

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

Fabricio Oliveira de Magalhães

**UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA NO PLANEJAMENTO DE
PRODUÇÃO DE UMA USINA SIDERURGICA PARA PRODUÇÃO DE CHAPAS
GROSSAS**

**Ipatinga
2017**

Fabício Oliveira de Magalhães

**UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA NO PLANEJAMENTO DE
PRODUÇÃO DE UMA USINA SIDERURGICA PARA PRODUÇÃO DE CHAPAS
GROSSAS**

Trabalho de Conclusão apresentado ao programa da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do certificado de Especialista em Otimização de Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Robson Mateus

Ipatinga

2017

©2017, Fabricio Oliveira de Magalhães
Todos os direitos reservados

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do ICEx - UFMG

Magalhães, Fabricio Oliveira de

M188m Um modelo de programação linear inteira no planejamento de produção de uma usina siderúrgica para produção de chapas grossas / Fabricio Oliveira de Magalhães. Belo Horizonte, 2017.

51 f. : il.; 29 cm.

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

Orientador: Geraldo Robson Mateus

1. Computação - Teses. 2. Programação linear
3. Siderurgia. 4. Controle de produção 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 OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS: ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
GESTÃO INDUSTRIAL

UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA PARA O PLANEJAMENTO DA
PRODUÇÃO DE CHAPAS GROSSAS EM UMA USINA SIDERÚRGICA

Fabício Oliveira de Magalhães

Monografia apresentada aos Senhores:

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

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

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

Belo Horizonte, 09 de junho de 2017

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste trabalho foi essencial a colaboração da empresa estudada. Agradeço aos colegas que contribuíram no acompanhamento dos resultados e aos meus gerentes Cleber dos Santos e Sebastião de Moraes pela compreensão e apoio no desenvolvimento.

Agradeço a todos os professores que contribuíram significativamente para o aprendizado de todo o conteúdo.

Gostaria de agradecer à minha família em especial minha esposa Jussara Magalhães e meu filho Nicolas Magalhães por todo apoio, suporte e compreensão necessários para a realização deste trabalho.

Agradeço também aos meus pais Maria José Magalhães e Sebastião Magalhães pelo incentivo e apoio nos momentos de dificuldades. E acima de tudo, agradeço a Deus, o meu refúgio e fortaleza, a Ele a minha eterna gratidão.

RESUMO

Esta monografia apresenta um modelo de otimização linear como apoio a decisões de planejamento de produção para uma linha de produtos de chapas grossas em um horizonte de médio a longo prazo. Com o objetivo na maximização da margem de contribuição, trata a redução do consumo de energia elétrica dos processos desta linha e a influência, dos diferentes produtos produzidos, no resultado de consumo considerando a possibilidade de produzir para estoques. Com o levantamento de dados de processo, definiram-se as restrições de capacidade dos processos e da linha de produção, diferentes aspectos de consumos nos processos, bem como a utilização do horizonte de planejamento de produção para ser aplicado ao modelo de otimização. A partir da análise dos resultados foi possível identificar que o modelo conseguiu visualizar as características operacionais dos produtos e processos dos cenários atual e proposto pelo modelo, apontando o melhor grupo de produtos e volume de produção nos períodos. Sendo que, ao final do horizonte planejado e em comparação ao planejamento real adotado pela empresa, trouxe um melhor resultado na lucratividade a partir da redução do consumo de energia. Enfim, a utilização do recurso proposto permitiu o planejamento agregado de produção de chapas grossas de modo enriquecedor.

Palavras-Chaves: Otimização; Planejamento Agregado de Produção; Lucro;

ABSTRACT

This study presents a linear optimization model to support production planning decisions for a plate product line over a medium to long term horizon. With the objective of maximizing the contribution margin, it deals with the reduction of the electric energy consumption of the processes of this line and the influence of the different products produced on the consumption result considering the possibility of producing for inventories. With process data collection, process and production line constraints were defined, different aspects of process consumptions, as well as the use of the production planning horizon to be applied to the optimization model. From the analysis of the results it was possible to identify that the model was able to visualize the operational characteristics of the products and processes in the current scenario in the scenario proposed by the model and point out the best product group and production volume in the periods. Being that, at the end of the planned horizon and in comparison to the real planning adopted by the company, it brought a better result in the profitability from the reduction of the energy consumption. Finally, the use of the proposed resource allowed for the aggregate planning of plate production in an enriching way.

Keywords: Optimization; Aggregate Production Planning; Profit;

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Representação do custo variável por produto ao longo dos períodos	32
GRÁFICO 2 - Representação do custo médio de energia dos produtos (R\$/tonelada)	32
GRÁFICO 3 - Representação da relação entre a produção mensal, o tempo efetivo necessário e a ociosidade.....	33
GRÁFICO 4 - Representação do planejamento atual de produção diário.....	34
GRÁFICO 5 - Consumo de energia no planejamento de produção atual.....	35
GRÁFICO 6 - Representação dos níveis de produção e demanda.....	36
GRÁFICO 7 - Representação da sensibilidade na ação de abafar ou apagar o forno	37
GRÁFICO 8 - Representação dos níveis de ociosidade e sua relação com o custo de acendimento diante dos níveis de produção no modelo atual aplicado	38
GRÁFICO 9 – Associação entre a produção mensal, o tempo efetivo e a ociosidade	39
GRÁFICO 10 - Representação dos níveis de produção e estoque.....	39
GRÁFICO 11 - Representação da movimentação do estoque ao longo dos períodos (toneladas)	40
GRÁFICO 12 - Representação do custo de estocagem (R\$).....	41
GRÁFICO 13 - Representação dos níveis de produção com o custo total associado	41
GRÁFICO 14 - Representação dos níveis de ociosidade e sua relação com o custo de acendimento diante dos níveis de produção no modelo proposto.....	42
GRÁFICO 15 - Representação comparativa dos custos diante do planejamento atual e o proposto pelo modelo.....	43
GRÁFICO 16 - Comparativo dos níveis de ociosidade ao longo dos períodos	44
GRÁFICO 17 - Bridge do ganho no consumo total de energia.....	45
GRÁFICO 18 - Representação das margens de contribuição entre o modelo proposto e o planejamento atual	46

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Processo de Laminação de Chapas Grossas.....	19
FIGURA 2 - Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção.....	23

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 Conjuntos do Modelo.....	27
QUADRO 2 Parâmetros do Modelo	28
QUADRO 3 Variáveis de decisão do Modelo.....	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivos e justificativa	12
1.1.1. Objetivo geral	12
1.1.2. Objetivos específicos.....	12
1.1.3. Justificativa.....	13
2. VISÃO GERAL	14
2.1 A programação linear	14
2.2 O planejamento agregado da produção	16
2.2.1 Elementos de um planejamento agregado de produção	17
2.3 Descrições dos processos de laminação	18
2.3.1 Fornos de reaquecimento.....	19
2.3.2 Laminador	19
2.3.3 Desempenadeira e PLC	20
2.3.4 Produto final	20
2.3.5 Consumo de energia elétrica.....	21
3. METODOLOGIA	23
4. DESENVOLVIMENTO	26
4.1 Descrição do problema.....	26
4.2 Desenvolvimento do modelo matemático	27
5. APLICAÇÃO DO MODELO	31
5.1 Apresentação do cenário atual	33
5.2 Aplicação do modelo.....	38
5.3 Análise comparativa dos planejamentos	43
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

Diante da conjuntura atual do mercado, a otimização de processos é uma das portas de escape para indústrias siderúrgicas que buscam melhorias em seus processos e atividades no intuito de se posicionar positivamente no mercado.

A grande oferta de aço no mundo contribui para o alto nível de estoque no mercado com tendência de frear os preços. Segundo um artigo da revista Carta Capital, a capacidade para produzir do país é cerca de 50 milhões de toneladas por ano, com a crise, as siderúrgicas do país não passaram de 33 milhões de toneladas no ano passado, em consequência principalmente da queda nas vendas internas.

Devido a tais fatores, as empresas buscam aperfeiçoar os processos visando a redução de custo e, também, a maximização do lucro através do planejamento de produção. Tal planejamento tem o objetivo de otimizar os ganhos reduzindo os custos, esta é uma das atividades mais complexas para o gestor de operações nas grandes siderúrgicas.

No processo da produção de aços planos, especialmente o de chapas grossas, além da demanda é fundamental uma análise criteriosa do grupo de produtos produzido e dos custos envolvidos com cada tipo de produto, tempo de processamento e outras restrições. Isso inclui os serviços e insumos que são necessários para transformação e que, naturalmente, são impactantes nos resultados. Assim, tais questões são elementos motivadores para realizar uma análise de otimização de processos.

Desta forma, buscou-se reunir dados/informações com o propósito de responder o seguinte problema de pesquisa: Como um modelo matemático pode apoiar o planejamento de produção de uma usina siderúrgica produtora de chapas grossas? O desenvolvimento do modelo e sua implementação visa apoiar as decisões em um horizonte de planejamento definido, respondendo a questão principal do estudo.

Em relação ao presente estudo, classifica-se a natureza metodológica como aplicada, por meio de objetivos exploratórios, utilizando uma abordagem quantitativa, principalmente, métodos de modelagem e simulação, tratando-se de uma pesquisa operacional.

O trabalho estrutura-se em seis capítulos: o primeiro aborda uma breve introdução do cenário, os objetivos gerais e específicos, acrescidos de uma breve justificativa da escolha da abordagem. O segundo capítulo dispõe do referencial teórico dividido em três pontos: as definições da pesquisa operacional e suas características; a definição do planejamento de produção juntamente com sua importância; e, a descrição do processo produtivo a ser explorado. O capítulo três conceitua a metodologia de pesquisa utilizada e os passos utilizados para o desenvolvimento do trabalho científico. O quarto capítulo apresenta o desenvolvimento do trabalho, tendo como essência a descrição do modelo matemático. Em seguida, o capítulo cinco apresenta a aplicação do modelo, apresentando os dados e os resultados obtidos pelo modelo. Por fim, o capítulo seis apresenta as considerações finais, tendo como conteúdo a reflexão dos resultados apresentados e as possíveis melhorias e sugestões.

1.1. Objetivos e justificativa

1.1.1. Objetivo geral

Desenvolver um modelo de otimização linear para apoiar as decisões de planejamento de produção, de médio a longo prazo, da linha de produção de chapas grossas, visando à maximização do lucro com o foco no consumo de energia elétrica.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analisar as características dos processos;
- Levantar os dados operacionais ligados aos processos produtivos;
- Definir restrições de capacidade e processamento de insumos;
- Definir um horizonte de planejamento para ser aplicado ao modelo de otimização;
- Analisar o planejamento atual aplicado pela usina em estudo diante o consumo de energia elétrica;

- Expor e analisar o planejamento definido pelo modelo em comparação com o planejamento atual adotado.

1.1.3. Justificativa

Atualmente diante de um mercado altamente competitivo, as empresas buscam prever os riscos e as oportunidades de crescimento em certo espaço de tempo. Desta forma, o planejamento da produção juntamente com a análise de disponibilidade dos recursos e os custos dos insumos de produção se faz de extrema importância para o seu posicionamento no mercado. Todo esse planejamento proporciona aos acionistas e aos possíveis investidores as vantagens do investimento, ou até mesmo a sua taxa de retorno. Já para os gestores da empresa, o planejamento deve apoiar as decisões de crescimento e retração do seu fluxo produtivo.

Assim, a presente pesquisa teve como fundamento proporcionar valor às atividades de planejamento da produção de uma usina siderúrgica no intuito de facilitar uma projeção de sua margem de lucratividade em um horizonte específico de planejamento. Outro viés motivacional se relaciona em definir um ponto ótimo dentro do cenário de infinitas possibilidades do atendimento da demanda e do planejamento da produção.

2. VISÃO GERAL

2.1 A programação linear

A programação linear é uma das técnicas mais utilizadas na solução de problemas, além de ser um método científico de tomada de decisões. Estas técnicas foram desenvolvidas a partir de necessidades militares em alocar recursos escassos às várias operações militares e às atividades dentro de cada operação de uma maneira efetiva.

No artigo “Production scheduling in steel rolling mills with demand substitution: Rolling horizon implementation and approximations”, [Rami As'ad, Kudret Demirli, 2010], foi desenvolvida uma formulação para minimizar os custos com a venda de uma qualidade de aço ao preço de uma qualidade inferior, para laminadores de aço. O modelo de programação linear inteira mista considera o custo de set up como os ajustes necessários no forno de reaquecimento para cada lote.

Também é abordado em “A Mixed Integer Programming model for Scheduling Orders in a Steel”, [C.N. Redwine, D.A Wismer, 1974], o planejamento de produção de uma usina integrada, mais precisamente um laminador de aço, onde os autores propõem um modelo de programação linear inteira mista para minimizar os atrasos totais de todas as encomendas.

Moreira (2010) cita que a Programação Linear, trás um melhor raciocínio lógico, melhora a capacidade de estruturar e resolver problemas e ainda conhecer técnicas úteis que serão aplicadas na vida profissional de um executivo.

O desenvolvimento da programação linear tem sido classificado entre os mais importantes avanços científicos dos meados do século XX. Seu impacto desde 1950 tem sido extraordinário. Hoje, é uma ferramenta padrão que poupou milhares de dólares para muitas empresas ou até mesmo negócios de porte médio em diversos países industrializados ao redor do mundo (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

Em linhas gerais, a programação linear busca, entre as inúmeras tarefas ou atividades, descobrir a melhor distribuição dos recursos a fim de obter um valor ótimo do objetivo desejado. Os problemas de alocação de recursos distinguem-se pela existência de um objetivo explícito por meio de variáveis de decisão e pela

existência de restrições para alocar os recursos devido às quantidades disponíveis e a forma de aplicá-los (ANDRADE, 2009).

Neste sentido os autores supracitados nos mostram que a programação linear é uma eficiente ferramenta para a tomada de decisão. Assim torna-se extremamente importante compreender como foi desenvolvida, sua aplicação e recursos que por ora foram utilizados neste estudo. Nos próximos capítulos será apresentado o conceito, como a programação linear pode ser aplicada no âmbito da maximização do lucro e como os resultados podem ajudar nos processos decisórios dentro da organização. Esse esclarecimento faz-se necessário para a compreensão de quão importante esta ferramenta é para os processos de decisão. Uma vez esclarecidos tais conceitos, será possível compreender o problema levantado na Siderúrgica em estudo, assim como explicar sua resolução e entender a solução ótima encontrada.

Acerca desse assunto, PRADO (2007) afirma:

[...] A programação linear é uma técnica de otimização; uma ferramenta usada para encontrar o lucro máximo, ou o custo mínimo em situações nas quais há várias alternativas de escolha sujeitas à algum tipo de restrição ou regulamentação. Ele ainda considera a programação linear uma técnica de planejamento capaz de produzir resultados expressivos em quase todos os ramos da atividade humana [...].

O modelo matemático de programação linear é composto de uma função objetivo linear, e de restrições técnicas representadas por um grupo de equações e inequações também lineares.

No desenvolvimento do modelo, algumas características devem ser levadas em consideração, tais como:

- Os modelos apresentam restrições (equações e/ou inequações) lineares, bem como a sua função objetivo;
- Os valores variam a uma taxa constante dos recursos utilizados (linearidade das restrições e da função objetivo);
- As variáveis podem ser contínuas ou discretas, e limitadas, ou não, inferior e superiormente.

Um bom modelo deve ser o mais próximo da realidade e de fácil experimentação. Nos modelos matemáticos as relações entre as variáveis do problema devem ser representadas por sistemas de símbolos e relações matemáticas. Os principais elementos que existem em um modelo matemático são:

- Variáveis de decisão e parâmetros;

- Restrições: retratam a insuficiência dos recursos e os limites impostos sobre as ações, com o objetivo de almejar a função-objetivo;
- Função Objetivo: é uma função matemática formada por uma combinação linear das variáveis de decisão.

Buscar uma solução ótima é a ideia fundamental na solução de um problema.

2.2 O Planejamento Agregado da Produção

De forma geral, o planejamento agregado de produção dentro de uma indústria de manufatura, busca atender a demanda agregada por meio da ação de unir as inúmeras variáveis de interferência e principalmente de influência produtiva. Essa ação de planejamento pode assumir diversos objetivos, como por exemplo, a maximização do lucro, minimização de custos e a redução dos insumos.

O planejamento agregado é o processo de determinação pelo qual a empresa busca aferir os níveis de capacidade, produção, estoque e esgotamento de estoque, sobre um horizonte de tempo pré-determinado. O foco do planejamento agregado é atender a demanda de maneira a otimizar um objetivo (GURGEL, 2003). Os enfoques apresentados são de grande importância para o posicionamento da empresa no mercado uma vez que a empresa se planeja em um horizonte de tempo objetivando sucesso em pontos específicos de sua estratégia. Portanto, o planejamento agregado é uma ferramenta de médio e longo prazo, utilizado comumente para atender as necessidades. Além do mais, ele norteia as decisões dos gestores em diversas situações e cenários.

“O planejamento agregado envolve a tomada de decisões a respeito de questões como, por exemplo: a empresa entrar em férias nos períodos de baixa demanda; fabricar produtos para estoque nos períodos de baixa demanda para vendê-los nos períodos de maior demanda; trabalhar em regime de horas extras quando preciso; estabelecer um turno temporário adicional nos períodos de maior demanda; subcontratar a fabricação do produto ou parte dele em outras fábricas com capacidade ociosa; atrasar, antecipar ou negociar a entrega para alguns clientes.” (PEINADO; GRAEML, 2007, p. 381).

Observa-se que a característica principal do planejamento agregado é dar uma visualização do cenário esboçado em um período de tempo de modo simplificado, além de ter como ponto chave a possibilidade de ser dirigido por meio de diversos objetivos e decisões. São essas decisões que demonstram a

estabilidade financeira da empresa, a possibilidade de crescimento, ou até mesmo ações corretivas de retração de crescimento.

2.2.1 Elementos de um planejamento agregado de produção

No planejamento de produção é comum encontrarmos diversos elementos de influência, como por exemplo: os custos de matéria prima e insumos de transformação (energia, mão-de-obra e maquinário). Esses e outros elementos de influência são normalmente associados a grupos segundo Peinado e Graeml (2007):

- **Desperdícios:** custos imprevisíveis que não possibilitam a produção de um novo produto. Podem e devem ser extintos, sem interferência na quantidade e qualidade dos produtos produzidos e vendidos. Exemplos: excesso de cargos e de pessoal, retrabalhos e estocagens.
- **Custo fixo:** todos os gastos (custos e despesas) que independem do número de produtos e/ou serviços. Alguns tipos comuns de custos fixos são: alugueis, diversos tipos de depreciações, seguros e salários administrativos.
- **Custos Variáveis:** custos que possuem variação de acordo com o volume de produtos fabricados. Nas indústrias a matéria-prima, fretes e comissões são os melhores exemplos a serem citados.

Peinado e Graeml (2007) ainda descrevem diversos outros grupos de custos, como por exemplo: custo total, custos diretos, custos indiretos, custo de capital e custos de oportunidade.

Por meio do plano de produção desenvolvido com base nas estimativas de necessidade dos clientes e das limitações de capacidade, a empresa formula um planejamento agregado de produção no qual possibilita analisar as oportunidades diante dos níveis de produtividade, dos níveis de força de trabalho e dos estoques (RITMAN, 2004).

Esse agrupamento de elementos de influência proporciona, ao planejamento de produção agregado, a redução da complexidade e do entendimento do cenário a ser trabalhado e planejado no horizonte de tempo.

2.3 Descrições dos processos de laminação

A laminação é um processo de conformação mecânica, onde a placa de aço de seção quadrada e com um determinado comprimento é inicialmente aquecida e passa por um laminador. Os cilindros do laminador giram em sentidos contrários com uma mesma velocidade periférica e a placa ganha uma determinada forma com um tipo de seção transversal característica do produto final desejado. Ao sofrer este processo de deformação plástica, a placa tem sua seção transversal reduzida e por consequência aumenta seu comprimento e largura, de forma que, para obtenção do produto final, é necessário o corte no comprimento desejado sendo que esta fase é realizada na linha de acabamento.

O processo de laminação de chapas grossas vem depois da aciaria e antes do processo de acabamento, onde são realizados os cortes, redimensionamento de material, marcação e embalagem. Na laminação, as placas são reaquecidas a temperaturas de até 1250 °C. Em seguida, as placas aquecidas são laminadas até atingir as dimensões exigidas pelo cliente e, posteriormente o material é desempenado e quando necessário sofre um processo de tratamento térmico para obter propriedades mecânicas recomendadas para a aplicação do aço.

As chapas grossas são aços planos com espessura que vão de 6 mm a 150 mm, com alta resistência e própria para aplicações em vários setores como: a indústria de óleo e gás; a indústria naval; construção civil; máquinas pesadas; máquinas agrícolas e no setor energético.

Os principais processos que compõem a Laminação de Chapas Grossas são: Forno de Aquecimento, Laminador Acabador, Desempenadeira e CLC "*Continuous On Line Control*" conforme mostra a Figura 1. Todos os materiais são processados nestes equipamentos exceto os materiais que não têm em suas especificações características mecânicas adquiridas somente através do processo CLC. Neste caso o material passa livre pelo equipamento CLC, mas não sofre modificações.



FIGURA 1 - Processo de Laminação de Chapas Grossas

Fonte: Usiminas 2014

2.3.1 Fornos de reaquecimento

O Forno de Aquecimento de Placas tem como objetivo aquecer as placas suficientemente de modo que a laminação seja efetuada dentro dos padrões de qualidade exigidos. A placa é aquecida a altas temperaturas e mantida no forno para obter maleabilidade, condições físicas e químicas adequadas à laminação.

2.3.2 Laminador

De modo automático, o Laminador reversível assegura as dimensões (espessura, largura e comprimento), forma e aspecto do material além de controlar também temperaturas que garantem propriedades mecânicas, de acordo com a aplicação do material. O consumo de energia neste processo há maior variação quando há mudanças de qualidades e dimensões do material e que diante destas alterações há maior ou menor exigência do equipamento ou tempo de processo.

2.3.3 Desempenadeira e CLC

A desempenadeira corrige os defeitos “de forma” que eventualmente são geradas no laminador. O CLC, ou resfriamento acelerado, consiste em passar o material através de rolos móveis, e resfriá-lo com jatos de água a uma temperatura pré-determinada a fim de obter propriedade mecânica e forma desejada. Quando este equipamento é utilizado eleva-se significativamente o consumo de água e energia.

2.3.4 Produto final

As chapas grossas podem ter requisitos variáveis de espessura, largura, comprimento, resistência, tenacidade e composição química, de acordo com a necessidade específica de cada cliente. A medida da exigência aplicada há uma grande variação nos procedimentos operacionais que refletem nos custos de produção considerando os diferentes tempos de processos necessários e de tratativas de temperaturas do material exigidas.

O conjunto de produtos da linha de produção de chapas grossas é muito diversificado, mas no modo geral se classifica em seis grandes grupos de produtos.

O produto um (P1) é aplicado principalmente na indústria de fabricação de plataformas de petróleo e gasodutos. Sua produção exige várias tratativas, dentre elas, o controle de temperatura nos processos desde a aciaria até a laminação.

Este material, obrigatoriamente, passa pelo processo CLC para obter propriedades mecânicas necessárias e garantir soldabilidade e alta resistência para serviço ácido, com conseqüente propensão a problemas de fragilização induzida pelo hidrogênio (*hydrogen induced cracking*, HIC). O maior custo de produção se concentra neste material porque o processo é lento e o consumo de insumos é elevado.

O produto dois (P2) é para a produção de tubos. Porém, não há uma exigência tão grande quanto ao (P1) porque em sua aplicação as tubulações não ficam expostas a um ambiente agressivo com riscos de rompimentos ou outros tipos de desgastes. Nesse caso, este material não é processado no CLC.

O produto três (P3) tem como finalidade atender a indústria naval na fabricação de navios e na construção civil para a fabricação de estruturas de pontes e viadutos. O processo de tratamento térmico via CLC também é obrigatório.

O produto quatro (P4) atende a indústria agrícola na fabricação de máquinas e equipamentos. Este material passa por um tratamento térmico chamado de têmpera direta via CLC, que consiste em resfriar o material com uma taxa de resfriamento muito elevada para garantir propriedades mecânicas.

O produto cinco (P5), atende principalmente a indústria de construção civil e exige um controle de temperatura rigoroso no processo de reaquecimento da placa (forno de reaquecimento) e no processo do laminador. O tratamento térmico via CLC não é exigido para este produto.

O produto seis (P6), conhecido como material comum é o material que tem o menor custo de produção, o controle de temperatura nos processos é menos exigente possibilitando melhor ritmo de produção. Sua aplicação é, principalmente, na construção civil não exige tratamentos térmicos rigorosos e não passa pelo processo de CLC.

2.3.5 Consumo de energia elétrica

A importância de levar em consideração o aspecto da economia de energia elétrica neste estudo se dá pelo fato deste insumo ter enorme participação no custo do processo de fabricação do aço.

Segundo uma matéria divulgada pelo Sistema FIRJAN, (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO RIO DE JANEIRO, 2015), o Brasil é o 1º no ranking de custo mais alto de energia da indústria entre 28 países analisados, superando a Índia e a Itália que ocupavam as duas primeiras posições.

Quando há um período longo de estiagem e que provocam a redução dos níveis dos reservatórios de água nas hidrelétricas, as termoeletricas são ligadas para garantir o abastecimento de energia. O processo de geração de energia nas termoeletricas tem um custo muito alto. Nesse período, há um aumento significativo no preço do kWh e naturalmente este ajuste influencia diretamente no custo de produção.

Na produção de aço, o consumo de energia elétrica é muito elevado, sendo este um dos principais insumos a afetar o custo de produção. Dentre os processos de laminação, o laminador de chapas é o processo que mais consome este recurso representando em média 82% do consumo total. O consumo de energia elétrica do forno de reaquecimento representa 9 %, a desempenadeira 4 % e o CLC 5%.

Sendo assim, é de extrema importância elaborar um plano de produção prevendo o consumo de energia. Cada tipo de material demanda um determinado consumo e alguns requerem tratamentos especiais que intensificam ainda mais a necessidade de controle e planejamento visando aproveitar todas as oportunidades como, por exemplo: definições de quais produtos serão produzidos; possibilidade da utilização do estoque prevendo a redução do consumo de energia para o mês seguinte; e, outras que podem ajudar na redução do custo total. A variação do consumo de energia está atrelada ao tipo de material, esta é identificada, principalmente, pelas características de processamento exigidas, que levam em consideração o tempo de processo, a exigência na aplicação de força do laminador, das dimensões e temperatura do material.

Por tanto, é imprescindível que haja uma abordagem do ponto de vista de economia de energia e a aplicação do modelo tendo como o fator de decisão o custo da energia elétrica para a produção de chapas grossas.

O consumo de energia elétrica no processo produtivo é o problema a ser tratado neste trabalho. O objetivo é desenvolver um modelo que aperfeiçoa o planejamento de produção aproveitando a capacidade produtiva da linha e a formação de estoques visando à economia de energia.

Em resumo, serão consideradas as seguintes restrições:

- Planejamento de produção para uma demanda no período de 12 meses, visando a redução do consumo de energia, sendo que o último período deve-se encerrar com estoque zero.
- A produtividade por produto e a capacidade produtiva em cada processo.
- O consumo de energia elétrica em cada processo e por produto
- O custo de estocagem.

3. METODOLOGIA

No intuito de conduzir a pesquisa de maneira adequada, utilizou-se por meio da Figura 2, o direcionamento das atividades conforme as características e suas diretrizes metodológicas.

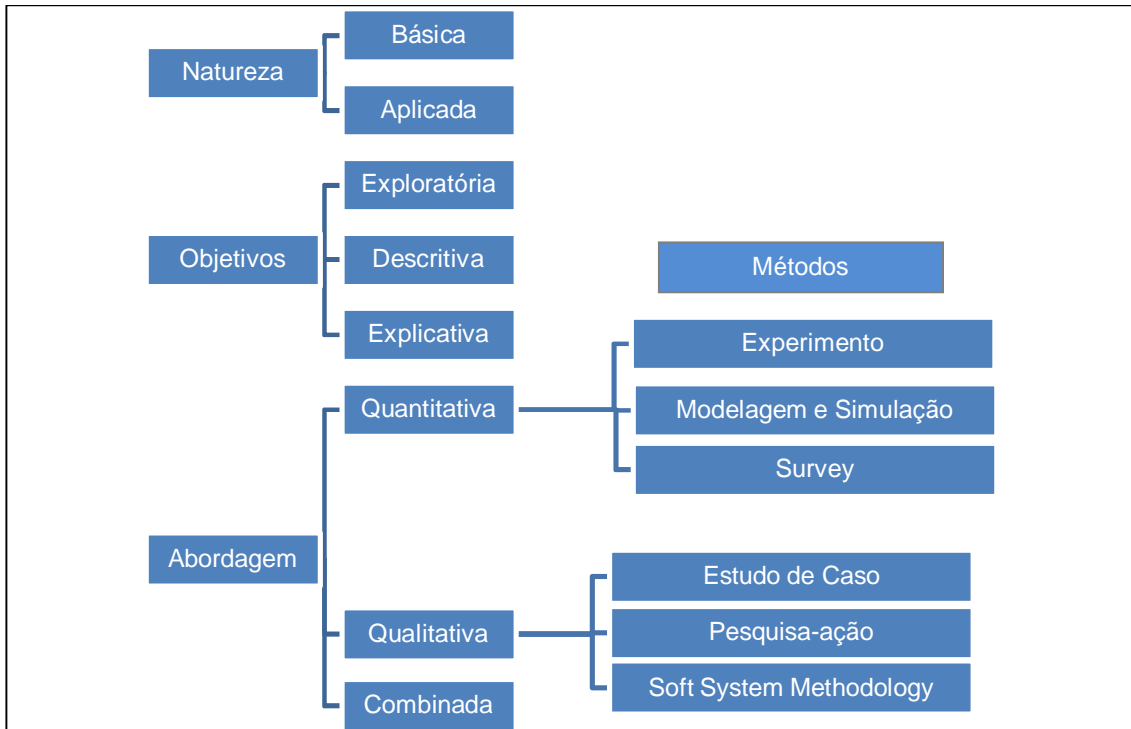


FIGURA 2 - Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção

Fonte: Adaptado de Miguel (2010)

A presente pesquisa possui a natureza aplicada pelo fato de desenvolver um modelo de análise e decisão prático no planejamento de produção de uma indústria siderúrgica, assim, é um sistema real.

Kauark, Manhães e Medeiros (2010) definem que a pesquisa aplicada objetiva gerar conhecimento para uma aplicação prática, tendo como fundamento problemas específicos envolvendo verdade e interesses locais.

Miguel (2010) guia o processo metodológico quanto aos objetivos. No presente trabalho, notam-se características de uma pesquisa exploratória, uma vez que busca explorar as variáveis que definem o planejamento de produção no que

tange a definição do conjunto e quantidades de produtos a serem produzidos para se alcançar a maior margem de lucratividade.

Prodanov e Freitas (2013) citam que a pesquisa exploratória tem por finalidade proporcionar mais informações sobre o assunto que se investiga, possibilitando a formulação de hipóteses e o descobrimento de um novo tipo de enfoque para o assunto.

Seguindo para o tipo de abordagem metodológica, são notáveis os laços quantitativos da pesquisa uma vez que a proposta foca em uma análise matemática. Como consequência, o método utilizado é a modelagem e a experimentação, onde definirá por meio da Pesquisa Operacional um modelo para o planejamento produtivo de uma usina siderúrgica. Vale destacar que os instrumentos a serem utilizados para a captação dos dados e informação serão as pesquisas bibliográficas e fontes de dados secundários, sendo estes repassados pela empresa dentro de sua confiabilidade.

Utilizando uma adaptação das fases comumente existentes em um estudo de Pesquisa Operacional proposto por Silva *et al.* (1998), segue abaixo as etapas de desenvolvimento da presente pesquisa:

- **Formulação do Problema:** Mapear e identificar as características do problema no intuito de dar clareza e coerência no entendimento do estudo em P.O. A partir disso, serão definidos os objetivos, as limitações técnicas, as restrições do sistema e as relações entre as variáveis do ambiente do problema.
- **Desenvolvimento do Modelo:** Um modelo adequado é aquele que possui um desempenho próximo do desempenho da realidade. Assim, caso o modelo desenvolvido tenha uma semelhança com modelos convencionais, a solução pode ser encontrada por meio de métodos matemáticos convencionais. Por outrora, caso não seja possível a utilização de um modelo convencional e suas relações matemáticas sejam mais complexas, faz-se necessário a combinação de metodologias e/ou uma análise de custo-benefício quanto a intuito de melhorar o desempenho de um modelo existente.
- **Solução e Validação do Modelo:** Essa fase tem o intuito de encontrar uma solução para o modelo proposto considerando uma técnica para o cálculo da solução. Geralmente a solução do modelo é atribuída pela

utilização de técnicas matemáticas existentes. Assim, a validação do modelo conta em representar o comportamento do sistema com uma margem de inexatidão visível e aceitável pelo pesquisador.

- **Implementação da Solução:** Nessa fase deve ocorrer uma validação da solução de modo a analisar as vantagens em transformar o modelo em regras operacionais. Tal momento é dito como crítico devido levar a possibilidade de alterar a operacionalização das atividades da empresa. Assim, faz-se necessário a validação do trabalho antes de sua implementação.

Por fim, a formulação da pesquisa contou com a abordagem das fases apresentados acima. Onde para a solução do modelo, será utilizado o *software* livre GNU GLPK 4.8.

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 Descrição do Problema

Entendendo a importância e os benefícios que um planejamento agregado de produção pode proporcionar a uma empresa, e considerando a delicada situação da geração de energia do país, definiu-se o enfoque do modelo a ser desenvolvido.

O modelo será de caráter genérico ao apoio a decisões para empresas possuidoras de processo de laminação a quente de chapas grossas. Ele terá como abordagem um planejamento agregado de produção em um horizonte de planejamento de médio e longo prazo. Terão também como influência a seu resultado os custos fixos, os custos variáveis e os custos de estocagem.

Portanto, o objetivo do modelo matemático proposto é maximizar a margem de contribuição diante do processo de laminação de chapas de uma usina siderúrgica. A margem de contribuição terá como influência de custos, parâmetros como custo fixo, custo variável e custo de estocagem. O custo fixo será representado pelo custo de operacionalização dos processos do forno, do laminador, da desempenadeira e do CLC. O custo variável terá como sua exclusiva composição o custo de energia elétrica de produção. E por fim, o custo de estocagem, terá como sua exclusiva composição o valor referente às movimentações de estocagem por ponte rolante.

O custo variável, sendo ele abordado pelo custo de energia possui o intuito de apresentar uma vertente distinta do cotidiano das empresas no planejamento de produção. Já o estoque, um dos maiores vilões, um custo totalmente evitado pelas empresas, sendo ele também um custo variável, será apresentado ao enfoque de energia elétrica de movimentações dos produtos acabados.

De forma geral, para o desenvolvimento do modelo foram utilizados três conjuntos de variáveis de decisão. A primeira irá apresentar o número de produtos produzidos por períodos, a segunda, de natureza binária, irá indicar se os processos irão ser utilizados em cada período, e a última apresentará o número de produtos estocados ao fim de cada período.

As restrições que devem ser levadas em conta para a elaboração do modelo são: os tempos de processamento dos produtos produzidos deve respeitar a

capacidade de tempo disponível nos processos além de toda linha de produção, a demanda dos produtos deverá ser atendida em todos os períodos, a capacidade de estocagem deverá ser respeitada.

De forma resumida, para a aplicação prática do modelo foi elaborado uma instância de teste. A instância irá possuir seus dados muito próximos da realidade cotidiana da companhia. Desta forma, os resultados apresentados pelo modelo serão analisados e confrontados com as decisões do planejamento de produção da empresa. Essa comparação terá como intuito analisar os prós e os contras de se analisar uma variável em particular no planejamento de produção, no caso, a energia elétrica.

O modelo irá abordar um grupo de seis produtos diversificados em suas características físicas de processamento e financeiras. Terá o enfoque no processo de laminação de chapas e irá apresentar como processos: o forno; o laminador; a desempenadeira e o CLC.

4.2 Desenvolvimento do Modelo Matemático

Para a criação do modelo foram utilizados conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão conforme segue nos quadros respectivamente.

QUADRO 1
Conjuntos do Modelo

Conjuntos	Descrição
<i>P</i>	Produtos
<i>K</i>	Processos
<i>T</i>	Períodos

Fonte: Elaborado pelo autor

QUADRO 2
Parâmetros do Modelo

Conjunto de Parâmetros	Descrição
t_{kp}	Tempo de processamento de uma tonelada de produto p no processo k
tp_{kt}	Tempo total disponível no processo k no período t
td_t	Tempo total disponível por período t
cp_{tkp}	Custo variável de produção de uma tonelada do produto p no processo k no período t
cf_{kt}	Custo fixo do processo k no período t
dp_{pt}	Demanda do produto p no período t
pv_{pt}	Valor de venda do produto p no período t
eO_p	Estoque inicial do produto p
$capE$	Capacidade total do estoque em toneladas
cE_p	Custo de estocagem do produto p por tonelada

Fonte: Elaborado pelo autor

QUADRO 3
Variáveis de decisão do Modelo

Conjunto de variáveis de decisão	Descrição
x_{pt}	Quantidade produzida do produto p no período t
y_{kt}	1 se o processo k é utilizado no período t; 0 caso contrário
e_{pt}	Estoque do produto p ao fim do período t

Fonte: Elaborado pelo autor

Por meios das notações apresentadas acima, o modelo matemático é apresentado pelas equações de 1 a 7.

Maximizar a margem de contribuição = receita – custo fixo – custo variável – custo de estoque

$$\text{Max FO} = \sum_t \sum_p dp_{pt} pV_{pt} - \sum_t \sum_k cf_{kt} y_{kt} - \sum_t \sum_p \sum_k x_{pt} cp_{tkp} - \sum_t \sum_p cE_p e_{pt} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_p t_{kp} x_{pt} \leq tp_{kt} y_{kt}; \forall t; \forall k \quad (2)$$

$$\sum_p (\sum_k t_{kp}) x_{pt} \leq td_t; \forall t \quad (3)$$

$$e_{pt} = eo_p + x_{pt} - dp_{pt}; \forall p; t = 1 \quad (4)$$

$$e_{pt} = e_{p(t-1)} + x_{pt} - dp_{pt}; \forall p; \forall t: t > 1 \quad (5)$$

$$\sum_p e_{pt} \leq cap_E; \forall t \quad (6)$$

$$\sum_p e_{pt} = 0; t = 12 \quad (7)$$

A função objetivo apresentada na equação (1) maximiza a margem de contribuição do planejamento agregado de produção de chapas grossas. Seu primeiro termo calcula a receita de produção por meio da multiplicação entre a quantidade de toneladas de chapas a serem vendidas do produto no período e o preço de venda do produto no período. O segundo termo representa o custo fixo total, encontrado por meio do custo fixo por processo multiplicado pela variável que valida a utilização do referido processo no período. O terceiro termo é uma subtração que define o custo variável total por meio da quantidade produzida e o custo de processamento por tonelada, todos por período, processo e produto. O quarto e último termo representa o custo de estocagem, ele é representado pela multiplicação entre o custo da ação de estocar cada tonelada de chapas e a quantidade estocada ao fim de cada período e por produto.

A equação (2) limita o número de chapas produzidas de acordo com o tempo disponível nos processos, validar a variável y_{kt} de modo que, caso ocorra produção de um produto e ele utilize o processo, a variável assume valor igual a 1, caso contrário, assume valor igual a zero. De intuito próximo, a equação (3) tem como função limitar o tempo total produção da linha de chapas grossas. De modo a ressaltar o tempo disponível por período.

A equação (4) tem como intuito restringir o atendimento a demanda e definir o estoque disponível no fim do primeiro período. Seu cálculo é definido por meio da seguinte ideia: o estoque acumulado no fim do presente período deve ser igual ao estoque inicial (dado no arquivo de dados) somados a quantidade de toneladas produzidas no período subtraindo a demanda de toneladas no período. Nota-se que a equação (5) tem a mesma ideia, o que difere da anterior, é que seu escopo atua

para todo período a partir do segundo, ou seja, ela avalia o estoque acumulado e não o inicial apresentado no arquivo de dados.

A equação (6) tem como fundamento restringir a capacidade de estocagem em toneladas. Ela descreve que o somatório dos produtos em estoque (em toneladas) no fim do período deve ser menor ou igual a capacidade de estocagem da usina. Na mesma linha de raciocínio, a equação (7) define que no fim do período 12 o estoque deverá ser igual à zero. O objetivo para que no período 12 não se acumule estoque, é para forçar o modelo a não produzir em excesso com relação a demanda, visto que não existe um período seguinte, não arque com o custo de estoque, e principalmente, utilize o estoque acumulado nos períodos anteriores caso exista.

5. APLICAÇÃO DO MODELO

Com o intuito de testar a aplicabilidade do modelo sugerido para o planejamento agregado de produção de um processo de laminação de chapas grossas, foi utilizado o *software* livre GNU GLPK 4.8.

Para uma análise confiável de um planejamento de médio e longo prazo, foi definida a utilização de 12 períodos, sendo eles apresentados em meses. Tais informações e dados contidos no estudo são de natureza real. A utilização tem como fundamento analisar como o modelo a ser proposto se comporta com os dados e informações.

Para sua aplicação foi utilizado um número de seis produtos, ou seja, seis tipos de chapas grossas com características distintas umas das outras perante os processos nomeados como forno, laminador, desempenadeira e CLC. De modo a identificar os produtos ao longo do estudo e entender características, segue abaixo o termo de identificação com relação a suas características físicas:

- ✓ P1 API - CLC
- ✓ P2 API
- ✓ P3 Naval e Estrutural
- ✓ P4 CLC – Têmpera Direta
- ✓ P5 LC
- ✓ P6 Comum

Visto que o planejamento de produção está direcionado a maximização da receita e os custos de interferência estão alinhados ao consumo de energia elétrica. Foi desenvolvido o gráfico 1 no intuito apresentar a variação dos custos de energia elétrica por produto (em tonelada) ao longo dos doze períodos, sendo este o horizonte de planejamento definido para a análise do cenário.

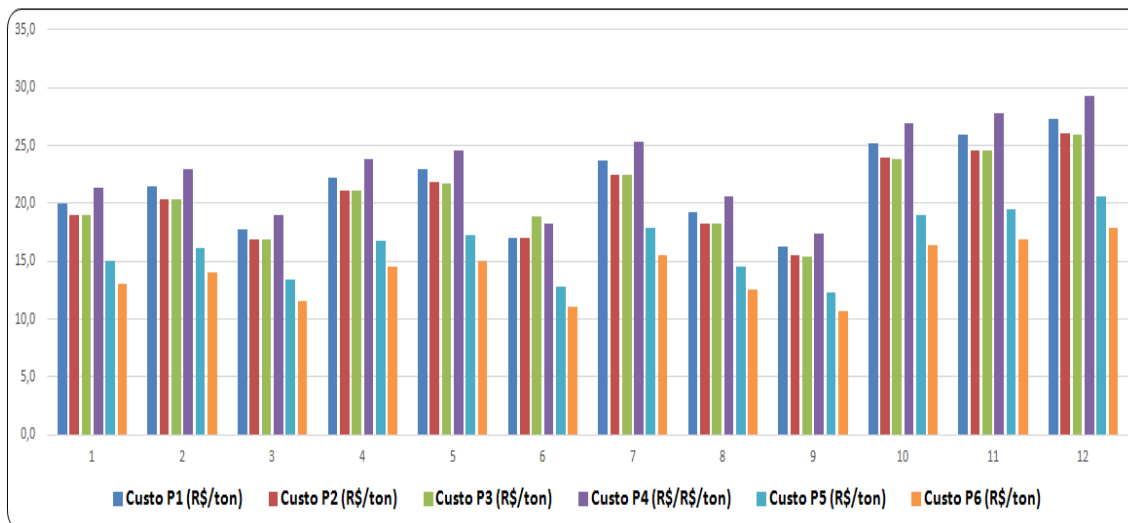


GRÁFICO 1 - Representação do custo variável por produto ao longo dos períodos

Fonte: Elaborado pelo autor

É possível notar no GRAF.1 que o custo variável, ou o custo de energia elétrica (R\$/tonelada), entre os produtos e entre os períodos apresenta uma grande oscilação. Para entender as diferenças entre o custo dos produtos, foi desenvolvido o gráfico 2, representado pela média dos custos ao longo dos períodos.

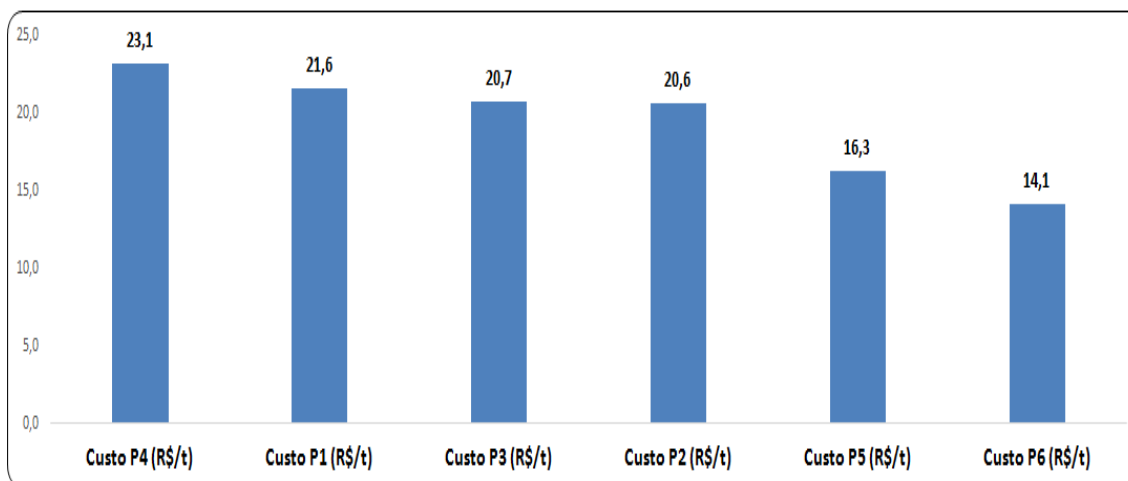


GRÁFICO 2 - Representação do custo médio de energia dos produtos (R\$/tonelada)

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se no GRAF.2, que o produto P4, ou o CLC têmpera direta se destaca como possuidor do maior custo. Tal razão se define, pois, ele é processado sobre procedimentos delicados ao longo dos processos, principalmente pelo processo

CLC. Em segundo lugar, está o produto P1 API – CLC e em terceiro lugar o produto P3 Naval e Estrutural, ambos devido a mesma razão.

5.1 Apresentação do cenário atual

Antes de adentrar no planejamento proposto pelo modelo, deve-se entender como a organização define o planejamento de produção da linha. Devido à crise econômica nacional e em consequência a redução do volume de venda, revigora-se elevados níveis de ociosidade na linha de produção e a capacidade de produção se torna uma grandeza pouco utilizada.

Entende-se que o tempo efetivo de produção, nada mais é que o tempo necessário para se produzir um determinado bem. Para entender a relação entre os níveis de produção e o tempo efetivo de produção associado e a quantidade de horas de ociosidade ligadas à capacidade de produção, foi desenvolvido o gráfico 3 a seguir:

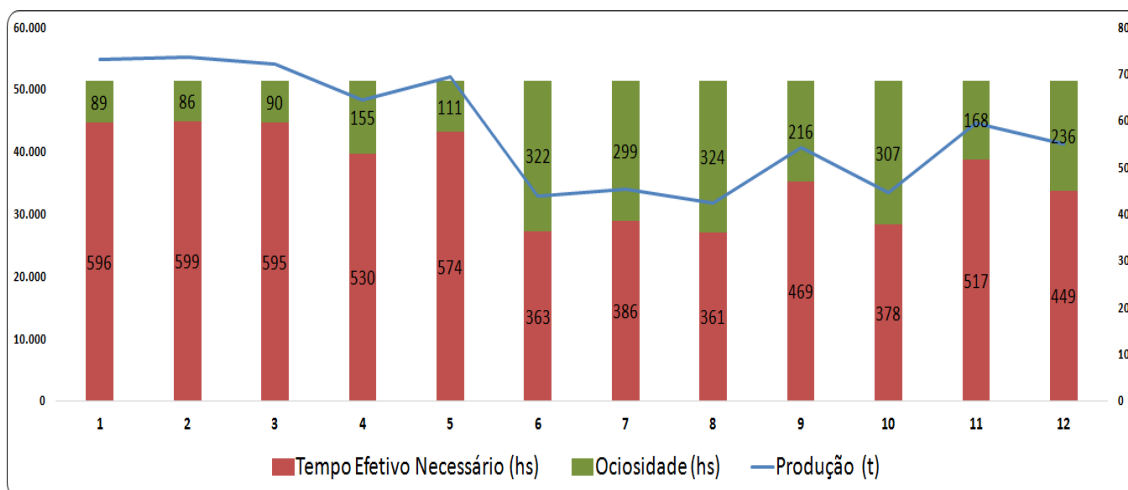


GRÁFICO 3 - Representação da relação entre a produção mensal, o tempo efetivo necessário e a ociosidade

Fonte: Elaborado pelo autor

No GRAF.3 é possível entender que no período 1 o tempo necessário para se cumprir a produção demanda foi de 596 horas. Entretanto, devido a superior capacidade da linha, o tempo de ociosidade no período foi de 89 horas. Nota-se que

devido ao baixo nível de produção entre os períodos de 6 a 10, ocorreu-se um maior nível de ociosidade da linha.

Diante desse cenário, a empresa analisada adota um planejamento de produção visando redução dos custos de produção. A estratégia adotada busca reduzir os custos e planejar a produção ao longo do mês de forma agrupada, sendo que nesse período, visa-se a melhor produtividade (toneladas/horas) para obter o melhor agrupamento possível. O gráfico 4 apresenta a estratégia adotada em um único período, mas de forma a representar os dias.

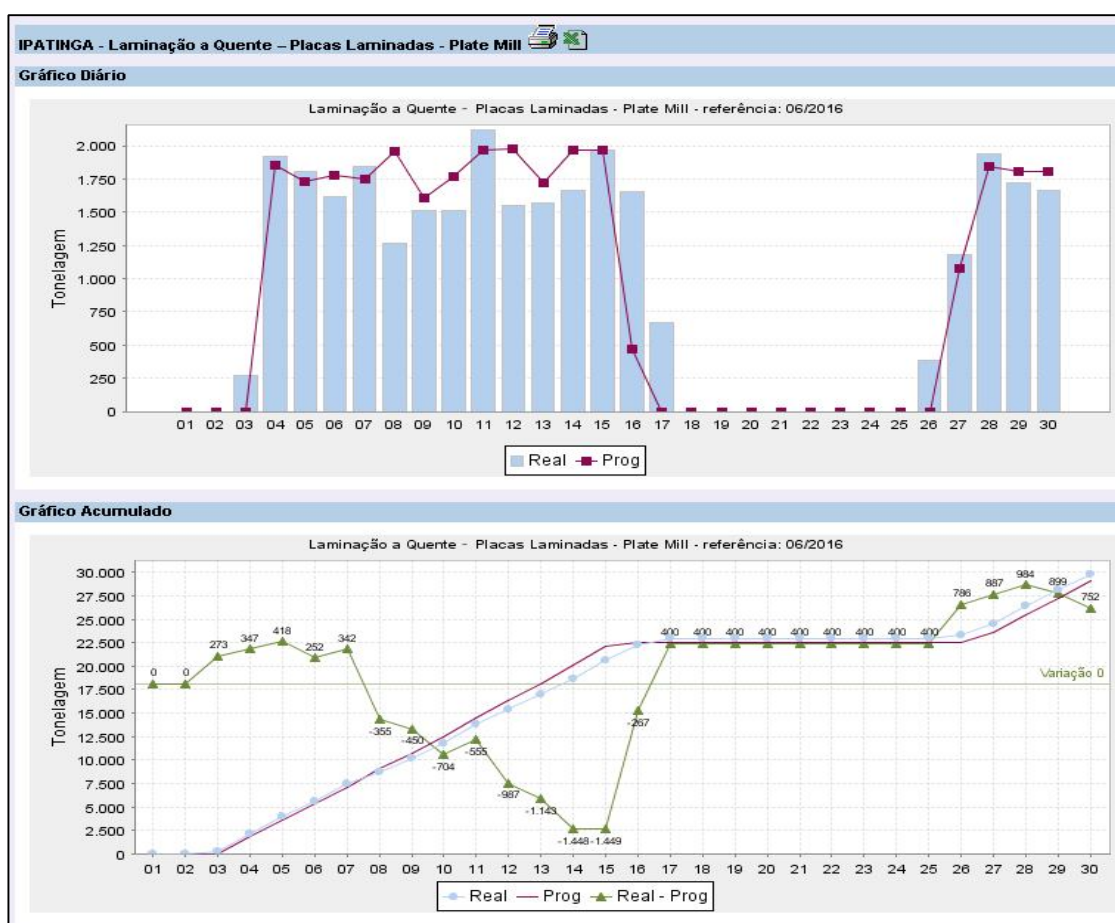


GRÁFICO 4 - Representação do planejamento atual de produção diário

Fonte: Site de Informações Gerenciais da Usiminas/Ipatinga

Observa-se que no gráfico diário houve dois agrupamentos, formando-se duas janelas dentro mês entre os dias 03 e 17 e entre os dias 26 e 30 que tiveram produção plena. Entre os dias 01 e 02 e entre os dias 18 e 25 a linha ficou parada.

A ação tomada é justificada, pois na atual realidade, a empresa produz no mês somente a produção demandada e evita-se a produção para estoque. Quando a demanda do mês é atendida e havendo ociosidade no plano, o processo é interrompido e os equipamentos desligados. Toda ação tomada, visa reduzir o consumo de energia elétrica.

Para identificar o consumo de energia elétrica e a relação do procedimento de agrupamento de produção adotado, desenvolveu-se o gráfico 5 de modo a identificar o consumo de energia elétrica no período analisado.

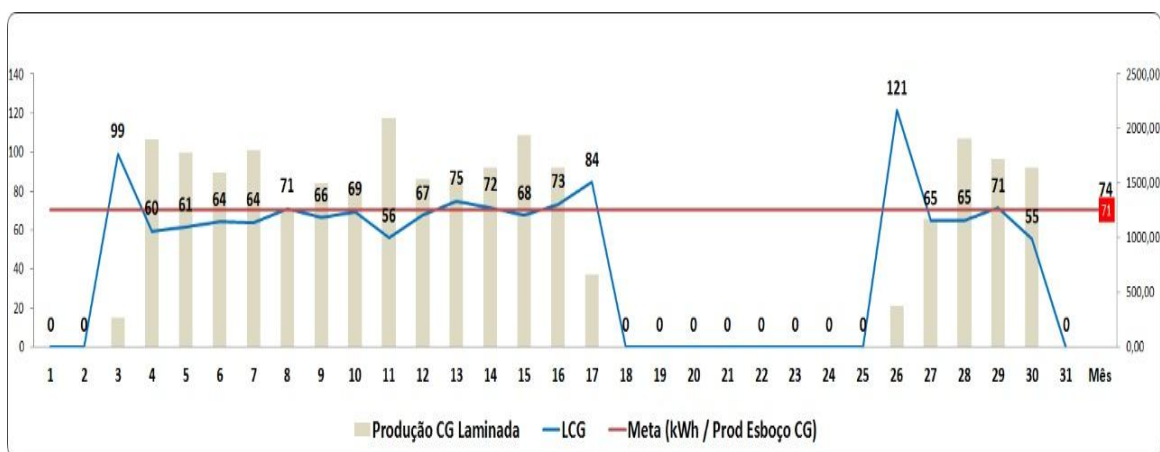


GRÁFICO 5 - Consumo de energia no planejamento de produção atual

Fonte: Relatório de consumos da Laminação a Quente

É possível notar no GRAF. 5 que, as barras representam o processo de produção como um todo; a linha azul representa o consumo de energia elétrica ao longo dos períodos, e a linha vermelha representa a meta de consumo estabelecido. Assim, é possível identificar que, nos períodos de desligamento, o consumo de energia aparentemente no GRAF 5 é extinto porque este indicador é o consumo específico, ou seja, o consumo em kWh dividido pela produção realizada em tonelada. Todavia, apesar do gráfico não apresentar o consumo nos períodos quando a linha está parada, ainda há um pequeno consumo absoluto de energia quando a linha para devido à necessidade de manter alguns equipamentos ligados. Este comportamento será abordado nos próximos capítulos. Por outro lado, nos períodos de reativação da linha, como nos períodos 3 e 26, nota-se o grande consumo de energia. Tal consumo será explicado também mais a diante.

Retornando a ideia de produzir somente a demanda, por meio do gráfico 6, nota-se que utilizando a estratégia adotada de agrupamento dentro dos meses, ao longo dos doze períodos, a empresa produziu somente o demandado.

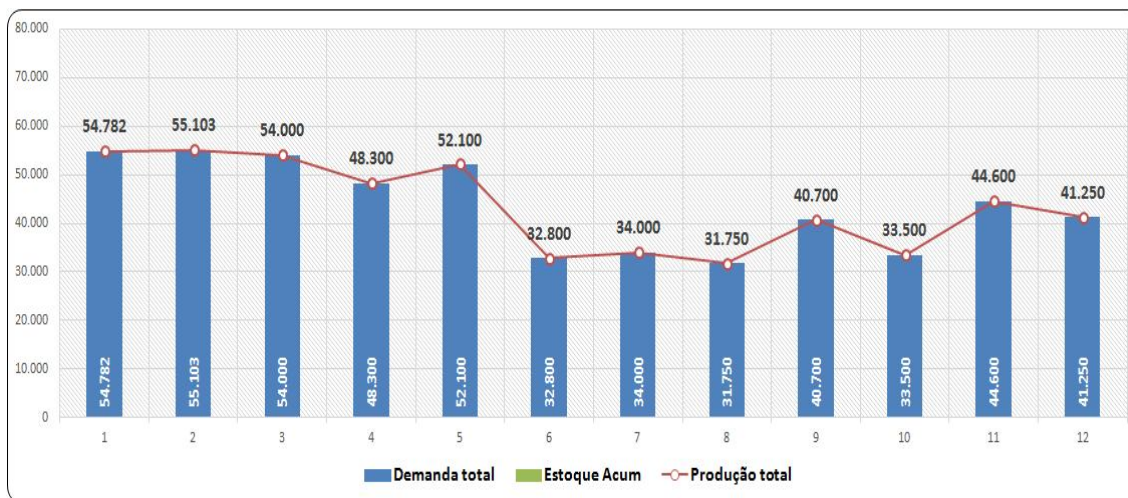


GRÁFICO 6 - Representação dos níveis de produção e demanda

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o GRAF. 6 acima, fica claro que no cenário atual o planejamento não adota a possibilidade de formação de estoque. Assim, ele define produzir somente a demanda do mês e analisa a possibilidade de desligamento dos equipamentos conforme sua estratégia de agrupamento de produção. Esse procedimento segundo a organização tem sido adotado com ganhos significativos se comparado com o modelo adotado em outras épocas, sem o agrupamento de produção.

Diante do atendimento da demanda e das paralizações da linha, os principais indicadores de consumo de energia elétrica são apontados para as seguintes condições de consumo: Consumo efetivo, consumo obtido durante o processo de produção; consumo durante a parada para manutenção; consumo no tempo de ociosidade com linha parada sem produzir e com equipamentos desligados.

A condição de consumo no tempo de ociosidade com a linha parada sem produzir e com os equipamentos desligados leva em consideração o tempo total de parada. Sendo que, se esse tempo for de no máximo 72 horas, o forno de aquecimento de placas fica aceso e abafado em uma temperatura mais baixa possível, mas não desligado. Nesta condição o forno consome energia elétrica

quanto gás. Por outro lado, quando há previsão de parada por ociosidade com tempo maior que 72 horas, o forno é desligado durante esse período. Todavia, quando o processo retorna à operação, há o custo de reativação, ou custo de *setup*. Este tempo foi definido a partir da análise de sensibilidade do custo de acendimento e abafamento do forno como mostra o gráfico 7 a seguir:

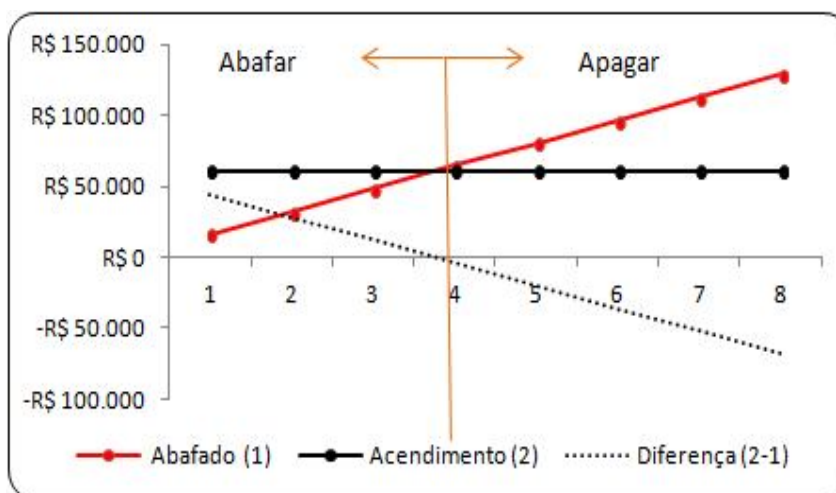


GRÁFICO 7 - Representação da sensibilidade na ação de abafar ou apagar o forno

Fonte: Relatório de análise da Engenharia Industrial da Laminação a Quente - Usiminas

O GRAF. 7 define que o custo de se manter o forno abafado por até 4 períodos é menor que o custo de acendimento. Por outro lado, a visibilidade de níveis de ociosidades acima de 4 períodos propõe o desligamento do forno no início e seu acendimento quando necessário.

De modo a representar a sensibilidade da decisão de apagar ou abafar o forno de acordo com os níveis de produção, o nível de ociosidade dos períodos e o custo de acendimento no cenário atual. Desenvolveu-se o GRAF. 8 conforme a seguir:

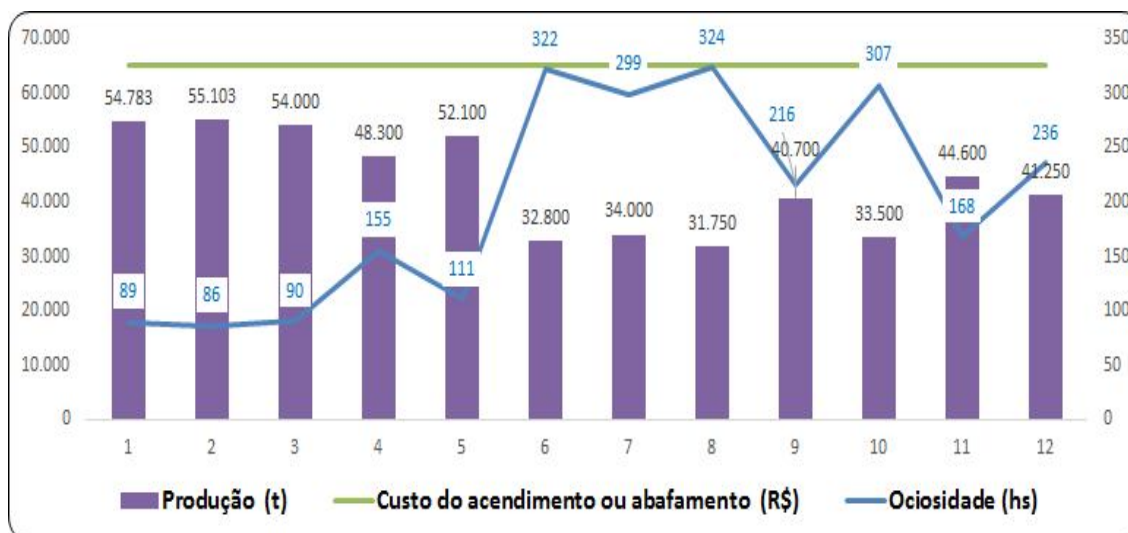


GRÁFICO 8 - Representação dos níveis de ociosidade e sua relação com o custo de acendimento diante dos níveis de produção no modelo atual aplicado

Fonte: Elaborado pelo autor

Devido todos os períodos possuírem ociosidade acima de 72 horas, o planejamento assumiu a ação de desligamento do forno em todos períodos. Conseqüentemente, a empresa assume o custo de reativação do forno, sendo este de R\$ 65.000.

5.2 Aplicação do Modelo

No cenário atual ainda mais desafiador, há uma necessidade de ter uma contínua busca pela redução de custos. Sendo assim, este trabalho propõe otimizar o planejamento do aproveitamento da capacidade de produção da linha e produzir por antecipação a demanda do mês seguinte, ou seja, para estoque quando houver um aumento de custos de energia para os meses seguintes. Aplicando no modelo de otimização proposto os mesmos dados analisados no planejamento adotado pela organização, desenvolveu-se o gráfico 9 de modo a representar o nível de produção definido e o seu tempo efetivo necessário juntamente com sua ociosidade associada.

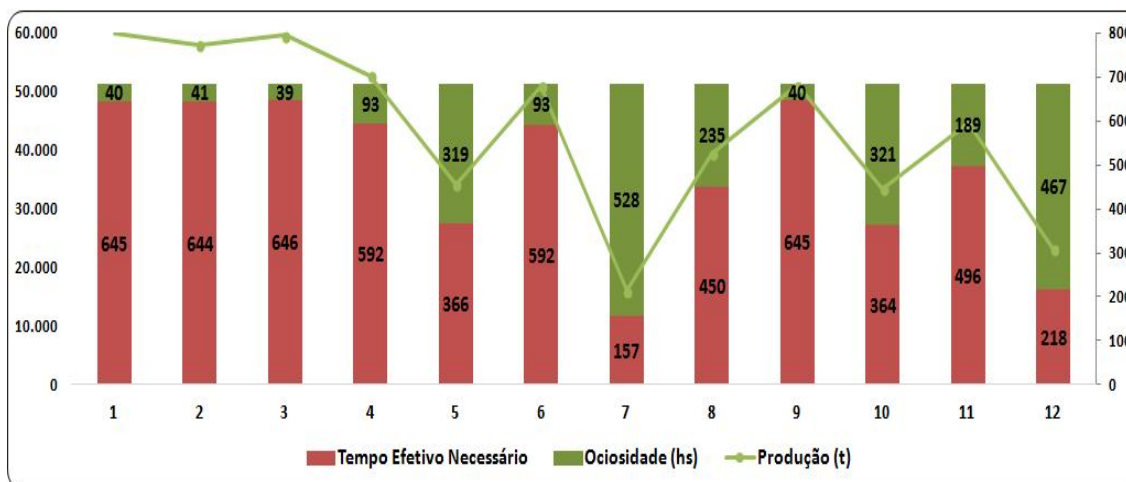


GRÁFICO 9 – Associação entre a produção mensal, o tempo efetivo e a ociosidade

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao avaliar o GRAF. 9, nota-se que o modelo definiu o planejamento de produção de modo a aumentar os níveis de produção e em consequência reduzir os níveis de ociosidade em alguns períodos ao prever o aumento dos custos de energia nos meses seguintes. A formação de estoque possibilitou a superprodução em alguns períodos e a redução da produção em outros.

De modo a identificar a demanda, a produção e a formação de estoque ao longo dos períodos, desenvolveu-se o GRAF. 10 a seguir:

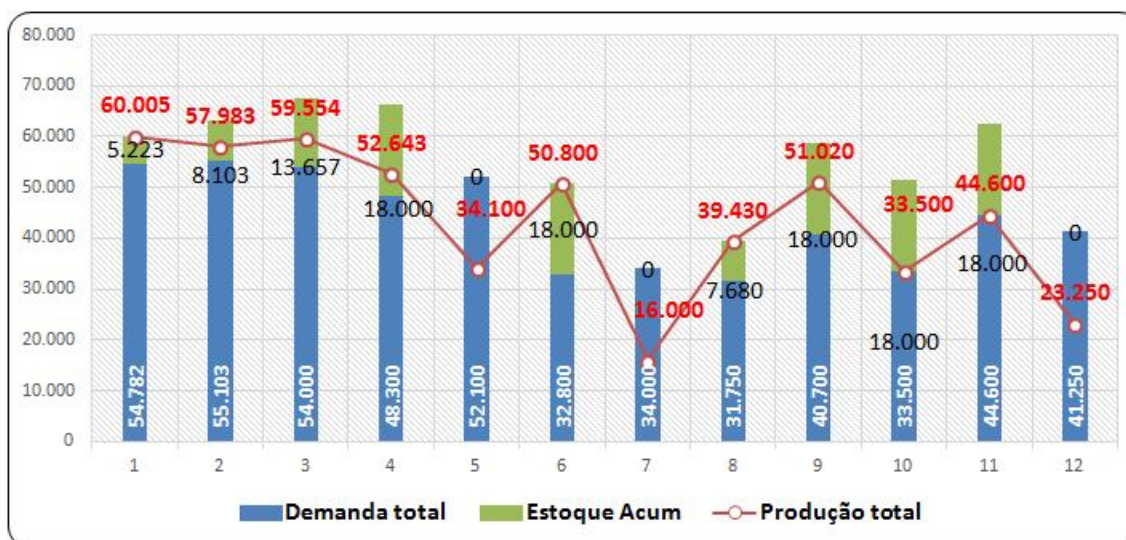


GRÁFICO 10 - Representação dos níveis de produção e estoque

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que em quase todos os períodos houve a produção para o estoque ou manteve o estoque acumulado dos períodos anteriores. Com exceção dos períodos 5, 7 e 12 no qual o modelo definiu a redução da produção diante a demanda. De modo a representar a movimentação do estoque ao longo dos períodos, desenvolveu-se o GRAF. 11 conforme a seguir:

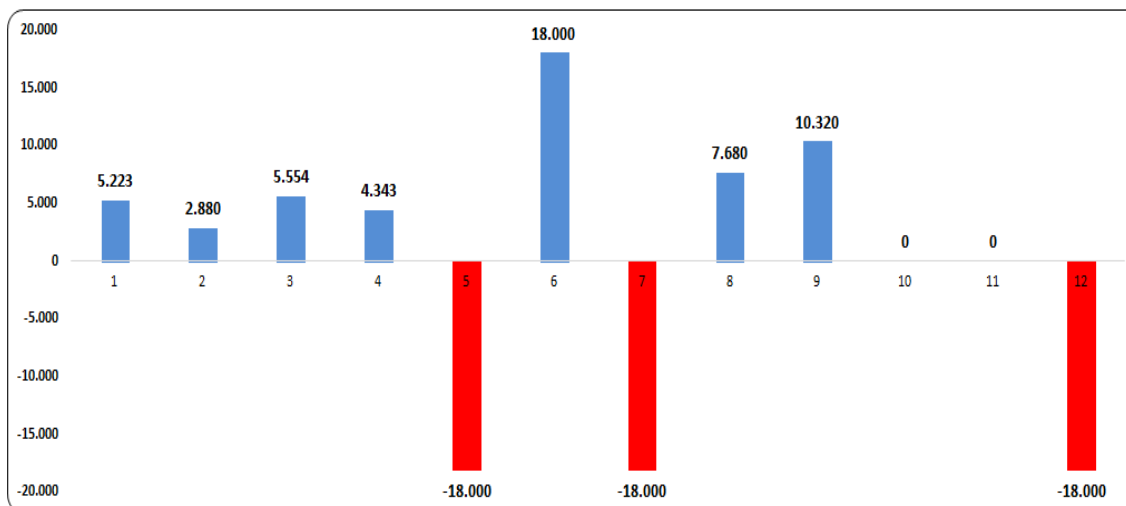


GRÁFICO 11 - Representação da movimentação do estoque ao longo dos períodos (toneladas)

Fonte: Elaborado pelo autor

No GRAF. 11 se vê que nos períodos 1,2,3,4,6,8 e 9 houve produção para estoque. Já nos períodos 5, 7, 12 ocorreu o consumo do estoque. Nesses períodos ao associar os GRAF. 10 e o GRAF. 11, entendemos a utilização do estoque e a diferença entre a produção e a demanda. Ainda associando os dois gráficos, é possível entender que nos períodos 10 e 11 com o custo de energia elevado, o modelo produziu exatamente a demanda para que os estoques acumulados dos períodos 8 e 9 fossem utilizados no período 12, deixando de assumir a elevação dos custos no último período e cumprindo a restrição de não possuir estoque no último período.

Cabe destacar que o modelo não alinha o custo de estocagem a fatores como obsolescência do produto final produzido e demais outros. O modelo define o custo de estocagem apenas diante da ação de movimentação do produto final produzido por meio de ponte rolante. Assim, o custo de estocagem está diretamente e exclusivamente ligado ao custo de movimentação, utilizando nosso recurso foco, a

energia elétrica. Para ilustrar o custo de estocagem assim definido, desenvolveu-se o GRAF. 12 para ilustrar o custo de estocagem ao longo dos períodos no planejamento proposto pelo modelo.

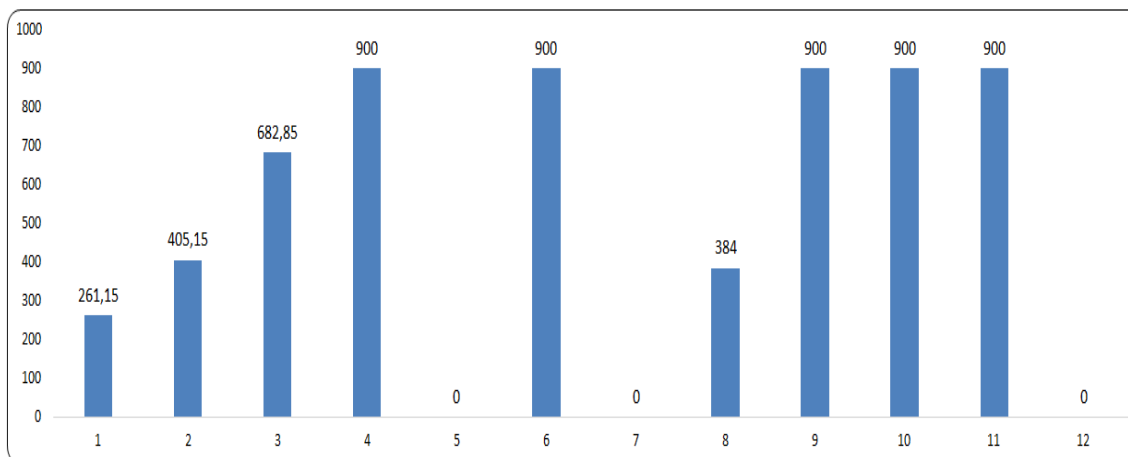


GRÁFICO 12 - Representação do custo de estocagem (R\$)

Fonte: Elaborado pelo autor

Entende-se que formação de estoque é um dos maiores vilões do planejamento de produção. Tendo em vista que o modelo define a formação de estoque diante da oscilação do custo de energia elétrica, desenvolveu-se o GRAF. 13 de modo a representar os níveis de produção e o custo total associado.

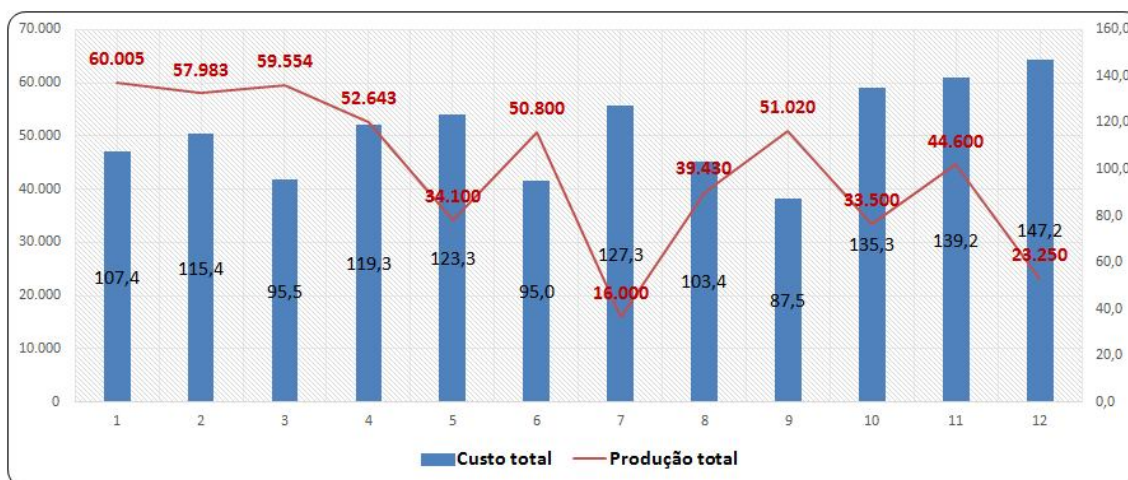


GRÁFICO 13 - Representação dos níveis de produção com o custo total associado

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar o GRAF. 13 é possível entender a principal razão da produção antecipada pelo modelo. Nos períodos onde ocorreram o menor nível de produção estava associado a eles um custo alto de energia elétrica, como por exemplo, nos períodos 7 e 12. Diante do período com maior custo associado, o período 12, o modelo definiu a estratégia de produzir exatamente o montante da demanda nos períodos 10 e 11 e manter o estoque acumulado nos períodos 8 e 9, conforme analisamos o GRAF. 11 e o GRAF. 13 juntos. Diante dos fatos, a premissa de não possuir estoque acumulado no último período, além de apoiar possibilidade de formar estoques anteriores e cumprir a demanda nos períodos com elevado custo, como foi mostrado, terá como propósito, ajudar a comparar a estratégia atual adotada pela empresa com o planejamento proposto pelo modelo.

Considerando a possibilidade de abafar ou desligar o forno no período de paradas com ociosidade, no cenário do modelo proposto é possível observar por meio do GRAF. 14, nos períodos 1, 2, 3 e 9, devido o tempo de parada ser menor que 72 horas, ocorreu-se a ação de abafamento do forno. Esse comportamento é apontado no GRAF. 14 onde a linha de cor verde indica o custo de acendimento ou abafamento. A linha azul tem como propósito indicar os níveis de ociosidade diante a tomadas de decisão e as barras indicam o nível de produção.

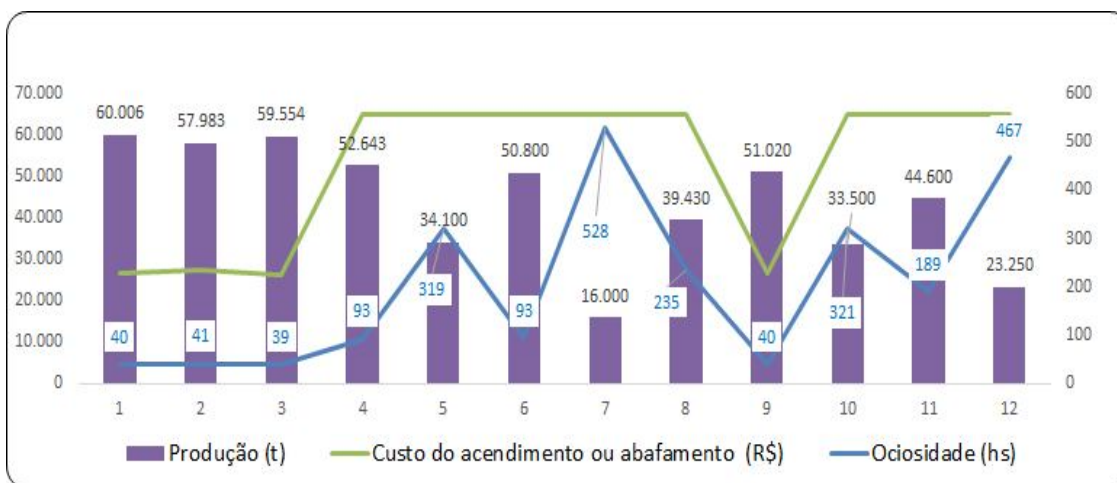


GRÁFICO 14 - Representação dos níveis de ociosidade e sua relação com o custo de acendimento diante dos níveis de produção no modelo proposto

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao analisar o GRAF. 14 é notável a decisão de apagar os fornos entre os períodos 4 e 8 e entre os períodos 10 e 12, visto que os níveis de ociosidade são maiores que 72 horas.

De modo a identificar os pós e os contras entre a estratégia adotada pela empresa e a proposta pelo modelo. Identificou-se a necessidade de refletir e apresentar informações conforme a seguir.

5.3 Análise comparativa dos planejamentos

De modo a representar uma análise comparativa entre o planejamento atual adotado e o modelo proposto, nos pontos de custo total de energia elétrica, custo de setup, custo de ociosidade e custo do consumo de energia elétrica em produção. Desenvolveu-se o GRAF. 15 conforme a seguir:

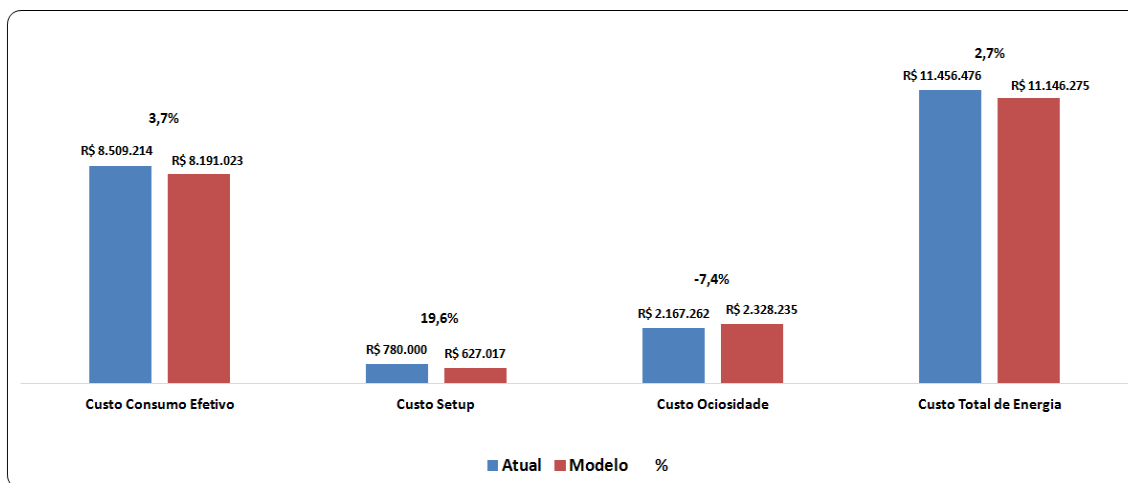


GRÁFICO 15 - Representação comparativa dos custos diante do planejamento atual e o proposto pelo modelo

Fonte: Elaborado pelo autor

Diante do GRAF. 15 acima, nota-se uma redução de 2,7 % no custo total energia. Sendo que de 3,7 % no custo do consumo efetivo de energia e 19,6 % do custo de setup. Porém, houve um acréscimo no custo da ociosidade pela variação do custo da energia ao longo dos períodos e da diferença dos tempos de ociosidade entre os cenários.

Para representar os níveis de ociosidade ao longo dos períodos entre o planejamento atual utilizado e o modelo proposto, segue o GRAF. 16:

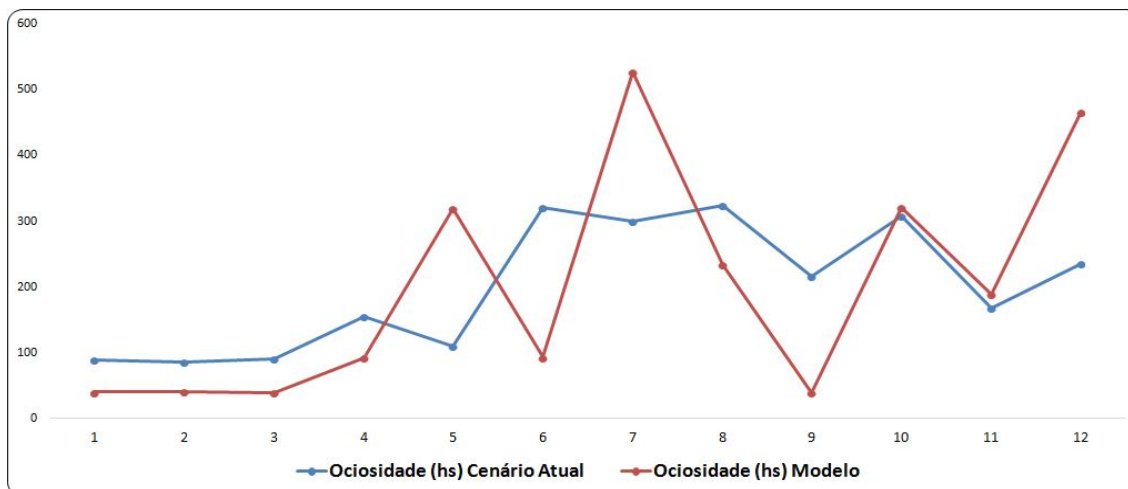


GRÁFICO 16 - Comparativo dos níveis de ociosidade ao longo dos períodos

Fonte: Elaborado pelo autor

Os níveis de ociosidade foram responsáveis pela decisão no setup dos fornos, tendo como ação abafar ou apagar os fornos. O modelo diante da possibilidade de produzir por antecipação, e assim, formar estoques, reduziu seu nível de ociosidade nos 4 primeiros períodos, reduzindo assim, seu tempo ocioso. Em contrapartida, diante dos elevados custos de produção, trabalhou seus níveis de produção seguintes de forma oscilante, conforme segue dos períodos 5 a 12.

O modelo proposto teve seus níveis de ociosidade menores que o modelo atual adotado em 7 períodos, em consequência o modelo atual teve 5 períodos de ociosidade. Mesmo possuindo um número menor de períodos em ociosidade, o modelo proposto em comparação do modelo atual, arcou com um custo de ociosidade de 7,4% a mais que o modelo atual aplicado.

Para representar as diferenças entre o consumo total de energia do modelo proposto e do atual aplicado, segue o GRAF. 17, onde apresenta a bridge do ganho do consumo de energia entre as duas abordagens.

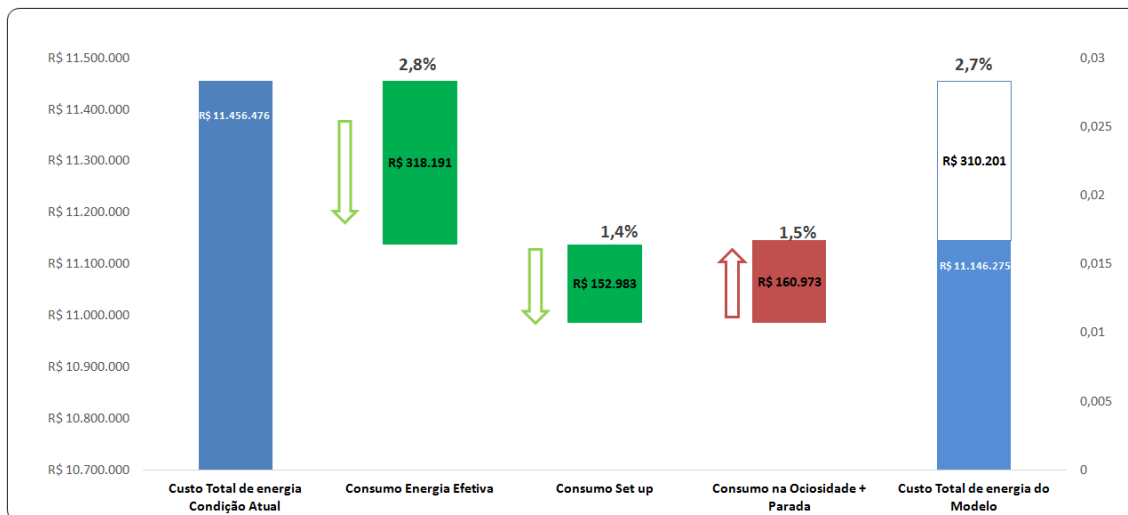


GRÁFICO 17 - Bridge do ganho no consumo total de energia

Fonte: Elaborado pelo autor

No GRAF. 17 as contribuições positivas se destacam em 2,8% no consumo da energia em produção efetiva e 1,4 % de ganho no setup. Já a contribuição negativa se destaca 1,5% consumo a mais na ociosidade. No geral, o modelo obteve um ganho de 2,7 % em comparação com atual proposto.

Considerando o grande esforço aplicado nos últimos meses com ações para redução de custos no processo, vislumbrar uma oportunidade de redução de 2,7 % no custo total de energia com mais esta ação de planejamento da produção, sem dúvida para a direção da empresa, torna-se uma grande expectativa aumentar a margem de contribuição.

De modo a comparar o planejamento atual aplicado e o planejamento proposto pelo modelo, tendo como foco a margem de contribuição o GRAF. 18 aborda as diferenças de valores e o valor total acumulado.

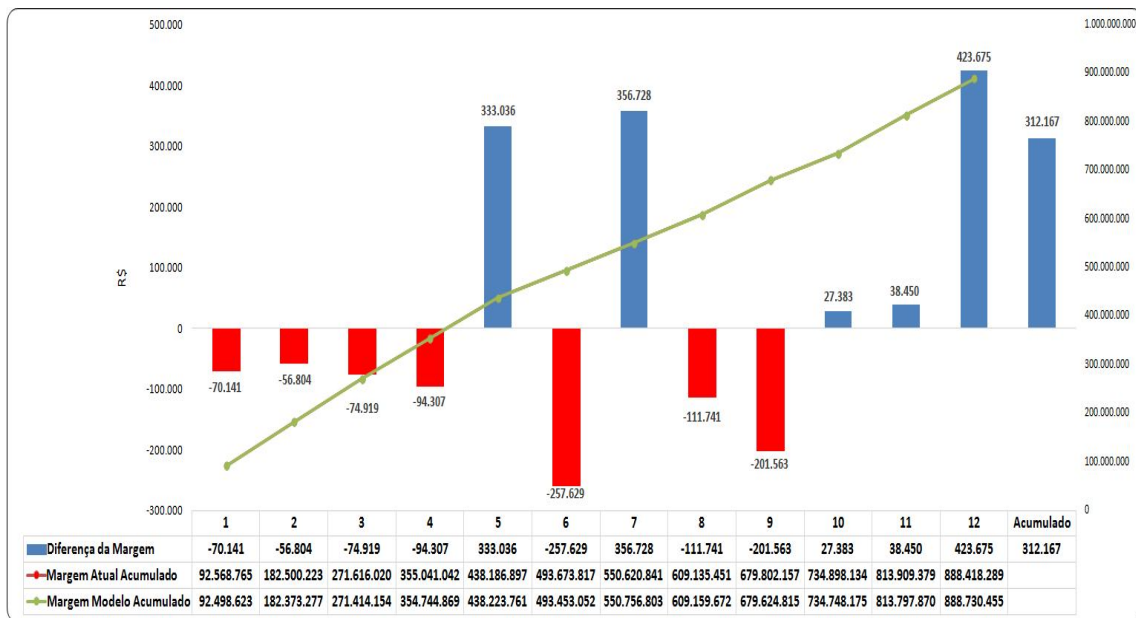


GRÁFICO 18 - Representação das margens de contribuição entre o modelo proposto e o planejamento atual

Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio do GRAF. 18 nota-se que o planejamento atual utilizado possui uma margem de contribuição melhor nos quatro primeiros períodos e nos períodos 6, 8 e 9. Tais valores estão associados à produção acima da demanda e ao custo de estocagem. Nos demais períodos, ocorrendo a utilização do estoque acumulado e a redução dos custos produtivos, a margem de contribuição do modelo assume valores positivos significativamente.

Na tabela do GRAF. 18, no período 12 podemos identificar a margem de contribuição final tanto do modelo atual utilizado, quanto o modelo proposto. Desta forma, é possível notar que o modelo proposto possui um ganho financeiro de R\$312.167,00 mil reais com relação ao atual proposto.

Por fim, o ganho destacado pelo modelo proposto se justifica pelo fato do planejamento de produção possuir o foco somente em energia elétrica. Tamanha variável é de grande importância para a empresa. Entretanto, existe a ciência que o modelo proposto pensa somente em uma variável de interferência ao processo produtivo. Cabendo assim a evoluir o modelo de modo chegar a um planejamento ainda mais condizente com o cenário real e suas interferências.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente analisando os procedimentos metodológicos aplicados e definidos ao estudo, pontua-se o indício da pesquisa ser também caracterizada como uma pesquisa descritiva uma vez que estabelece relações entre variáveis e as características de um processo. Contudo, teve-se uma análise influenciada indicatória ao planejamento de produção por meio da área de pesquisa operacional.

Todo estudo possibilitou uma análise de como um modelo de pesquisa operacional favorece o planejamento agregado de produção de chapas grossas, acerca da análise dos três tipos de custos básicos em uma usina, o custo fixo, e os custos variáveis e de estoque, ambos apontados pelos custos de energia elétrica. O objetivo é elevar o nível de lucratividade dentro de um horizonte de planejamento de médio e longo prazo.

A principal contribuição da monografia é exatamente considerar o ambiente real, a energia elétrica em um planejamento agregado de produção e aplicabilidade de dados reais ao modelo genérico proposto. Desta forma, a análise dos níveis de utilização dos processos, do consumo de energia elétrica, seja ela efetiva na produção ou em níveis de ociosidade, foi importante para entender os pontos comparativos entre o real utilizado e o proposto.

O modelo consegue visualizar as características operacionais dos produtos em todos os cenários e definir o melhor grupo de produtos no horizonte de planejamento. Ainda mais, considera o custo de energia elétrica como o pivô das decisões, além de variáveis como o estoque e o custo fixo por processo. Cabe ressaltar que o modelo, identifica a vantagem da capacidade de produção perante a ação de antecipar a demanda dos meses seguintes, assim, vindo a se beneficiar de não arcar com os custos elevados dos períodos seguintes.

Não se pode deixar de esclarecer que o modelo é de natureza genérica na aplicação em processos de laminação de um planejamento agregado de produção. Dada à importância do tema, torna-se necessário a evolução do mesmo em pesquisas e aprofundamento para obter maiores benefícios. Um exemplo de tal sustentação seria incorporar o custo variável de produção e não somente o custo de energia.

Um questionamento importante refere-se diante da formação de estoque ao longo dos períodos dado pelo modelo. A metodologia de trabalho *just in time* sugere uma redução de estoques. No entanto, o modelo foi contra esse posicionamento ao definir que diante do cenário, é mais lucrativo produzir para estoque alguns de seus produtos, assumindo assim, o custo de estocagem. A ação de confrontar os resultados da abordagem atual aplicada e o cenário proposto pelo modelo foi o ponto principal do estudo, vindo a enriquecer e entender a importância da variável de energia elétrica.

Considerando o aspecto prático na aplicação do modelo, é preciso dizer que no estudo não foi considerado a variação de preços do produto e custos que na realidade sofrem constantes alterações podendo variar em qualquer período, a depender de vários fatores de influência. Dessa forma, o modelo ainda precisa ser aperfeiçoado para condições de previsibilidade e para um plano de produção sensível às condições de variabilidades que podem influenciar estas flutuações de preços e custos.

Concluindo, a utilização do recurso didático no desenvolvimento do modelo, permitiu o planejamento agregado de produção de chapas grossas em uma usina de modo enriquecedor. Todo o trabalho motiva e sugere avançar na aplicação de métodos e técnicas de Pesquisa Operacional na otimização de processos e operações.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

AS'AD, Rami; DEMIRLI, Kudret (2010). **Production scheduling in steel rolling mills with demand substitution: Rolling horizon implementation and approximations**. Montreal, International Journal Production Economics 126 p.361–369.

CAMPOS, V. **A crise abalou a Siderurgia**. Disponível em < <http://www.cartacapital.com.br/revista/892/fornos-desativados>>. Acessado em 27 de novembro de 2016.

C.N. Redwine, D.A Wismer (1974), **A Mixed Integer Programming model for Scheduling Orders in a Steel**, Journal of Optimization Theory and Applications, vol.14, nº3.

DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. **Fundamentos da administração da produção**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **FIRJAN: Brasil é o 1º no Ranking de Custo mais Alto de Energia para a Indústria**. Disponível em: < <http://www.firjan.com.br/noticias/firjan-brasil-e-o-1-no-ranking-de-custo-mais-alto-de-energia-para-industria.htm>>. Acessado em 27 de novembro de 2016.

FINGERL, E. R. **Setor Siderúrgico no Brasil e no mundo**. BNDS - - área de operações industriais 2 - ao2 – gerência setorial de mineração e metalurgia. 1997. Disponível em <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/relato/sidcola.pdf> Acesso em 27 de novembro de 2016.

FROSSARD, A. C. P. **Programação linear: maximização de lucro e minimização de custos**. Revista Científica da Faculdade Lourenço Filho, São Paulo, v. 6, p. 19-48, 2009.

GURGEL, F. A. **Glossário de engenharia de produção**. São Paulo: Fundação Vanzolini, 2003.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

KAUARK, F.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa: guia prático**. Itabuna: Via Litterarum, 2010.

LOESCH, C.; HEIN, N. **Pesquisa operacional: fundamentos e modelos**. São Paulo: Saraiva, 2009.

MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MOREIRA, D. A. **Pesquisa operacional: curso introdutório**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

PASSOS, E. J. P. F. **Programação linear como instrumento da pesquisa operacional**. São Paulo: Atlas, 2008.

PEINADO, J; GRAEML, A. R. **Administração da produção: Operações industriais e de serviços**. Curitiba: UnicenP, 2007.

PRADO, D. S. **Programação Linear**. 5a ed. Belo Horizonte, MG: Editora Instituto de Desenvolvimento Gerencial TecS, 2007. v.1.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia de trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RITZMAN, L. P.; Krajewski, L. J. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

SILVA, E. M. et. al. **Pesquisa operacional: para os cursos de administração e engenharia**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

SILVA, E. M.; SILVA, E. M.; GONÇALVES, V.; MUROLO, A. C. **Pesquisa Operacional: programação linear**. 3 Ed. São Paulo: Atlas, 1998.

USIMINAS. **Catálogo de Especificação de Produtos Laminados a Quente da Usiminas**, 2014. Disponível em: <<http://usiminas.com/wp-content/uploads/2014/02/novo-laminados-frio-v20-baixa.pdf>> Acessado em 27 de novembro de 2016.

