

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

LEANDRO FERREIRA MACHADO

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA OTIMIZAR O CONSUMO DE
MATÉRIAS PRIMAS EM ALTOS-FORNOS**

Belo Horizonte
2016

LEANDRO FERREIRA MACHADO

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA OTIMIZAR O CONSUMO DE
MATÉRIAS PRIMAS EM ALTOS-FORNOS**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Otimização de Sistemas do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de especialista em Otimização de Sistemas

Área de concentração: Gestão Industrial

Orientador(a): Prof. Dr. Maurício de Souza Cardozo

Belo Horizonte
2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do ICEx - UFMG

Machado, Leandro Ferreira.

M672m Modelo de programação linear para otimizar o consumo de matérias-primas em altos-fornos. / Leandro Ferreira Machado. – Belo Horizonte, 2016.
x, 29 f.: il.; 29 cm.

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

Orientador: Mauricio Cardoso de Souza

1. Computação. 2. Programação linear 3. Otimização matemática. 4. Siderurgia. I. Orientador. II. Título.

CDU 519.6*61 (043)



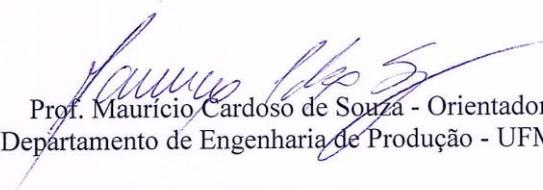
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

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

MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA OTIMIZAR O CONSUMO DE MATÉRIAS-PRIMAS EM ALTOS-FORNOS

Leandro Ferreira Machado

Monografia apresentada aos Senhores:


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


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


PROF. MARTIN GÓMEZ RAVETTI - Orientador
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um modelo de programação linear para apoiar a montagem de cargas para consumo em altos-fornos. Para montagem de uma carga, deve-se decidir a quantidade de cada tipo de matéria prima a ser enforcada. Esta decisão influencia fortemente o custo final e qualidade do produto, além de impactar na estabilidade e preservação do equipamento. O alto-forno abordado neste trabalho tem a possibilidade de consumo de diferentes tipos de matérias primas e sofre com o dinamismo na necessidade de alterações das misturas. Atualmente, estas alterações são baseadas na experiência dos técnicos responsáveis.

Para a formulação do modelo de montagem de cargas, primeiramente foi realizada a contextualização do problema para o alto-forno em questão. Após esta etapa, foi iniciada a modelagem matemática do problema utilizando a programação linear, sendo a função objetivo minimizar o custo do produto. Foram definidas restrições tanto tecnológicas, quanto comerciais. As restrições tecnológicas foram relacionadas ao subproduto gerado, a escória, e ao produto, o gusa. As restrições comerciais foram definidas com base nas disponibilidades e qualidade de cada tipo de matéria prima.

Em um segundo momento, foi realizada a implementação do modelo de otimização proposto. Os resultados computacionais indicaram que tal modelo possui boa aderência ao modelo atual, com possibilidade de redução de custo do produto através das soluções ótimas geradas. Por fim, o modelo foi aplicado em simulações envolvendo situações reais de processo, mostrando ser ágil na análise de vários cenários antes de uma tomada de decisão.

Palavras-chave: Programação Linear; Alto-Forno; Minimização de Custos; Programação por Metas

ABSTRACT

The aim of this study was to develop a linear programming model to support the assembly of burden for consumption in blast furnaces. For mounting a blast furnace burden must decide the amount of each type of raw material to be put into the furnace. This decision strongly influences the final cost and product quality, as well as impact on the stability and preservation of the equipment. The blast furnace addressed in this work is the possibility of consumption of different types of raw materials and suffers from the dynamism in the need for changes in mixtures. Currently, these changes are based on the experience of the technician.

For the formulation of the burden assembly model, it was first performed contextualization of the problem for the blast furnace in question. After this step, the mathematical modeling of the problem was initiated using linear programming with an objective function is to minimize the cost of the product. Both technological and commercial restrictions have been set. Technological constraints were related to the generated byproduct, slag, and the product, the pig iron. Commercial restrictions, defined based on the availability and quality of each type of raw material.

In a second moment, the implementation of the proposed optimization model was performed. The computational results indicated that such a model has good adherence to the current model, with the possibility of reducing the cost of the product through the optimum solutions generated. Finally, the model was applied in simulations involving real process situations, showing to be agile in the analysis of several scenarios before a decision making.

Keywords: Linear Programming; Blast Furnace; Minimizing Costs; Goal Programming

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma básico de uma usina integrada a coque.....	6
Figura 2 - Esquema indicando as regiões componentes do corpo do alto-forno.....	7
Figura 3 - Fluxograma básico de desenvolvimento do modelo de otimização	11
Figura 4 - Planilha de resultados do cálculo de carga do alto-forno.	18
Figura 5 - Arquivo de saída do modelo utilizando o GLPK.....	19
Figura 6 - Resultados da necessidade de consumo de minérios com base em contratos	23
Figura 7 - Análise de sensibilidade para a quantidade de escória de 320 kg/t	24
Figura 8 - Análise de sensibilidade para o volume de escória de 350 kg/t.....	24
Figura 9 - Gráfico de correlação entre o custo do gusa e slag rate.....	25
Figura 10 - Gráfico de correlação entre o custo do gusa e teor de fósforo.....	26
Figura 11 - Gráfico de correlação entre o custo do gusa e teor de manganês	27

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Leitões de fusão de um alto-forno com diferentes cargas metálicas.....	8
TABELA 2 - Parâmetros da matéria prima	17
TABELA 3 - Índices do alto-forno.....	18
TABELA 4 - Saída do modelo de otimização: Função objetivo e restrições.....	20
TABELA 5 - Saída do modelo de otimização: Carga metálica após otimização.....	20
TABELA 6 - Comparativo entre o modelo atual e o de otimização	21
TABELA 7 - Comparativo da carga metálica entre o modelo atual e o de otimização	21
TABELA 8 - Impacto da falta de determinado tipo de minério	22
TABELA 9 - Resultado sem limite de disponibilidade de granulados.....	22
TABELA 10 - Resultado sem limite de disponibilidade de granulados e restringindo o P	22

LÍSTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

Σ - Auto soma
PL - Programação Linear
 T_{Fe} - Teor de Ferro
LTQ - Laminação de Tiras a Quente
LCG - Laminação de Chapas Grossas
 SiO_2 - Sílica
CaO - Óxido de Cálcio
MgO - Óxido de Magnésio
 Al_2O_3 - Alumina
P - Fósforo
Mn - Manganês
Si - Silício
S - Enxofre
PCI - Pulverized Coal Injection
B2 - Basicidade Binária
SR - Slag Rate

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1	PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO EM PROCESSOS SIDERÚRGICOS	2
2.2	TÉCNICAS UTILIZADAS NO PROBLEMA DA MISTURA	2
2.2.1	<i>Pesquisa operacional e modelagem de problemas de otimização</i>	<i>2</i>
2.2.2	<i>Programação Linear</i>	<i>3</i>
2.2.3	<i>Programação por Metas.....</i>	<i>4</i>
3	DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DE UMA SIDERÚRGICA.....	5
3.1	RESUMO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO	5
3.2	ALTO-FORNO	6
3.2.1	<i>Matérias primas e carregamento</i>	<i>6</i>
3.2.2	<i>Composição da carga do alto-forno.....</i>	<i>7</i>
3.2.3	<i>Características de operação</i>	<i>9</i>
3.2.4	<i>Cálculo do leito de fusão</i>	<i>9</i>
4	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	11
4.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	11
4.2	DECISÕES E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	11
4.3	MODELAGEM DO PROBLEMA	12
4.3.1	<i>Variável de Decisão.....</i>	<i>12</i>
4.3.2	<i>Parâmetros</i>	<i>12</i>
4.3.3	<i>Função Objetivo</i>	<i>14</i>
4.3.4	<i>Restrições</i>	<i>14</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
5.1	VALIDAÇÃO DO MODELO	17
5.2	APLICAÇÃO DO MODELO EM DIFERENTES SITUAÇÕES	21
5.2.1	<i>Impacto de variações na disponibilidade de minérios</i>	<i>21</i>
5.2.2	<i>Impacto de alterações no limite de geração específica de escória.</i>	<i>24</i>
5.2.3	<i>Redução do teor de fósforo utilizando pelota.....</i>	<i>25</i>
5.2.4	<i>Avaliação da redução do manganês no gusa</i>	<i>26</i>
6	CONCLUSÃO.....	28
7	BIBLIOGRAFIA	29

1 INTRODUÇÃO

O algoritmo Simplex para programação linear tem sido considerado um dos algoritmos de grande aplicação no século XX. Seu impacto desde 1950 tem sido extraordinário. Hoje em dia é uma ferramenta-padrão que poupou muitos milhares ou milhões de dólares para muitas empresas ou até mesmo negócios de tamanho moderado em diversos países industrializados ao redor do mundo; e seu emprego em outros setores da sociedade se espalhou rapidamente. A maior parte de toda a computação científica realizada em computadores é dedicada ao uso da programação linear.

A utilização da programação linear na siderurgia tem passado por grandes avanços, diante da necessidade de auxílio em decisões cada vez mais complexas em um mercado extremamente competitivo. Estas decisões, em sua maioria, se relacionam fortemente com o lucro e participação de mercado das empresas.

Uma parcela significativa dos custos na siderurgia está relacionada à aquisição e consumo de matérias primas. Este processo é de vital importância, principalmente quando se trata do minério de ferro. Atualmente a siderurgia brasileira conta com uma grande variedade de tipos de minérios, tornando-se complexo determinar a mistura ótima de consumo através de técnicas tradicionais de montagem de cargas. Diante deste contexto, o algoritmo simplex para programação linear tem se mostrado de grande aplicação em problemas de misturas na siderurgia.

Este trabalho apresenta a aplicação da programação linear na montagem de cargas de um alto-forno. Essa montagem vem sendo feita a base da experiência pessoal seguindo processo de tentativa e erro com apoio de planilhas e programas tradicionais de cálculos de carga.

Na primeira etapa do trabalho, é conduzida uma revisão bibliográfica em torno de alguns conceitos relativos à Programação Linear. São abordados alguns fundamentos sobre a técnica, bem como alguns trabalhos de otimização linear na área siderúrgica encontrados na literatura. Em um segundo momento, é descrito o processo de produção de uma usina siderúrgica, com um detalhamento mais específico a área de altos-fornos, foco do trabalho.

Na seção seguinte é apresentada a formulação do problema de otimização desenvolvido, juntamente com as restrições envolvidas no problema.

No tópico de resultados e discussões, são apresentados os resultados obtidos nos testes após implementação do modelo no *software* GLPK. A validação do modelo é demonstrada através de um comparativo de resultados com o método atual. Simulações de diferentes cenários envolvendo custo, qualidade e processo são realizados com o intuito de demonstrar a eficácia do modelo no apoio à tomada de decisão.

Finalmente são apresentadas as conclusões e uma breve discussão sobre as futuras extensões deste trabalho.

Os objetivos deste trabalho resumem-se a:

- Desenvolver um modelo de programação linear para apoiar a montagem de cargas no alto-forno, complementando o método tradicional.
- Determinar entre os diversos tipos de minérios, uma mistura que atenda às necessidades operacionais dos altos-fornos e aciarias e que, paralelamente, minimize o custo do gusa.
- Servir como subsídio para orientação da administração nas decisões relacionadas à programação e compras de matérias primas.
- Pesquisar diversas misturas variando os parâmetros do processo e sugerindo alternativas mais econômicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Procura-se neste tópico dar uma visão geral dos problemas de otimização de matérias primas na siderurgia e das técnicas utilizadas. Por fim, será abordado o processo de produção dos altos-fornos e sua forma de alimentação.

2.1 Problemas de otimização em processos siderúrgicos

Segunda DESTRO et al.¹ (2009 apud SILVA et al., 2011), em uma indústria de transformação, como a siderurgia, existem problemas de otimização dos processos produtivos, entre eles destacam-se os relacionados ao transporte dos produtos, corte e embalagem, as alocações de recursos, o problema da mistura de matérias-primas, entre outros. A aquisição de matérias primas é uma etapa fundamental em termos de estratégia do negócio. Para a siderurgia brasileira, este processo é de vital importância, principalmente quando se trata do minério de ferro, matéria-prima responsável por uma parcela altamente significativa dos custos de produção do aço.

A definição dos melhores minérios e respectivas quantidades para abastecimento de uma empresa siderúrgica é um problema semi-estruturado, que apresenta uma certa complexidade por envolver um grande número de variáveis, muitas funções interdependentes, decisões conflitantes e vultuosos recursos financeiros.

2.2 Técnicas Utilizadas no Problema da Mistura

A seguir faremos pequenos comentários, a partir dos autores, a respeito de técnicas utilizadas para o problema da mistura. A estes serão acrescentados outros oriundos de artigos pesquisados.

2.2.1 Pesquisa operacional e modelagem de problemas de otimização

A Pesquisa Operacional é uma metodologia quantitativa de engenharia que modela a estrutura do problema gerencial a ser resolvido. Definido um critério para a avaliação de diferentes alternativas de solução, são desenvolvidos métodos quantitativos de otimização para encontrar a melhor solução segundo o critério.

A pesquisa operacional é uma abordagem científica para a solução de problemas de natureza executiva, sejam eles estratégicos, táticos ou operacionais. Esta técnica se caracteriza em três aspectos, a ênfase na tomada de decisão, construção de um modelo matemático representando o problema real e desenvolvimento de métodos quantitativos de otimização.

O processo de análise quantitativa na aplicação da Pesquisa Operacional tem foco na tomada de decisão e seguem as seguintes etapas: (1) Conhecimento e definição do problema, (2) Identificação de sobre o quê devem ser tomadas decisões, (3) Definição do critério de avaliação para as diversas alternativas de soluções possíveis, (4) Construção de um modelo matemático que descreva o problema, (5) Desenvolvimento de métodos de otimização. (WAGNER, 1975)

Existem inúmeros exemplos de modelos matemáticos para resolução de problemas na pesquisa operacional. Conforme Hillier, F. e Lieberman, G. (2005, p. 12-13) um tipo particularmente importante é o modelo de programação linear, em que as funções

¹ DESTRO, E.; ASSIS, P. S.; SILVA, G. L. R.; CARIAS, R. D. A.; OLIVEIRA, F. O. M. Operacional Research to Optimize the Iron Raw Materials for Blast Furnace Burden. In: 5th INTERNATIONAL CONGRESS ON THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF IRONMAKING, October 19-23, 2009, Shangai.

matemáticas lineares aparecem tanto na função objetivo quanto nas restrições. Existem modelos de programação linear específicos para atender a problemas bem diversos como: (1) um conjunto de produtos que maximiza o lucro, (2) distribuição eficiente de recursos limitados, maximizando os lucros e/ou minimizando os custos, (3) definição de misturas de matérias primas a ser consumida, minimizando o custo do produto e (4) produção de ligas metálicas misturando várias matérias primas obedecendo às restrições mínimas e máximas dos respectivos elementos presentes na liga. Os modelos matemáticos apresentam muitas vantagens em relação a uma descrição verbal do problema. Uma delas é que o modelo matemático descreve um problema de forma muito mais concisa. Isso tende a tornar mais compreensível a estrutura geral do problema e ajuda a revelar importantes relacionamentos causa-efeito. Desse modo, ele indica mais claramente quais dados adicionais são relevantes para a análise. Também facilita o tratamento do problema como um todo, considerando todos os seus inter-relacionamentos de forma simultânea. Finalmente, um modelo matemático é uma ligação para o emprego de técnicas matemáticas e computadores potentes para analisar o problema. De fato, pacotes de software tanto para PCs como para mainframes podem ser encontrados em abundância para solucionar muitos modelos matemáticos.

2.2.2 Programação Linear

A programação linear usa um modelo matemático para descrever um problema em questão. O adjetivo linear significa que todas as funções matemáticas nesse modelo são necessariamente funções lineares. A palavra programação, nesse caso, não se refere à programação de computador; ela é, essencialmente, um sinônimo para planejamento.

Portanto, a programação linear envolve o planejamento de atividades para obter um resultado ótimo, isto é, um resultado que atinja o melhor objetivo especificado (de acordo com o modelo matemático) entre todas as alternativas viáveis.

Embora a alocação de recursos para atividades seja o tipo de aplicação mais comum, a programação linear também tem inúmeras outras aplicações importantes. De fato, qualquer problema cujo modelo matemático se encaixe no formato bem genérico para o modelo de programação linear é um problema de programação linear. (Por essa razão, os problemas de programação linear e seus modelos normalmente são conhecidos de forma intercambiável como simplesmente programas lineares).

Além disso, um procedimento de solução extraordinariamente eficiente, chamado método simplex, se encontra disponível para solucionar até mesmo problemas de programação linear de enormes dimensões. Essas são algumas das razões para o tremendo impacto da programação linear em décadas recentes. (HILLIER, F.; LIEBERMAN, G., 2005, p. 25-26)

Existem duas formas diferentes de apresentar o modelo, conforme se pretenda maximizar ou minimizar, que são as seguintes:

$$\text{Maximizar (Minimizar) } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (1.1)$$

Sujeito a

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

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

(1.2)

...

$$\begin{aligned} & \dots \\ & a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \quad \{ \leq, =, \geq \} \quad b_m \\ & x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \end{aligned} \tag{1.3}$$

onde,

a_{ij} ($i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$) \rightarrow coeficientes técnicos ou tecnológicos,

$b_1, b_2, \dots, b_m \rightarrow$ termos independentes (constantes de restrição ou segundos membros),

$c_1, c_2, \dots, c_n \rightarrow$ coeficientes da função objectivo (coeficientes de custo),

$x_1, x_2, \dots, x_n \rightarrow$ variáveis de decisão (principais ou controláveis),

(1.1) \rightarrow função objectivo (económica ou critério),

(1.2) \rightarrow restrições (restrições funcionais), em que apenas se verifica uma das relações,

(1.3) \rightarrow condições de não negatividade.

A técnica de programação linear na otimização de cargas para altos-fornos é bem exemplificada no artigo de Wu S., Han, H. e Lix X. (2009). Os autores apresentam um modelo de otimização de cargas construído de acordo com a teoria da programação linear com aplicação no processo de produção do gusa. Considerações são feitas a respeito dos requisitos básicos do modelo, destacando a necessidade de garantir à qualidade do produto, a partir de matérias primas com propriedades químicas e metalúrgicas que estão em conformidade com as exigências tecnológicas do processo. Outro ponto mostrado pelos autores, diz a respeito da aplicação do modelo, onde não só o custo da carga pode ser reduzido, como também a qualidade das matérias primas pode ser assegurada. Por fim, os resultados alcançados neste artigo indicam que o modelo é razoável, ou seja, com a utilização da carga definida pela otimização, o custo do gusa pode ser reduzido e os índices técnicos e econômicos podem ser melhorados.

CAO et al. (2012) apresentam um modelo matemático para otimização de cargas em altos-fornos. O modelo desenvolvido tem como objetivo minimizar o custo do gusa considerando a basicidade binária (CaO/SiO₂) da escória do alto-forno, a composição do sinter e restrições tecnológicas do processo. Para solução deste modelo foi utilizada a técnica de algoritmo genético, porém a partir de sua idéia básica, o modelo poderia ser adaptado a técnica de programação linear. Neste artigo, os resultados do modelo se mostraram efetivos, reduzindo o custo do gusa e garantindo as propriedades necessárias do sinter e da escória.

2.2.3 Programação por Metas

A Programação Linear assume que as restrições não podem ser violadas e, geralmente, está condicionada à solução de um único objetivo. Entretanto, inúmeros problemas no mundo real exigem que boa parte das decisões do dia a dia das empresas seja flexível e estão relacionadas com objetivos diversos, que têm que ser atendidos simultaneamente. Assim, segundo Bueno A. e Oliveira M. (2004, p. 394-438), a Programação Linear por Metas, ou Goal Programming, surge como técnica de pesquisa operacional que permite a modelagem e busca de soluções para problemas com múltiplos objetivos ou metas. Desse modo, pode-se caracterizar a programação linear por metas como uma extensão da programação linear que permite a resolução de problemas com múltiplas metas. (COSTA, 2005)

Estes modelos tentam reconhecer o ambiente corrente dos negócios. Gerentes de produção têm que lidar com uma multiplicidade de metas e objetivos que irão influenciar em decisões. Metas de produção, minimização dos custos de estoques, a maximização do faturamento e a utilização da capacidade são considerados como importantes objetivos para o gerenciamento. (LEE e ORR, 1977).

A concepção básica da Programação por Metas requer a incorporação de todos os objetivos gerenciais e as restrições no modelo. A função objetivo para o modelo de Programação por Metas inclui somente as variáveis que têm intervalo de desvio e as restrições medem o cumprimento das metas gerenciais (LEE, 1972).

Tal como a PL a Programação por Metas sofre as mesmas críticas e ressalvas relativas à premissa de linearidade dos custos. A sua grande vantagem vem do fato do corpo gerencial incorporar seus objetivos na formulação e na identificação dos recursos necessários para atingi-los.

3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DE UMA SIDERÚRGICA

Para um melhor entendimento do problema, será feito um resumo do processo de produção de uma usina siderúrgica. Posteriormente será detalhada mais especificamente a área de altos-fornos, considerando um resumo sobre a forma de operação do equipamento e matérias primas utilizadas no processo produtivo.

3.1 Resumo do processo de produção

Segundo JUNIOR (2009), as usinas siderúrgicas podem ser integradas, quando partem do minério de ferro como sua principal fonte metálica, ou semi-integradas, quando a fonte metálica é sucata de aço ou gusa sólido adquirido de terceiros. Elas têm em sua planta áreas distintas com regras de produção totalmente diversas. Quando a mesma é integrada, ela se compõe de quatro grandes áreas: redução, aciaria, laminação a quente e laminação a frio. A semi-integrada não possui a área de redução.

A área de redução é a responsável pela transformação do minério de ferro em gusa, principal matéria prima para a aciaria. O equipamento mais importante desta área é o alto-forno, que trabalha em regime contínuo. O ideal é que, feitos os ajustes do mesmo em função das matérias primas, este fique o máximo de tempo possível em operação, mantendo constantes os seus parâmetros operacionais. Tem um fluxo uniforme e o seu produto é o ferro gusa. Este é uma mistura de Ferro e Carbono, com baixos teores de outros elementos presentes nas matérias primas, é transportado na forma líquida para processamento na aciaria.

Na aciaria o ferro gusa é transformado em aço que é uma mistura de Ferro-Carbono com um máximo de 2,11% de Carbono. Assim como na redução, esta área também opera com o metal líquido que é solidificado em sua última fase de produção. No caso da siderúrgica estudada, o aço líquido é solidificado através do processo de lingotamento contínuo e transformado em placas.

O próximo processo é a laminação a quente. Nesta fase é feita a conformação mecânica a quente da placa. Esta fase fornece matéria prima para as laminações a frio e produtos para vendas. O grande desafio desta área é a produção de todas as famílias de aços e a necessidade de sincronismo com a aciaria na produção de algumas famílias que não podem se resfriar antes da laminação.

A laminação a frio, etapa final do processo, faz a conformação mecânica a frio das bobinas laminadas a quente. Nesta fase, o material atinge a espessura e as características mecânicas solicitadas pelo cliente. Como complementação da laminação a frio, têm-se áreas de acabamento que fazem cortes das bobinas laminadas a frio em chapas, blank's e tiras.

O fluxograma atual da usina está sintetizado na Figura 1.

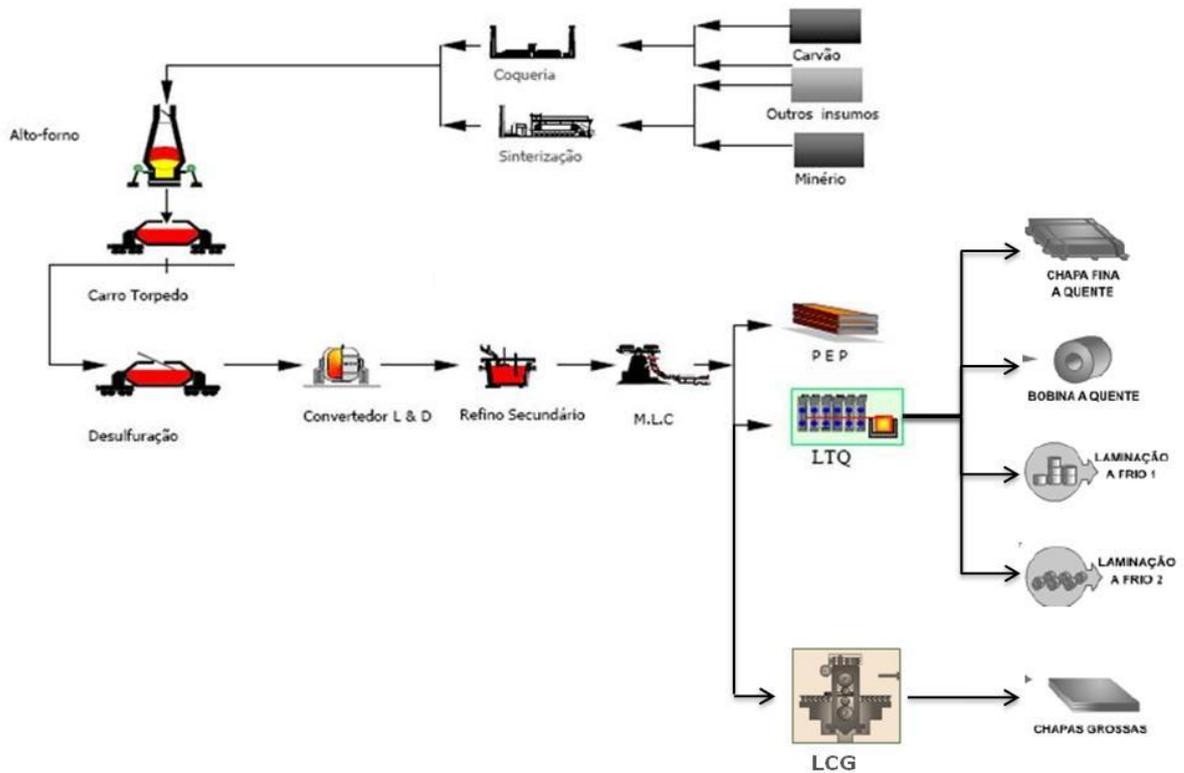


Figura 1 - Fluxograma básico de uma usina integrada a coque

3.2 Alto-Forno

No tópico anterior foi discutida as etapas de produção de uma usina siderúrgica integrada. Neste item será detalhado o processo de produção em altos-fornos e sua estrutura de carregamento, as características de operação deste reator e por fim, o método de cálculo de carga. Estes tópicos irão servir como base para o desenvolvimento do modelo.

3.2.1 Matérias primas e carregamento

O alto-forno atualmente é o principal equipamento para produção de ferro primário (ferro-gusa) no mundo, responsável por cerca de 60% do aço produzido mundialmente. Usam-se como matérias-primas uma carga metálica (minério de ferro, pelota e sinter), combustível (coque ou carvão vegetal) e fundentes (Calcário, Dolomita e Quartzo), variando de acordo com o alto-forno e a própria matéria-prima. Eventualmente alguns altos-fornos prescindem do uso de fundentes, usando para isto carga metálica aglomerada auto-fundente. A redução do óxido de ferro se processa à medida que as matérias-primas descem em contracorrente em relação aos gases, provenientes da queima do carbono com o oxigênio do ar aquecido soprado pelas ventaneiras. Os produtos formados pela interação e reações entre gases e matérias-primas são escória, ferro-gusa, gases, poeira e lama.

O corpo físico do alto-forno é dividido basicamente nas seguintes partes: goela, cuba, ventre, rampa e cadinho, como mostrado na Figura 2.

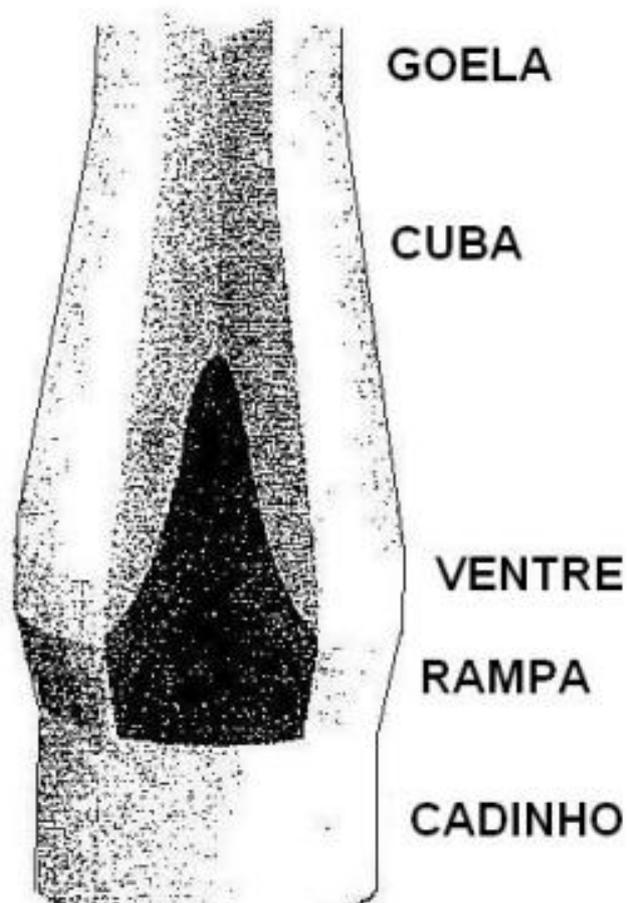


Figura 2 - Esquema indicando as regiões componentes do corpo do alto-forno.

3.2.2 Composição da carga do alto-forno

A carga do alto-forno é composta pelos seguintes constituintes:

- Carga metálica
- Fundentes
- Combustíveis

3.2.2.1 Carga metálica

É aquela composta de materiais de alto teor em ferro. Os materiais normalmente utilizados são:

- Minério de ferro granulado ($T_{Fe} = 64 \%$)
- Pelota ácida ($T_{Fe} = 65 \%$)
- Sínter auto-fundente ($T_{Fe} = 58 \%$).

A participação de cada um destes materiais na carga do forno depende dos parâmetros operacionais, dimensões do forno, disponibilidade, quantidade e custo do produto final. Em termos de qualidade do gusa e escória, as matérias primas devem possuir características que permitam obter um volume de escória necessário para manter o equilíbrio do forno e uma composição química que possa eliminar as principais impurezas introduzidas pelas matérias-primas, como enxofre e álcalis.

3.2.2.2 Fundentes

São os tipos de materiais ácidos ou básicos utilizados para controle da basicidade da escória e, por conseguinte, da capacidade de dessulfuração da escória e também para eliminar outras impurezas que acompanham a carga metálica e o combustível.

Os tipos principais são o quartzo ($\text{SiO}_2 = 98\%$) e o calcário ($\text{CaO} = 54\%$).

3.2.2.3 Combustíveis

Os combustíveis sólidos tradicionais são o carvão vegetal, normalmente usado em altos-fornos de pequeno porte (volume interno $< 400\text{m}^3$) e o coque metalúrgico, utilizado em altos-fornos de maior porte, que além de fornecedor do gás redutor e calor, tem como finalidade sustentar a coluna de carga e manter a permeabilidade da carga na zona de amolecimento e fusão (zona coesiva).

Visando facilitar a dinâmica de composição da carga metálica, apresentam-se na Tabela 1 três leitões de fusão, onde são mostrados os aspectos técnico-operacionais de um alto-forno operado com 100% de sinter auto-fundente, pelota ácida e minério granulado.

TABELA 1 - Leitões de fusão de um alto-forno com diferentes cargas metálicas

CARGA ITENS	SÍNTER	PELOTA		MINÉRIO			
		SEM CORREÇÃO	COM CORREÇÃO	SEM CORREÇÃO	COM CORREÇÃO		
Sínter (Kg/t)	1.642	-	-	-	-		
Pelota	-	1.455	1.452	-	-		
Minério	-	-	-	1.478	1.472		
Quartzo	7	-	20	-	33		
Calcário	-	75	155	82	215		
Dunito	-	-	30	-	50		
Coke-rate	490	487	528	477	547		
Slag-rate	333	183	275	126	278		
Al ₂ O ₃	10,57	13,38	9,79	28,20	14,17		
MgO	6,69	3,78	6,33	1,04	6,75		
P	0,096	0,069	0,075	0,160	0,171		
Mn	0,68	0,09	0,15	0,08	0,19		
ANÁLISE QUÍMICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS							
MATERIAL	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Mn	P
Sínter	57,62	5,40	9,07	1,32	1,25	0,52	0,051
Pelota	65,00	2,80	2,74	0,39	0,68	0,05	0,035
Minério	64,00	0,90	-	-	1,43	0,04	0,100
Quartzo	0,89	96,41	0,52	0,29	0,76	-	0,012
Calcário	0,25	0,91	54,26	0,90	0,11	0,48	0,054
Dunito	5,88	38,85	3,06	32,20	3,11	1,44	0,028

3.2.3 Características de operação

3.2.3.1 Transformação da carga no alto-forno

O alto-forno é um trocador à contra-corrente. Uma corrente descendente de material frio e oxidado (sinter e minério de ferro) é aquecida e reduz ao contato de uma corrente ascendente de gás redutor quente. Os materiais oxidados (Fe_2O_3) geram um produto reduzido: o gusa. O gás redutor ($\text{CO} + \text{H}_2$) gera o gás do topo parcialmente oxidado em $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

O gás de rampa de alta temperatura, produzido na zona de combustão (região das ventaneiras), provoca o aquecimento da carga, reações de decomposição e redução dos óxidos durante sua elevação no alto-forno.

Resulta que a temperatura do gás diminui gradativamente, ao mesmo tempo que sua composição química se altera. Primeiramente, a carga sofre a evaporação da umidade e o pré-aquecimento nas proximidades do nível de carga. A medida que a carga desce, ocorre a redução dos óxidos de ferro.

Na zona de amolecimento e fusão, na região da cuba inferior e ventre, iniciam-se o amolecimento e a fusão da carga, que se desenvolvem até atingir o cadinho.

O gusa e a escória armazenados no cadinho são retirados pelos furos de corrida, em intervalos de tempo controlados.

Na região das ventaneiras, o coque à medida que vai sendo queimado, diminui de tamanho gradativamente. Em conjunto com a fusão dos materiais que compõem a carga, provoca um abaixamento do nível da mesma no interior do alto-forno, havendo então a necessidade de um novo carregamento no topo.

3.2.3.2 Corridas de gusa e de escória

O gusa e a escória produzidos no interior do alto-forno são armazenados no cadinho. Do interior do cadinho, o gusa e a escória vazam pelo furo de corrida para canais de corrida, dispostos de forma a atender os respectivos furos de corrida de cada alto-forno. Este mecanismo é denominado de corrida de alto-forno.

No canal principal, ocorre a separação do gusa e da escória pela diferença de densidade. Através de canais secundários, o gusa é direcionado para o carro torpedo e a escória para o sistema de granulação de escória. O gusa carregado no carro torpedo é enviado para a aciaria. A granulação de escória consiste em verter a escória líquida sobre um jato de água, proporcionando a granulação e o resfriamento da mesma.

3.2.4 Cálculo do leito de fusão

(1) Condições básicas

Para o cálculo do leito de fusão, há necessidade de se conhecer as análises químicas dos materiais que irão compor a carga, inclusive a do coque e a qualidade do gusa que se deseja obter.

Além disso, de acordo com experiências anteriores, há necessidade de levar em conta os rendimentos de cada elemento dos materiais carregados, bem como a basicidade visada para a escória. De acordo com os resultados obtidos, estabeleceram-se os seguintes rendimentos para cada elemento componente de cada material carregado, como:

- T_{Fe} (sinter, minério, pelota, fundentes e coque) toma-se 99% supondo que 0,5% sai na escória e 0,5% sai no pó.

- Produção de gusa: $T_{Fe} \times \frac{0,99}{0,94} = T_{Fe} \times 1,0532$
- SiO_2 para formar o Si do gusa = $Si \text{ gusa} \times \frac{SiO_2}{Si} \times \% \text{ gusa} = A$

(2) Elementos que vão formar a escória

a) SiO_2 para escória = SiO_2 (matérias-primas) - SiO_2 para incorporar o Si do gusa = $SiO_2 - A = B$

b) FeO para escória = 0,5% de T_{Fe} carregado $\times \frac{FeO}{Fe} = 0,5\% \text{ de } T_{Fe} \times 1,286$

c) TiO_2 para escória = 75% do TiO_2 carregado

d) P_2O_5 para escória = 10% do P carregado $\times \frac{P_2O_5}{P_2} = 10\% \text{ do P} \times 2,29$

e) $CaO + Al_2O_3 + MgO = 100\%$ para a escória

f) MnO para escória = 20% do Mn carregado $\times \frac{MnO}{Mn} = 20\% \text{ do Mn} \times 1,29$

g) S para escória = 80% do S carregado

As, Cu, Ni e Sn = 100% do carregado vai para o gusa; Zn, Pb e Sb = 95% volatizam.

Escória produzida = \sum dos itens de (a) a (g)

(3) Método de cálculo

O cálculo da carga é feito toda vez que houver alteração do T_{Fe} do sinter ou na sua basicidade, ou mesmo na cinza do coque, a fim de controlar termicamente o forno e manter a basicidade da escória dentro de uma faixa pré-estabelecida e a mais constante possível, para que se tenha uma dessulfuração eficiente. O cálculo também é feito quando há necessidade de alterar a relação minério/coque (elevação ou redução do PCI, controle térmico ou de marcha).

Para efeito de cálculo o alto-forno abordado utiliza os resultados das análises químicas dos materiais recebidos (minério granulado, pelota e quartzo). Para o coque, toma-se uma análise média da cinza do coque produzido com uma mistura padrão de carvões e transforma-se este resultado para o coque de um teor de cinza conhecido. No caso do sinter, as análises são enviadas diretamente (on-line) para os terminais dos altos-fornos. Desta forma, o cálculo de carga é efetuado com o auxílio de programas disponíveis nos terminais de controle dos altos-fornos, baseado na metodologia descrita anteriormente.

4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

4.1 Apresentação do Problema

Para um melhor entendimento do problema serão apresentados a seguir detalhes da complexidade da montagem de cargas no alto-forno, no que se refere aos tipos de matérias primas consumidas, às restrições tecnológicas e comerciais, ao tratamento e atendimento das necessidades de consumo e aos horizontes de planejamento. A Figura 2 apresenta o fluxograma básico utilizado para o desenvolvimento do modelo de otimização.

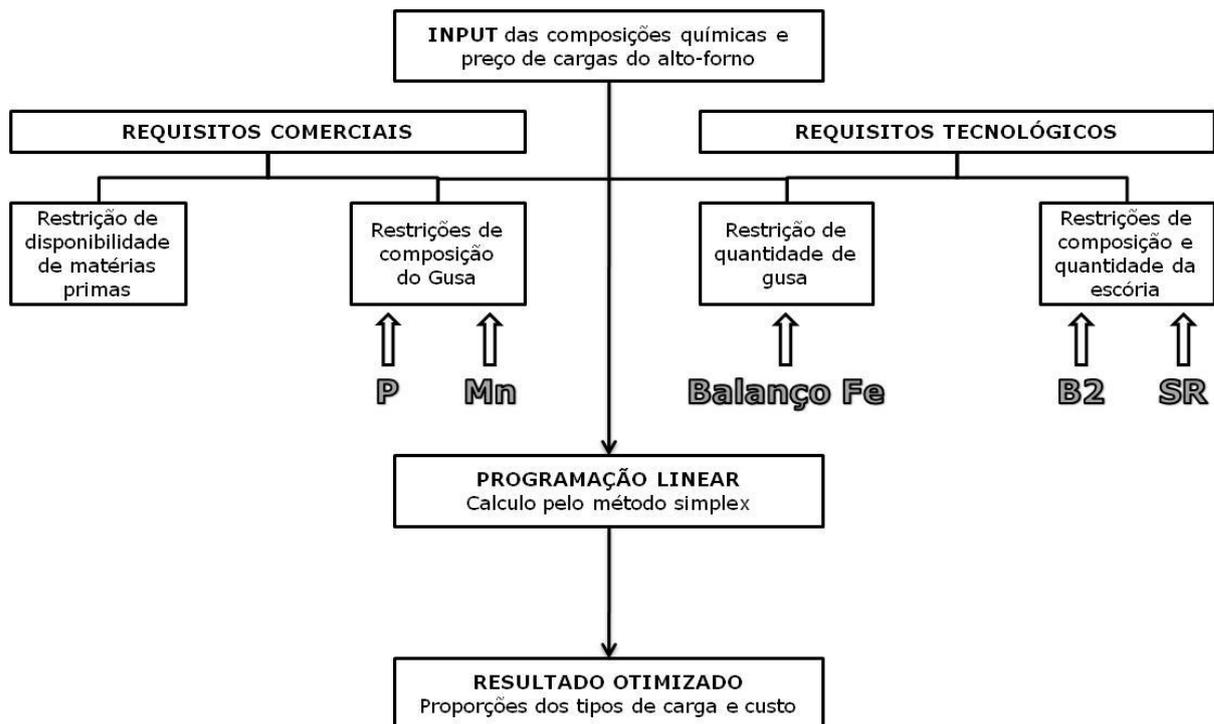


Figura 3 - Fluxograma básico de desenvolvimento do modelo de otimização

4.2 Decisões e Critérios de Avaliação

A formulação de cargas metálicas para altos-fornos consiste na definição dos minérios e de suas proporções, para se obter o menor custo, a partir dos minérios disponíveis. A carga formulada deve atender às necessidades operacionais do processo de altos-fornos e produzir um gusa com características de qualidade capaz de desempenhar os papéis dele exigidos no processo de produção de aço na aciaria. A qualidade do gusa e a estabilidade do alto-forno depende das características da qualidade dos minérios utilizados na carga. Uma vez estabelecida a qualidade do gusa para atender a aciaria e o plano de produção, uma carga deverá então, ser estabelecida. Esta mistura vai ser subdividida em misturas seqüenciais que irão obedecer às mesmas regras de qualidade e produção. Nesta fase, com auxílio de modelo matemático, testam-se várias misturas até determinar a mistura considerada boa e que atenda o binômio: qualidade e custo. Alguns pré-requisitos básicos devem ser observados, tais como:

- Qualidade do gusa definida entre aciaria e altos-fornos,
- Qualidade dos minérios,
- Diversificação de fontes,
- Introdução de novos minérios e
- Contratos em exercício.

A composição da mistura e determinação do gusa teórico obedece à lei da aditividade que é aplicada para todos os seus principais componentes. Basicamente, a composição da mistura visa uma estrutura do gusa adequada para cada tipo de alto-forno e aciaria.

4.3 Modelagem do Problema

A proposição deste modelo é obter as quantidades de cada tipo de matéria prima a ser carregada no alto-forno gerando o menor custo do gusa e satisfazendo todas as restrições. O cálculo do modelo é baseado no balanço de massa dos materiais e sua estrutura inclui as variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

4.3.1 Variável de Decisão

A variável de decisão x_j é a quantidade da matéria prima a ser enfiada, representa a quantidade em kg da matéria prima do tipo j a ser carregada no alto-forno. Neste trabalho foram consideradas como matérias-primas: sinter, minérios granulado, pelota, fundentes, coque e carvão pulverizado.

4.3.2 Parâmetros

A seguir a relação dos parâmetros adotados.

- Preço das matérias primas. Este parâmetro é associado a variável de decisão e representa o preço unitário de mercado das matérias primas a serem utilizadas.

P_j : preço unitário (R\$/t) da matéria prima tipo j a ser utilizado

- Oferta de matérias primas. A quantidade mínima deve ser estabelecida com base em contratos em exercício ou pela estratégia de se manter um fornecedor de pequeno porte. A disponibilidade máxima é estabelecida com base na capacidade de fornecimento dos fornecedores de matérias primas.

d_{min_j} : Quantidade (t) mínima da matéria prima tipo j

d_{max_j} : Quantidade (t) máxima da matéria prima tipo j disponível

- Parâmetros de matérias primas. Como exposto anteriormente, um dos primeiros objetivos é o conhecimento das qualidades químicas das matérias primas disponíveis para consumo. Foram considerados parâmetros referentes aos principais elementos e compostos, são eles, Fe, CaO, SiO₂, P e Mn

f_j : Ferro total (%) contido na matéria prima do tipo j

h_j : CaO (%) contido na matéria prima do tipo j

s_j : SiO₂ (%) contido na matéria prima do tipo j

r_j : Fósforo (%) contido na matéria prima do tipo j

z_j : Manganês (%) contido na matéria prima do tipo j

- Parâmetros de processo. Os parâmetros abaixo devem ser estabelecidos com base nas necessidades operacionais do alto-forno visando sua estabilidade e preservação.

esmax: limite de volume de escória em kg/t

sbmin: Basicidade mínima da escória

sbmax: Basicidade máxima da escória

- Parâmetros do gusa. É necessário estabelecer como parâmetros, os valores característicos de qualidade do gusa como o teor de ferro e silício, utilizados no balanço de massa. Os valores dos elementos residuais de fósforo e manganês máximos estabelecem restrições de acordo com as necessidades da aciaria.

η_{Fe} : Índice de Perda de Fe (%)

$[Fe]_{GU}$: Teor de Fe (%) no gusa

P_G : Quantidade (t) de gusa a ser produzida

$[Si]_{GU}$: Teor de Si (%) incorporado no gusa (SiO₂ carregado * 60/58 * 0,010532)

pmax: Fósforo (%) máximo do gusa

mnmax: Manganês (%) máximo do gusa

- Parâmetros da Escória. Devem ser definidos os valores característicos de qualidade da escória, utilizados no balanço de massa.

$[CaO]_{ES}$: Teor de CaO (%) na escória

$[Fe]_{ES}$: Teor de FeO (%) na escória * 56/72

4.3.3 Função Objetivo

Previamente ao consumo nos altos-fornos, os minérios e combustíveis são preparados para atenderem a determinadas especificações químicas e granulométricas. Os principais materiais provenientes desta preparação são o sinter, granulado, pelota, fundentes, coque e carvão pulverizado. Diante desta diversidade de materiais, é necessária a seleção das matérias primas que resultem no menor custo de processo. Desta forma, o custo por tonelada de gusa é a função objetivo do modelo.

$$\text{Min } Z = \sum_{j \in J} (P_j X_j) \quad (1)$$

Onde representa o custo ótimo por tonelada de gusa (R\$/t), X_j representa a quantidade de matéria prima enforada j (t) e P_j , o custo unitário do material j (R\$/t).

4.3.4 Restrições

Para que a produção de gusa siga dentro da normalidade, fazem-se necessárias restrições tecnológicas ao processo. Uma primeira restrição é adequar à quantidade de gusa produzida a quantidade de ferro carregado via matérias primas. Uma segunda restrição objetiva adequar à condição e quantidade de escória, de forma a promover a estabilidade operacional do equipamento.

As matérias primas consumidas nos altos-fornos sofrem limitações de disponibilidades e qualidade por parte dos fornecedores. Dentro deste contexto faz-se necessário a criação de restrições comerciais para o processo.

4.3.4.1 Restrições Tecnológicas

(4) Produção de Gusa

A condição desta restrição deriva do cálculo de produção de gusa obtido através do balanço de massa do ferro (1ª parcela da equação). A restrição é complementada com o índice de perda de Fe (η_{Fe}), no qual representa a fração do ferro carregado que é processado no alto-forno, sendo que o restante se perde no pó e lama do alto-forno. Por último, considerado a perda de Fe na escória na forma de óxido (2ª parcela da equação).

$$\frac{(\sum_{j \in J} x_j f_j)}{[Fe]_{GU}} * \eta_{Fe} - \frac{(\sum_{j \in J} x_j h_j) * [Fe]_{ES}}{[CaO]_{ES}} = P_G \quad (2)$$

(5) Restrições de composição e quantidade da escória

As restrições de composição e quantidade de escória estão relacionadas ao fato da mesma estar fortemente ligada a produtividade, consumo de combustíveis, qualidade do gusa e estabilidade de marcha do alto-forno.

a. Restrição de Basicidade da escória

A restrição de basicidade expressa a razão entre os óxidos básicos e ácidos na forma binária, ou seja, %CaO / %SiO₂. Este valor, denominado índice de basicidade, deve estar em uma faixa pré determinada para que a mesma escoe com facilidade e melhore a eficiência na produção de gusa. O numerador da equação representa a quantidade de CaO contida na escória e o denominador a quantidade contida de SiO₂.

$$\frac{(\sum_{j \in J} x_j h_j)}{(\sum_{j \in J} x_j s_j) - ([Si]_{GU} * P_G)} \geq sbmin \quad (3)$$

$$\frac{(\sum_{j \in J} x_j h_j)}{(\sum_{j \in J} x_j s_j) - ([Si]_{GU} * P_G)} \leq sbmax \quad (4)$$

b. Restrição de volume de escória

A produção de escória é dada pelo balanço de massa do CaO. Este volume de escória depende da qualidade dos combustíveis (coque e carvão) e do minério, sendo que quanto melhor a qualidade destes insumos, menor a quantidade de escória e melhor a operação do forno. Além de estabilidade de operação, o menor volume de escória acarreta na diminuição no consumo de combustíveis. A restrição limita o volume de escória em um valor pré determinado.

$$\frac{(\sum_{j \in J} x_j h_j) * 1000}{[CaO]_{ES} * P_G} \leq esmax \quad (5)$$

4.3.4.2 Restrições Comerciais

(1) Restrição de disponibilidade de matérias primas

A situação atual consiste na utilização do minério de ferro proveniente de diversos fornecedores. As quantidades são limitadas por motivos comerciais ou de capacidade. As restrições comerciais se limitam a volumes previamente contratados no medio-longo prazo, o que normalmente se trata de grandes fornecedores. As restrições de capacidade se limitam ao fornecedor de pequeno porte. A equação considera os limites de fornecimento mínimo, $dmin_j$, justificado pela necessidade em adquirir quantidades mínimas contratadas ou pelo fato de manter fornecedores estratégicos e $dmax_j$ considerando o máximo disponibilizado por cada fornecedor.

$$x_j \geq dmin_j \quad (6)$$

$$x_j \leq dmax_j \quad (7)$$

(2) Restrições de composição do gusa

Alguns elementos residuais presentes nas matérias primas impactam negativamente no processo. Por exemplo, a presença de Zn e alcális possibilitam a formação de cascão nas paredes do alto-forno afetando sua estabilidade, além promover ataque aos refratários afetando a vida útil do equipamento. O alto teor de P no gusa gera principalmente, aumento significativo de custos na aciaria, além de dificuldades na produção de aços restritivos. O Mn elevado contribui negativamente para o desgaste do cadinho.

A melhor maneira de controle para estes elementos é limitar o consumo de matérias primas que contenham alto teor dos mesmos. Precisam ser controlados o P, Mn, Zn, álcalis, entre outros. Para este modelo, em acordo com as matérias primas definidas para consumo, as restrições serão feitas para os elementos mais críticos. São eles, o fósforo e o manganês.

a. Restrição de Fósforo no Gusa

O teor de fósforo nos minérios de ferro vem aumentando consideravelmente e isso dificulta a produção de aços com rigorosos requisitos de qualidades. Faz-se necessário restringir o teor deste elemento no gusa visando atender a exigência de produção de aços com baixos teores de fósforo nos convertedores. A incorporação do P no gusa atinge valores de 90%.

$$\frac{0,9 \left(\sum_{j \in J} x_j r_j \right)}{P_G} \leq pmax \quad (8)$$

b. Restrição de Manganês no Gusa

O manganês do gusa é carregado através do sinter, o valor visado é de 0,30 a 0,45. A quantidade de manganês carregada tem incorporação de 80% no gusa, o restante é perdido na escória devido a formação de MnO. As influências no alto-forno estão relacionadas à viscosidade do gusa e escória. O limite de 0,30% é definido pela necessidade de um valor mínimo na aciaria no qual teores abaixo deste limite implicam em descontrole na formação de escória nos convertedores. O valor máximo de 0,45% está relacionado ao desgaste do cadinho. A redução da %Mn implica em maior viscosidade do gusa e menor reatividade, diminuindo assim o desgaste do cadinho.

$$\frac{0,8 \left(\sum_{j \in J} x_j z_j \right)}{P_G} \leq mnmax \quad (9)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados os resultados obtidos pelo modelo, com dados baseados nas condições reais de consumo do alto-forno em questão.

Os dados globais foram baseados em informações de mercado e do alto-forno estudado. Os volumes de disponibilidades e qualidades de matérias primas propostos para um determinado plano de produção foram o ponto de partida para detalhamento das entradas. Junto com estes foram considerados dados relativos a produção e índices de processo visados.

O modelo foi implementado com utilização do software GUSEK (GLPK Under Scite Extended Kit).

5.1 Validação do modelo

Para a validação do modelo foram realizados experimentos utilizando o método tradicional de cálculo de carga com parâmetros definidos para a produção de um mês do alto-forno em questão. Posteriormente experimentos foram realizados utilizando o modelo de otimização desenvolvido. Os resultados foram comparados a fim de verificar a coerência nas saídas de cada metodologia utilizada.

(1) Condição inicial de otimização

A Tabela 2 apresenta os parâmetros das matérias primas utilizada para validação.

TABELA 2 - Parâmetros da matéria prima

	Disponibilidade (t)		Fet	SiO2	CaO	P	Mn
	min	max	%	%	%	%	%
Sinter 2	-	232215	56.29	5.92	10.06	0.069	0.361
Sinter 3	-	82603	55.96	6.04	10.26	0.072	0.363
Minério 1	6000	15167	56.90	8.00	0.06	0.110	0.350
Minério 2	6000	11590	61.59	8.63	0.28	0.080	0.090
Minério 3	6000	26505	59.81	6.86	0.02	0.080	0.360
Minério 4	6000	16200	60.50	4.30	0.02	0.130	0.160
Pelota	-	50000	63.50	4.70	2.91	0.040	0.130
Quartzo	-	10000	0.40	96.63	0.06	0.000	-
Coque	-	-	0.70	6.00	0.30	0.050	-
Carvão	-	-	0.63	5.42	0.55	0.116	-

Foram considerados sete tipos de materiais metálicos. O sinter se dividiu em dois tipos, de acordo com a máquina de sinter de origem. A disponibilidade e qualidade de cada tipo de sinter foram definidas com base na capacidade de produção e do leito de fusão característico das máquinas de sinter.

As disponibilidades e qualidade dos minérios foram definidas com base em diferentes fornecedores e a pelota a partir de um único fornecedor.

O consumo mínimo (disponibilidade mínima) de cada tipo de minério foi definido em 6.000 t, o que representa um lote de recebimento. A estratégia foi manter o fornecedor, sendo que temos uma tendência de escassez deste tipo de material ao longo dos próximos anos.

A Tabela 3 apresenta as considerações referentes aos limites de processo utilizados.

TABELA 3 - Índices do alto-forno

Produção	Coke Rate	Fuel Rate	B2 Escória	Slag Rate	P max	Mn max
t	kg/t	kg/t	-	kg/t	%	%
200400	376	495	1.18	≤ 340	≤ 0.140	≤ 0.50

As matérias primas disponíveis serão selecionadas devendo se adequar aos limites de processo estabelecidos conforme indicado na tabela 3. Estes limites visam à estabilidade operacional do equipamento e qualidade do gusa produzido.

a. Método atual de cálculo de carga do alto-forno

O modelo atual de cálculo de carga não utiliza de métodos computacionais de otimização. Foram realizados diversos cálculos de leito de fusão na busca pelo menor custo e respeitando todas as limitações do processo.

Por meio de tentativas e discussões técnicas, foi gerada a saída contemplando a carga metálica considerada otimizada. A Figura 4 apresenta os resultados deste experimento.

CÁLCULO DE CARGA ALTO-FORNO 3							
ENTRADA DE DADOS							
VISADO							
EXCESSO	DIF. CR	CZ COQ DIR	CZ COQ PAT	CZ CARVÃO	BASICIDADE		
0	497	6.97	8.27	10.19	1.18		
SILICIO	MANGANÊS	FÓSFORO	M2 - M1	C2 - C1	COQ PAT		
0.45	0.4	0.12	8000	0	0		
OPERAÇÃO							
AR SOPRADO	OXIGÊNIO	TEMP DO AR	UMIDADE AR	TAXA DE INJ			
4200	0	1,180	21	120			
CARGA PADRÃO							
MS2	69.3	MS3	19	MIVEM	4.4	MIJME	0
MINVAL	2.9	PELO	0.0	MIUSI	3	MICOM	1.8
TAXA DE SUBSTITUIÇÃO							
PRIMEIRA SUGESTÃO							
MS2		MS3		MIVEM		MIJME	
MINVAL		PELO		MIUSI		MICOM	
QTZO		CALC					
SEGUNDA SUGESTÃO							
COQUE		M MET		QUARTZO		CALCÁRIO	
CARGA ATUAL (KG/CARGA)							
MS2	1,159	MS3	316	MIVEM	74	MIJME	0
MINVAL	49	PELO	0	MIUSI	45	MICOM	30
QTZO	12	CALC	0	MANG	0	SERP	0
COQUE (DIRETO + PÁTIO)			376	COQUE MÉDIO			0
RESULTADOS							
TOTAL MIN	1,672.4	ESCÓRIA	338	METALIZ.			
TOTAL COQ	376	SLAG RATE	338	COAL-RATE	120		
% SINTER	92.6	% ALUMINA	10.1	COKE-RATE	376		
%COQ PAT	0.0	% MGO	5.4	FUEL-RATE	495		
MIN / COQ	4.45	ENX CARREG	3.29	CR CORRIG.			
GUSA/CARGA	1,000	MN CARREG	5.86	DIFER CR			
MIN/GUSA	1,672.4	P CARREG	1.47	EXC CALC	0		
		TIO2 CARREG	1.13				

Figura 4 - Planilha de resultados do cálculo de carga do alto-forno.

Posteriormente foi calculado o custo do gusa resultante, 574,11 R\$/t. Para este valor foram considerados os custos operacionais, da carga metálica, fundentes, combustíveis e créditos com subprodutos gerados.

b. Modelo de otimização desenvolvido para o cálculo de carga

Inicialmente os parâmetros do problema foram estruturados utilizando uma planilha, na qual, contemplou todos os dados necessários para o modelo.

Após o levantamento de dados para os parâmetros, iniciou-se sua implementação utilizando o software GLPK.

A Figura 3 apresenta o arquivo de saída do modelo gerada pelo software.

```

Problem: .....Modelo
Rows: .....27
Columns: .....10
Non-zeros: ..85
Status: .....OPTIMAL
Objective: ..custo = 573.8454864 (MINimum)

  .. No. .. Row name .. St .. Activity .. Lower bound .. Upper bound .. Marginal
  -----
  ....12 dispmax[ST2] NU ..... 232215 ..... 232215 -9.36937e-006
  ....13 dispmax[ST3] B ..... 65363.2 ..... 82603
  ....14 dispmax[MI1] NU ..... 9010 ..... 9010 -0.000152091
  ....15 dispmax[MI2] NU ..... 9852 ..... 9852 -0.000120834
  ....16 dispmax[MI3] B ..... 12870.2 ..... 22529
  ....17 dispmax[MI4] NU ..... 6006 ..... 6006 -0.000299639
  ....18 dispmax[PEL] B ..... 0 ..... 50000
  ....19 dispmax[QUA] B ..... 3498.56 ..... 10000
  ....20 dispmax[COQ] B ..... 75312 ..... 75312
  ....21 dispmax[PCI] B ..... 23951 ..... 23951
  ....22 gusa ..... NS ..... 200400 ..... 200400 = 0.00176533
  ....23 sbasmax ..... B ..... -2401.58 ..... -2401.58
  ....24 sbasmin ..... NL ..... -2401.58 ..... -2401.58 5.73972e-006
  ....25 escmax ..... NU ..... 340 ..... 340 -0.135567
  ....26 fosfmax ..... B ..... 0.131735 ..... 0.15
  ....27 mangmax ..... B ..... 0.468199 ..... 0.5

  .. No. .. Column name .. St .. Activity .. Lower bound .. Upper bound .. Marginal
  -----
  .... 1 x[ST2] ..... B ..... 232215 ..... 0
  .... 2 x[ST3] ..... B ..... 65363.2 ..... 0
  .... 3 x[MI1] ..... B ..... 9010 ..... 0
  .... 4 x[MI2] ..... B ..... 9852 ..... 0
  .... 5 x[MI3] ..... B ..... 12870.2 ..... 0
  .... 6 x[MI4] ..... B ..... 6006 ..... 0
  .... 7 x[PEL] ..... NL ..... 0 ..... 0 0.000303538
  .... 8 x[QUA] ..... B ..... 3498.56 ..... 0
  .... 9 x[COQ] ..... B ..... 75312 ..... 0
  ....10 x[PCI] ..... B ..... 23951 ..... 0

```

Figura 5 - Arquivo de saída do modelo utilizando o GLPK

As saídas do modelo apresentaram dados consistentes em comparação ao modelo atual utilizado. A função objetivo apresentou um valor ótimo de 573,85 R\$/t, bastante próximo ao valor atingido pelo modelo tradicional, 574,11 R\$/t.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados pós otimização.

TABELA 4 - Saída do modelo de otimização: Função objetivo e restrições

	Custo R\$/t	Produção			Uso de Disponibilidade				Slag Rate kg/t	P %	Mn %	
		Gusa t	ST2 t	ST3 t	MIN1 t	MIN2 t	MIN3 t	MIN4 t				PEL t
Atividade	573.85	200400	232215	65363	9010	9852	12870	6006	0	340	0.132	0.470
Faixa Inferior												
Faixa Superior		200400	232215	82603	9010	9852	22529	6006	50000	340	0.150	0.500
Marginal		0.00177			-0.000152	-0.000121		-0.000300		-0.135567		

A Tabela 4 demonstra que o modelo atingiu a produção de gusa visada, 200.400 t. A análise marginal deste item apresenta que para um aumento de 100 toneladas na produção de gusa, o seu custo aumentaria em 0,177 R\$/t, fato este justificado pela necessidade de consumo do minério de maior custo, MIN3.

Para a disponibilidade das matérias primas verifica-se a máxima utilização do sínter ST2 e a utilização parcial do sínter ST3. A escolha do sínter não somente se baseia em seu preço e qualidade, mas também pelo fato de ser uma carga auto-fundente necessária para o controle da basicidade da escória do alto-forno.

Os minérios MIN4, MIN1 e MIN2, nesta ordem, tiveram máxima utilização, selecionados com base em seus preços e qualidades. O MIN3 foi utilizado parcialmente e o aumento de sua utilização se daria eventualmente em um possível aumento de produção. A análise marginal mostra que esforços buscando maior fornecimento dos minérios MIN4, MIN1 e MIN2 implicam em redução de custo do gusa produzido. Por exemplo, um aumento de 1.000 t na disponibilidade de cada um destes minérios, implicaria em uma redução no custo do gusa de 0,573 R\$/t, ou com base em uma referência mensal, 114.829 R\$/mês. Deste valor, o minério MIN4 contribui com 0,3 R\$/t, o MIN1 com 0,152 R\$/t e o MIN2 com 0,121 R\$/t;

TABELA 5 - Saída do modelo de otimização: Carga metálica após otimização

		ST2	ST3	MIN1	MIN2	MIN3	MIN4	PEL
	t	232215	65363	9010	9852	12870	6006	0
Atividade	kg/t	1159	326	45	49	64	30	0
	%	69.3	19.5	2.7	3	3.8	2	0
Marginal								0.000304

Com relação às variáveis de decisão, que representa o mix de minério utilizado, temos o sínter ST2 com uma participação de 69,3%, ST3 com uma participação de 19,5%. Como descrito anteriormente, a proporção elevada de sínter na carga, apesar de seu preço e qualidade, está relacionada com a necessidade de atender a restrição de basicidade da escória do alto-forno (B2 = 1,18).

c. Comparativo do método atual versus modelo de otimização

As Tabelas 6 e 7 apresentam os valores comparativos relacionados a função objetivo e restrições.

TABELA 6 - Comparativo entre o modelo atual e o de otimização

	Custo R\$/t	Produção			Uso de Disponibilidade					Carga Metálica kg/t	Slag Rate kg/t	P %	Mn %
		Gusa t	ST2 t	ST3 t	MIN1 t	MIN2 t	MIN3 t	MIN4 t	PEL t				
Modelo Atual	574.11	200400	232215	63382	8982	9786	14773	6006	0	1672.4	338	0.132	0.468
Modelo Otimização	573.85	200400	232215	65363	9010	9852	12870	6006	0	1673.2	340	0.132	0.470
Faixa Superior		200400	232215	82603	9010	9852	22529	6006	50000		340	0.150	0.500
Dif. Otim - Atual		0	0	1981	28	66	-1903	0	0	0.9	2.0	0	0

A análise comparativa entre modelos mostrou grande coerência entre os resultados, com o modelo de otimização gerando um custo a menor do gusa de 0,26 R\$/t. Como mostrado na Tabela 7, o modelo de otimização considerou uma utilização de sinter ST3 a maior de 0,6% substituindo o minério MIN3 de maior preço. Apesar de um menor rendimento da carga metálica em relação ao resultado do modelo atual, + 0,8 kg/t, o ganho em mix pela substituição do MIN4 pelo ST3 mais que compensa esta perda. Os valores de volume de escória e manganês apresentaram pequenas diferenças, sendo -0,2 kg/t e -0,002%, respectivamente. O fósforo não apresentou variação entre os modelos, com o valor de 0,132%.

TABELA 7 - Comparativo da carga metálica entre o modelo atual e o de otimização

		ST2	ST3	MIN1	MIN2	MIN3	MIN4	PEL
Modelo Atual		69.3	18.9	2.7	2.9	4.4	1.8	0.0
Modelo Otimização	%	69.3	19.5	2.7	2.9	3.8	1.8	0.0
Dif. Otim - Atual		0.0	0.6	0.0	0.0	-0.6	0.0	0.0

5.2 Aplicação do modelo em diferentes situações

5.2.1 Impacto de variações na disponibilidade de minérios

A aplicação do modelo se mostra de grande utilidade na avaliação dos impactos em situações em que ocorrem desvios na oferta de minérios pelos fornecedores. Estas situações podem ocorrer com alguma frequência, dependendo da quantidade de tipos de minérios utilizados, condições de operação das minerações e logística dos diferentes fornecedores.

(1) Impacto do não recebimento de determinado tipo de minério

Para um primeiro experimento, foi considerada uma condição em que o recebimento do minério MIN4 em determinado período foi zerado por questões logísticas. Como exemplo, podemos considerar a ocorrência de alguma anormalidade no transporte ferroviário do mesmo, impedindo a sua chegada.

A Tabela 8 apresenta as saídas do modelo considerando a restrição em questão.

TABELA 8 - Impacto da falta de determinado tipo de minério

	Custo R\$/t	Produção			Uso de Disponibilidade					Slag Rate kg/t	P %	Mn %
		Gusa t	ST2 t	ST3 t	MIN1 t	MIN2 t	MIN3 t	MIN4 t	PEL t			
Atividade	575,65	200400	232215	65363	9010	9852	18948	0	0	340	0,130	0,470
Faixa Inferior												
Faixa Superior		200400	232215	82603	9010	9852	22529	0	50000	340	0,150	0,500
Marginal		0,00177			-0,000152	-0,000121		-0,000300		-0,135567		

O impacto no custo do gusa, de uma forma mais simplificada, poderia ser mostrado através da avaliação marginal dos resultados gerados pela condição inicial, não sendo necessário uma nova solução considerando o ajuste dos parâmetros. O aumento no custo do gusa na ocorrência de falta de fornecimento do minério MIN4 seria de 1,8 R\$/t, ou 200 R\$.mil/mês. Nesta situação, o minério MIN4 é substituído em sua totalidade pelo minério de maior custo o MIN3 gerando grande impacto no custo final do gusa.

(2) Sem limite de disponibilidade de minérios granulados

Um segundo experimento foi realizado com o objetivo de avaliar a influência da não limitação na disponibilidade de minérios granulados. Para esta condição, os valores máximos de recebimento no modelo foram elevados para 50.000 toneladas. Este valor foi considerado respeitando o limite técnico de consumo de granulado do alto-forno em questão de 15%.

TABELA 9 - Resultado sem limite de disponibilidade de granulados

	Custo R\$/t	Produção			Uso de Disponibilidade					Slag Rate kg/t	P %	Mn %
		Gusa t	ST2 t	ST3 t	MIN1 t	MIN2 t	MIN3 t	MIN4 t	PEL t			
Atividade	565,41	200400	232215	51556	0	0	0	50000	0	324	0,140	0,442
Faixa Inferior												
Faixa Superior		200400	232215	82603	50000	50000	50000	50000	50000	340	0,150	0,500
Marginal		0,00150						-0,000132				

Os resultados gerados neste teste estão apresentados na Tabela 9. A saída apresentou uma redução significativa no custo do gusa com relação ao cenário base em -8,44 R\$/t, ou -1.691 R\$.mil/mês. O modelo apresenta uma carga metálica otimizada na proporção de 85% em síter e 15% do minério MIN4.

Pode ser observado neste resultado o aumento do teor de fósforo a níveis considerados elevados, 0,140%. Para efeito de análise foi realizado um teste limitando o fósforo a níveis do cenário base. A Tabela 10 apresenta os resultados considerando o fósforo máximo em 0,132%.

TABELA 10 - Resultado sem limite de disponibilidade de granulados e restringindo o P

	Custo R\$/t	Produção			Uso de Disponibilidade					Slag Rate kg/t	P %	Mn %
		Gusa t	ST2 t	ST3 t	MIN1 t	MIN2 t	MIN3 t	MIN4 t	PEL t			
Atividade	571,21	200400	232215	65069	0	23033	0	14056	0	340	0,132	0,447
Faixa Inferior												
Faixa Superior		200400	232215	82603	50000	50000	50000	50000	50000	340	0,132	0,500
Marginal		0,00200								-0,03889	-771,9980	

A análise da Tabela 10 mostra uma diluição significativa do ganho apresentado na Tabela 9. Limitando o fósforo em 0,132% a redução de custo do gusa em relação cenário base seria reduzida para -2,64 R\$/t.

O minério MIN4, apesar de seu preço atrativo apresenta elevado teor de fósforo, fator no qual limitou sua utilização para 4,2%, ante os 15,0% utilizado no teste sem restrição de fósforo. O MIN2, minério de baixo teor de fósforo, foi utilizado na proporção de 6,9%, e o sínter em 88,9%.

A análise para este cenário mostra que esforços no desenvolvimento junto a fornecedores de minérios granulados podem contribuir significativamente para a redução do custo final do produto. Além disto, o modelo pode ser útil na definição de ações visando aumento no volume ofertado, garantia da qualidade da matéria prima e desenvolvimento de novos fornecedores.

(3) Impacto da necessidade de consumo de minérios por contratos em exercício

Foi realizado um teste com o intuito de avaliar o impacto de uma eventual necessidade de consumo de determinado tipo de minério em quantidades acordadas por contratos de longo prazo. Neste caso, foi considerada uma situação de mercado em que este tipo minério, com base em seu preço e qualidade, não se mostra mais vantajoso frente às condições nas quais o fornecimento deste minério foi acordado em contrato.

Para avaliação deste cenário foi considerada uma redução nos preços dos minérios em 20%, porém com base em questões contratuais o minério MIN1 obteve uma redução de apenas 5%. A Figura 6 apresenta os testes realizados considerando esta variação desproporcional de preços. A primeira foi feita sem considerar limitações contratuais de consumo e a segunda com necessidade mínima de consumo de 40.000 toneladas do minério MIN1. A necessidade do consumo deste minério no segundo teste elevou o custo do gusa em +2,9 R\$/t.

SIMULAÇÃO SEM LIMITAÇÃO DE CONTRATO							SIMULAÇÃO COM NECESSIDADE DE CONSUMO DE 40 kt DE MIN1						
No.	Row name	St	Activity	Lower bound	Upper bound	Marginal	No.	Row name	St	Activity	Lower bound	Upper bound	Marginal
1	custo	B	480.797				1	custo	B	483.694			
2	dispain(ST2)	B	232215	-0			2	dispain(ST2)	B	232215	-0		
3	dispain(ST3)	B	65393.3	-0			3	dispain(ST3)	B	59174.5	-0		
4	dispain(MI1)	B	0	-0			4	dispain(MI1)	NL	40000	40000		0.000152692
5	dispain(MI2)	B	9852	-0			5	dispain(MI2)	B	0	-0		
6	dispain(MI3)	B	21412.7	-0			6	dispain(MI3)	B	0	-0		
7	dispain(MI4)	B	6006	-0			7	dispain(MI4)	B	6006	-0		
8	dispain(PEL)	B	0	-0			8	dispain(PEL)	B	0	-0		
9	dispain(QUA)	B	3636.16	-0			9	dispain(QUA)	B	2130.61	-0		
10	dispain(COQ)	NL	75312	75312		0.00258582	10	dispain(COQ)	NL	75312	75312		0.00258447
11	dispain(PCI)	NL	23951	23951		0.00183958	11	dispain(PCI)	NL	23951	23951		0.0018347
12	dispaax(ST2)	NU	232215		232215	-7.4954e-006	12	dispaax(ST2)	NU	232215		232215	-4.29819e-006
13	dispaax(ST3)	B	65393.3		82603		13	dispaax(ST3)	B	59174.5		82603	
14	dispaax(MI1)	B	0		40000		14	dispaax(MI1)	B	40000		40000	
15	dispaax(MI2)	NU	9852		9852	-9.6647e-005	15	dispaax(MI2)	B	0		9852	
16	dispaax(MI3)	B	21412.7		22529		16	dispaax(MI3)	B	0		22529	
17	dispaax(MI4)	NU	6006		6006	-0.000239691	17	dispaax(MI4)	NU	6006		6006	-0.000105229
18	dispaax(PEL)	B	0		50000		18	dispaax(PEL)	B	0		50000	
19	dispaax(QUA)	B	3636.16		10000		19	dispaax(QUA)	B	2130.61		10000	
20	dispaax(COQ)	B	75312		75312		20	dispaax(COQ)	B	75312		75312	
21	dispaax(PCI)	B	23951		23951		21	dispaax(PCI)	B	23951		23951	
22	gusa	NS	200400	200400		0.00141223	22	gusa	NS	200400	200400		0.00120081
23	sbasmax	B	-2401.58		-2401.58		23	sbasmax	B	-2401.58		-2401.58	
24	sbasmin	NL	-2401.58	-2401.58		4.59165e-006	24	sbasmin	NL	-2401.58	-2401.58		4.43865e-006
25	escmax	NU	340		340	-0.108454	25	escmax	B	332.741		340	
26	fosmax	B	0.130363		0.15		26	fosmax	B	0.136871		0.15	
27	mangmax	B	0.46799		0.5		27	mangmax	B	0.480494		0.5	

Figura 6 - Resultados da necessidade de consumo de minérios com base em contratos

5.2.2 Impacto de alterações no limite de geração específica de escória.

Eventualmente faz-se necessário avaliar o limite de geração específico de escória considerada adequado de acordo com as matérias primas que estão disponíveis para consumo. O modelo desenvolvido se mostra bastante ágil e útil para avaliar situações como esta.

Para aplicação desta condição, foram realizados testes no modelo variando o volume de escória em uma determinada faixa e fixando todos os outros parâmetros de acordo com o cenário base (Tabela 3).

Dentro destas condições, foi avaliado o impacto da quantidade de escória de 320 e 350 kg/t nos resultados, ou seja, na função objetivo e restrições.

A Figura 7 apresenta o resultado da análise de sensibilidade para o volume de escória de 320 kg/t.

```

Problem: 02
Objective: custo = 579.091653 (MINimum)

```

No.	Row name	St	Activity	Slack Marginal	Lower bound Upper bound	Activity range	Obj coef range	Obj value break point	at Limiting variable
25	escmax	NU	320.00000		-Inf 320.00000	282.62308 328.16657	-Inf .44596	595.76020 575.44970	dispmín[QUA] dispmín[PEL]

Figura 7 - Análise de sensibilidade para a quantidade de escória de 320 kg/t

Para esta análise, conclui-se que o menor volume de escória possível de acordo com a carga metálica utilizada é 283 kg/t. Tecnicamente o limitante para este valor está relacionado com a sílica dos minérios utilizados e a basicidade estabelecida para a escória do alto-forno. Outro ponto de destaque é a necessidade de elevado consumo de pelota, 14,1%, o que eleva o custo da carga metálica em referência a condição inicial em 21,8 R\$/t. Para análise do impacto da menor geração de escória no custo do gusa é necessário considerar o ganho em redução de combustível. Foi considerada uma relação de que para uma variação de 10 kg/t na quantidade de escória temos uma redução no consumo de combustíveis em 1,5 kg/t, em valores financeiros, 0,7 R\$/t no custo do gusa. Dentro destas condições, o impacto é de +17,9 R\$/t no custo do gusa para uma quantidade de escória de 283 kg/t.

A análise de sensibilidade mostra que a quantidade mínima de escória possível sem a utilização de pelota é 328 kg/t. Este volume de escória gera um aumento no custo do gusa em relação a condição inicial de +0,75 R\$/t, considerando o impacto da redução no consumo de combustíveis. Este valor é influenciado pela necessidade de maior utilização do minério granulado de maior custo, o MIN3.

Para avaliar condições de alto valor de geração de escória, foi realizada a análise de sensibilidade para o slag rate de 350 kg/t, conforme Figura 8.

```

Problem: 02
Objective: custo = 572.6449402 (MINimum)

```

No.	Row name	St	Activity	Slack Marginal	Lower bound Upper bound	Activity range	Obj coef range	Obj value break point	at Limiting variable
25	escmax	NU	350.00000		-Inf 350.00000	348.41700 359.51483	-Inf .03758	572.70442 572.28741	dispmáx[M12] dispmáx[ST3]

Figura 8 - Análise de sensibilidade para o volume de escória de 350 kg/t

Conclui-se a partir do teste apresentado na Figura 8, que o máximo volume de escória que minimizaria o custo sem considerar o impacto em consumo de combustíveis seria de 360 kg/t. A Figura 9 apresenta a análise gráfica correlacionando o custo do gusa com o volume de escória.

Abaixo do gráfico, ainda na Figura 9, foi mostrada uma tabela com a carga metálica após otimização a partir de valores de slag rate determinados.

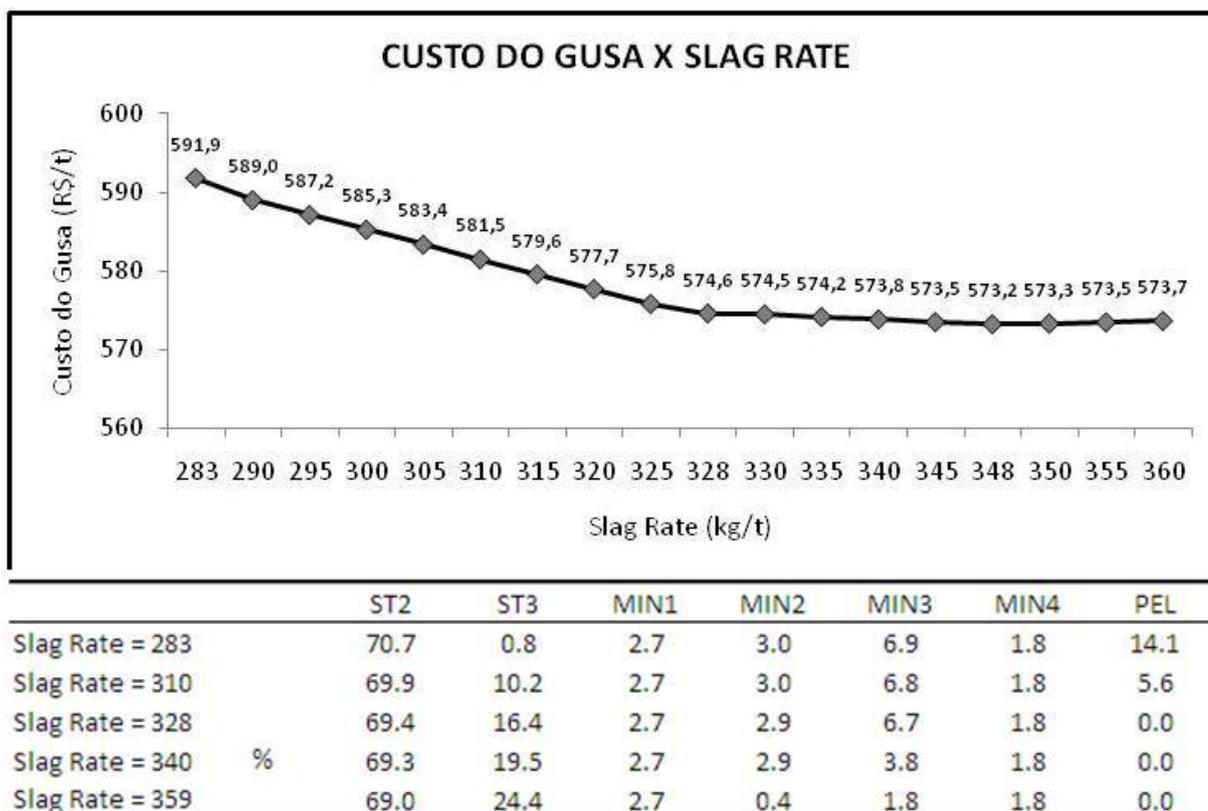


Figura 9 - Gráfico de correlação entre o custo do gusa e slag rate

A curva do gráfico aponta que uma redução na quantidade de escória eleva o custo do gusa. Este aumento ocorre pela necessidade de utilização de minérios mais concentrados e consequentemente de maiores preços. Observa-se uma maior inclinação da reta para a faixa de slag rate entre 283 e 328 kg/t. A partir da quantidade de escória de 328 kg/t, os valores de custo do gusa sofrem pequenas variações. Uma análise gráfica final implicaria em se definir entre dois valores de slag rate que de fato minimizariam o custo, seriam eles os valores de 328 e 340 kg/t. A diferença de custo entre as duas situações é de 0,8 R\$/t, o que dependeria de uma avaliação técnica, se a diferença de 12 kg/t compensaria este maior custo.

A tabela da Figura 9 justifica a maior inclinação da reta a partir de 328 kg/t pelo aumento do consumo do pelota a medida que o slag rate cai. A pelota representa o minério de maior preço.

5.2.3 Redução do teor de fósforo utilizando pelota

A redução do teor de fósforo no aço pode ser realizada basicamente de duas maneiras. Pela redução de entradas de fósforo no processo de fabricação do gusa ou através do processo de oxidação na aciaria.

Com o objetivo de avaliar o impacto no custo em se reduzir o fósforo do gusa através da utilização de matérias primas com baixos teores deste elemento, foram realizadas testes no

modelo considerando uma variação do fósforo em determinada faixa mantendo fixo todos os outros parâmetros.

A Figura 10 apresenta a correlação entre o teor de fósforo e o custo do gusa.

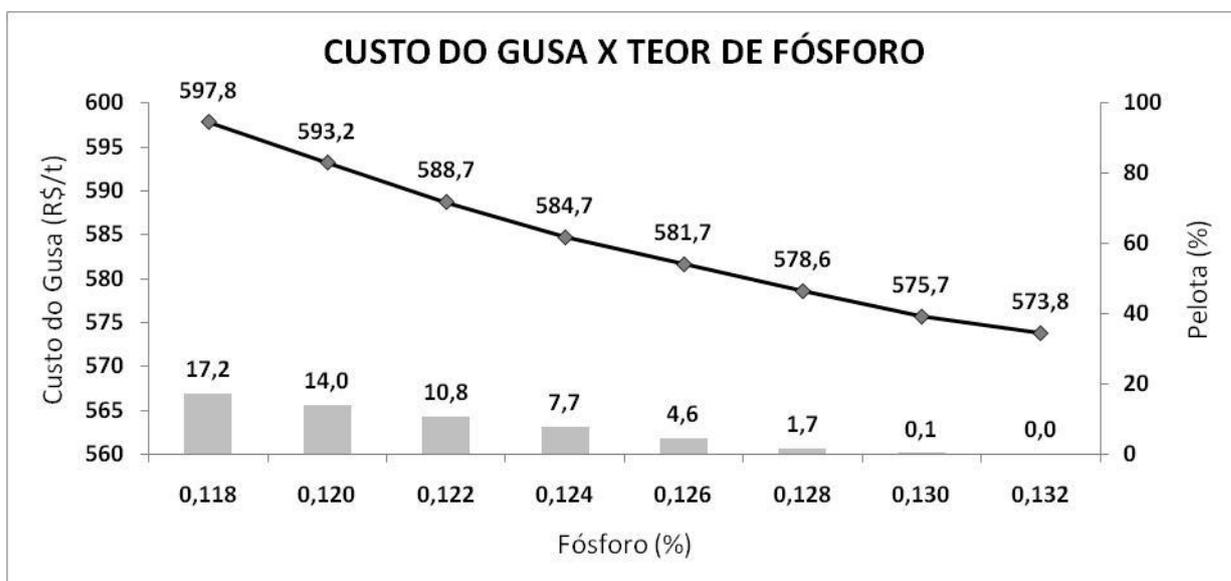


Figura 10 - Gráfico de correlação entre o custo do gusa e teor de fósforo

As saídas do modelo em acordo com os dados de entrada de qualidade de matérias primas apresentaram valores considerados elevados mostrando uma faixa possível de teor de fósforo entre 0,118% e 0,132%. Comparado com outros altos-fornos, um valor de referência seria menor que 0,110%. A redução no teor de fósforo em relação ao cenário base gera um aumento expressivo no custo gusa conforme mostrado na curva do gráfico da Figura 10. A exemplo, uma redução de 0,010% no fósforo do gusa eleva o custo em +14,9 R\$/t ou R\$ 2.984.000/mês. Diante destes resultados e com as matérias primas disponíveis dificilmente será viável a redução de fósforo via redução de entradas de fósforo no alto-forno.

Esta análise mostra a tendência em que o teor de fósforo nos minérios de ferro vem aumentando consideravelmente e com isso, dificultando a produção de aços com rigorosos requisitos de qualidades.

5.2.4 Avaliação da redução do manganês no gusa

Eventualmente faz-se necessário ajustar a composição química do gusa no sentido de se aumentar os teores de silício e enxofre, e reduzir o teor de manganês em caso de aquecimento extra do refratário do cadinho. Pelo fato do manganês do gusa produzido nos altos fornos ser carregado pelas matérias primas, principalmente pelo sinter, foram realizados testes no sentido de avaliar o impacto no custo do gusa em se reduzir o teor de manganês através da utilização de matérias primas com baixos teores deste elemento. Como nos testes de quantidade de escória e teor de fósforo, esta análise foi realizada considerando uma variação do teor de manganês, mantendo todos os outros parâmetros fixos.

A curva do gráfico apresentada na Figura 11 mostra que o manganês, assim como o fósforo, se encontra em níveis elevados e não mostrando viabilidade em se reduzir via entradas de manganês pelas matérias primas. O manganês mínimo possível conforme apresentado no gráfico seria de 0,42% e demandaria um elevado consumo de pelota, 13,2%, gerando um aumento expressivo no custo do gusa, em 17,9 R\$/t.

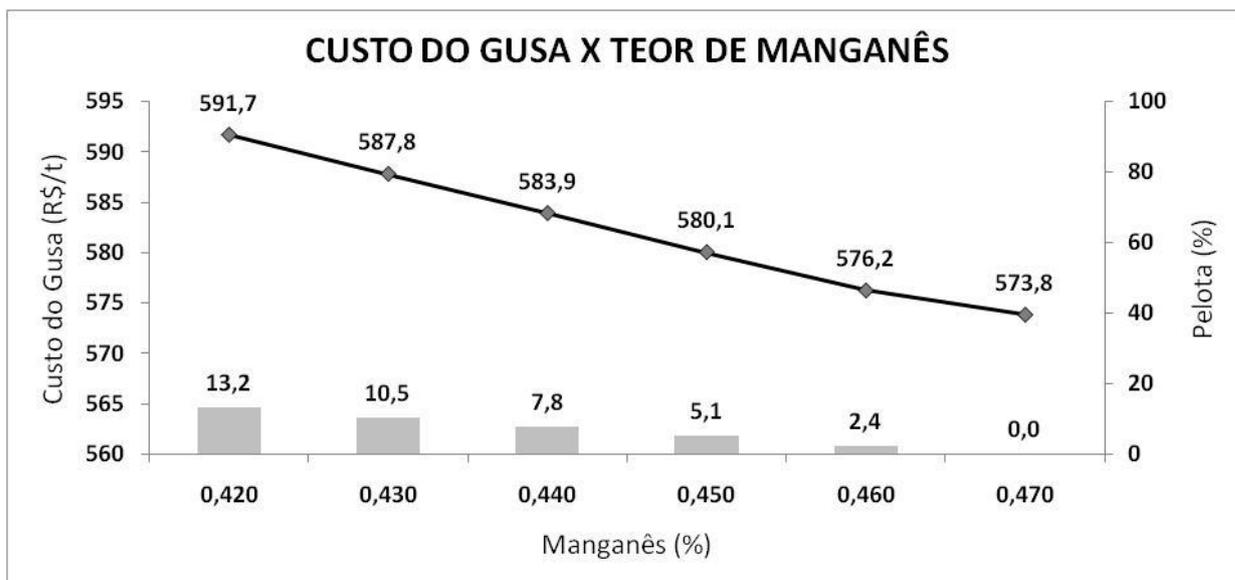


Figura 11 - Gráfico de correlação entre o custo do gusa e teor de manganês

Conforme o gráfico, uma faixa de referência para o manganês, seria valores menores que 0,45%, mostrando que o resultado otimizado do cenário base não respeita este limite, 0,47%. Em situações como esta, de aumento no teor de manganês, é necessário trabalhar com os teores de Si e S nas faixas superiores para proteção dos blocos de carbono do cadinho.

Uma consideração importante com relação aos teores de fósforo e manganês do gusa seria intensificar esforços na redução dos teores destes elementos frente aos fornecedores, principalmente nas matérias primas que compõem as cargas das sinterizações. O modelo pode mostrar o grande impacto que estes elementos trazem para o custo final do produto. Podemos concluir que as matérias primas utilizadas na simulação podem gerar impactos significativos em estabilidade do processo e resultados financeiros.

6 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido mostra a aplicabilidade da pesquisa operacional no suporte à tomada de decisões. No ambiente estudado, o modelo desenvolvido com a utilização de programação linear aliada a programação por metas mostrou-se capaz de retratar todas as restrições e características do processo.

Em um primeiro momento, o teste comparativo mostrou aderência do modelo otimizador ao atual método de tentativa e erro na definição de cargas para consumo nos altos-fornos. Quando realizado a comparação dos resultados, o modelo desenvolvido mostrou uma melhoria dos resultados financeiros e de processo, sendo que com a utilização da carga definida pela otimização, o custo do gusa pode ser reduzido e os índices técnicos e econômicos foram melhorados.

O modelo se mostra bastante útil no processo de tomada de decisões consideradas vitais na siderurgia, podendo suportar a estratégia de compras e consumo de matérias primas, processo este, que representa cerca de 30% da composição do custo final do produto. Outro ponto de destaque é a necessidade do modelo em garantir à qualidade do produto, a partir de matérias primas com propriedades químicas e metalúrgicas que estão em conformidade com as exigências tecnológicas do processo.

Com a utilização do modelo pode-se avaliar o impacto da variação de índices do processo no custo do produto.

A estrutura de implementação do modelo permite uma simples utilização, se mostrando ágil em análises comparativas sempre que inseridos os dados de entrada. O registro dos dados de entrada foi facilitado com o desenvolvimento de uma planilha de fácil interface com software de otimização utilizado. Os resultados gerados podem ser facilmente migrados para outros ambientes computacionais e são de fácil compreensão pelos usuários. Os tempos computacionais apresentados mostram que o modelo, implantado com a utilização do GLPK, está apto a dar respostas em tempo hábil para a tomada de decisões.

Por fim, através de uma simples ferramenta, temos a informação da carga que minimiza o custo do gusa, respeitando os requisitos tecnológicos e comerciais do processo.

Um desenvolvimento futuro do trabalho será estender o modelo para o planejamento mensal e anual de matérias-primas e realizar a integração do modelo com outros elementos da cadeia produtiva.

7 BIBLIOGRAFIA

SILVA, G. L. R. S.; DESTRO, E.; MARINHO, G. M.; ASSIS, P. S. Problema da otimização de mistura de carvão na produção de coque metalúrgico. In: 11º SEMINÁRIO DE CARVÃO, 11., 2011, Gramado. Disponível em:

<http://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_B4_B5_B6/B5_ARTIGO_01.pdf>.

Acesso em: 05 jul 2016

WAGNER, Harvey M. *Principles of Operations Research*, Prentice-Hall, 1975.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. *Introdução à Pesquisa Operacional*. São Paulo, 2005. p. 12-26.

WU S.; HAN, H.; LIU X. Mathematical Model for Blast Furnace Burden Optimization Based on the High-temperature Reactivity. *ISIJ International*. Beijing, v. 50, n. 7, p. 987-993, Nov. 2009.

CAO, W. et al. A Genetic Algorithm Application to Minimize Pig Iron Cost. *ISIJ International*. Beijing, v. 53, n. 2, p. 207-212, Aug. 2012.

BUENO, A. F.; OLIVEIRA, M. C. Goal programming (Programação Multiobjetivo). In: CORRAR, L. J.; THEÓPHILO, C. R. (Org.). *Pesquisa operacional para decisão em contabilidade e administração*. São Paulo: Atlas, 2004. Cap. 8, p. 394-438.

COSTA, Felipe Pereira da. *Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavras em mina a céu aberto*. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2005.

LEE, Sang M. *Goal Programming for Decision Analysis*, Philadelphia, 1972.

LEE, S. M.; ORR, D. Further results on planning horizons in the production smoothing problem, *Management Science*. v. 23, p. 490-498, 1977.

JUNIOR, José Cecílio M. *Programação Linear no planejamento agregado de produção e vendas de uma indústria siderúrgica*. 2009. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

FERNANDES, Mauro V. *Operação de Altos-Fornos e Equipamentos Auxiliares*. Ipatinga, 2012.