

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

ELIAS PEREIRA DA SILVA

**“Otimização da Configuração Produtiva da Planta de Laminação a Frio de
Aços Planos”**

Belo Horizonte
2016

ELIAS PEREIRA DA SILVA

“Otimização da Configuração Produtiva da Planta de Laminação a Frio de Aços Planos”

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Otimização de Sistemas do Departamento de Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista em Otimização de Sistemas.

Área de concentração: Gestão Industrial

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Robson Mateus

Belo Horizonte
2016

© 2016, Elias Pereira da Silva.
Todos os direitos reservados

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do ICEx - UFMG

Silva, Elias Pereira da.

S586o Otimização da configuração produtiva da planta de laminação a frio de aços planos. / Elias Pereira da Silva – Belo Horizonte, 2016.
 xiii, 47 f.: il.; 29 cm.

Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Ciência da Computação.

Orientador: Geraldo Robson Mateus

1. Computação. 2. Programação linear. 3. Produtividade industrial. 4. Laminação (Metalurgia). I. Orientador. II. Título.

CDU 519.6*61 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
ESPECIALIZAÇÃO EM OTMIZAÇÃO DE SISTEMAS: ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
GESTÃO INDUSTRIAL

OTIMIZAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO PRODUTIVA DA PLANTA DE LAMINAÇÃO A FRIO DE AÇOS PLANOS

Elias Pereira da Silva

Monografia apresentada aos Senhores:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'G. Mateus'.

Prof. Geraldo Robson Mateus - Orientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Cardoso'.

Prof. Maurício Cardoso de Souza
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Gomez'.

Prof. Martín Gomez Ravetti
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG

Belo Horizonte, 13 de dezembro de 2016

A Deus pelo dom da vida a mim concedido,
À minha querida e amada esposa Luciene,
Aos meus filhos Samuel e Thaís,
Aos meus pais, em especial ao meu pai que não está mais entre nós, mas
sempre foi meu incentivador,
Aos meus irmãos, familiares e amigos.
Com muito carinho e amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder a vida e a sabedoria.

À minha esposa Luciene que sempre esteve ao meu lado acreditando em mim, me apoiando e incentivando com um amor incondicional.

Aos meus filhos Samuel e Thaís, por me proporcionarem alegria e motivos para a busca dos meus objetivos.

Ao professor e orientador, Dr. Geraldo Robson Mateus, pelas orientações, apoio e aprendizado.

À minha coorientadora Alhandra Cristina Moraes Antunes Tepedino pelo apoio, sobretudo na formulação do modelo.

Ao Hélio Bechara de Almeida pelas orientações.

À Usiminas, pela confiança e oportunidade a mim concedida.

Aos colegas de trabalho da Engenharia Industrial e da Laminação a Frio pelo apoio e colaboração.

Aos colegas da especialização, pelo companheirismo e ajuda.

À UFMG, pela aceitação da apresentação da minha proposta.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE NOTAÇÕES	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo Geral	2
2.2. Objetivos específicos	2
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	3
3.1. Planta de laminação a frio	3
3.2. Linha de Limpeza Eletrolítica	5
3.2.1. Seção de entrada	7
3.2.2. Seção de centro	8
3.2.3. Seção de saída	13
3.2.4. Reprocesso na linha de limpeza eletrolítica	13
3.3. Geração de produtos	14
3.4. Definição do Problema	16
3.5. Proposta de solução	16
3.6. Problemas de programação linear	20
3.7. A solução de problemas de programação linear	22
3.8. Análise de sensibilidade em problemas de programação linear	22
4. METODOLOGIA	24
4.1. Mapeamento do processo na laminação a frio	24
4.2. Coleta de dados	27
4.3. Cenários analisados	28
4.4. Modelagem	30
4.4.1. Software utilizado no modelo de programação linear	30
4.4.2. Modelo Matemático	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1. Respostas do Modelo	34

5.1.1. Configuração Produtiva.....	34
5.1.2. Custo da Produção	37
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – PLTCM.....	4
Figura 3.2 – CAPL.....	5
Figura 3.3 – Linha de Limpeza Eletrolítica.	6
Figura 3.4 – Seções da LLE.....	7
Figura 3.5 – Tanque HCT – limpeza químico-alkalina.	8
Figura 3.6 – Limpeza por método mecânico.	9
Figura 3.7 – Mecanismo de limpeza eletrolítica.	10
Figura 3.8 – Diagrama esquemático do processo de eletrólise.....	11
Figura 3.9 – Secador de tiras.	12
Figura 3.10 – Bobinadeira.....	13
Figura 3.11 – Pátio de controle.	14
Figura 3.12 – Bobinas a frio - produtos gerados na planta de laminação a frio.	15
Figura 4.1 – Fluxograma de processo da laminação a frio.	25
Figura 4.2 – Fluxograma de entrada e saída na LLE.	31
Figura 5.1 – Gráfico com a configuração produtiva diária da LLE alterando o volume de material reprocessado.	34
Figura 5.2 – Gráfico com a configuração produtiva diária da LLE incrementando o valor de UE e PE.	35
Figura 5.3 – Gráfico com a configuração produtiva diária da LLE em situação de linha ociosa – baixa demanda.....	36
Figura 5.5 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE alterando o volume de material reprocessado.	38
Figura 5.6 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE incrementando o valor de UE e PE – sem ocupação da disponibilidade. .	38
Figura 5.7 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE incrementando o valor de UE e PE – com ocupação da disponibilidade. .	39
Figura 5.8 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE em situação de linha ociosa – baixa demanda.....	39
Figura 5.9 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE em situação de linha cheia – alta demanda.	40

Figura 5.10 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE com aumento da taxa de material desclassificado.	41
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1 – Análise de cenários alterando quantidade de reprocesso.	28
Tabela IV.2 – Análise de cenários alterando UE e PE.	28
Tabela IV.3 – Análise de cenários alterando taxa de material desclassificado.	29
Tabela IV.4 – Análise de cenários alterando a demanda para linha ociosa.	29
Tabela IV.5 – Análise de cenários alterando a demanda para linha cheia.	30

LISTA DE NOTAÇÕES

BAF	<i>Batch Annealing Furnace</i> – Recozimento em Caixa
CAPL	<i>Continuous Annealing and Processing Line</i> – Linha de Recozimento Contínuo
ECT	<i>Electro Cleaning Tank</i> – Tanque de Limpeza Eletrolítica
HCT	<i>Hot Cleaning Tank</i> – Tanque de Limpeza a Quente
HRT	<i>Hot Rising Tank</i> – Tanque de Lavagem a Quente
LLE	Linha de Limpeza Eletrolítica
PE	Produtividade Efetiva
PLTCM	<i>Pickling Line and Tandem Cold Mill</i> – Linha de Decapagem e Laminador em Tandem a Frio
TCM	<i>Tandem Cold Mill</i> – Laminador em Tandem a Frio
UD	Utilização Disponível
UE	Utilização Efetiva

RESUMO

A necessidade de otimizar os custos de produção dos processos industriais associada à garantia de propriedades mecânicas, características dimensionais e superficiais dos materiais gerados na planta de laminação a frio, requer que processos adicionais sejam devidamente avaliados. Um deles é a linha de limpeza eletrolítica, responsável por retirar os resíduos oleosos provenientes da laminação. Atualmente, esta linha opera em regime de um turno. O objetivo é determinar a configuração produtiva mais adequada, com o melhor custo benefício a partir da modelagem do problema de otimização linear e sua solução através de um software comercial. Este trabalho permitiu encontrar resultados que são de grande importância para o processo operacional, como minimização da ociosidade, menor volume de reprocesso e melhores indicadores de produtividade, o que contribui para o aumento da lucratividade da empresa.

Palavras-chave: Otimização Linear, Limpeza Eletrolítica, Configuração Produtiva.

ABSTRACT

The need to optimize production costs of industrial processes associated to the guarantee of mechanical properties, dimensional and superficial of the characteristics materials produced in cold rolling plant, requires that additional processes be properly evaluated. One of them is the electrolytic cleaning line, responsible for removing oily residues from rolling. Currently, this line operates in one shift basis. The aim is to determine the most appropriate production configuration, with the best value from the modeling of the linear optimization problem and its solution through commercial software. This work allowed us to find results that are of great importance for the operational process, such as minimization of idleness, lower reprocessing volume and better productivity indicators, which contributes to increase the company's profitability.

Keywords: Linear Optimization, Electrolytic Cleaning, Production Configuration.

1. INTRODUÇÃO

A planta de laminação a frio de aços planos é composta por vários processos operacionais cuja função é receber o material laminado a quente chamado bobina a quente e reduzir sua espessura para dimensões aplicáveis no mercado de produtos planos, sobretudo, na indústria de eletrodomésticos, construção civil e automobilística.

Nestes processos da laminação a frio ocorre algumas vezes que os materiais processados não atendem às especificações com relação às propriedades mecânicas ou qualidade superficial. Neste caso, estes materiais que seriam desclassificados são encaminhados para serem reprocessados em linhas como a limpeza eletrolítica.

Ao serem reprocessados é inserido no custo de transformação destes materiais despesas dos processos adicionais. Dessa forma, gera o questionamento de qual seria a melhor configuração produtiva do ponto de vista dos custos de produção.

Para as verificações de diferentes cenários foram definidos parâmetros de rendimento e desclassificação, bem como quantidade de material a ser reprocessado e indicadores de processo.

Neste trabalho foram avaliadas as combinações desses parâmetros e o seu impacto nos custos de produção.

A partir dos resultados encontrados com o uso da modelagem do problema de otimização linear, foi possível determinar diferentes configurações produtivas e seus custos benefícios.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Determinar a configuração produtiva mais adequada para a linha de limpeza eletrolítica, com o melhor custo benefício a partir da verificação de diferentes cenários.

2.2. Objetivos específicos

- Mapear o fluxo de produção dos materiais laminados a frio;
- Modelar o problema de otimização linear e solução através de um software comercial;
- Identificar a configuração produtiva da linha de limpeza eletrolítica que melhor se ajusta à produção de reprocessos com o melhor custo benefício;
- Propor utilização da ferramenta para outros processos confirmando a aplicabilidade no trabalho proposto.

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

3.1. Planta de laminação a frio

A planta de laminação a frio está inserida na cadeia produtiva de aços planos para diversas aplicações com destaque para indústria de eletrodomésticos, construção civil e automobilística.

Os aços laminados a frio são gerados a partir da redução a frio aplicada ao produto laminado a quente, sendo posteriormente recozido – tratamento térmico. Os produtos assim obtidos apresentam dimensões que podem variar de 0,20 a 3,00 mm de espessura e larguras compreendidas entre 700 e 1.830 mm, fornecidos como bobina ou chapa. O tratamento térmico, responsável por conferir as principais propriedades mecânicas ao produto, pode, opcionalmente, ser feito por duas tecnologias: BAF ou CAPL. A associação entre composição química específica e histórico termomecânico adequado permite a produção de diferentes qualidades de aço, desde comerciais até os de alta resistência. Ensaio são aplicados aos produtos para aferir as diferentes propriedades especificadas em norma, sendo o mais comum o ensaio de tração que avalia a resistência mecânica e a ductilidade. O produto laminado a frio é fornecido sem revestimento, sendo aplicado à superfície das chapas, óleos protetivos temporários, que asseguram resistência à corrosão atmosférica até o uso do produto pelo cliente (USIMINAS, 2014).

A planta de laminação a frio é composta pelos processos de decapagem cuja função principal consiste na remoção de óxidos, preparando o material para o processo de laminação; laminador a frio que reduz a espessura da bobina até atingir a especificada pelo cliente; rebobinamento composto por bobinadeiras que tem por finalidade rebobinar as bobinas consideradas *full hard*, isto é, sem recozimento. A Usiminas possui em uma de suas linhas o PLTCM que acopla os processos citados acima de forma contínua, o que proporciona ganho em qualidade e, principalmente, em produtividade conforme figura 3.1 (USIMINAS, 2014).

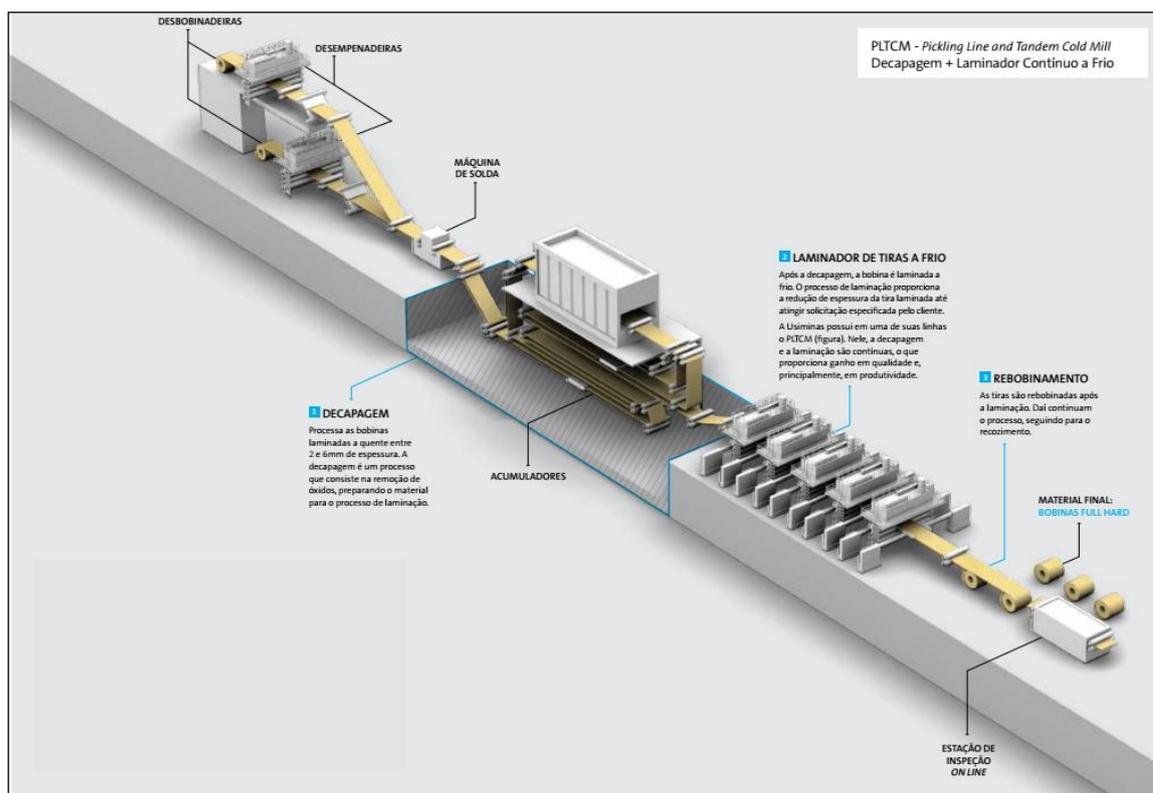


Figura 3.1 – PLTCM.

Fonte: USIMINAS, 2014.

Após o laminador a frio a bobina é encaminhada para os processos de limpeza eletrolítica cuja função é retirar da superfície do material os resíduos gerados durante a laminação devido ao atrito entre as chapas e os cilindros antes de ser recozido. O recozimento consiste em um tratamento térmico para recuperação das propriedades mecânicas do material, tornando-o adequado para aplicação em diversos segmentos, podendo acontecer de duas formas: em caixa ou contínuo. No recozimento em caixa, as bobinas são dispostas em pilhas de três ou quatro e passam por ciclos de aquecimento. O material fica de dois a três dias sendo recozido nesses equipamentos. Já no recozimento contínuo, o material é desbobinado no início da linha e passa aberto pela linha de recozimento (em forma de tira), o que proporciona um aquecimento mais rápido e faz com que o processo tenha duração de apenas alguns minutos. Após o recozimento contínuo, a bobina passa pelo encruamento cujo processo proporciona a adequação das propriedades mecânicas do aço, além de adequar a forma da bobina e imprimir rugosidade final na superfície do

material. Por fim, o material passa pela tesoura que apara as bordas e secciona as bobinas para atender a largura e o peso solicitados pelo cliente e encerra o processo na estação de inspeção *on line* e rebobinadeiras conforme figura 3.2 (USIMINAS, 2014).

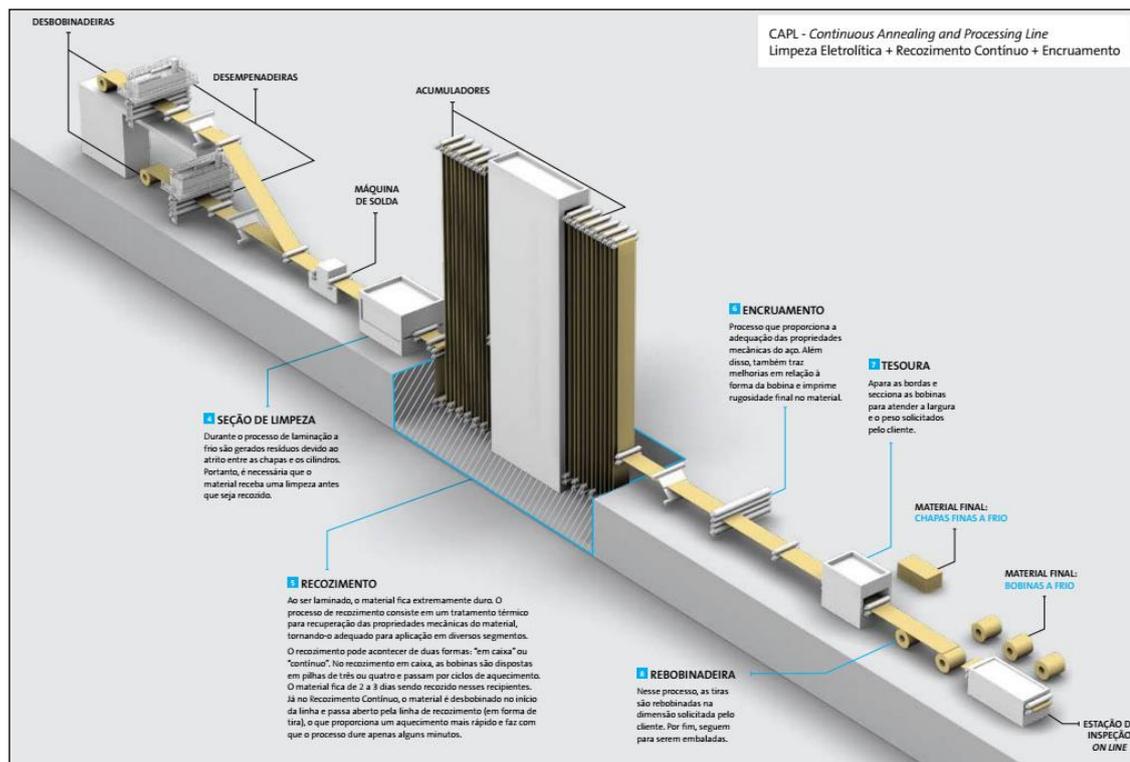


Figura 3.2 – CAPL.

Fonte: USIMINAS, 2014.

Após a inspeção *on line* o material final pode ser destinado ao cliente sem ou com a camada de revestimento protetivo contra oxidação composta por zinco ou zinco/alumínio. A este processo dá-se o nome de galvanização, podendo ser por eletrólise ou por imersão a quente.

3.2. Linha de Limpeza Eletrolítica

A Linha de Limpeza Eletrolítica (LLE) é uma das etapas do processo siderúrgico que ocorre após o laminador de tiras a frio (TCM) da laminação a frio conforme figura 3.3. Seu objetivo é promover uma melhor limpeza da superfície da tira.

O processo da LLE é responsável pela remoção dos resíduos de carbono, óleo e finos de ferro utilizados na etapa de laminação a frio. A limpeza da superfície da tira ocorre através de um banho em solução desengraxante (limpeza química e mecânica) e, também, por eletrólise, garantindo a qualidade do produto em aplicações de pintura e revestimento, por exemplo.



Figura 3.3 – Linha de Limpeza Eletrolítica.

Fonte: USIMINAS, 2014.

O processo da LLE é dividido em três seções, sendo elas: entrada, centro e saída conforme figura 3.4.

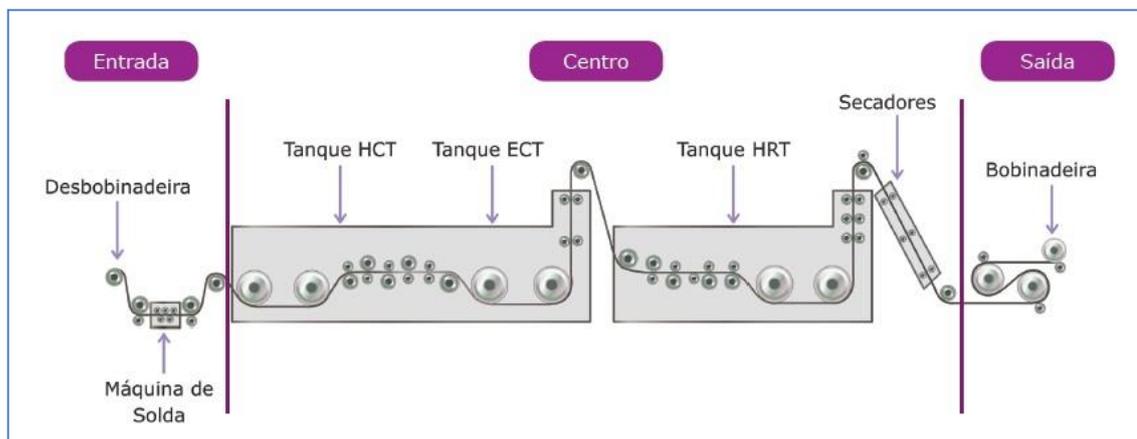


Figura 3.4 – Seções da LLE.

Fonte: USIMINAS, 2014.

Cada seção possui equipamentos e objetivos específicos, conforme detalhado a seguir.

3.2.1. Seção de entrada

A seção de entrada da LLE é composta por equipamentos, que são acionados via sistemas hidráulicos, pneumáticos e elétricos; eles são responsáveis pela condução da bobina a ser processada até a desbobinadeira. Estes equipamentos são:

- a) Transportador de bobinas: promove a movimentação das bobinas, através de passes, berço a berço, até a posição do carro elevador de bobinas.
- b) Carro elevador de bobinas: responsável pelo transporte da bobina do berço até o mandril da desbobinadeira.
- c) Desbobinadeira: desbobina a bobina para iniciar o processo na linha, exercendo tensão contrária ao sentido de processo da linha (tensão de ré).
- d) Guilhotina: responsável pelo corte da ponta inicial do material, para eliminar defeitos e variações de espessura.
- e) Máquina de solda por resistência elétrica: é um equipamento que tem como função básica a união de materiais. Neste caso, a união da ponta inicial e final das bobinas.

3.2.2. Seção de centro

A seção de centro da linha de limpeza eletrolítica é composta por:

- Tanque HCT – desengraxamento alcalino;
- Tanque ECT – desengraxamento eletrolítico;
- Tanque HRT – limpeza por método mecânico;
- Secagem de tiras – torres e secador.

Esses tanques são responsáveis pela limpeza da tira através de um banho em solução alcalina, métodos mecânicos e por eletrólise. Além dos tanques, a linha central também possui equipamentos para secagem das tiras, que são duas torres constituídas de rolos para retenção de solução e um secador de tiras.

A) Tanque HCT – *Hot Cleaning Tank*:

Tanque de limpeza a quente. Nele ocorrem dois processos de limpeza, sendo eles: limpeza químico-alkalina e limpeza mecânica.

Limpeza químico-alkalina: a tira recebe um banho em solução alcalina à base de ortossilicato de sódio. A tira oleada é imersa nessa solução à alta temperatura (aproximadamente, 60°C), transformando o resíduo oleoso em sabões solúveis e glicerina, conforme se visualiza na figura 3.5.

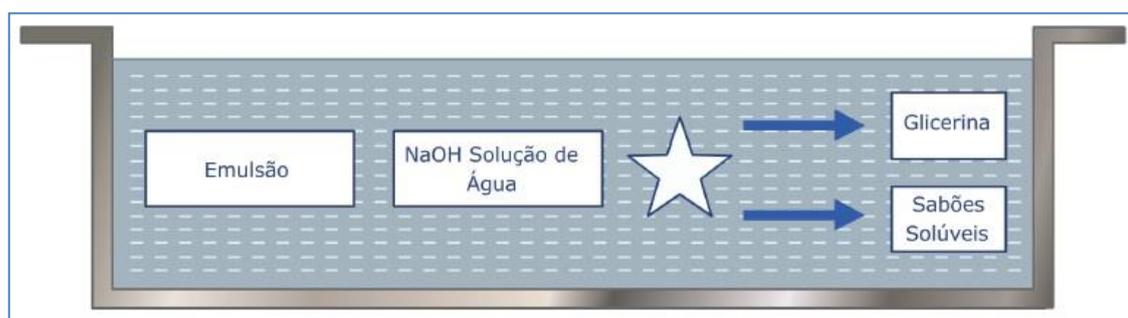


Figura 3.5 – Tanque HCT – limpeza químico-alkalina.

Fonte: USIMINAS, 2014.

Durante o processo de limpeza no tanque HCT, dentro do banho alcalino ocorre uma reação, conhecida como saponificação. Ela acontece da seguinte maneira:

- Infiltração: ocorre o umedecimento do material oleoso na superfície da tira pelo álcali.
- Penetração: após a infiltração, a solução alcalina penetra nos elementos oleosos.
- Dispersão: após a penetração, o álcali reage e desprende os óleos da superfície da chapa.
- Emulsificação: é a última fase. Nela acontece a dispersão dos resíduos oleosos dentro da solução.

Limpeza mecânica: o segundo processo de limpeza que acontece no tanque HCT é a limpeza mecânica conforme figura 3.6. Nessa limpeza são utilizados rolos escovas que trabalham em contato com a superfície da tira, girando a uma velocidade máxima de 900 rpm e pressão regulada em 22 Amperes.

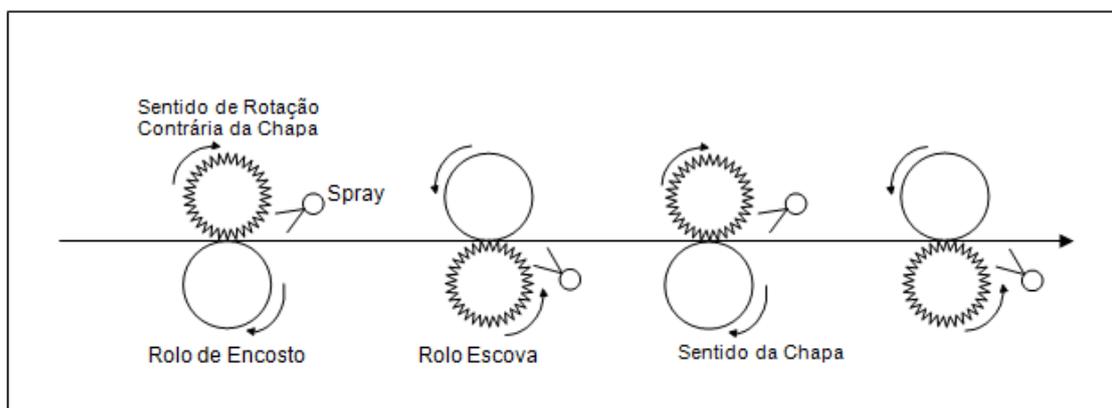


Figura 3.6 – Limpeza por método mecânico.

Fonte: USIMINAS, 2014.

B) Tanque ECT – *Electro Cleaning Tank*:

Tanque de limpeza por eletrólise. Os processos de desengraxamento mecânico e químico não são suficientes para limpeza da superfície da chapa em pequeno espaço de tempo. O terceiro mecanismo de desengraxamento é feito por eletrólise, no tanque ECT.

O desengraxamento por eletrólise baseia-se em uma reação elétrica que promove a limpeza total dos resíduos da tira.

À medida que a tira passa entre quatro conjuntos de eletrodos, podendo ser positivos ou negativos, ocorre o bombardeamento elétrico, formando uma célula eletrolítica (eletrólise).

Os resíduos da superfície são liberados através do desprendimento de hidrogênio e oxigênio nas rugosidades (vales), provocando arraste do restante das impurezas pelo hidrogênio e pelo oxigênio liberado.

Verifica-se na figura 3.7 a superfície da tira com moléculas de H_2 e O_2 presas abaixo da camada de óleo.

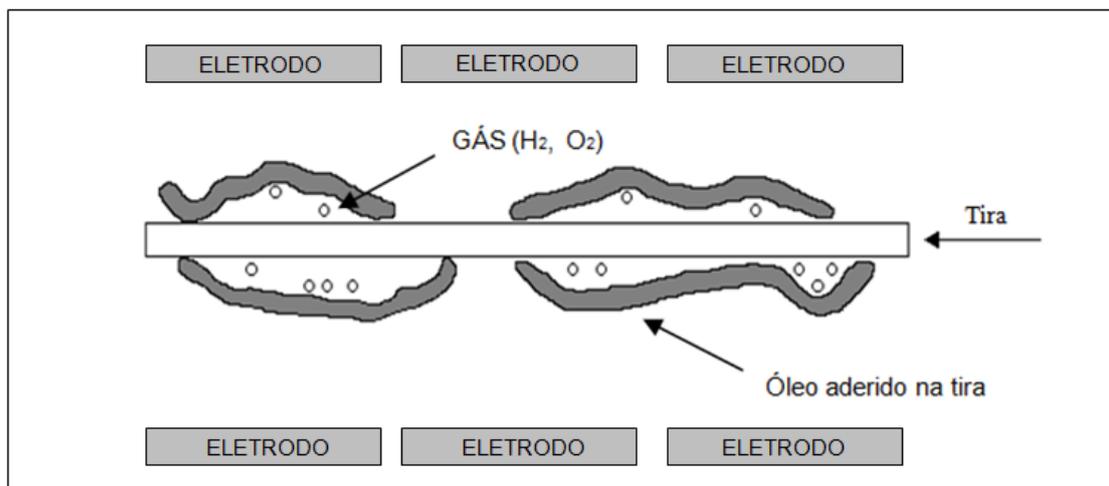


Figura 3.7 – Mecanismo de limpeza eletrolítica.

Fonte: USIMINAS, 2014.

Conforme mostra a 3.8, quando a tira passa entre dois eletrodos positivos, carrega-se com carga negativa em sua superfície. Quando a tira é o cátodo, ocorre geração de hidrogênio, sendo assim, o eletrodo é o ânodo, ocorrendo à geração de oxigênio. Quando invertemos a polaridade do eletrodo, ou seja, este passa ser o cátodo carregado com carga negativa, ocorre o processo inverso, promovendo a geração de oxigênio na tira, que passa a ser o ânodo, gerando hidrogênio no eletrodo.

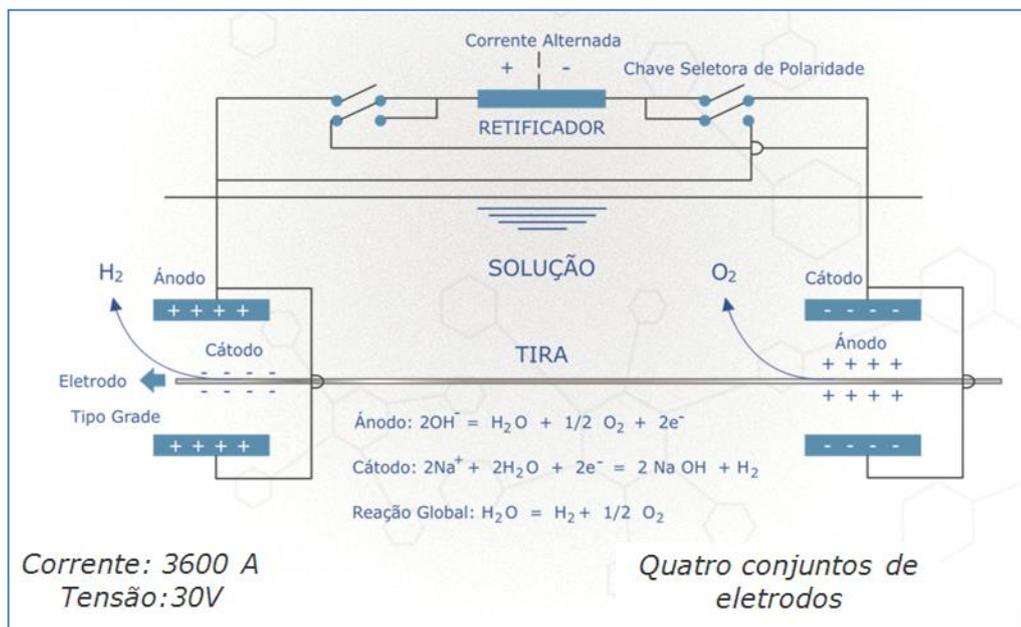


Figura 3.8 – Diagrama esquemático do processo de eletrólise.

Fonte: USIMINAS, 2014.

Após esse processo a tira passa por uma torre com conjuntos de rolos espremedores, para reter a solução contida na tira, evitando que esta seja arrastada para o tanque HRT e o contamine.

C) Tanque HRT – *Hot Rising Tank*:

O terceiro, e último tanque, é o HRT (tanque de lavagem a quente). Nesta etapa ocorre o último processo de limpeza da tira, que consiste em uma limpeza pelo método mecânico, ou seja:

- A sujeira é retirada através de rolos tipo escova e bicos sprays pressurizados;
- A tira é mergulhada em um banho de água potável/industrial para a lavagem final;
- É iniciado o processo de secagem da tira.

D) Secagem da tira:

O processo de secagem da tira é realizado em três etapas:

- A primeira e a segunda ocorrem na torre número 02, por meio de rolos espremedores e cabeçotes de ar comprimido;
- Já a terceira etapa é realizada através do secador de tiras utilizando ar quente.

Após sair do tanque HRT, a tira segue para a torre 02. Nesta etapa, a tira passa por bicos de ar e por três conjuntos de rolos espremedores, sendo sua função reter a solução contida na superfície da chapa.

Na sequência, a tira entra no secador conforme figura 3.9, sendo este um equipamento utilizado para secar ambos os lados da tira. Este procedimento é realizado com a finalidade de evitar que se inicie o processo de oxidação na superfície da bobina.



Figura 3.9 – Secador de tiras.

Fonte: USIMINAS, 2014.

Antes de iniciar o procedimento de secagem, o ar é aquecido no trocador de calor, para então ser soprado na superfície da tira, através de cabeçotes em forma de V, promovendo a secagem total da mesma.

3.2.3. Seção de saída

Na saída da LLE, a tira encontra-se completamente limpa e seca, mas ainda não é o final do processo. Nesta seção existem diversos equipamentos que dão sequência ao processo da linha, sendo os principais:

- a) Rolo tensor: é o rolo responsável pelo controle de tensão de bobinamento e desbobinamento da tira.
- b) Guilhotina: promove o seccionamento das bobinas e descarte da solda realizada na linha.
- c) Mesa basculante: conduz as sucatas de material para a caçamba de descarte.
- d) Rolos auxiliares: transporta a tira até a bobinadeira.
- e) EPC: É o equipamento responsável pelo controle da qualidade do bobinamento da bobina.
- f) Bobinadeira: realiza o bobinamento do material conforme figura 3.10; exerce tensão de bobinamento com valores pré-definidos em função das dimensões do material e do ciclo de recozimento.



Figura 3.10 – Bobinadeira.

Fonte: USIMINAS, 2014.

3.2.4. Reprocesso na linha de limpeza eletrolítica

Na LLE é possível realizar a recuperação de alguns produtos que apresentaram defeitos durante a sua produção. Muitos defeitos podem ser corrigidos com a limpeza eletrolítica.

As principais recuperações de produtos enviados para a LLE são para retirar o óleo protetivo, aplicado nas linhas de inspeção e também reinspecionar o material. Posteriormente, tais bobinas são processadas em outros processos como o de recozimento ou um novo revestimento ou no acabamento, seja para corrigir propriedades mecânicas ou defeitos superficiais, como oxidação/sujeira.

Para realização da recuperação e reprocesso, os produtos são recebidos na linha de limpeza eletrolítica através de carretas e permanecem no pátio de controle conforme figura 3.11 até que sejam programados para entrarem na linha de processo.



Figura 3.11 – Pátio de controle.

Fonte: USIMINAS, 2014.

3.3. Geração de produtos

Os produtos gerados na planta de laminação a frio chamados bobinas a frio conforme figura 3.12. São destinados ao mercado de aços planos como

indústria automobilística, eletrodomésticos e construção civil, cuja exigência de qualidade, propriedades mecânicas e características dimensionais são relevantes.



Figura 3.12 – Bobinas a frio - produtos gerados na planta de laminação a frio.

Fonte: USIMINAS, 2014.

Para atendimento a essas exigências dos requisitos demandados pelos clientes torna-se necessário garantir boa performance operacional dos processos produtivos da planta de laminação a frio. Porém, algumas vezes, em função de alguma variável operacional, torna-se necessário reprocessar a bobina.

Estes materiais ao serem reprocessados demandam um tempo de reprocesso que pode impactar o tempo de entrega aos seus clientes. Além disso, são inseridos no custo de transformação destes materiais despesas dos processos por onde serão novamente processados o que aumenta o custo de produção.

3.4. Definição do Problema

A partir da verificação de diferentes cenários encontrar o que apresenta o melhor custo benefício com relação à quantidade de reprocesso, taxa de desclassificação, taxa de rendimento, demanda de produção, índices de utilização e produtividade da linha.

Daí, o fato deste trabalho ter como objetivo determinar a configuração produtiva mais adequada, com o melhor custo benefício, a partir da modelagem do problema de otimização linear e solução através de um software comercial.

3.5. Proposta de solução

Foi usado utilizado um software comercial para modelagem do problema de otimização linear e solução verificando diferentes cenários a partir de parâmetros de rendimento e desclassificação definidos, bem como quantidade de material a ser reprocessado e indicadores de processo. A partir do modelo estabelecido foram avaliadas as combinações desses parâmetros e o seu impacto nos custos de produção.

Um dos métodos mais utilizados na abordagem de problemas de Pesquisa Operacional é a programação linear. É um método matemático que pode ser utilizado, sob certas condições, para gerar uma solução ótima para diversos problemas e aplicações. A programação linear é uma técnica de otimização cujos benefícios incluem a redução de custos e aumento do lucro, entre outros (BAZARAA *et al.*, 2009).

Essa técnica foi criada em 1946 e tem sido aplicada nas áreas mais diversas. Algumas aplicações se tornaram clássicas, tais como: composição de alimentos, rações e adubos; produção de ligas metálicas e petróleo; transporte; localização industrial; carteira de ações - investimentos; alocação de recursos em fábricas, fazendas, escritórios e outros; designação de pessoas e tarefas;

composição de tabelas de horários; corte de barras e chapas (SCALABRIN *et al.*, 2006).

A programação linear, além de permitir encontrar o lucro máximo ou o custo mínimo em situações reais, tem como objetivos auxiliar no estágio inicial da investigação; na avaliação e interpretação dos resultados do problema; na aplicação desses resultados (HILLIER; LIBERMAN, 2006).

O termo “programação” pode ser entendido como “planejamento”. Já a qualificação “linear” deixa antever como as relações matemáticas utilizadas são funções lineares (SCALABRIN *et al.*, 2006).

Este é um método matemático utilizado para a solução de problemas empresariais que dizem respeito à otimização na utilização de recursos pelas diversas tarefas ou atividades que devem ser realizadas. Em geral, nesses problemas, os recursos disponíveis são escassos, ou seja, não são suficientes para que cheguem ao nível mais elevado que se deseja na execução de todas as atividades (BERNARDO, 1996). Trata-se, portanto, de uma ferramenta de auxílio ao processo de tomada de decisões sobre a utilização de recursos limitados, buscando a maximização ou a minimização de um ou mais objetivos, sujeito a um conjunto de restrições (CECILIANO, 2007).

Os problemas de programação linear buscam a distribuição eficiente de recursos limitados para atender a um determinado objetivo, em geral, maximizar lucros ou minimizar custos. Em se tratando de programação linear, esse objetivo é expresso através de uma função linear, denominada “função-objetivo” (KUHNNEN, 2002).

É necessário também que se definam quais as atividades que consomem recursos e em que proporções são consumidas. Essas informações são apresentadas em forma de equações ou inequações lineares, uma para cada recurso. O conjunto dessas equações e/ou inequações denominam-se

“restrições do modelo” (SCALABRIN *et al.*, 2006). Uma solução que atende todas as restrições é denominada viável, e a que otimiza a função objetivo é a solução ótima.

O método da programação linear deve observar os seguintes procedimentos, para solucionar um problema: **Definir o problema** - para isso, é preciso identificar o objetivo pretendido, as variáveis de decisão, ou seja, as variáveis que estão ligadas a esse objetivo e, ainda, quais as limitações e relações a que estas variáveis estão sujeitas. O **objetivo**, em geral, é maximizar ou minimizar um critério, observando se os recursos disponíveis são escassos, ou seja, possuem condições restritivas. O **modelo** é codificado em uma linguagem simbólica, no caso, através de equações e inequações matemáticas lineares. Dessa forma, o mundo real será representado através de um modelo matemático, permitindo que sobre ele se apliquem técnicas e métodos matemáticos que facilitem a solução do problema (SOUZA, 1998).

A programação linear é uma das técnicas mais utilizadas na pesquisa operacional. Sua aplicação é facilitada devido à simplicidade do modelo e a disponibilidade de uma técnica de solução programável em computador. As aplicações mais comuns são feitas em Produção, Finanças, Logística, Matemática aplicada entre outras (SILVA *et al.*, 1998).

Decisões de qual a melhor combinação de recursos que minimizem os custos dos processos da laminação a frio apontando a melhor configuração produtiva são o foco de discussão deste trabalho. No caso proposto, será discutida, passo a passo, a solução de um problema de minimização de custos.

Definido o problema, é preciso obter a solução por meio do modelo construído. Hoje, existem diversos programas de computador, softwares disponíveis no mercado, para solucionar problemas de programação linear, fáceis de serem operados. Alguns softwares disponíveis no mercado são o GLPK, CPLEX,

GUROBI, XPRESS, MINOS, Scilab, Excel (Solver), LINDO, LINGO, MATLAB e outros (PRADO, 1999).

Entre os softwares, as planilhas eletrônicas têm sido usadas pela facilidade de utilização e estarem em uso nas principais empresas, entre elas o Excel da Microsoft, o Lotus da IBM e o Quatro-Pro da Corel (VIEIRA, 2014).

No caso deste trabalho será usado o software LINGO que é uma ferramenta simples utilizada na otimização linear e não linear para formular, resolver e analisar a solução de grandes problemas de forma concisa. A otimização ajuda a encontrar a resposta que produz o melhor resultado; atinge o maior lucro ou aquela que atinge o menor custo (LINDO SYSTEMS INC, 2010).

Um dos recursos mais poderosos do LINGO é a sua linguagem de modelagem matemática. A linguagem de modelagem do LINGO permite expressar o seu problema de uma forma natural que é muito semelhante ao padrão de notação matemática. Em vez de inserir cada termo de cada restrição explicitamente, pode-se expressar uma série de restrições similares em uma única declaração compacta. Isto leva a modelos que são muito mais fáceis de manter e ampliar. Outra característica conveniente da linguagem de modelagem do LINGO é a seção de dados. A seção de dados permite isolar os dados do seu modelo a partir da formulação. Na verdade, o LINGO pode até mesmo ler dados de uma planilha, banco de dados ou arquivo de texto separado. Com dados independentemente do modelo, é muito mais fácil fazer alterações, e há menos chance de erro quando é feita uma determinada modificação (LINDO SYSTEMS INC, 2010).

No caso deste trabalho serão usadas planilhas eletrônicas, associadas ao LINGO para análise e formulação de problemas.

O grande atrativo destas planilhas é a facilidade de criar interfaces flexíveis para o usuário com um custo baixo, permitindo assim que ele possa tomar

decisões dentro de um ambiente customizado. Como consequência, elas têm prestado importante apoio ao processo de tomada de decisão gerencial, melhorando o desempenho dos diversos setores que compõem a organização (GROSSMAN, 2005).

Através desses aplicativos podem-se formular problemas e gerar soluções ótimas que possam ser facilmente interpretadas pelo usuário final. Além disso, é possível também analisar diferentes cenários de produção, criados a partir de mecanismos de análise de sensibilidade das variáveis de decisão dos problemas formulados (TECHAWIBOONWONG, 2002).

3.6. Problemas de programação linear

Problemas de programação linear são problemas de otimização nos quais a função-objetivo e as restrições são todas lineares, o que implica proporcionalidade das quantidades envolvidas. Com isso, um modelo de programação linear apresenta uma estrutura padronizada e repetitiva que pode ser utilizada para resolver os mais variados problemas. Esta característica permitiu o desenvolvimento de eficientes programas de computador, simples de serem utilizados, tornando a programação linear uma técnica extremamente útil e com grande número de aplicações. Além disso, a simplicidade do modelo envolvido e a disponibilidade de uma técnica de solução programável em computador facilitam sua aplicação (LACHTERMACHER, 2004; EHRLICH, 2004; LISBOA, 2002).

Um problema de programação linear pode ser definido da seguinte forma (LACHTERMACHER, 2004):

Variáveis de x_1, x_2, \dots, x_n

Decisão:

$$\begin{array}{l} \text{Objetivo: Otimizar } Z \\ \text{Sujeito a: } \left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} = \\ \leq \\ = \\ \geq \end{array} \left\{ \begin{array}{l} f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_m \end{array} \right. \end{array}$$

Onde: $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + \dots + a_{in}x_n$, para $i = 1, \dots, m$

n é o número de variáveis

m é o número de restrições do problema

i é o índice de uma determinada restrição ($i = 1, 2, \dots, m$)

j é o índice de uma determinada variável ($j = 1, 2, \dots, n$)

De forma algébrica, pode-se representar um problema padrão da seguinte forma:

Maximizar: $Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

$$\begin{array}{cccc} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{array}$$

Sujeito a: $a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

$$b_1 \geq 0$$

A complexidade de um problema de programação linear vai depender em parte de sua dimensão, que pode ser medida em termos do número de variáveis e restrições envolvidas (DONATO, 2002).

3.7. A solução de problemas de programação linear

A solução de um problema de otimização envolve a escolha de valores para um conjunto de variáveis inter-relacionadas, com o intuito de alcançar um determinado objetivo (NAKAYAMA, 2005).

O principal método de resolução de um problema de programação linear é o Método Simplex, considerado como um dos dez algoritmos de maior influência no desenvolvimento e prática da ciência e da engenharia no século XX (YARMISH, 2002). Entretanto, existem outros métodos para a solução de problemas deste tipo, como os métodos de pontos interiores ou o algoritmo proposto por Karmakar (SIMONETTO *et al*, 2003; HEIN *et al*, 2008).

O método Simplex é um procedimento ou algoritmo iterativo convergente baseado na álgebra linear, desenvolvido por George Dantzig, em 1947, que resolve qualquer modelo de programação linear número finito de iterações, indicando a ocorrência de múltiplas soluções ótimas, solução ilimitada, ou problema inviável; sendo o mais utilizado pelos programas de computador para a solução de problemas de programação linear. Os programas LINDO e Solver do Excel (quando a opção linear é acionada) utilizam o Simplex (SIMONETTO *et al*, 2003).

3.8. Análise de sensibilidade em problemas de programação linear

Além de listar o valor da função-objetivo e das variáveis de decisões, os programas de computador fornecem também um relatório de análise de sensibilidade, o qual permite examinar o comportamento da função-objetivo em função de alterações nos parâmetros do problema (COGAN, 2008).

A análise de sensibilidade é uma análise de pós-otimização que verifica as possíveis variações dos coeficientes e constantes de um modelo sem que a solução ótima seja alterada (LACHTERMACHER, 2004).

Um dos principais objetivos da análise de sensibilidade é o de identificar os parâmetros sensíveis, isto é, parâmetros cujos valores não podem ser alterados sem alterar a solução ótima. Dessa forma, a análise de sensibilidade permite identificar os parâmetros que precisarão ser particularmente monitorados à medida que o estudo for implementado. Se for descoberto que o valor verdadeiro de um determinado parâmetro sai de seu intervalo possível, isso indica a necessidade imediata de se mudar de solução (HILLIER *et al*, 2006).

4. METODOLOGIA

O programa experimental foi desenvolvido com dados dos processos operacionais da linha de limpeza eletrolítica da laminação a frio da Usiminas. Para isso foi feito da seguinte forma:

4.1. Mapeamento do processo na laminação a frio

A fim de visualizar e compreender tanto as atividades executadas no processo, quanto suas inter-relações, primeiramente realizou-se o mapeamento do processo.

O mapeamento de processos é uma ferramenta gerencial analítica e de comunicação usada para detalhar processos, tendo como foco os elementos importantes que influenciam seu comportamento, e que têm como objetivo auxiliar a melhoria dos processos existentes ou implantar uma nova estrutura (CORREIA *et al*, 2002; LEAL, *et al* 2005).

Conforme CORREIA *et al*, 2002, esta técnica é extremamente reconhecida pelo importante papel que pode desempenhar ao ajudar a entender as dimensões estruturais de um fluxo de trabalho ou dar direções para um programa de reprojeto das atividades.

Por meio do mapeamento de processos é possível: identificar as fases do processo que realmente agregam valor ao produto, pontos desconexos ou ilógicos nos processos e as fontes de desperdícios; melhorar o entendimento dos processos atuais; eliminar ou simplificar processos que necessitam de mudanças; reduzir custos no desenvolvimento de produtos e serviços; reduzir falhas de integração entre sistemas; melhorar o desempenho da organização etc (CORREIA *et al*, 2002).

Na figura 4.1 pode-se ver o fluxograma de processo da laminação a frio da Usiminas. Um fluxograma traça o fluxo de informação, pessoas, equipamentos

ou materiais através das várias partes do processo. Fluxogramas são traçados com caixas contendo uma breve descrição de cada uma das etapas do processo e com linhas e setas que mostram a sequência de atividades.

Esta técnica facilita a visualização ou identificação dos produtos produzidos, das funções, das responsabilidades, dos pontos críticos, dos clientes e dos fornecedores de um processo, e permite identificar oportunidades de melhoria da eficiência dos processos.

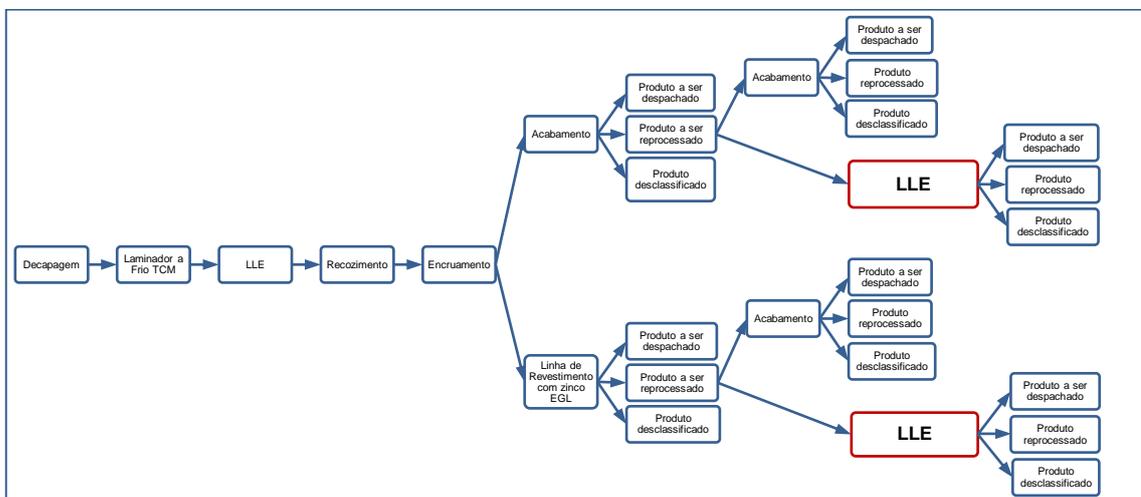


Figura 4.1 – Fluxograma de processo da laminação a frio.

Conforme a figura 4.1 o processo de laminação a frio consiste em receber bobinas laminadas a quente e processá-las na linha de decapagem para retirar a oxidação da superfície do material. Em seguida, as bobinas são direcionadas para o laminador a frio TCM cuja função é reduzir a espessura do material. Como o processo de redução da espessura é feito a frio, a estrutura cristalina das bobinas é alterada e conseqüentemente suas propriedades mecânicas tornando-as mais resistente e menos dúctil. Por esse motivo, as bobinas são tratadas termicamente no recozimento em caixa visando restabelecer suas propriedades mecânicas alteradas no processo de laminação a frio. Antes do recozimento as bobinas são processadas na LLE para retirada de óleo e particulado de ferro provenientes da redução de espessura a frio. Após o recozimento as bobinas são laminadas superficialmente no laminador de

encruamento cuja função é acertar a planicidade, acertar a rugosidade e eliminar o patamar de escoamento. Em seguida, as bobinas podem seguir o processo para a linha de acabamento ou para a linha de revestimento com zinco por eletrólise – EGL. Após estes processos as bobinas passam a ser chamadas de produto.

Os produtos podem seguir três fluxos:

Fluxo 01) serem embalados e despachados para o cliente ou

Fluxo 02) serem reprocessados ou

Fluxo 03) serem desclassificados.

Para o fluxo 01 os materiais são considerados aprovados. Dessa forma são encaminhados para serem embalados e enviados para os clientes.

Para o fluxo 02 (serem reprocessados), os produtos podem seguir dois caminhos:

a) retornar para a linha de acabamento para reinspeção e aí podem ser despachados após sua aprovação/embalagem ou desclassificados;

b) reprocessar na LLE para retirada do óleo protetivo e reinspeção. Após processo na LLE os produtos podem ser despachados para processos posteriores após sua aprovação, reprocessados ou desclassificados.

Para o fluxo 03 (serem desclassificados), os produtos são destinados para uma ordem de venda inferior ou para sucata na Aciaria.

Destaca-se que entre os processos deve-se levar em conta o atendimento à demanda.

Neste trabalho focou-se no processo da LLE visando identificar sua melhor configuração produtiva com o objetivo de minimizar o custo de produção visando o melhor custo benefício quando necessário se adotar o fluxo 02, isto é, reprocessar os produtos.

4.2. Coleta de dados

Na operacionalização dos objetivos foram analisados os dados dos processos da planta de LLE da Usiminas considerando:

a) Custos operacionais fixos e variáveis:

Para a obtenção dos custos fixos e variáveis dos processos foram levantados valores médios mensais do ano de 2015 e primeiro semestre de 2016.

b) Custo da sucata:

O custo da sucata trata-se do valor que a empresa paga para adquirir sucata no mercado para seu processo metalúrgico. Quando o material é desclassificado e passa a ser considerado sucata, a empresa deixa de comprar sucata. Daí, o fato de considerar um custo evitável. Para este valor também foram considerados os valores médios mensais do ano de 2015 e primeiro semestre de 2016.

c) Indicadores de processo da linha:

Os indicadores de processo levantados são:

- * UD: tempo calendário menos as paradas programadas;
- * PE: tonelagem horária;
- * UE: tempo disponível menos as interrupções no processo;
- * Rendimento: a capacidade de geração de material na saída levando em consideração as perdas com sucateamento de ponta inicial e final no processo;
- * Taxa de desclassificação de material na linha.

d) Atendimento à demanda:

Foi considerada a capacidade de produção – gargalo – e o atendimento à demanda. Para esta demanda, considerou-se como material a ser despachado o material de primeiro processo e o material de reprocesso.

4.3. Cenários analisados

Para análise das variações de custo foram considerados alguns cenários conforme tabelas IV.1, IV.2, IV.3 e IV.4.

Tabela IV.1 – Análise de cenários alterando quantidade de reprocesso.

Indicadores	Cenário 01 (referência)	Cenário 02	Cenário 03
Turno	1T (um turno)	1T	1T
Demanda	8000 t	8000 t	8000 t
Reprocesso	200 t (valor médio - referência)	0 t	100 t
Tempo paradas	24h	24h	24h
UE	92,38%	92,38%	92,38%
PE	65,81 t/h	65,81 t/h	65,81 t/h
Rendimento	99,70%	99,70%	99,70%
Taxa de desclassificação	2,00%	2,00%	2,00%
Custo Variável	33,02 R\$/t	33,02 R\$/t	33,02 R\$/t
Custo Fixo (mão de obra)	23,06 R\$/t	23,06 R\$/t	23,06 R\$/t
Custo da sucata	537,00 R\$/t	537,00 R\$/t	537,00 R\$/t

Tabela IV.2 – Análise de cenários alterando UE e PE.

Indicadores	Cenário 01 (referência)	Cenário 04A	Cenário 04B
Turno	1T (um turno)	1T	1T
Demanda	8000 t	8000 t	8774 t
Reprocesso	200 t (valor médio - referência)	200 t	200 t
Tempo paradas	24h	24h	24h
UE	92,38%	96,25%	96,25%
PE	65,81 t/h	69,27 t/h	69,27 t/h
Rendimento	99,70%	99,70%	99,70%
Taxa de desclassificação	2,00%	2,00%	2,00%
Custo Variável	33,02 R\$/t	33,02 R\$/t	33,02 R\$/t
Custo Fixo (mão de obra)	23,06 R\$/t	23,06 R\$/t	23,06 R\$/t
Custo da sucata	537,00 R\$/t	537,00 R\$/t	537,00 R\$/t

Tabela IV.3 – Análise de cenários alterando taxa de material desclassificado.

Indicadores	Cenário 01 (referência)	Cenário 05
Turno	1T (um turno)	1T
Demanda	8000 t	8000 t
Reprocesso	200 t (valor médio - referência)	200 t
Tempo paradas	24h	24h
UE	92,38%	92,38%
PE	65,81 t/h	65,81 t/h
Rendimento	99,70%	99,70%
Taxa de desclassificação	2,00%	3,50%
Custo Variável	33,02 R\$/t	33,02 R\$/t
Custo Fixo (mão de obra)	23,06 R\$/t	23,06 R\$/t
Custo da sucata	537,00 R\$/t	537,00 R\$/t

Tabela IV.4 – Análise de cenários alterando a demanda para linha ociosa.

Indicadores	Cenário 01 (referência)	Cenário 06
Turno	1T (um turno)	1T
Demanda	8000 t	5000 t
Reprocesso	200 t (valor médio - referência)	200 t
Tempo paradas	24h	24h
UE	92,38%	92,38%
PE	65,81 t/h	65,81 t/h
Rendimento	99,70%	99,70%
Taxa de desclassificação	2,00%	2,00%
Custo Variável	33,02 R\$/t	33,02 R\$/t
Custo Fixo (mão de obra)	23,06 R\$/t	23,06 R\$/t
Custo da sucata	537,00 R\$/t	537,00 R\$/t

Além dos cenários citados, ainda foi considerado o cenário de aumento de demanda superior à capacidade de um turno. Estes cenários estão evidenciados na tabela IV.5.

Tabela IV.5 – Análise de cenários alterando a demanda para linha cheia.

Indicadores	Cenário 01 (referência)	Cenário 07	Cenário 08
Turno	1T (um turno)	2T (dois turnos)	3T (três turnos)
Quantidade de equipes	01 equipe	02 equipes	04 equipes
Demanda	8000 t	16500 t	36000 t
Reprocesso	200 t (valor médio - referência)	200 t	200 t
Tempo paradas	24h	24h	24h
UE	92,38%	92,38%	92,38%
PE	65,81 t/h	65,81 t/h	65,81 t/h
Rendimento	99,70%	99,70%	99,70%
Taxa de desclassificação	2,00%	2,00%	2,00%
Custo Variável	33,02 R\$/t	33,02 R\$/t	33,02 R\$/t
Custo Fixo (mão de obra)	23,06 R\$/t	23,06 R\$/t	23,06 R\$/t
Custo da sucata	537,00 R\$/t	537,00 R\$/t	537,00 R\$/t

4.4. Modelagem

4.4.1. Software utilizado no modelo de programação linear

Para determinar a configuração produtiva mais adequada, com o melhor custo benefício, foi usada a modelagem do problema de otimização linear e programação do software LINGO, o qual permite que as restrições sejam rotuladas com nomes. Este recurso é útil por duas razões:

- a) Os nomes são usados nos relatórios das soluções geradas para torná-los mais fáceis de serem interpretados.
- b) Muitas mensagens de erro do LINGO referem-se aos nomes dados às restrições. Caso as restrições não sejam rotuladas, localizar a fonte desses erros pode ser bastante difícil.

4.4.2. Modelo Matemático

Este modelo levou em consideração que a LLE tem como entrada material de processo e de reprocesso, enquanto pode ter como saída material a ser despachado, material reprocessado e material desclassificado conforme figura 4.2.

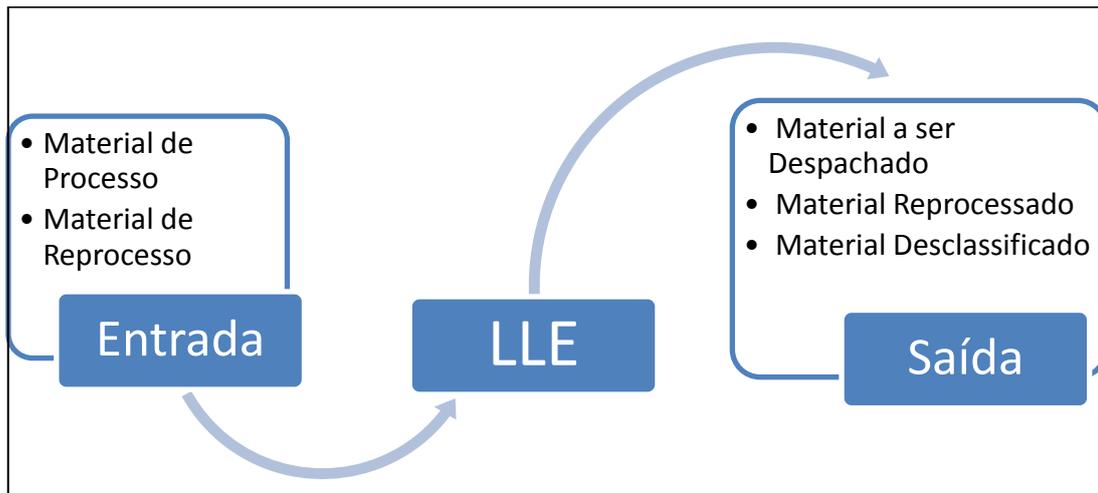


Figura 4.2 – Fluxograma de entrada e saída na LLE.

➤ Parâmetros:

- ✓ *CUSTO_PROC_LE*: custo do processo de limpeza eletrolítica
- ✓ *CUSTO_EVIT_SUC*: custo evitável da sucata
- ✓ *CUSTO_MDO*: custo da mão de obra
- ✓ *DEM_MES*: demanda do mês
- ✓ *REND*: rendimento do processo
- ✓ *MAT_ENT_MES*: quantidade de material de entrada pronto para processo de limpeza eletrolítica no mês
- ✓ *k*: constante de penalização do custo do reprocesso
- ✓ *REP_ENT_MES*: quantidade de reprocesso previsto de entrada no mês
- ✓ *CAP_j*: capacidade de produção no período j
- ✓ *CAP_ENT_j*: capacidade de entrada no período j
- ✓ *CAP_REP_j*: capacidade de reprocesso no período j

- ✓ MAT_DESC_MES : quantidade de material desclassificado previsto no mês

➤ **Variáveis de Decisão:**

- ✓ $DESP_j$: quantidade a ser despachada no período j
- ✓ REP_SAIDA_j : quantidade de material que foi reprocessado no período j
- ✓ MAT_DESC_j : quantidade de material desclassificado no período j

$$\begin{aligned}
 Min FO = \sum_j \{ & [(DESP_j + MAT_DESC_j) \times CUSTO_PROC_LE] \\
 & + [REP_SAIDA_j \times k \times CUSTO_PROC_LE] \} \\
 & + \sum_j (MAT_DESC_j \times CUSTO_EVIT_SUC) \\
 & + \sum_j [(DESP_j + MAT_DESC_j + REP_SAIDA_j) \times CUSTO_MDO]
 \end{aligned}$$

S.A.

$$\sum_j (DESP_j + REP_SAIDA_j) \geq DEM_MES \quad (1)$$

$$\sum_j (DESP_j + MAT_DESC_j) * 1/REND \geq MAT_ENT_MES \quad (2)$$

$$\sum_j (REP_SAIDA_j) * 1/REND \geq REP_ENT_MES \quad (3)$$

$$DESP_j + MAT_DESC_j + REP_SAIDA_j \leq CAP_j \quad \forall j \quad (4)$$

$$DESP_j + MAT_DESC_j \leq CAP_ENT_j \quad \forall j \quad (5)$$

$$REP_SAIDA_j \leq CAP_REP_j \quad \forall j \quad (6)$$

$$\sum_j (MAT_DESC_j) = MAT_DESC_MES \quad (7)$$

➤ **Descrição das Restrições:**

- ✓ (1) Restrição de Demanda: a quantidade de material a ser despachada somada à de material de reprocesso indica a quantidade de material processado pela linha que poderá ser produzida; assim este material processado deverá ser maior ou igual à demanda solicitada.
- ✓ (2) Restrição de Matéria-Prima (material de entrada) a quantidade de material de entrada, vindo do processo anterior, sofrerá a influência do rendimento do processo e irá gerar material a ser despachado e material a ser desclassificado.
- ✓ (3) Restrição de Matéria-Prima (material de reprocesso): a quantidade de reprocesso na entrada sofrerá a influência do rendimento do processo e irá gerar material de reprocesso de saída.
- ✓ (4) Restrições de Capacidade: as quantidades de material a ser despachado, desclassificado e de reprocesso de saída, somados, deverão ocupar a linha dentro da sua capacidade produtiva.
- ✓ (5) Restrições de Capacidade de Material de Entrada: as quantidades de material a ser despachado e de material desclassificado, somados, deverão ocupar a capacidade para alocação de material de entrada.
- ✓ (6) Restrições de Capacidade de Reprocesso: a quantidade de material de reprocesso de saída deverá ocupar a capacidade para alocação de material de reprocesso de entrada.
- ✓ (7) Restrição para Material Desclassificado: a quantidade de material desclassificado deve ser igual à quantidade de material a ser desclassificado previsto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Respostas do Modelo

As respostas do modelo foram obtidas comparando oito cenários. Destaca-se que o cenário 01 foi considerado como referência; este cenário apresenta o *modus operandi* da linha em um turno de trabalho. Dessa forma, os demais cenários serão sempre comparados com ele. As respostas do modelo consideraram a configuração produtiva e o custo de produção.

5.1.1. Configuração Produtiva

Nas figuras 5.1 a 5.4 observa-se o comportamento da configuração produtiva diária para a LLE comparando todos os cenários com o cenário 01 cujo *modus operandi* é o atualmente mais praticado na LLE operando com um turno de trabalho. Onde se verifica a produção diária com 0 t se deve ao fato de se tratar dos dias de sábado e domingo onde a linha não opera. Já no dia 12 a produção diária também é de 0 t por se tratar do dia em que a linha deixa de operar para manutenção preventiva programada.

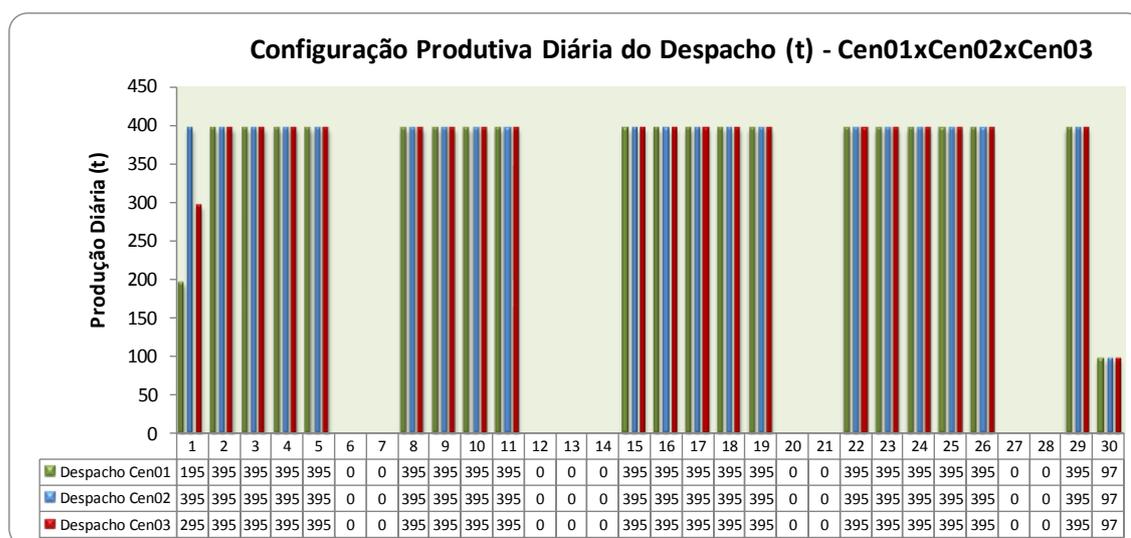


Figura 5.1 – Gráfico com a configuração produtiva diária da LLE alterando o volume de material reprocessado.

Na figura 5.1 observa-se a configuração produtiva distribuída de forma linear nos três cenários. Isso acontece porque o modelo busca ocupar a linha o máximo possível conforme a demanda prevista que para esta situação foi de 8000 t. No primeiro dia a linha deixa de produzir material a ser despachado e é ocupada em parte da sua capacidade produtiva diária com material a ser reprocessado no total de 200 t no cenário 01, 0 t no cenário 02 e 100 t no cenário 03.

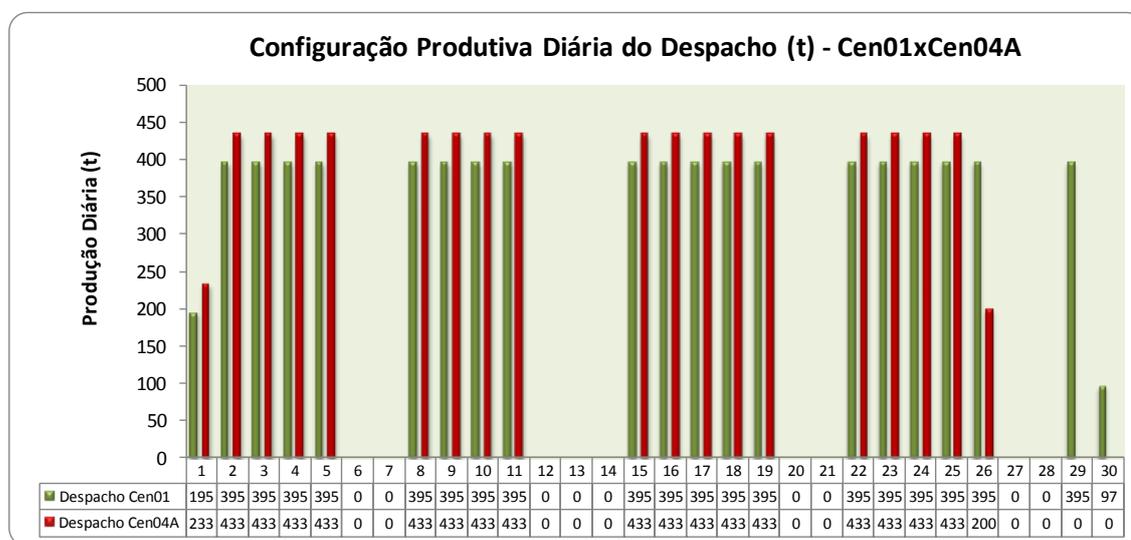


Figura 5.2 – Gráfico com a configuração produtiva diária da LLE incrementando o valor de UE e PE.

Na figura 5.2 houve um incremento na UE e PE de 3,87% e 3,46 t/h respectivamente. Neste caso a configuração produtiva da LLE mostra um aumento de capacidade de produção diária maior no cenário 04A se comparado ao cenário 01. O material a ser reprocessado é feito no primeiro dia e a partir do dia 26 observa que a linha passa a ficar disponível para absorver uma maior demanda, superior à demanda fixada para estes cenários de 8000 t de material a ser despachado e 200 t de material a ser reprocessado. O impacto desse aumento de disponibilidade será avaliado no item custo de produção.

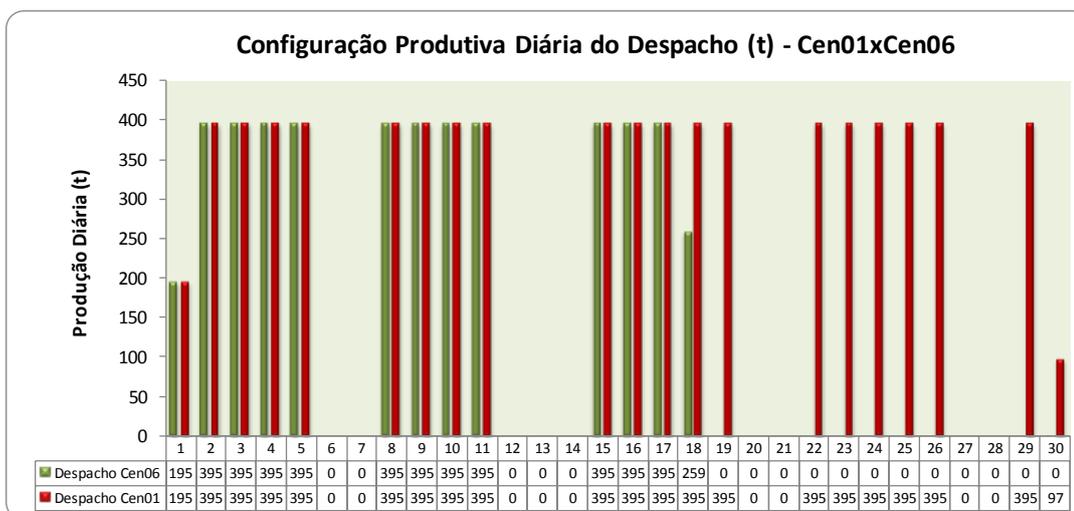


Figura 5.3 – Gráfico com a configuração produtiva diária da LLE em situação de linha ociosa – baixa demanda.

A figura 5.3 evidencia no cenário 06 a situação da linha em ociosidade, isto é, com uma demanda de 5000 t, isto é, 3000 t a menor que a do cenário 01. O que se verifica é que a configuração produtiva da LLE é distribuída de forma linear até o dia 17 nos dois cenários, sendo que para ambos cenários o volume de 200 t de reprocesso é feito no primeiro dia. A partir do dia 18, no cenário 06, começa a diminuir a produção diária, zerando nos dias posteriores até o final do mês. Como consequência disso a linha ficará parcialmente ociosa. O impacto dessa ociosidade será avaliado no item custo de produção.

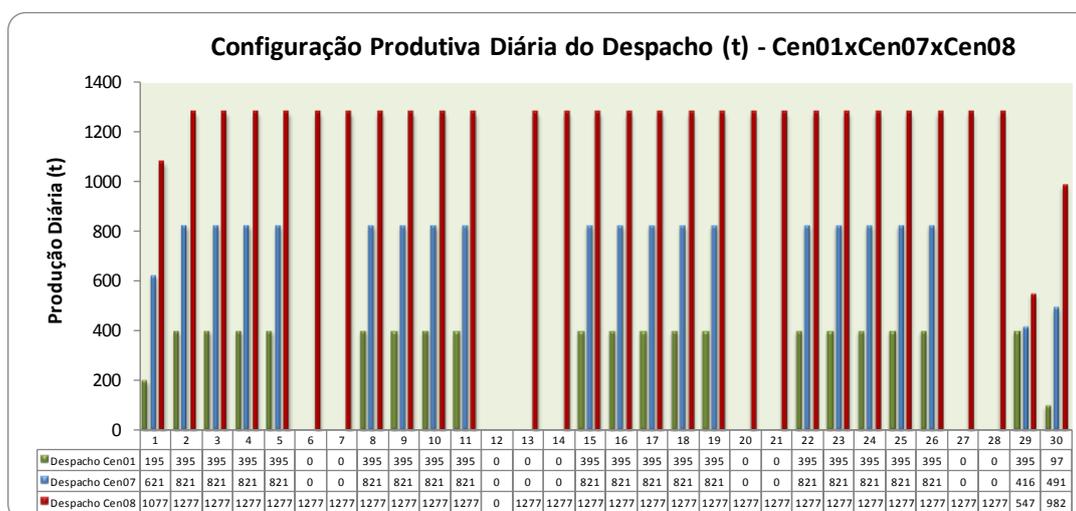


Figura 5.4 – Gráfico com a configuração produtiva diária da LLE em situação de linha cheia – alta demanda.

A figura 5.4 evidencia nos cenários 07 e 08 a situação da linha cheia, isto é, com alta demanda, superior a 8000 t apontada no cenário 01. Em função desse aumento da demanda torna-se necessário a alteração do *modus operandi* da linha para dois e três turnos nos cenários 07 e 08 respectivamente. Para os três cenários o volume de 200 t de material a ser reprocessado é produzido no primeiro dia. Para o cenário 07 se verifica uma configuração produtiva com aumento da produção diária resultando numa demanda de 16500 t. Destaca-se que se torna necessário aumentar uma equipe de trabalho, porém não é necessário operar a linha no final de semana. Operando dois turnos de segunda a sexta é possível atender à demanda. Já para o cenário 08 com uma demanda de 36000 t, além de se verificar uma configuração produtiva com aumento da produção diária, verifica-se também a necessidade de operar a linha de forma contínua, o que inclui os dias de sábado e domingo e também o acréscimo de mais duas equipes de trabalho para se conseguir atender à demanda. Destaque que o modelo sempre visa produzir a quantidade de material para reprocesso no primeiro dia do mês e o restante da produção nos primeiros dias, deixando a ociosidade para o final do mês. O impacto desse aumento de será avaliado no item custo de produção.

5.1.2. Custo da Produção

Nas figuras 5.5 a 5.10 observa-se o comportamento do custo de produção da LLE conforme os diferentes cenários. O custo total da linha conforme o cenário foi dividido pela demanda resultando no custo específico da linha em reais por tonelada.

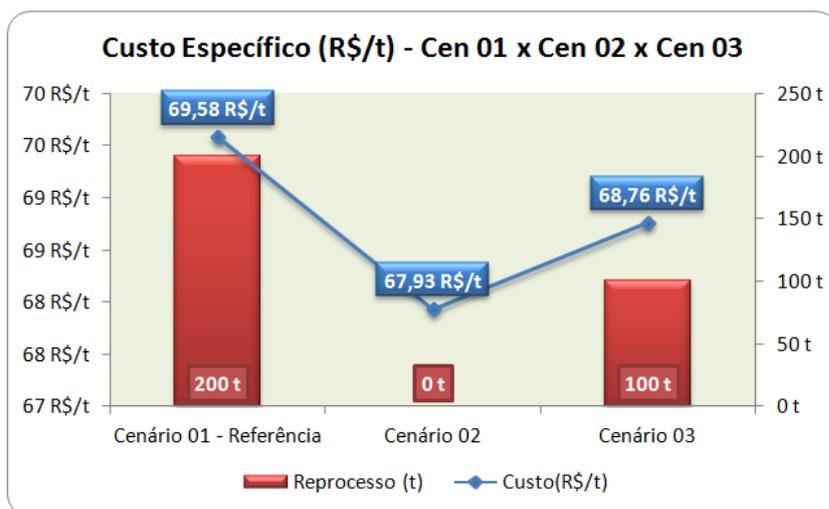


Figura 5.5 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE alterando o volume de material reprocessado.

Na figura 5.5 observa-se que à medida que a linha é ocupada com material a ser reprocessado seu custo específico aumenta partindo de 69,58 R\$/t no cenário 01, onde são reprocessadas 200 t de material, e chegando a 67,93 R\$/t no cenário 02 onde não se reprocessa material. Isso comprova que o reprocesso é indesejável, porém algumas vezes ele torna-se necessário, sobretudo quando se tem um prazo de entrega muito ajustado onde ter um custo maior torna-se necessário em detrimento de um atraso de entrega ao cliente.

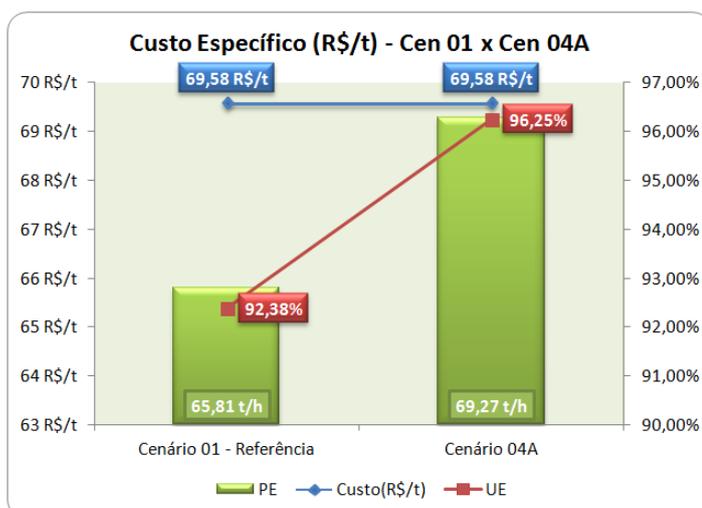


Figura 5.6 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE incrementando o valor de UE e PE – sem ocupação da disponibilidade.

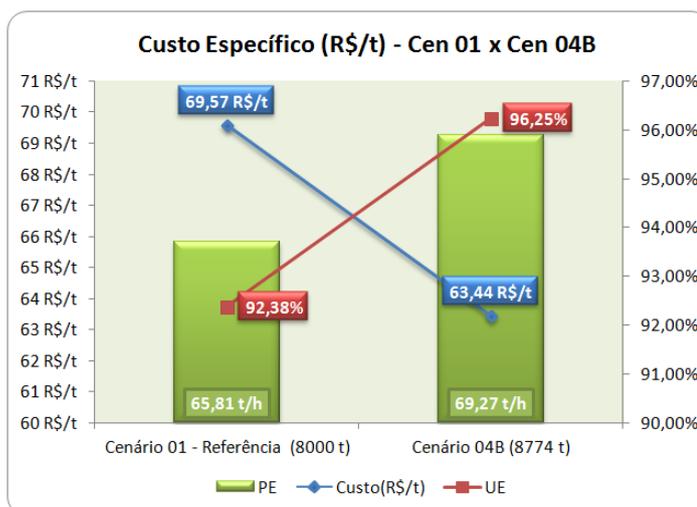


Figura 5.7 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE incrementando o valor de UE e PE – com ocupação da disponibilidade.

Analisando a figura 5.6 a partir do incremento na PE e UE de 3,46 t/h e 3,87% respectivamente verifica-se que o custo específico mantém constante em 69,58 R\$/t levando em consideração o cenário 04A, cuja demanda é de 8000 t. Por outro lado, o aumento da disponibilidade da linha evidencia que há um benefício em relação à economia com custo variável. Conforme figura 5.7 pode-se verificar ocupando essa disponibilidade com produção a demanda poderia aumentar em 774 t e o custo específico reduziria de 69,58 R\$/t no cenário 01 para 63,44 R\$/t no cenário 04B.

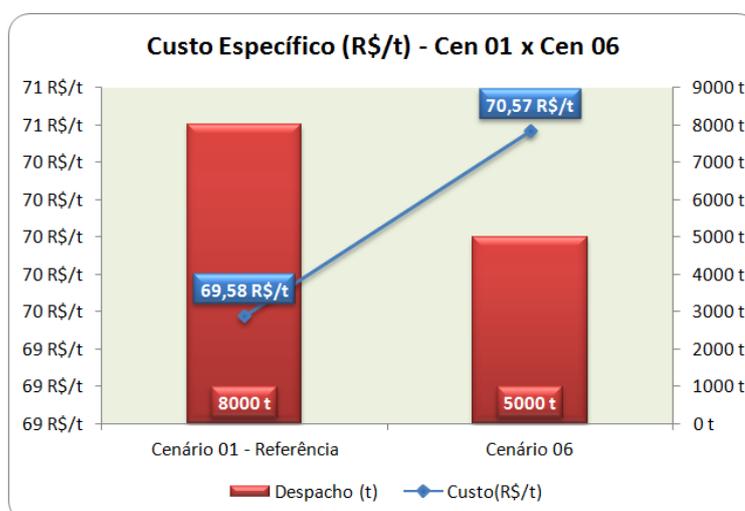


Figura 5.8 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE em situação de linha ociosa – baixa demanda.

Na figura 5.8 observa-se que o custo específico da linha aumenta de 69,58 R\$/t para 70,57 R\$/t à medida que a linha fica ociosa em função da redução da demanda de 8000 t no cenário 01 para 5000 t no cenário 06.

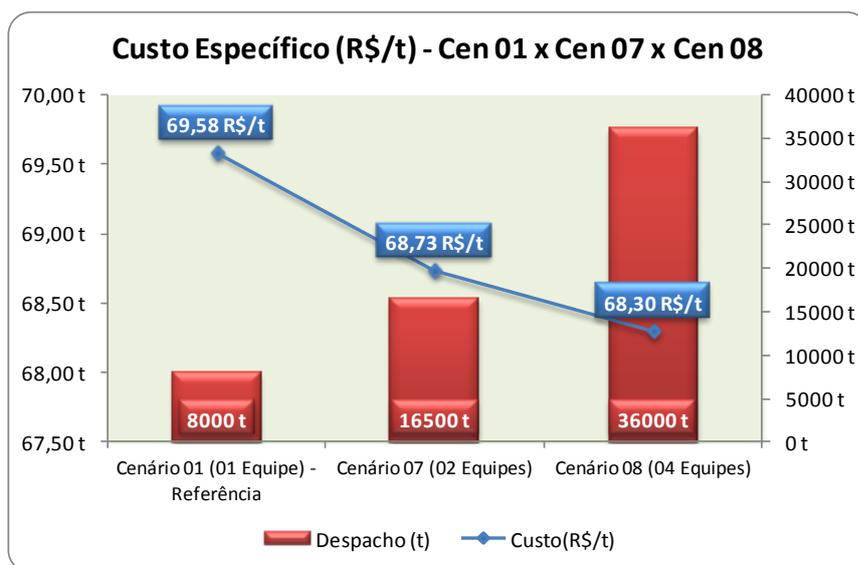


Figura 5.9 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE em situação de linha cheia – alta demanda.

A figura 5.9 evidencia que à medida que se aumenta a demanda, mantendo o volume de reprocesso em 200 t, há um decréscimo no valor do custo específico de 69,58 R\$/t no cenário 01 para 68,73 R\$/t e 68,30 R\$/t nos cenários 07 e 08 respectivamente. Destaca-se que a variação do custo específico de 0,43 R\$/t entre os cenários 08 e 07 foi menor que a variação de 0,85 R\$/t entre os cenários 07 e 01 pelo fato do aumento do custo fixo a maior no cenário 08 que no cenário 07, uma vez que no cenário 08 há necessidade de se ter quatro equipes, enquanto no cenário 02 bastam apenas duas equipes de trabalho.

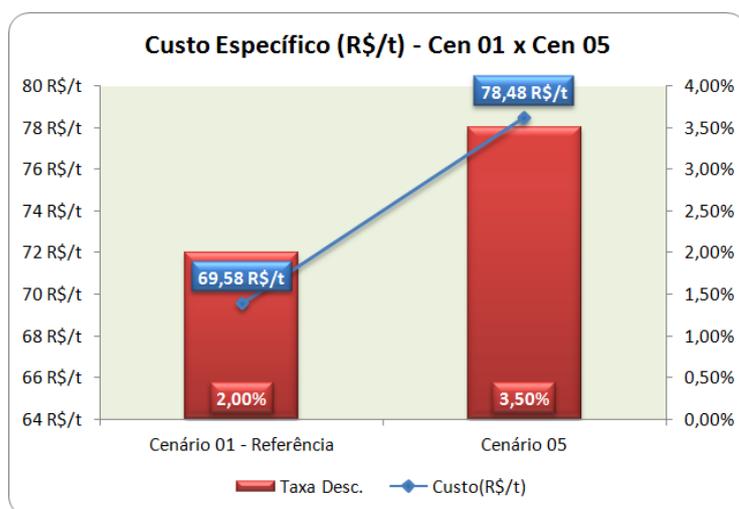


Figura 5.10 – Gráfico com o custo específico de produção da LLE com aumento da taxa de material desclassificado.

Na figura 5.10 vê-se que o custo específico da linha aumenta de 69,58 R\$/t para 78,48 R\$/t à medida que a linha aumenta a quantidade de material desclassificado. Isso evidencia que é indesejável desclassificar o material descartando para sucata.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A configuração produtiva da LLE pode ser otimizada à medida que se varia a demanda para os diferentes cenários, limitada à capacidade da linha para os seus indicadores atuais. Essa configuração produtiva está diretamente ligada aos parâmetros de processo e custos da linha.

Verificou-se que aumentando a demanda de produção o custo específico da linha diminui, mas não basta aumentar a demanda da linha, pois ao ser necessário operar a linha com três turnos conforme cenário 08 o decréscimo do custo específico não foi tão destacado quanto utilizando o cenário 07 com dois turnos de trabalho.

Por outro lado, a baixa demanda leva a linha a operar com ociosidade e, conforme cenário 06, operando nesta situação verificou-se um acréscimo no custo específico.

Já o aumento no volume de material desclassificado, conforme cenário 05 demonstrou um acréscimo elevado no custo específico.

O incremento na UE e PE evidenciou uma redução muito representativa no custo específico, desde que haja ocupação da disponibilidade com aumento da demanda de despacho.

Por fim, a redução do volume de reprocesso representou um fator de destaque na redução do custo específico, o que demonstra que o reprocesso torna-se necessário somente se forem considerados valores, muitas vezes intangíveis, como o atendimento à satisfação dos clientes no que diz respeito ao prazo de entrega.

Com este trabalho foi possível verificar as diversas configurações produtivas da LLE a partir de diferentes cenários podendo identificar a variação do custo

específico para cada um, o que conduz ao melhor custo benefício para o processo.

Neste caso, a melhor configuração produtiva consiste na utilização da linha com melhores indicadores de PE e UE, minimização da ociosidade, menor taxa de desclassificação de material e menor volume possível de reprocesso.

O uso da modelagem do problema de otimização linear e sua solução através de um software comercial permitiu encontrar resultados que são de grande importância para o processo operacional, pois tais resultados evidenciaram a possibilidade de buscar a melhor configuração produtiva visando o melhor custo benefício, o que contribui para o aumento da lucratividade da empresa.

A partir das respostas obtidas com o modelo, propõe-se a utilização da ferramenta para outros processos de toda linha de produção.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZARAA, M. S; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. Linear Programming and Networks Flows. Fourth edition. New York: John Wiley & Sons, 2009. 768 p.

BERNARDO, M. S. Desenvolvimento da contabilidade de custos e o progresso tecnológico: origens e desenvolvimentos até 1914. Dissertação de Mestrado em Controladoria e Contabilidade – Programa de Pós-Graduação em Ciências Contábeis, Faculdade de Ciências Econômicas, Administrativas e Contábeis da Universidade de São Paulo – FEA/USP, São Paulo, 1996.

CECILIANO, W. R. A. Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

COGAN, S. Gerenciamento dos custos operacionais em produtos conjuntos. In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de Agosto de 2008, SIMPOI, 2008.

CORREIA, K. S. A.; ALMEIDA, D. A. Aplicação da técnica de mapeamento de fluxo de processo no diagnóstico do fluxo de informações da cadeia cliente fornecedor. In: XXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Curitiba, 23 a 25 de outubro de 2002. ENEGEP, 2002.

DONATO, A.A. Aplicação do processamento paralelo na resolução de problemas de programação linear de grande porte utilizando o princípio de decomposição de Dantzig-Wolfe. 94p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

GROSSMAN, T. A.; MEHROTRA, V.; ÖZLÜK, O. Spreadsheet Information Systems are Essential to Business, Working Paper, 2005. Disponível em <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.100.4262&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em 28 de outubro de 2015.

HEIN, N.; LOESCH, C.; FARIA, T. H. Algoritmo projeto um método alternativo de resolução de problemas de programação linear. In: XI SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 5 e 6 de agosto de 2008. SPOLM, 2008.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. Introdução à Pesquisa Operacional. 8ª Ed. São Paulo: Editora Mc-Graw-Hill, 2006. 828p.

KUHNEN, O. L. Métodos quantitativos. Erechim: Apostila da Pós-Graduação em Auditoria e Perícia, 2002.

LACHTERMACHER, G. Pesquisa operacional na tomada de decisões. Editora Campus, Elsevier, São Paulo, 2004.

LEAL, F.; PINHO, A. F.; CORRÊA, K. E. S. Análise comparativa de técnicas de mapeamento de processo aplicadas a uma célula de manufatura. In Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, 7 a 9 de novembro de 2005. SIMPEP, 2005.

LINDO SYSTEMS INC. LINGO: the modeling language and optimizer. Chicago: LINDO Systems Inc., 2010.

NAKAYAMA, A.Y. Análise de margem de contribuição e capacidade produtiva por programação linear e simulação para apoio à tomada de decisão de um sistema de manufatura. 85f. Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

PRADO, D. S. Programação Linear. Série Pesquisa Operacional. Editora de Desenvolvimento Gerencial, Belo Horizonte, 1999. p. 208.

SCALABRIN, I., MORES, C. J., BODANESE, R. E., OLIVEIRA, J. A. Programação linear: estudo de caso com utilização do Solver da Microsoft Excel. Revista Universo Contábil, ISSN 1809-3337. v. 2. n. 2. Blumenau, 2006. p. 54-66.

SILVA, E. M., *et al.* Pesquisa Operacional: Programação linear. Cap. 2, Atlas, São Paulo, 1998. p. 14-22.

SIMONETTO, E.O.; LOBLER, M. L. Os modelos de programação linear sob a ótica da racionalidade limitada. Revista Do CCEI – Centro de Ciências da Economia e Informática. Bagé: EDIURCAMP, v. 7, n. 11, 107p., mar. 2003.

SOUZA, A. C. Contextos, paradigmas e sistema de custeio. CONGRESSO GESTÃO ESTRATÉGICA DE CUSTOS, v. 1, Anais, Fortaleza, 1998. p. 141-156.

TECHAWIBOONWONG, A.; YENRADEE, P. Aggregate production planning using spreadsheet solver: model and case study, Science Asia, n. 28, 2002. p. 291-300.

USIMINAS. Catálogo de Especificação de Produtos Laminados a Frio da Usiminas, 2014. <http://usiminas.com/wp-content/uploads/2014/02/novo-laminados-frio-v20-baixa.pdf>. Acessado em 28 de outubro de 2015.

VIEIRA, J. A. G. Pesquisa Operacional Aplicada à Rede de Distribuição Logística. IX WORKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA, ISSN: 2175-1897, Centro Paula Souza, São Paulo, 2014.

YARMISH, G. A distributed implementation of the Simplex method. 178 f. Tese de Doutorado em Ciências da Computação e Informação – Polytechnic University, New York, 2002.