

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

BRUNO HERMÓGENES DAS GRAÇAS

Otimização da mistura de minérios no processo de sinterização objetivando minimização
de custo

Belo Horizonte

2017

BRUNO HERMÓGENES DAS GRAÇAS

Otimização da mistura de minérios no processo de sinterização objetivando minimização de custo

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

Orientador: Prof. Dr. Maurício de Souza

Belo Horizonte

2017

© 2017, Bruno Hermógenes das Graças

Todos os direitos reservados

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do ICEx - UFMG

Graças, Bruno Hermógenes das.

G729o Otimização da mistura de minérios no processo de sinterização objetivando minimização de custo / Bruno Hermógenes das Graças. Belo Horizonte, 2017.

41 f. : il.; 29 cm.

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

Orientador: Maurício Cardoso de Souza

1. Computação - Teses. 2. Programação linear
3. Sinterização. 4. Modelagem matemática.

I. Orientador. II. Título.

CDU

519.6*61(043)



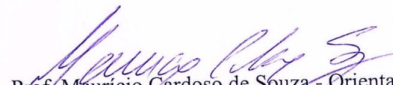
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

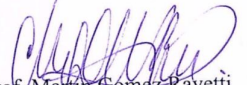
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
ESPECIALIZAÇÃO EM OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS: ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
GESTÃO INDUSTRIAL

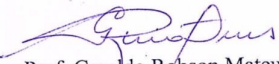
**OTIMIZAÇÃO DA MISTURA DE MINÉRIOS NO PROCESSO DE
SINTERIZAÇÃO OBJETIVANDO MINIMIZAÇÃO DE CUSTO**

Bruno Hermógenes das Graças

Monografia apresentada aos Senhores:


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


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


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

Belo Horizonte, 19 de maio de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus porque por Ele e para Ele são todas as coisas.

Agradeço a minha amada esposa Naiara pela atenção, carinho e compreensão dispensado a mim durante todo o período de realização dessa monografia.

A minha filha Esther, que com certeza foi a responsável pela alegria revigorante que tive.

Ao meu pai, grande companheiro e minha querida mãe, exemplo e admiração de pessoa pelo caráter e garra que me inspiram.

À UFMG pela grande oportunidade que tive em cursar minha especialização nesta instituição de grande renome.

Ao Gileno Antonio de Oliveira, Gerente Geral da Engenharia de Processos Industriais da Usiminas, responsável pela implantação histórica dessa especialização na empresa.

Agradeço finalmente ao meu orientador, professor Maurício, pela paciência e dedicação na arte de ensinar.

RESUMO

A sinterização compõe um importante processo em uma usina siderúrgica integrada. É responsável por 60% a 95% da mistura metálica carregada em um alto forno. O sinter compõe o produto intermediário em uma usina siderúrgica integrada. É produzido através da mistura de minérios, fundentes, combustível e resíduos siderúrgicos, formulada para atender tanto as condições operacionais do processo de sinterização, como os requisitos de qualidade do processo de produção de gusa. O minério de ferro desempenha um importante papel nesse contexto, tanto pelo volume envolvido como pelo impacto do seu custo no processo de sinterização.

Este trabalho trata da otimização e planejamento da mistura de minérios a serem utilizados na planta de sinterização de uma siderúrgica produtora de aço. O cenário atual conta com uma grande variedade de minérios com preços e qualidades bastante distintos. A proposta básica é o desenvolvimento de um modelo matemático que visa buscar a otimização da mistura a sinterizar que atendam aos requisitos do produto ao menor custo possível. Para tanto foram desenvolvidos e implementados modelos de otimização baseados em programação linear. A função objetivo adotada é a minimização do custo de produção. Foi utilizado o conceito de metas, onde cada meta gerencial estudada foi tratada como uma restrição no modelo. Nas etapas de implementação, validação e análise de sensibilidade onde a produção foi acrescida em cada um dos seis cenários em 5% (260.148t), os resultados comprovaram a eficiência e a potencialidade do modelo na minimização dos custos da mistura de minérios.

***Palavras-chave:** Programação Linear, Modelagem Matemática, Mistura Ótima de Minérios em Sinterização.*

ABSTRACT

Sintering composes an important process in an integrated steel mill. It accounts for 60% to 95% of the charged metal blend in a blast furnace. The sinter composes the intermediate product in an integrated steel mill. It is produced by mixing ores, fluxes, fuel and steel residues, formulated to meet both the operating conditions of the sintering process and the quality requirements of the pig iron production process. Iron ore plays an important role in this context, both by the volume involved and by the impact of its cost on the sintering process.

This work deals with the optimization and planning of the ore mixture to be used in the sintering plant of a steel producer. The current scenario counts on a great variety of ores with prices and very different qualities. The basic proposal is the development of a mathematical model that seeks to optimize the mixture to sinter that meet the requirements of the product at the lowest possible cost. For that, we developed and implemented optimization models based on linear programming. The objective function adopted is to minimize the cost of production. The concept of goals was used, where each managerial goal studied was treated as a constraint in the model. In the stages of implementation, validation and sensitivity analysis where the production was increased in each of the six scenarios in 5% (260,148t), the results proved the efficiency and the potential of the model in minimizing the costs of the ore mixture

Key words: Linear Programming, Mathematical Modeling, Optimal Mixing of Ores in Sintering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Preço do minério fino colocado no porto da China.	12
Figura 2 – Fluxo típico de um processo de sinterização.	19
Figura 3 – Disposição de pátios de recebimento e blendagem.	20
Figura 4 – Esquemático de uma torre de amostragem.	20
Figura 5 – Zonas do processo de aglomeração a quente.	21
Figura 6 – Fluxo do processo de tratamento mecânico do sinter.	22
Figura 7 – Relação do ferro total com o custo do sinter nas misturas testadas.	30
Figura 8 – Relação do aumento do FeT no custo do sinter por ponto de ferro.	31
Figura 9 – Diagrama de Ellingham para sulfetos.	32
Figura 10 – Relação da basicidade com o custo do sinter nas misturas simuladas.	33
Figura 11 – Relação da basicidade com a adição de fundentes no sinter.	34
Figura 12 – Relação da basicidade com o ferro total no sinter.	34
Figura 13 – Relação do aumento da basicidade no custo do sinter por ponto de ferro total.	35
Figura 14 – Relação do aumento de produção no custo do sinter nas misturas simuladas.	36
Figura 15 – Relação do aumento de produção no custo do sinter por ponto de ferro total.	37
Figura 16 – Impacto do TOP no custo do sinter nas misturas simuladas.	38
Figura 17 – Relação da variação do TOP no custo do sinter por ponto de ferro total.	38

LISTA DE SIGLAS

Al – Elemento químico Alumínio

Bas – Basicidade

Ca – Elemento químico Cálcio

CaO – Óxido de Cálcio

CIF - *Cost Insurance and Freight*

FeT - Ferro Total

FOB - *Free on Board*

Mg – Elemento químico Magnésio

Mn – Elemento químico Manganês

PF - Perda Física

PO – Pesquisa Operacional

PPC – Perda Por Calcinação

Si - Elemento químico Silício

SiO₂ – Sílica

TOP - *Take or Pay*

LISTA DE TERMINOLOGIA

Blending Reclaimer: equipamento utilizado para propiciar a remoção de matérias primas em pátios de estocagem de forma a potencializar a homogeneização da mistura.

Calcio ferritas: ligações químicas entre os óxidos de cálcio e óxidos de ferro obtidas a alta temperatura (500° a 1400°c).

Car Dumper's: virador de vagões, utilizado na descarga de vagões ferroviários tipo GDE.

Hooper de Materiais Diversos: utilizado na descarga de vagões com abertura no fundo.

Just-in-Time: sistema de administração da produção que determina que nada deve ser produzido, transportado ou comprado antes da hora certa. Just in time é um termo inglês, que significa literalmente “na hora certa” ou "momento certo".

Shatter test: ensaio de laboratório utilizado para medir a resistência mecânica de produtos ao impacto

Sinter: material poroso, obtido através da aglomeração de minérios de ferro, fundentes, adições e resíduos industriais, cujas características físicas, químicas e metalúrgicas são predeterminadas para atendimento aos altos-fornos.

Supply chain: cadeia logística

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Objetivos Gerais	13
1.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Organização do Trabalho	14
2	Revisão Bibliográfica	15
3	Descrição do Processo de Sinterização	19
3.1	Recebimento e Blendagem	20
3.2	Aglomeração a Frio	21
3.3	Aglomeração a Quente	21
3.4	Tratamento Mecânico	22
4	Modelagem Matemática	23
4.1	Contexto Geral	23
4.2	Desafios da Frente Comercial	24
4.3	Desafios da Frente Operacional	24
4.4	Tratamento dos Dados	24
4.5	Restrições	25
4.6	Conjuntos	26
4.7	Parâmetros	26
4.8	Variáveis de Decisão	27
4.9	Modelo Matemático	28
5	Estudo de Caso	29
5.1	Relação do FeT com o Custo do Sinter	29
5.2	Relação da Basicidade com o Custo do Sinter	31
5.3	Relação da Produção com o Custo do Sinter	35
5.4	Relação de Contrato Take or Pay (TOP) com o Custo do Sinter	37
6	Conclusão e Desenvolvimentos	39
6.1	Conclusão	39
6.2	Próximos Desenvolvimentos	39
7	Referências Bibliográficas	40

1 INTRODUÇÃO

As grandes flutuações que vem ocorrendo nos preços dos minérios ao longo dos anos no mercado mundial principalmente motivado pela China, maior consumidor dessa matéria prima, tem gerado grandes incertezas nas decisões com respeito às compras de minérios no curto e médio prazo. Algumas Siderurgicas buscaram a verticalização do negócio com aquisição de minerações, na tentativa de diminuir o reflexo dessas oscilações no custo do aço. Infelizmente a grande maioria ainda não são auto-suficientes em volume e qualidade deste recurso.

O cenário antes do efeito China e Índia era de grande disponibilidade de minérios com alta qualidade e baixo custo, as Siderurgicas utilizavam geralmente dois a três tipos de minérios de um único fornecedor. Esse cenário mudou e com a grande demanda por esse recurso os preços sofrem grandes oscilações o que pode ser visto na figura 1.

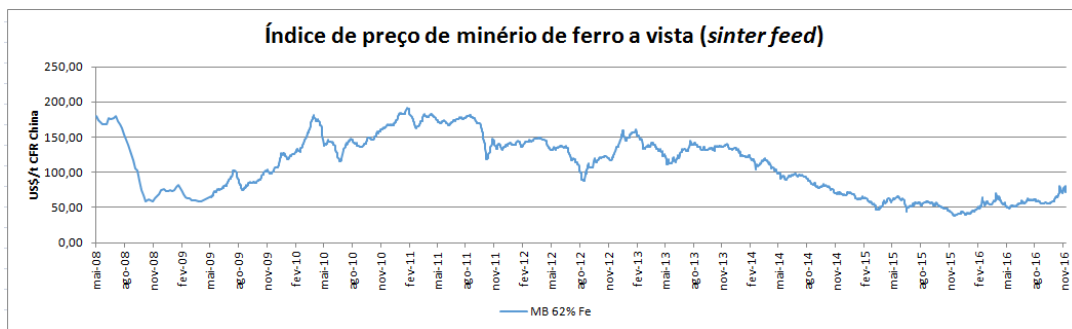


Figura 1– Preço do minério fino colocado no porto da China.

Fonte: Metal Bulletin <http://www.mbsonlineindex.com>

Esse novo cenário obrigou as empresas que tem dependência externa por minérios a buscar novas fontes alternativas de minérios para compor a mistura a sinterizar, que atendam aos requisitos técnicos e de qualidade ao menor custo.

Nessa busca por novas fontes de minérios alternativos, frequentemente, depara-se com minérios que são muito bons em um aspecto, porém muito ruins em outro e vice versa. O grande desafio é contrabalancear esses pontos fortes e fracos.

Diante do exposto torna-se um grande desafio para os processos de sinterização manter-se competitivo e continuar suportando o processo de altos fornos na busca por

redução de custos, mantendo-se a qualidade exigida do produto final da redução, o ferro gusa.

A pesquisa operacional vem sendo aplicada nas siderurgias como principal ferramenta de auxílio na tomada de decisão. Através de informações da realidade, associadas a comportamentos, modelos da realidade são desenvolvidos onde otimizações são buscadas com objetivo de redução de custos. Conforme é destacado por Taha (2008), como ferramenta de tomada de decisões, PO é uma ciência e também uma arte. É uma ciência em virtude das técnicas matemáticas que incorpora e é uma arte porque o sucesso das fases que resultam na solução do modelo matemático depende em grande parte da criatividade e da experiência da equipe de PO.

Segundo Lanchtermacher (2009), em diversos lugares do mundo existe a escassez de certo produto ou matéria-prima, pela dificuldade de produção e/ou obtenção, entre outras razões. Tal dificuldade exige que esses recursos escassos sejam empregados de forma mais eficiente e eficaz. Busca-se, portanto, maximizar ou minimizar (lucro, custos, receita, número de produtos, entre outros), chamada de um objetivo, que depende de um ou mais recursos escassos. Esses processos de otimização de recursos são aplicados a diversas áreas e entre elas podemos citar: determinação de *mix* de produtos, escalonamento de produção, roteamento e logística, planejamento financeiro, carteiras de investimento, análise de projetos, alocação de recursos de mídia, designação de equipe.

Dentro deste contexto, a pesquisa operacional dispõe de ferramentas e técnicas que podem auxiliar os gestores dos processos de sinterização na tomada de decisão que buscam ser mais competitivos em custos e qualidade.

1.1 Objetivos Gerais

Essa monografia trata do desenvolvimento de modelo matemático que visa auxiliar os gestores dos processos de sinterização em uma usina siderúrgica integrada na tomada de decisão de quais minérios devem compor a mistura a sinterizar que atendam aos requisitos do produto ao menor custo possível.

1.2 Objetivos Específicos

Definir entre uma variedade possível de matérias primas, quais as quantidades e tipos de minérios, fundentes e combustíveis devem ser escolhidos para compor uma mistura a sinterizar teórica ao menor custo.

Dar condições de analisar o impacto de variáveis externas no custo de sinterização, tais como contratos *take or pay*, e variações nos preços e volumes dos minérios disponíveis.

1.3 Organização do Trabalho

Inicialmente é apresentada uma introdução para que o leitor possa se situar no ambiente onde o trabalho é desenvolvido bem como os objetivos esperados do trabalho.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica referente ao assunto. No capítulo 3 é feita uma descrição breve do processo produtivo de sinterização e suas etapas. É desenvolvido no capítulo 4 o modelo matemático, com os parâmetros e variáveis de decisão. O capítulo 5 trata de um estudo de caso onde é feita a aplicação do modelo proposto e verificado o grau de aderência do mesmo à realidade, através da busca da mistura ótima de minérios a sinterizar que atenda todas as restrições pelo menor custo. No capítulo 6 é feita a conclusão e propostas para futuros desenvolvimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A área que estuda a otimização de recursos segundo Lanchtermacher (2009), é denominada programação matemática. Nela, a quantidade a ser maximizada ou minimizada é descrita como uma função matemática dos recursos (variáveis de decisão) escassos. As relações entre as variáveis são formalizadas por meio de restrições ao problema expressas como equações e/ou inequações matemáticas.

Segundo Arenales (2007), se fazer ciência é a capacidade de observar e descrever fenômenos naturais, sociais, econômicos, entre outros, a matemática tem uma importância fundamental na descrição desses fenômenos, processos ou sistemas, que podem ser físicos, químicos, biológicos, econômicos, buscam-se leis que os regem. Essas leis se prestam a serem descritas por relações matemáticas, dão origem aos modelos matemáticos. Em geral, para formular um modelo matemático, simplificações razoáveis do sistema ou problema real precisam ser considerados (em diferentes níveis) e a validação do modelo depende de a solução do modelo matemático ser coerente com o contexto original. Com isso, o modelo matemático é uma representação simplificada (abstração) do problema real.

Taha (2008), diz que uma solução do modelo matemático é viável se satisfizer todas as restrições. É ótima se, além de ser viável, resultar no melhor valor (máximo ou mínimo) da função objetivo. Se o modelo representar o sistema real razoavelmente bem, sua solução vai ser ótima também para a situação real.

Em PO não existe uma técnica única para resolver todos os modelos matemáticos existem várias técnicas específicas para modelos específicos como por exemplo: programação linear (que se aplica para modelos cuja função objetivo e restrições são lineares), programação inteira (na qual variáveis assumem valores inteiros), programação dinâmica (na qual o modelo original pode ser decomposto em subproblemas mais fáceis de tratar), otimização em redes (na qual o problema pode ser modelado como uma rede), e a programação não linear (na qual as funções do modelo são não lineares).

Willemain (1994), aconselha que a prática efetiva de PO requer mais do que competência analítica: requer também entre outros atributos, julgamento técnico (por exemplo, quando e como usar determinada técnica) e habilidade de comunicação e sobrevivência organizacional.

Existem na literatura, varias contribuições de trabalhos de PO utilizando-se da técnica de programação linear para formulação de modelos matemáticos com o objetivo de minimizar ou maximizar. Williams et al, *apud* Gandolpho et al. (2002), desenvolveu um modelo de programação linear para o problema de mistura, onde existem dois ou mais componentes, que podem ser um conjunto de matérias-primas, uma ou mais qualidades de cada um destes componentes, e um ou mais produtos a serem produzidos, de tal forma que certas necessidades sejam satisfeitas a um custo mínimo.

Gandolpho et al. (2002) apresenta em seu artigo, uma aplicação de programação linear fuzzy para o problema de mistura de carvões para siderúrgicas a coque. A lógica fuzzy permite modelar conceitos vagos e imprecisos, inerentes ao problema de misturas. A programação linear fuzzy é utilizada tanto para transformar a função objetivo como as restrições fuzzy em funções determinísticas, podendo assim ser tratadas por métodos tradicionais de programação matemática. O resultado obtido mostra o potencial de utilização desta metodologia para problemas de misturas.

Van Niekerk et al. (1991) desenvolveram em seu artigo um modelo de programação linear para a predição de uma mistura de carvão estabelecendo os requisitos mínimos de qualidade do coque de alto-forno, em vez da máxima qualidade de coque atingida, e o modelo foi aplicado para otimizar uma mistura de carvão escolhida do ponto de vista económico. As relações entre as propriedades do carvão, a resistência do coque e o desempenho de um alto forno foram investigadas por meio de estudos de correlação.

Moreira Junior (2009), em sua tese de mestrado, utilizou-se da programação linear objetivando a maximização da margem de contribuição para tratar o problema de elaboração do planejamento agregado de produção e vendas em uma siderúrgica produtora de aços especiais.

Ferreira et al. (2010) desenvolveu através de programação linear uma proposta de sistema para a determinação e aplicação do ônus efetivamente causado por desvios na qualidade estimada de um carvão contratado em empresa siderúrgica.

Em sua dissertação de mestrado, Silva (2011) desenvolveu modelos de otimização baseados em programação linear para otimizar e planejar a mistura de carvões na produção de coque metalúrgico buscando a minimização dos custos das misturas de carvões.

Yazaki (1991) em sua dissertação de mestrado desenvolveu um modelo de programação linear de inteiros mistos para planejamento e programação de suprimento de carvões em uma usina siderúrgica a coque.

Em seu artigo, Bellabdaoui (2006), propõe um modelo de programação linear de inteiros mistos para programação da produção de uma fundição contínua de aço, com vista ao aumento de produtividade.

Leondes et al. (1974) propõe em seu artigo, a aplicação de um modelo de programação linear inteira mista determinística para o problema de programação de ordens de produção em uma usina de aço onde se busca processar as ordens em uma sequência que minimiza o atraso total da entrega prometida para todas as encomendas.

Tang et al. (2000) em seu artigo apresenta um modelo matemático, baseado na idéia de *just-in-time*, para a solução de conflitos de máquinas no planejamento de produção de aço contínuo no ambiente de sistema de fabricação integrado de computadores. O modelo é desenvolvido como um modelo não-linear baseado em situações reais de produção, considerando tanto a entrega pontual como a continuidade da operação de produção. É então convertido em um modelo de programação linear que pode ser resolvido usando pacotes de software padrão.

Na prática podem existir incertezas na definição de metas ou restrições de um modelo ou possibilidades de valores dos coeficientes da função objetivo e restrições. Geralmente, em casos práticos, é feita uma simplificação onde se assume um valor aproximado, mais provável, dado a dificuldade em modelar as incertezas.

Na siderurgia, otimizar a mistura a sinterizar buscando a minimização de custos, não significa dizer que isso deve ser alcançado a qualquer custo. Metas e indicadores de qualidade devem ser inteiramente atendidos para satisfazer as exigências do processo e da gestão dos mesmos. Desenvolver um modelo que tenha em suas restrições as metas do processo, significa deixa-lo mais próximo da realidade.

Nas indústrias, requisitos de qualidade geralmente são mandatórios e devem ser alcançados para satisfazer uma necessidade, seja ela para um cliente externo ou interno. Importante é atender aos requisitos porém, ao melhor custo benefício uma vez que superar requisitos de qualidade está costumeiramente associado a aumento de custo.

Outro ponto importante é considerar todas as variáveis do processo. Para conseguir que a influência de todas sejam consideradas de forma que o modelo seja o mais simples, rápido e econômico, importante se faz analisá-las uma de cada vez.

Será adotado neste trabalho a programação linear e utilizado para definição de cenários e análise dos resultados o conceito de metas, uma vez que objetivos devem ser alcançados dadas as restrições dos processos siderúrgicos. Por se tratar de um problema

que envolve mais de uma variável, será tratada uma variável por vez até que todas as variáveis sejam otimizadas.

Existem vários trabalhos práticos que reforçam a utilização da programação linear em usinas siderúrgicas como importante ferramenta de auxílio na tomada de decisão que visa minimização de custos ou maximização de lucros, desta forma a pesquisa operacional, através da programação linear, vem se consolidando como ciência que gera resultados tangíveis.

3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO

A sinterização é um processo de aglomeração à quente de uma mistura de finos de minérios, coque, fundentes e adições, com dosagens e composições químicas definidas, cujo produto resultante, o sinter, apresente características químicas, físicas e metalúrgicas compatíveis com as solicitações do alto-forno.

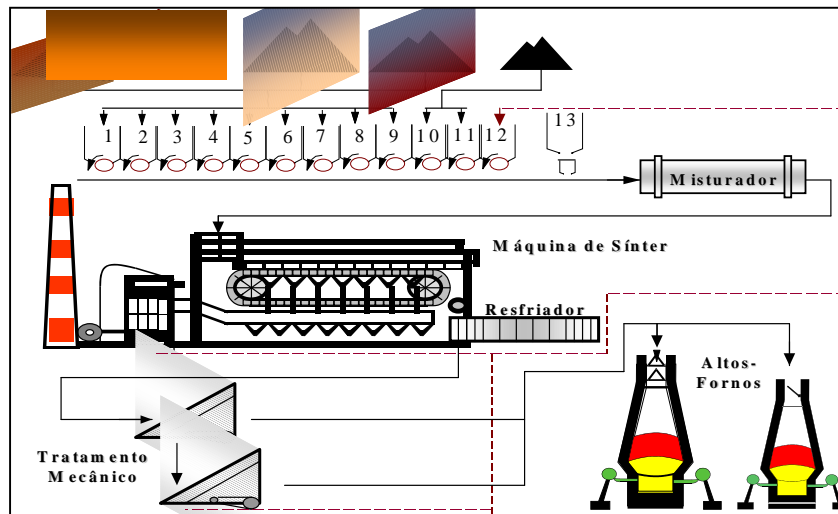


Figura 2 – Fluxo típico de um processo de sinterização.

(Fonte: Najar, 1981)

Para o caso em estudo, a Sinterização é do tipo contínuo (DWIGHT LLOYD), o processo é dividido basicamente em: recebimento e descarga de matérias primas (2 *car dumper's* e 1 *hooper de materiais diversos*), amostragem (2 torres de amostragem), pátios de estocagem (2 pátios primários e secundários), blendagem (2 conjuntos de silos de blendagem), abastecimento das máquinas de sinter (2 conjuntos de silos), misturadores (2 misturadores convencionais e 1 misturador intensivo), máquina de sinterizar (3 máquinas de sinter), resfriador de sinter (2 resfriadores de sinter), britadores e peneiras vibratórias para tratamento físico do sinter, pátios de estocagem de sinter além de máquinas de empilhar e remover materiais dos pátios.

3.1 Recebimento e Blendagem

O processo de recebimento e blendagem de matérias primas consistem em receber os minérios e fundentes adquiridos, realizar a descarga nos pátios primários de estocagem, homogeneizar a maioria das matérias-primas usadas na sinterização e fabricar o produto blendado e posterior estocagem nos pátios secundários. A remoção desta mistura é feita por recuperadores (*Blending Reclaimer*) que fazem a remoção de forma também a contribuir com a homogeneização das matérias primas. A figura 3 demonstra a disposição dos pátios de recebimento e blendagem.

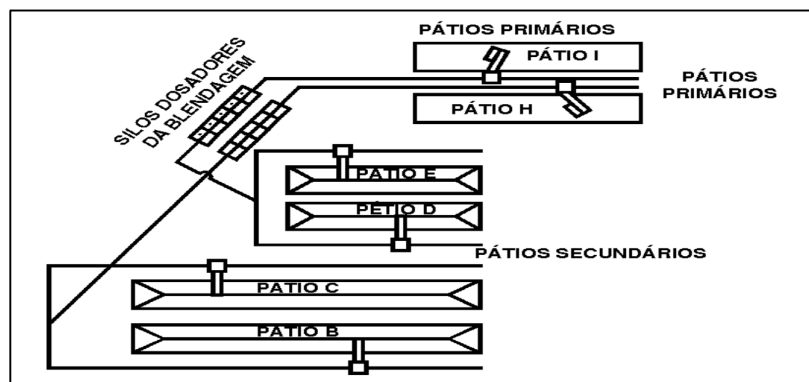


Figura 3 – Disposição de pátios de recebimento e blendagem.

A amostragem é fundamental para o processo operacional da sinterização e, por consequência, do alto-forno. Existem na literatura diversas normas referente a amostragem, mas o ponto crucial é garantir a representatividade da amostra dos minérios e fundentes recebidos. Para exemplificar, segue abaixo uma torre de amostragem para recebimento de minérios e fundentes via vagões ferroviários de uma empresa siderúrgica.

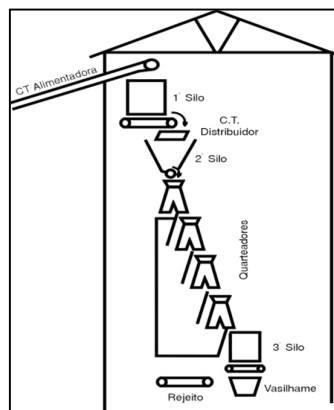


Figura 4 – Esquemático de uma torre de amostragem.

3.2 Aglomeração a Frio

O conceito de aglomeração consiste em unir partículas por forças físicas de curto alcance, com ou sem a presença de ligantes. Por ligantes entende-se material diverso daquele a ser ligado que se adere à sua superfície, química ou fisicamente, formando pontes, que conferem resistência mecânica suficiente para a finalidade prevista.

O processo de aglomeração consiste na adição de água e aglomerante (cal, por exemplo) ao mix de matérias primas e combustível e posterior misturamento controlado até que as partículas aumentem de tamanho unindo umas as outras. Esse processo é importante, pois potencializa o processo posterior que é a aglomeração a quente.

3.3 Aglomeração a Quente

O processo de aglomeração a quente consiste em duas etapas distintas na esteira da sinterização:

1 - Fenômeno físico de transferência de calor da camada superior para a inferior no leito de sinterização, proporcionada pela sucção forçada de ar, criando uma frente térmica.

2 - Fenômeno químico da combustão do combustível contido na mistura a sinterizar que produzindo calor gera uma frente de reações químicas.

O resultado desses fenômenos é a formação de zonas com características distintas conforme descrito na figura 5.

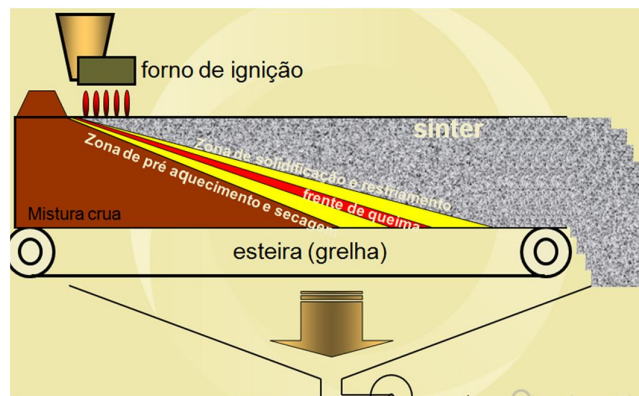


Figura 5 – Zonas do processo de aglomeração a quente.

O resultante desse processo de aglomeração a quente é um Sinter com características físicas e químicas bem definidas de forma a atender a aplicação nos altos fornos.

3.4 Tratamento Mecânico

Esse processo consiste na adequação granulométrica do sinter atendendo a necessidade de aplicação no Alto Forno que gira em torno de 20 a 50mm. Esse processo consiste em uma série de britadores (à quente e à frio) e peneiras vibratórias que são responsáveis pela quebra das partículas maiores e segregação das frações por faixas granulométricas, conforme apresentado na figura 6.

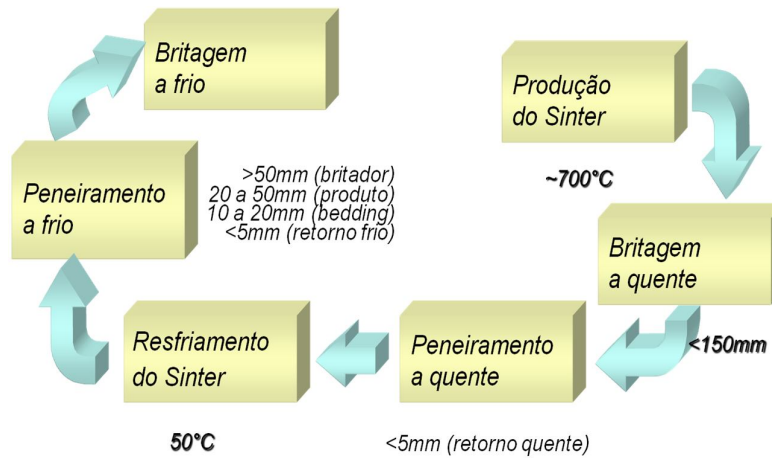


Figura 6 – Fluxo do processo de tratamento mecânico do sinter.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

4.1 Contexto Geral

O estudo de caso trata da aplicação do modelo matemático desenvolvido para definição da mistura de minérios, fundentes e combustíveis a serem utilizados na planta de sinterização, visando a elaboração do plano de produção de sinter de uma siderúrgica produtora de aços.

O modelo proposto deverá atender, simultaneamente, as características químicas, físicas e metalúrgicas, do sinter, compatíveis com as solicitações do alto-forno. Atender uma exigência da planta de desempenhar o papel de recicladora na siderurgia, ou seja, consumir o máximo de resíduos metálicos, fundentes e combustíveis gerados no processo siderúrgico. Finalmente atender, as exigências de custo, buscando o menor custo de produção da sinterização para que o produto seja atrativo financeiramente.

A sinterização, como recicladora de resíduos, desempenha um importante papel ambiental na Siderúrgica estudada, porém do ponto de vista operacional, torna-se um grande desafio consumir todo o resíduo gerado e ainda atender aos parâmetros físicos e químicos exigidos pelo alto-forno.

Apesar de cada siderurgia ter uma configuração específica para a composição da mistura de minérios na sinterização, onde, algumas são alto suficientes outras são totalmente dependentes de terceiros e algumas são parcialmente dependentes. Parte de sua massa metálica tem origem de terceiros. Trataremos essa matéria prima, o *sinter feed* como uma variável, independente da sua configuração. Será adotado quantidades disponíveis de cada minério, o valor do frete será incluído no preço do minério, de forma a simplificar o modelo.

O contexto atual, de flutuação de preço e variedade de minérios disponíveis, torna a tarefa de escolha dos minérios para compor a mistura muito difícil e dinâmica, dado as flutuações constantes dessa matéria prima.

A seguir são descritos, sucintamente, os desafios enfrentados pela frente comercial, representada pelas áreas de suprimentos, *supply chain* e área operacional.

4.2 Desafios da Frente Comercial

Do ponto de vista comercial, deve-se escolher, entre os minérios disponíveis no mercado, os minérios que atenderão em volume e preço as necessidades da área operacional. Outro fator que merecesse atenção especial é que alguns minérios já tem em seus preços, o custo e riscos com frete e seguros, denominado, frete CIF (*Cost, Insurance and Freight*), e em outros, o cliente é o responsável pelo custo e riscos com frete e seguros, frete FOB (*Free on board*), portanto existe a necessidade de alinhamento constante entre suprimentos e logística.

4.3 Desafios da Frente Operacional

No passado existiam de modo geral dois ou tres tipos de minérios, de um único fornecedor e com qualidades muito boas, porém devido ao empobrecimento dos minérios e o crescimento no mercado siderúrgico, principalmente motivado pela China, tornou essa tarefa de trabalhar com mais tipos de minérios e com qualidades e preços distintos, um grande desafio. Associado a isto está o aumento na geração dos resíduos motivado pela alta exigência por aços mais nobres e pela piora na qualidade das materias primas disponíveis.

4.4 Tratamento dos Dados

Os dados gerais foram fornecidos pela Siderúrgica estudada. Os volumes de produção das sinterizações para o orçamento de 2017 foram o ponto de partida para detalhamento das entradas. Junto com estes foram informados os dados relativos às produtividades, índice de funcionamento das máquinas de sinter, Perda Por Calcinção (PPC), umidade das matérias primas, resíduos de geração interna.

Os dados relativos a preços de compra das matérias primas, preço de fretes, distribuição das matérias primas e seus volume, foram inferidos a partir dos recebidos da empresa ou estabelecidos aleatoriamente, não sendo, portanto, valores reais.

Os dados de entrada foram extraídos de um arquivo Excel utilizado para a elaboração do orçamento de produção para 2017. Todos os dados são reais de valores propostos para produção de 2017 detalhados mensalmente com todos os parâmetros operacionais utilizados na sua elaboração.

O primeiro passo foi o agrupamento dos dados para o período anual. Partiu-se de dados mensais e distribuídos em três máquinas de sinterização, esses foram agrupados em uma máquina de sinter com volume anual correspondente ao somatório das três máquinas, visto que as misturas são praticamente idênticas e as máquinas de sinterizar com comportamentos similares, essa simplificação não promove perda de informação ou muda o sentido da decisão.

Em seguida foram atribuídos volumes e custo das matérias primas, o modelo de frete adotado para os minérios foi o CIF, onde nele o fornecedor é o responsável por todos os custos e riscos incluindo frete e o seguro até o local de destino.

O impacto da perda de volume, durante a calcinação, PPC, foi tratado em separado e seu efeito foi contabilizado tanto na qualidade do sinter quanto na produção através da adoção de um fator de perda.

A perda física (PF), que considera as quedas de matérias primas durante seu transporte, via correias transportadoras, dos silos de dosagens até as esteiras das máquinas de sinter, também foi considerada, abatendo-se da produção o percentual de perda.

O modelo foi implementado com utilização do Solver da Microsoft Office Excel 2010, com sistema operacional Windows 7 e processador Intel ® Core™ 2 Duo CPU P9400 @2,4 GHz com 4,00 GB de memória RAM e sistema operacional de 64 Bits.

A validação do modelo foi feita simulando o orçamento de 2017.

4.5 Restrições

O Modelo matemático deverá ser capaz de:

- ✓ Atender aos parâmetros de qualidade exigidos pelos Altos Fornos (Basicidade - CaO/SiO₂, Ferro total FeT);
- ✓ Não ultrapassar o volume máximo de oferta para cada minério;
- ✓ Consumir todos os resíduos de geração interna destinados a esse processo (função de recicladora);
- ✓ Produzir a quantidade de Sinter necessário para o Alto Forno.

4.6 Conjuntos

Conjunto J onde matérias primas a serem utilizadas para composição do sinter. Estas matérias primas incluem minérios, fundentes e combustíveis

4.7 Parâmetros

A seguir e apresentado a relação dos parâmetros adotados.

Para a produção de sinter. A sinterização deve atender a necessidade de sinter demandada pelo alto forno. O parâmetro utilizado foi:

d : quantidade de sinter demandado pelo alto forno expressa em toneladas (t).

Para a disponibilidade de matéria prima. Existem no mercado uma variedade de matéria prima disponíveis, porem com restrição de volumes. A Sinterização deve consumir no máximo, a disponibilidade de cada materia prima O parâmetro utilizado foi:

k_j : quantidade de matéria prima j disponível expressa em toneladas (t).

Para a qualidade do sinter. Uma das grandes funções da sinterização é atuar no alto forno como corretor de qualidade do gusa. Os parâmetros de qualidade utilizados para atender esse requisito foram:

c_j : percentual de CaO contido na matéria prima j;
 s_j : percentual de SiO₂ contido na matéria prima j;
 m_j : percentual de MgO contido na matéria prima j;
 f_j : percentual de FeT contido na matéria prima j;
 t_j : redução de massa pela PPC da matéria prima j;
 $m_{go\ sint}$: percentual de MgO contido no sinter;
 $f_{et\ sint}$: percentual de FeT mínimo contido no sinter;
 b : basicidade alvo do sinter;
 g : MgO alvo do sinter;
 h : FeT alvo do sinter.

Para os resíduos. Como informado anteriormente, a Sinterização desempenha um papel importante na Siderurgia como recicladora, portanto é uma premissa da empresa, que, todo o resíduo gerado internamente, deve ser consumido em sua totalidade. Esses resíduos impactam nos parâmetros de qualidade do sinter (basicidade, FeT e MgO). Para

considerar o efeito dos resíduos na qualidade do sinter foi adicionado ao modelo os parâmetros abaixo, uma vez que seus volumes e qualidades já são conhecidos, assim como sua influência nos resultados. Na prática esses parâmetros são dados pela análise química dos resíduos.

- \bar{b} : correção da basicidade devido à adição de resíduos metálicos, fundentes e energéticos;
- \bar{g} : correção do MgO devido à adição de resíduos metálicos, fundentes e energéticos;
- \bar{h} : correção do FeT devido à adição de resíduos metálicos, fundentes e energéticos.

Parâmetros técnicos. Os parâmetros abaixo foram desenvolvidos para atender a requisitos técnicos do processo.

- w : proporção de combustível sólido em relação a produção de sinter expresso em kg/t.
- z : proporção de cal sólido em relação a produção de sinter expresso em kg/t.

Parâmetros financeiros. O parâmetro financeiro é:

- p_j : preço da matéria prima j.

4.8 Variáveis de Decisão

A variável do modelo é a seguinte:

- x_j : quantidade da matéria prima j a ser consumida;

4.9 Modelo Matemático

O modelo matemático ficou assim formulado.

Função objetivo;

$$MIN \sum_{j=1}^J p_j x_j \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^J t_j c_j x_j = b \sum_{j=1}^J t_j s_j x_j + \bar{b} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J t_j m_j x_j = g \sum_{j=1}^J t_j x_j + \bar{g} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J t_j f_j x_j \geq h \sum_{j=1}^J t_j x_j + \bar{h} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J t_j x_j \geq d \quad (5)$$

$$x_j \leq k_j \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J a_j x_j = w d \quad a_j = \begin{cases} 1000, & \text{se } j \text{ é combustível} \\ 0, & \text{se não é} \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^J a_j x_j = z d \quad a_j = \begin{cases} 1000, & \text{se } j \text{ é cal} \\ 0, & \text{se não é} \end{cases} \quad (8)$$

$$x_j \geq 0 \quad (9)$$

A função objetivo é a minimização do custo de produção do sinter. Para tal tomamos, das matérias primas disponíveis (minérios, fundentes e combustíveis), aquelas que atendam a necessidade de produção de sinter demandada pelo alto forno ao menor custo.

A restrição (2) faz o balanço de massa onde o volume de matérias primas e seus respectivos valores de CaO e SiO₂ são capazes de atender a premissa de basicidade requerida pelo alto forno no sinter.

A restrição (3) garante que o MgO requerido no sinter pelo alto forno seja atendido.

As equações (4) define o mínimo de FeT no sinter, para atendimento da necessidade dos altos fornos.

A equação (5) garante o atendimento da demanda do alto forno por sinter.

A equação (6) garante o atendimento a restrição de disponibilidade máxima de minérios.

A equação (7) tem a finalidade de garantir o consumo técnico de combustível sólido.

A equação (8) tem a finalidade de garantir o consumo técnico de cal sólido.

A equação (9) determina o domínio e garante a não negatividade das variáveis.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Relação do FeT com o Custo do Sinter

Todas as análises que se seguem partiram de uma produção orçada para o ano de 2017 da siderúrgica estudada (produção base), e foram entendidas as variações nos demais parâmetros do sinter.

O ferro total do sinter (FeT) é um dos principais indicadores econômicos da área de redução estudada, isso porque o sinter corresponde a aproximadamente 90% da carga metálica dos altos fornos e o gusa, produto resultante do processo de alto forno, tem aproximadamente 95,5% de ferro e 4,5% de carbono.

Para entender o impacto da variação deste elemento no custo da mistura, partiu-se de uma referência mínima de 56,0% de FeT no sinter, variando sempre de +0,1% em cada mistura testada.

Abaixo, são descritos os resultados e análises dessa simulação.

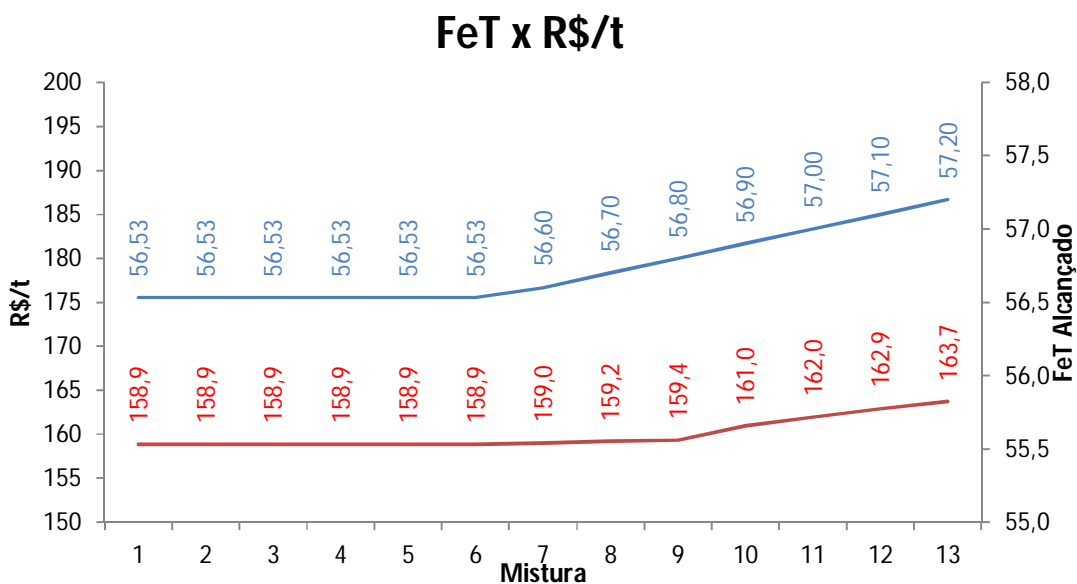


Figura 7 – Relação do ferro total com o custo do sinter nas misturas testadas.

A figura 7 demonstra a correlação entre o ferro total (FeT) contido no sinter e o impacto no seu custo. Observa-se que nas misturas 1 a 6 o teor de FeT mínimo objetivado no sinter foi variado de 56,0% a 56,5%, porém o resultado não variou, tanto para o custo como para o FeT alcançado. Podemos assumir que o FeT mínimo do sinter é 56,53%, considerando os minérios disponíveis com suas respectivas qualidades e garantindo o atendimento a todas as restrições.

Para as misturas 14 e 15 algumas restrições não foram atendidas. O FeT mínimo da mistura 14 57,30% não foi atendido (real: 57,16%), já a mistura 15 não atendeu a restrição de basicidade 1,60 (real: 1,58).

Pode-se assumir que com a mistura 13 obteve-se o FeT máximo do sinter (57,20%) e custo máximo, considerando os minérios disponíveis com suas respectivas qualidades e garantindo o atendimento a todas as restrições.

Definidos os limites de FeT no sinter, estabelece-se a faixa de trabalho possível, que está compreendida as misturas 6 a 13. Pode-se concluir que a mistura 9 é a mistura ótima em relação a custo benefício, pois ela proporciona um significativo incremento de FeT (+0,268 %) com o menor incremento em custo (+0,486 R\$/t). Esta afirmação é reforçada pela análise do custo por ponto de ferro (R\$/ponto de FeT), demonstrado na figura 8, onde o menor custo específico (2,806 R\$/Ponto FeT) é alcançado. Em

comparação com a mistura 13, a mistura 9 permite uma redução no custo da mistura por ponto de FeT de 1,9%.

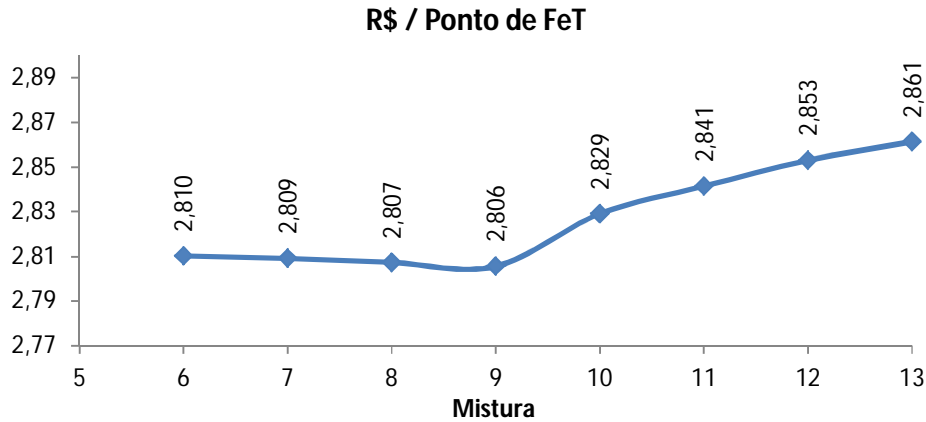


Figura 8 – Relação do aumento do FeT no custo do sinter por ponto de ferro.

5.2 Relação da Basicidade com o Custo do Sinter

Outra função importante do sinter é atuar como corretor químico da escória no gusa, controlando a fluidez e o ponto de fusão da escória. Ajustar a composição química da escória via sinter é mais econômico e eficiente, isso devido ao próprio processo de produção do sinter que conta com um sistema de dosagem e homogeneização da mistura a sinterizar, além de, este produto compor cerca de 90% da carga metálica dos altos fornos avaliados.

A menor basicidade do sinter pode reduzir o volume de escória no alto forno, o que reflete diretamente na estabilidade do processo e consumo de combustível (já que maior volume de escória exige maior aporte térmico no alto forno). A menor basicidade também significa menor temperatura liquidus da escória (menor aporte térmico para fundir totalmente a escória), assim a temperatura de operação será maior que a temperatura liquidus, garantindo que a escória estará totalmente líquida ao ser retirada do cadinho.

Por outro lado, quanto menor a basicidade (menor quantidade de Ca) do sinter pior será a fluidez da escória (maior viscosidade) e pior será o processo de dessulfuração (retirada de enxofre) do gusa considerando que o Ca tem maior afinidade com enxofre. Termodinamicamente, no diagrama de Ellingham para sulfetos da figura 9, traçando-se uma linha perpendicular ao eixo da temperatura, esta tocara as curva que representam a

formação de sulfetos pela seguinte ordem de afinidade pelo enxofre dos elementos contidos no gusa: $Ca > Mg > Mn > Al > Si$.

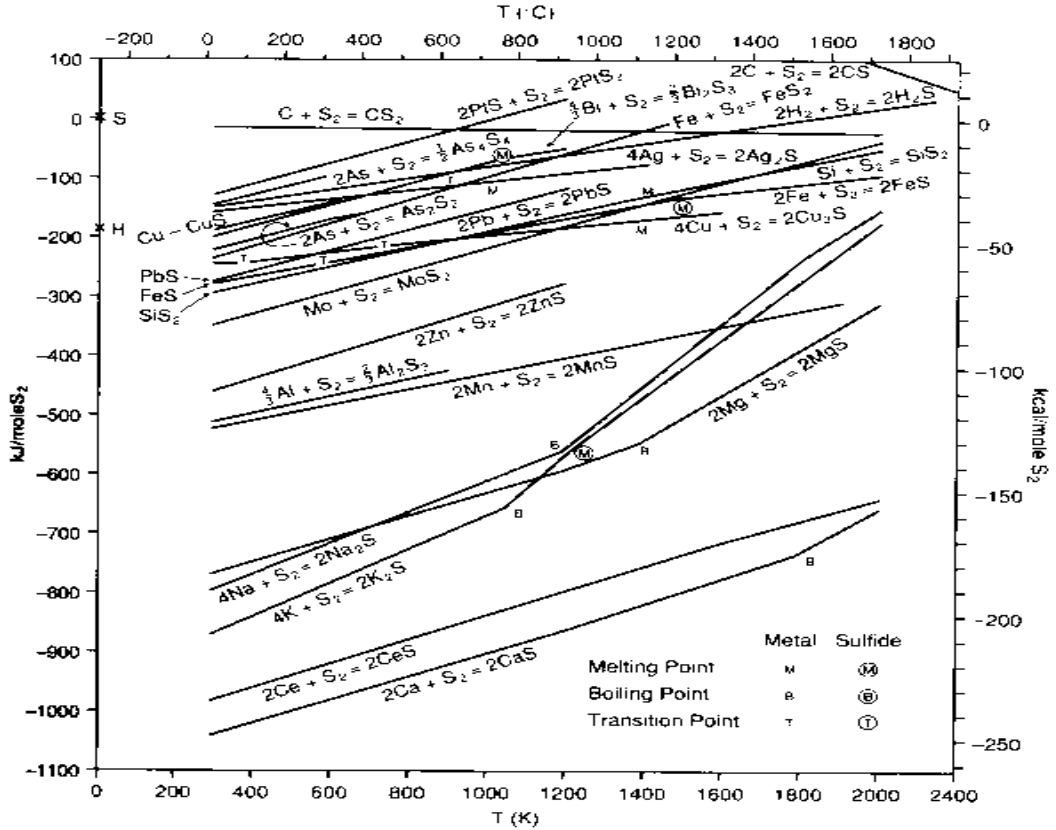


Figura 9 – Diagrama de Ellingham para sulfetos.

A correção da basicidade na sinterização, elimina a necessidade de adição de quartzo (fonte de sílica SiO_2) e ou calcário (fonte de CaO), diretamente no gusa. A adição desses componentes torna o custo do gusa mais elevado, portanto é mais econômico ajustar esse parâmetro através da carga metálica (sinter) a ser carregada. Porém, quanto menor a basicidade do sinter pior será sua resistência mecânica ao impacto (shatter test), devido à fragilidade do sinter pela baixa concentração de fundentes, que são responsáveis pela ligação dos minérios, formando calcio ferritas.

Para entender melhor o efeito da variação da basicidade do sinter no seu custo, partiu-se de uma mistura ótima, obtida anteriormente (FeT de 56,80%) e foi variada a basicidade de 1,54 a 1,72 (faixa de trabalho dos fornos estudados)

Abaixo, são descritos os resultados e análises do impacto da basicidade no custo da mistura.

Bas x R\$/t

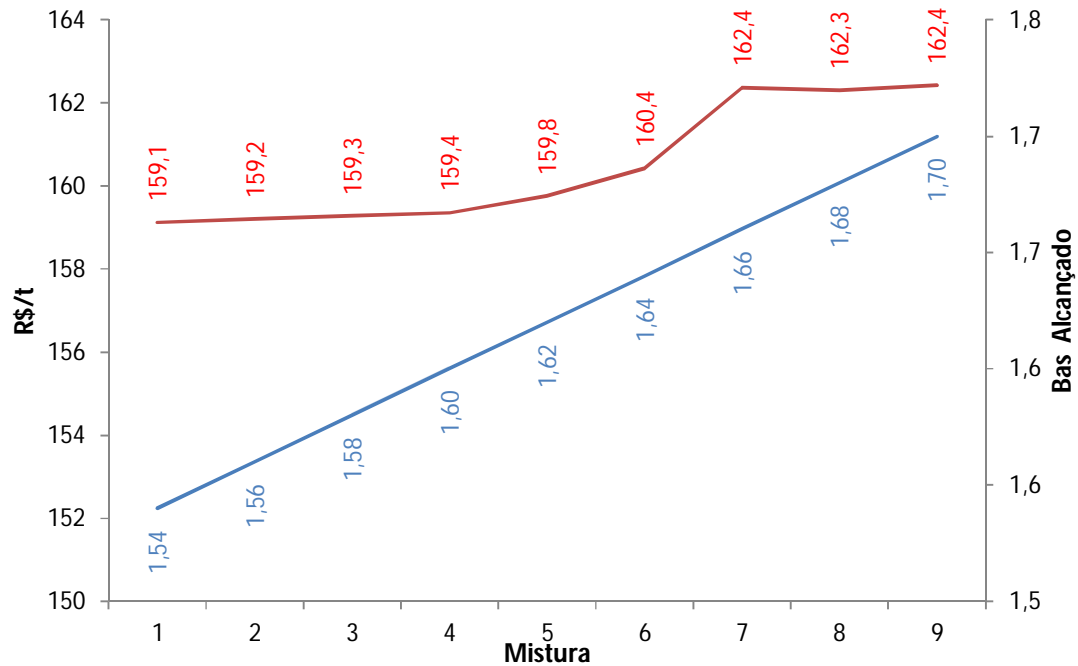


Figura 10 – Relação da basicidade com o custo do sinter nas misturas simuladas.

A figura 10 demonstra a correlação entre a basicidade contida no Sinter e o impacto no seu custo. A basicidade de 1,72 da mistura 10 não atende a restrição de FeT mínimo (real: 56,74%), portanto o limite máximo de basicidade que atenda todas as restrições foi obtido pela mistura 9 (1,70).

Quanto maior a basicidade maior é o custo da mistura, isto porque a basicidade está diretamente relacionada com a adição de fundentes, que tem custo mais elevado que o sinter, isso pode ser visto na figura 11.

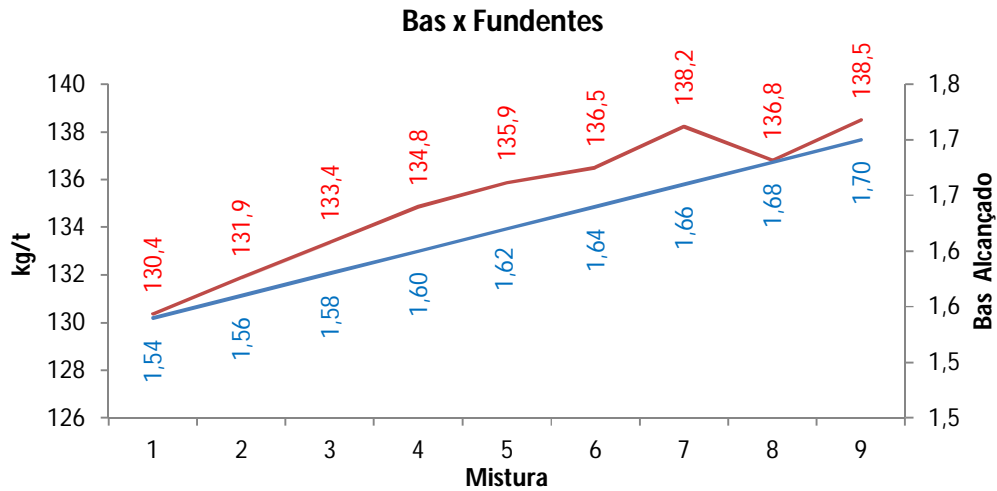


Figura 11 – Relação da basicidade com a adição de fundentes no sinter.

O limite ideal de basicidade nas sinterizações estudadas que não gera impacto na resistência física do sinter é de 1,60. Note na figura 10 que a mistura 4, em comparação com a mistura 1, eleva a basicidade em +0,06 com um incremento de custo de apenas R\$/t 0,233, essa mistura eleva a participação de fundente em +4,5 kg/t (figura 11) porém sem variação no FeT do sinter (figura 12).

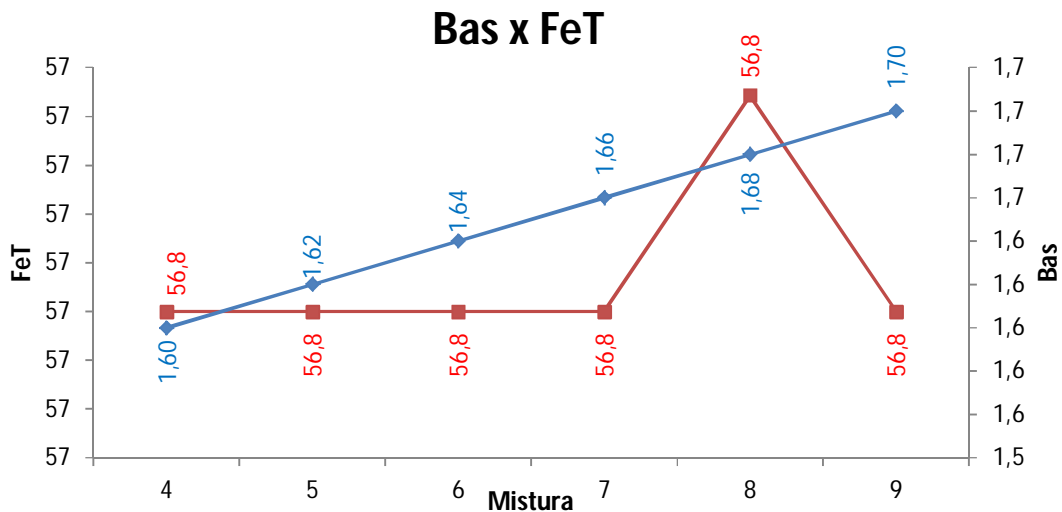


Figura 12 – Relação da basicidade com o ferro total no sinter.

Desprezando as misturas 1 a 3, por gerarem uma pior resistência física com uma pequena redução de custo, foi adotado a mistura 4 como limite inferior de basicidade e portanto foi a que gerou menor custo por ponto de ferro (R\$/ponto de FeT 2,806),

mantendo-se a vantagem competitiva de -1,9% do custo em relação a mistura 9 com maior basicidade, isso pode ser visto na figura 13. Portanto entende-se que apesar da elevação no custo do sinter a mistura 4 é a que oferece o melhor custo benefício, uma vez que o que importa para o processo seguinte (Alto Forno) é a quantidade de ferro carregado, pois os demais resíduos ficam dispostos na escória, onde é necessário inclusive adição de combustível para a remoção da mesma.

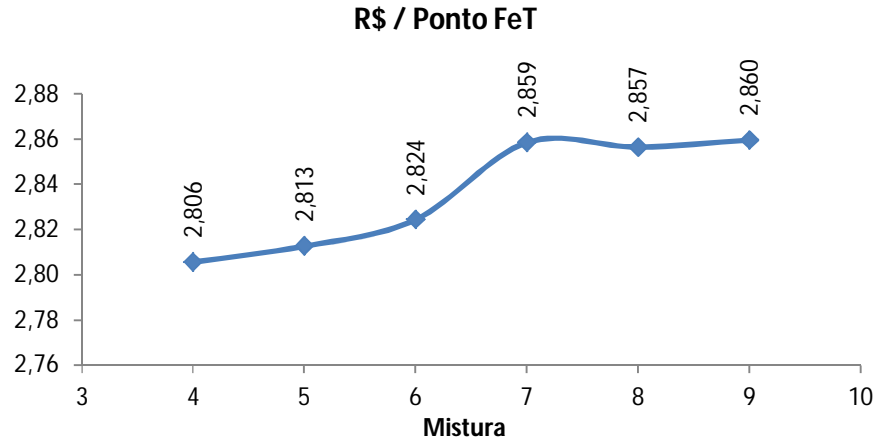


Figura 13 – Relação do aumento da basicidade no custo do sinter por ponto de ferro total.

5.3 Relação da Produção com o Custo do Sinter

Um ponto importante a ser considerado é a influência do aumento de produção no custo do sinter. Essa informação possibilita verificar o grau de aderência do modelo aos objetivos a serem alcançados. Uma vez que existem quantidades limitadas de matérias primas e com objetivo de minimizar o custo da mistura a sinterizar, o modelo teria que em tese escolher os minérios em ordem, dos mais favoráveis para os menos favoráveis, até alcançar a produção orçada para 2017 (produção base).

Quando se eleva a produção, partindo da mistura otimizada e mantêm-se os parâmetros de qualidade ótimos, espera-se que o custo da mistura aumente, dado que os próximos minérios a preencher a nova produção são os mais caros. Para comprovar tal afirmação, foi acrescido à produção um valor fixo de 5% da produção base (260.148t) a cada cenário de mistura e mantido como premissa os valores das variáveis que resultaram em um custo ótimo (56,80% de FeT e basicidade de 1,60).

Os resultados são apresentados a seguir.

Incremento na Produção x R\$/t

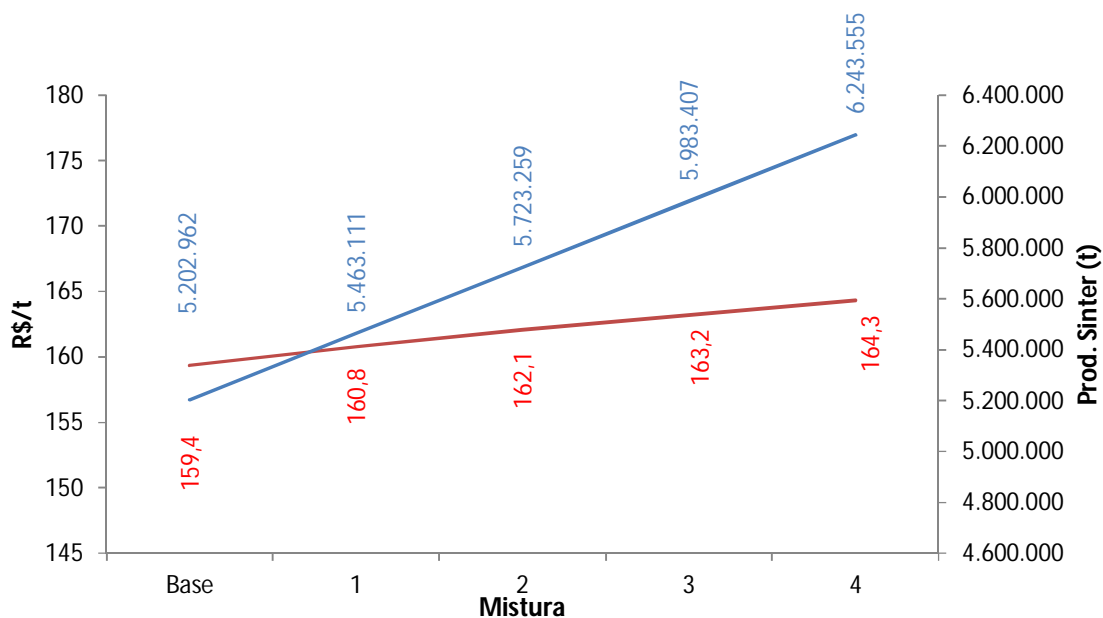


Figura 14 – Relação do aumento de produção no custo do sinter nas misturas simuladas.

Todas as premissas foram atendidas pelas misturas 1 a 4. As misturas 5 e 6, não conseguiram atender a restrição de mínimo FeT de 56,80%, alcançando respectivamente 56,77% e 56,50% de FeT.

Pode ser visto na figura 14 que sempre que houve um acréscimo na produção base, houve da mesma forma uma elevação no custo da mistura, isso leva a crer que a mistura base atingiu seu ponto ótimo em custo, visto que como havia possibilidade de escolha para os minérios disponíveis nos volumes disponíveis, considerando a produção orçada para 2017, foi escolhido pelo modelo os minérios mais favoráveis. O menor custo da mistura está condicionado a produção orçada, caso seja necessário um incremento de 20% na produção, esta ação deverá gerar um benefício 2,8% superior ao custo da mistura base para que o sinter continue mantendo sua margem de contribuição. Diante do exposto pode-se dizer que o modelo representou bem essa realidade.

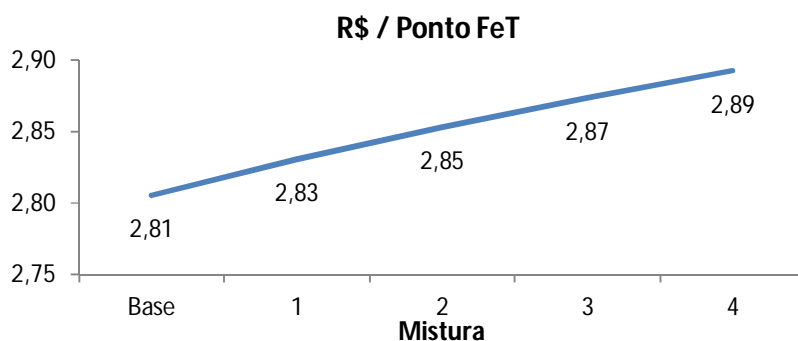


Figura 15 – Relação do aumento de produção no custo do sinter por ponto de ferro total.

Desprezando as misturas 5 e 6 por não atingirem a premissa de FeT mínimo, o aumento no custo do sinter por ponto de FeT, em módulo foi de +0,02 R\$/Ponto de FeT, a medida que a produção era aumentada conforme demonstrado na figura 15. Mais uma vez corrobora a aderência do modelo em representar a realidade.

5.4 Relação de Contrato Take or Pay (TOP) com o Custo do Sinter

Uma ação muito comum nos setores minero-siderúrgicos é a criação de contratos de fornecimento de minérios do tipo Take or Pay (TOP) para as siderúrgicas. Nesses contratos as empresas siderúrgicas garantem o pagamento, ao preço do contrato, às mineradoras, de um volume anual de minério fixado previamente, independentemente de esse volume ser ou não consumido.

Para efeito de se prever o efeito de tal exigência, foi simulada a participação obrigatória de um determinado minério, que antes tinha 46% de participação na mistura ótima, e avaliado seu impacto no custo da mistura. Tomou-se por base as variáveis alcançadas com a mistura otimizada (56,80% de FeT, basicidade de 1,60, produção de 5.202.962t) e posteriormente foi arbitrado percentual (30% até 70%) de participação desse minério na mistura, variando sempre de +5% a cada simulação.

Os resultados são apresentados a seguir.

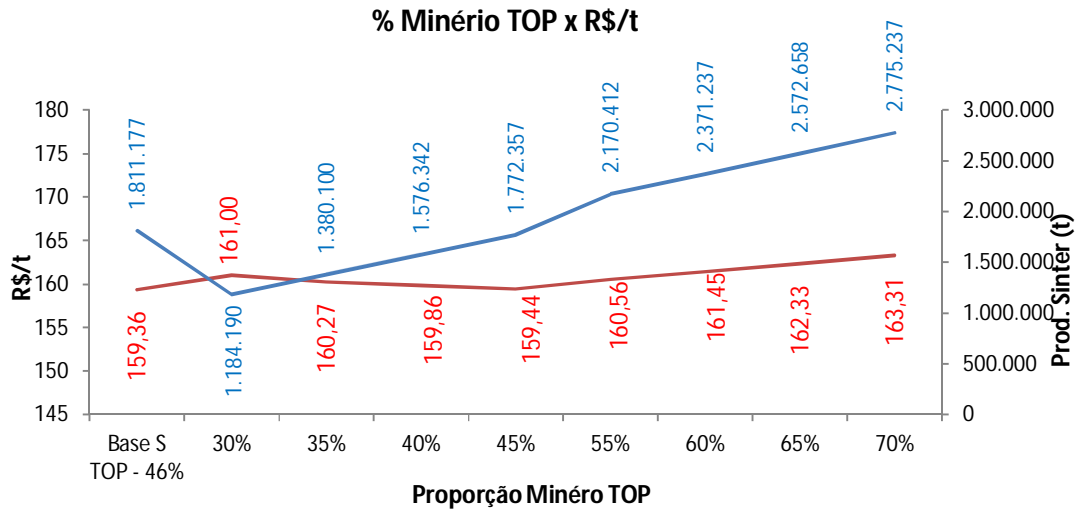


Figura 16 – Impacto do TOP no custo do sinter nas misturas simuladas.

Observa-se na figura 16, que o TOP a partir de 30% desse minério em especial gera um decréscimo no custo da mistura até atingir seu menor custo, próximo a 45% de participação, a partir do qual, o custo da mistura volta a se elevar tornando inviável sua participação. Tal efeito também pode ser visto com mais clareza na figura 17, pois o menor custo por FeT é obtido próximo a esta mesma proporção. Esta afirmação reforça ainda mais que a mistura base com 46% desse minério em especial é a mistura ótima do ponto de vista de custos. Caso a siderúrgica estudada fosse efetivar um contrato TOP desse minério, sua participação viável na mistura deveria ser de 46%, considerando o preço utilizado no modelo, porém se por algum motivo o volume em contrato fosse limitado a 30% o custo da mistura aumentaria +0,7%, já se esse contrato fosse estabelecido com participação de 70% desse minério, o custo da mistura aumentaria em +1,4%.

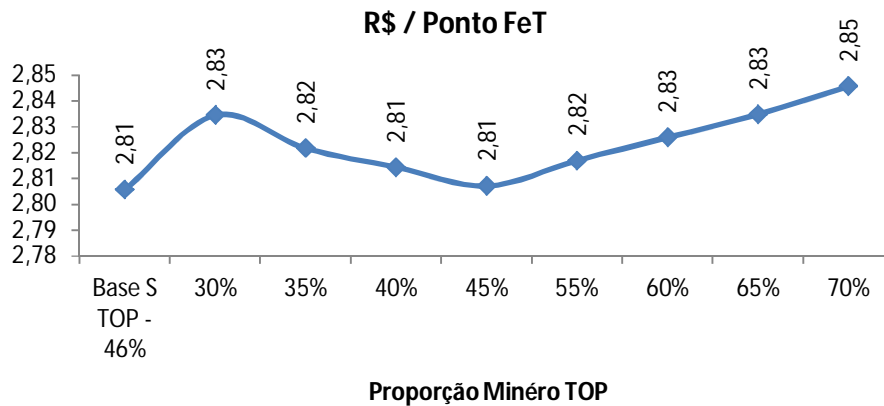


Figura 17 – Relação da variação do TOP no custo do sinter por ponto de ferro total.

6 CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS

6.1 Conclusão

O cenário que gerou um menor custo da mistura foi o que teve a configuração com FeT de 56,8%, Basicidade de 1,60%, Produção Sinter 5.202Mt, TOP do minério principal de 46% na mistura.

O trabalho desenvolvido demonstra a aplicabilidade das ferramentas de pesquisa operacional no âmbito da siderurgia e sua importância no auxílio da tomada de decisão, principalmente quando existem muitas variáveis envolvidas nesse processo de decisão. O cenário siderúrgico atual onde existe uma grande variedade de fornecedores de minérios com preços e qualidades das mais diversas, um sistema que consiga receber e interpretar as variáveis envolvidas gerando resultados compatíveis com as metas e restrições envolvidas no processo são de grande ajuda como ferramenta de auxílio à decisão.

Os experimentos demonstram a aderência do modelo à condição real, levando a tomada de decisão consistente e que gera valor do ponto de vista econômico e direciona a empresa de forma mais assertiva.

O conceito de metas auxilia e muito no desenvolvimento de cenários e na interpretação dos seus resultados, ajudando a compreender com mais clareza a realidade e aplicabilidade do modelo em um mundo real.

6.2 Próximos Desenvolvimentos

Um desenvolvimento desse modelo será a inserção de outras restrições e metas, principalmente de qualidade do sinter (física e de reductibilidade), que começam a fazer sentido do ponto de vista econômico e técnico dado o contexto atual de degradação da qualidade dos minérios de uma forma geral.

Outro desenvolvimento será a integração do processo alto forno no modelo, pois ações que inviabilizam o custo nas sinterizações em uma primeira análise podem ser mais benéficas nos altos fornos pagando inclusive o custo a maior nas sinterizações. Esses impactos no modelo estudado foram considerados como metas, restrições ou foram atribuídos nos resultados obtidos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKOFF, R.L.; SASIENI, M.W. *Pesquisa operacional*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.A; MORABITO, R.; YANASSE, H.H. *Pesquisa operacional*. 5a Reimpressão, Rio de Janeiro: Elsevier, 2007

BELLABDAOUI, A. ; TEGHEM, J. *A mixed-integer linear programming model for the continuous casting planning*. Int. J. Production Economics V. 104, pp. 260-270, 2006

FERREIRA FILHO, J.C ; MEDEIROS, R.L. *Sistema para aplicação de penalidades por desvios na qualidade estimada de carvões siderúrgicos para a produção de coque*. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, V. 5.3, pp 49-57, 2010

GANDOLPHO, A. A.; VELLASCO M. R.; TANSCHKEIT R.; PIZZOLATO N. D. *programação linear fuzzy para problemas de mistura*. Artigo apresentado no XXXIV Simpósio Brasileiro De Pesquisa Operacional, Rio de Janeiro, 2002.

HILLIER, F.; LIEBERMAN, G.J. *Introduction to Operations Research*. 9a Edição, Mc Graw Hill, 2010.

HONORATO, E.P; RANGEL, NAJAR, F. J. - *Curso: Utilização do minério de ferro na siderurgia*. USIMINAS, Ipatinga, M.G, Ipatinga, M.G, Brasil, p.6-27, 1993

HONORATO, E.P. *Adequação granulométrica das matérias-primas e do sistema de segregação contínua (I.S.F), para melhorias na produtividade e qualidade do sinter para os altos-fornos*. Dissertação de Mestrado aprovada pelo CPGEM/EEUFMG, Belo Horizonte, 2005.

LANCHTERMACHER, G. *Pesquisa Operacional na tomada de decisões*. 4a Edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

FERREIRA FILHO, J.C ; MEDEIROS, R.L. *Sistema para aplicação de penalidades por desvios na qualidade estimada de carvões siderúrgicos para a produção de coque*. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, V. 5.3, pp 49-57, 2010

LEONDES C. T. ; REDWINE C. N. ; WISMER D. A. *A mixed integer programming model for scheduling orders in a Steel Mill*. Journal of optimization theory and applications: vol. 14, no. 3, pp 305-318, 1974

TANG L. ; LIU J. ; RONG A. ; YANGEONDES Z. *A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production*. European Journal of Operational Research V. 120, pp 423-435, 2000

NAJAR, F.J; SANTOS, J.F. *Curso de Sinterização*. USIMINAS, Ipatinga, M.G, Brasil, p. 32-66,1981.

SILVA, G.L.R. *Otimização da mistura de carvões na produção de coque metalúrgico*. Dissertação de Mestrado aprovada pelo UFOP/CETEC/UEMG, Ouro Preto, 2011.

TAHA, H. A. *Pesquisa operacional*. 8a Edição, São Paulo: Person Prentice Hall, 2008.

VAN NIEKERK, W. H; DIPPENAAR, R.J. *Blast-furnace coke: A coal-blending model*. J.S. Atr. Inst. Min. Metal V. 91, pp 53-61, 1991.

WILLEMAIN, T. R. "*Insights on modeling from a dozen experts*". Institute for Operations Research and the Management Sciences V. 42, n. 2, p.p 213-222, 1994

YAZAKI, K. *Planejamento e programação de suprimento de carvões em uma usina siderúrgica a coque*. Dissertação de Mestrado aprovada pelo PUC-RIO/DEI, Rio de Janeiro, 1991.