que os pesquisadores estão envolvidos.

Objetivando maior imersão no tema investigado, foi realizada uma pesquisa bibliográfica. O resultado apurado nesta etapa serve de sustentação para todos os procedimentos adotados ao longo do trabalho. A pesquisa de campo apoia-se nas bases conceituais do estudo de caso, para coleta de dados e aplicação dos achados em uma situação real de uma empresa da indústria eletrônica, seguindo as orientações de Yin (2010). Já a pesquisa operacional, para embasar cientificamente o processo de tomada de decisão e formulação do modelo proposto.

Dados fornecidos pela empresa foram utilizados na formulação dos modelos utilizados, embora a solução proposta neste trabalho não se limite apenas ao caso estudado.

4. Modelo para solução do problema.

Para melhoria desse processo vamos utilizar um método de programação linear e adequação do processo para o melhor desempenho e redução da quantidade de aço desperdiçada no processo de corte na forma de sobras.

Para Moreira (2017 pag.11) A programação linear é, se não o mais popular, um dos modelos matemáticos mais populares, estruturado para resolver problemas que apresentem variáveis que possam ser medidas e cujos relacionamentos possam ser expressos por meio de equações e/ou inequações lineares. Há muitos problemas que podem ser formulados dessa maneira, em muitas áreas científicas e sociais, pelo menos de forma aproximada, vindo daí o uso intenso do modelo.

Dalla Vecchia (2016 pag.17) afirma que, de modo geral, a programação linear se constitui em uma Função Objetivo z , linear, que pode ser maximizada ou minimizada e possui um conjunto de restrições também lineares que se constituem por equações ou inequações. Silva (2010 pag. 4) entende que, uma das técnicas mais utilizadas na abordagem de problemas em pesquisa operacional é a programação linear. A simplicidade do modelo envolvido e a disponibilidade de uma técnica de solução programável em computador facilitam sua aplicação. As aplicações mais conhecidas são feitas em sistemas estruturados, como os de produção, finanças, controles de estoque etc. Ainda no mesmo raciocínio Silva (2010) continua sua afirmativa dizendo que o modelo matemático de programação linear é composto de uma função objetiva linear, e de restrições técnicas representadas por um grupo de inequações também lineares.

O primeiro passo utilizado para redução da quantidade de *blanks* desperdiçados no processo de corte foi a restrição do comprimento e tolerância da especificação da barra comprada pela siderúrgica. Essa melhoria não exigiu nenhum tipo de investimento por parte da empresa. A nova especificação de barras passou a ser de 8900mm, com uma tolerância de 200mm.

Após a especificação de novas tolerâncias para a barra foi modelado e simulado todos os possíveis cortes em uma planilha excel, essa simulação será o segundo passo para obtenção do modelo de solução no SOLVER, para a construção do modelo foi considerado os comprimentos (barra e comprimento das peças), nas medidas nominais.

Para composição do modelo 184 combinações possíveis combinações de corte entre os três modelos. Foram considerados no mapeamento dos cortes os três modelos de itens de maior impacto no custo do refugo.

Com o objetivo de solução vamos utilizou-se programação linear e aplicação na aplicação SOLVER. Para isso devemos obter uma função objetivo e identificar as restrições em nosso processo. Para Moreira (2017) função objetivo é uma expressão formada por uma combinação linear das variáveis de decisão. No que se refere a restrições, Moreira (2017) afirma que, restrições dizem respeito a escassez de recursos, por um lado, e a limites impostos sobre nossas ações na tentativa de maximizar a função objetivo. Abaixo função objetivo para a solução do modelo proposto:

$$FO \min. = \sum_{i=1}^n x_i * y_i$$

Sujeito a:

$$p_1 - d_1 \leq 50$$

$$p_2 - d_2 \leq 50$$

$$p_3 - d_3 \leq 50$$

$$x_i \text{ e } y_i \geq 0$$

$$d_1, d_2 \text{ e } d_3 \geq 0$$

onde:

i é o modelo de corte mapeado. Neste estudo foram utilizados um total de 184 modelos mapeados, porém número pode ser extrapolado em função de expansão do trabalho de mapeamento.

x_i é a quantidade de cortes do modelo i a serem realizados.

y_i é a resultante ao se realizar o corte de uma barra seguindo o modelo i .

p_1, p_2 e p_3 são as quantidades produzidas dos modelos 16321, 16328 e 16353. Estas quantidades são obtidas a partir da soma dos produtos entre a quantidade de cada modelo de peça resultante de cada modelo de corte i e a quantidade de barras cortadas sob cada modelo i .

d_1, d_2 e d_3 são as demandas dos modelos 16321, 16328 e 16353.

Como restrição foi estipulado um estoque máximo de 50 peças por demanda. No processo atual, sem melhorias, não são utilizados estoques controlados, porém para a redução de custo devemos considerar a possibilidade do trabalho com estoque máximo.

Com a função objetivo determina e as restrições definidas entraram no módulo do Solver para a resolução do problema, como determinamos na função objetivo um comando de minimizar os valores, o Solver irá calcular as condições de corte para a demanda desejada, um arranjo de combinações que irá minimizar o desperdício das sobras de pontas de barra, ou seja, irá fazer a combinação de cortes de forma que o desperdício de pontas de barra seja quase zero. Além disso, temos também as restrições referentes ao tempo de produção de cada um dos produtos em relação ao número de horas que a fábrica funciona, sazonalidade, etc. Todas estas variáveis externas colocam pressão sobre o pessoal de produção e os economistas da empresa, pois eles precisam maximizar a produção de forma que o retorno seja o mais alto possível.

Ao selecionar a função resolver o solver irá combinar todas as possibilidades de cortes que foi determinado e apontar as combinações de menor desperdício de sobras. Essas combinações deverão ser analisadas e executadas para obtenção de resultados vantajosos.

5. Resultados obtidos

Com os resultados obtidos na simulação para uma demanda estimada de 9000pç do item 16321; 7000pç do item 16328 e 1000pç do item 16353 constatou-se que, a combinação de cortes para essa demanda mensal ficaria, conforme os dados apresentados na Tabela 3:

		Itens			Sobra
Nº de cortes		16321	16328	16353	
6	Corte 36	42	35		2,37
190	Corte 37	41	36		0,36
24	Corte 142	15		42	0,08
8	Corte 183	76		1	16,4

Tabela 3 – Combinação de cortes para a demanda mensal

Executando os cortes indicados pelo modelo chegamos às quantidades que correspondem a solução apresentada na Tabela 4:

	s.a.	Nº Solução	Itens	
			Demanda	Restrição
16321	P1	9010	9000	9050
16328	P2	7050	7000	7050
16353	P3	1016	1000	1050

Tabela 4 – Quantidades obtidas pela solução

A solução apresentada é a melhor combinação de cortes para a demanda estipulada obtendo um estoque máximo de 50 unidades de cada modelo após atendimento da demanda. Foi utilizado para a cálculo da solução no SOLVER uma demanda que em média é realizada na empresa. Essa demanda pode oscilar para mais ou para menos em função de variáveis de mercado, porém no histórico recente indica ser capaz de atender o mercado. Os resultados obtidos correspondem a 92% de economia em materiais que sobram após o processo de corte considerando que a empresa possui mais de 35 modelos de matéria prima, essa economia se torna um ganho significativo em termos de eficiência no uso da matéria prima, chegando a um desperdício de quase zero. Como desvantagem na utilização da solução da programação linear nessa configuração é a geração de um número mínimo de estoque, devido ao fato de que a empresa na atual condição não trabalha com estoques. Porém, estes estoques são componentes utilizáveis, que passam a substituir a sobra em dimensões não utilizáveis que era revendida à siderúrgica como sucata anteriormente.

O gráfico apresentado na Figura 2 apresenta as perdas financeiras mensal e anual decorrentes das sobras geradas pela programação do corte de barras utilizado atualmente pela empresa.

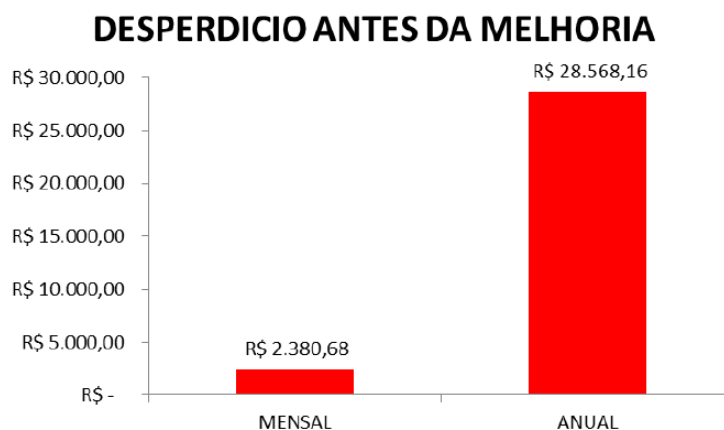


Figura 2 – Desperdício anual. Fonte: pesquisadores.

A perda financeira devido às sobras chega a atingir valores próximos da casa de R\$30 mil. Recursos financeiros dessa ordem podem viabilizar investimentos substanciais em outros projetos de melhoria, aquisição de equipamento e investimentos em qualificação da mão de obra.

A programação dos cortes de barras com base na solução proposta permitiram uma expressiva redução das perdas. Na Figura 2 são apresentadas as perdas por descarte de sobras mensal e anual projetadas para a produção dos mesmos itens, porém planejando o corte das barras com base

na solução proposta.

DESPERDÍCIO APÓS A MELHORIA

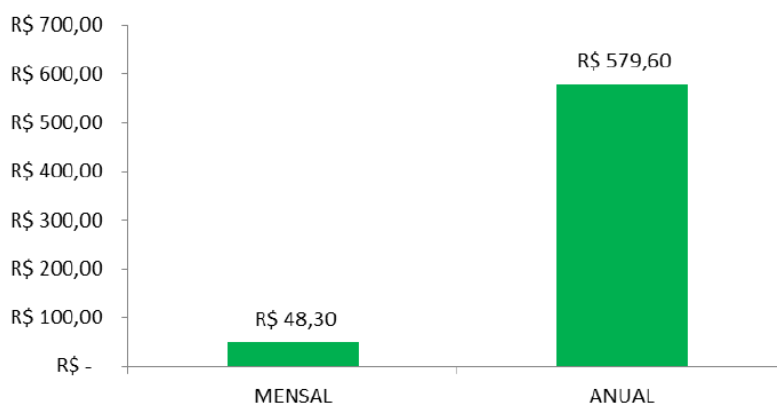


Figura 3 – Desperdício anual. Fonte: pesquisadores.

6. Considerações finais

A competitividade da indústria está baseada na capacidade que a empresa tem de eliminar desperdícios e utilizar de forma mais eficiente seus recursos. Na indústria de transformação metal mecânica muitas perdas ocorrem em função das diferenças entre as dimensões da matéria prima adquirida e os múltiplos das dimensões dos produtos resultantes de seu fracionamento.

Neste trabalho foi possível evidenciar que simples mudanças na lógica de programação dos cortes, melhorando o planejamento deste processo pode reduzir substancialmente as perdas, elevando o nível de eficiência na utilização dos recursos disponíveis. Uma ferramenta de apoio à tomada de decisão baseada em programação linear e implementada na aplicação SOLVER do Microsoft Excel permitiu esta alteração no caso da empresa estudada, sem a necessidade de investimentos ou qualificação adicional da mão de obra.

Comparando a situação atual com a solução encontrada no modelo, percebeu-se uma redução possível da sucata considerando a configuração gerada no trabalho na ordem de 92%. Essa redução na sucata corresponde a um ganho mensal de R\$ 2.332,38, esse, conforme modelo apresentado faz com que a empresa tenha uma perda real de apenas R\$ 48,30. Isto mostra que o resultado obtido pelo modelo é muito satisfatório e de grande impacto na redução de sucata dos três modelos de peças analisados.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a exploração de soluções de maior poderio para lidar com maior complexidade computacional. A aplicação, por exemplo, de métodos metaheurísticos pode ampliar o espaço de busca de soluções (combinações de cortes) possíveis, e até mesmo a combinação de outros modelos de produtos, permitindo a construção de soluções de melhor qualidade.

Referências

BIANCO, C.M.; SILVA, A.D. *Problema de corte bidimensional guilhotinado: uma abordagem através de ferramentas CAD e heurísticas de posicionamento*. In: ENEGEP 2010, São Carlos. Anais. ABEPRO, 2010.

MOREIRA, P.D. *Pesquisa operacional: curso introdutório*. 2. Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2017.

BRESSAN, G.M.; OLIVEIRA, A.R.L. Reordenamento eficiente das colunas básicas na programação de lotes e cortes. *Revista pesquisa Operacional*, 24, p.323-337, 2004.

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, 1, 2006.

CHERRI, A.C.; VIANNA, A.C.G. *Problemas de corte com sobras aproveitáveis*. In: XIX SIMPEP, Bauru. Anais. 2012.

COLIN, E.C. *Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas*. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

COROMINAS, A.; BAUTISTA, J. Procedures for solving a 1-dimensional cutting problem. *European Journal of Operational Research*, v. 77, 1994.

COSTA, F.M.; SASSI, R.J.; GUIMARÃES, S.A. *Aplicações de meta-heurística bio-inspiradas híbridas para otimização de corte bidimensional guilhotinado em uma indústria vidreira*. In: ENEGEP 2012, Bento Gonçalves. Anais. ABEPRO, 2012.

DALLA VECCHIA, R. *Pesquisa operacional*. Canoas: Ed. Ulbra, 2016.

GIL, A.C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 5. Ed. São Paulo: Atlas, 2010.

LACHTERMACHER, G. *Pesquisa Operacional, na tomada de decisões*. São Paulo: Pearson, 2009.

LOEBLEIN, L. C.; GODOY, L. P.; TABORDA, L. W.; DE OLIVEIRA, D. C. Aplicação da programação Linear para minimização de perdas de aparas em indústria metal mecânica. *Revista Gestão Industrial*, v.8, n.4, p. 14-29, 2012.

MANSON, N.J. Is operations research really research? *Orion*, v.22, n. 5, p. 155-180, 2006.

MARQUES, F. do P.; ARENALES, M. N. O problema da mochila compartimentada e aplicações. *Pesquisa Operacional*, V.22, p.285-304, 2002.

SILVA, S.E.A. *Otimização no processo de corte unidimensional de barras de aço*. Campinas: USP. 2008. (Dissertação de Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SILVA, E.M. *Pesquisa operacional para os cursos de administração e engenharia: programação linear, simulação*. 4. Ed São Paulo: Atlas, 2010.

SIMÕES, W. L.; DALLA VECCHIA, R.; DA SILVA, M. G. Um modelo para programação de cortes de estoque unidimensional inteiro livre de predas. Anais XX Simpósio de Engenharia de Produção. SP: Bauru, 2013.

TAHA, H. *Pesquisa operacional: uma visão geral*. 8. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

YIN, R.K. *Estudo de caso: Planejamento e métodos*. 4. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.