

# OTIMIZAÇÃO DO ROTEIRO TECNOLÓGICO APLICADA NO REFINO DO FERRO-GUSA<sup>1</sup>

Átila Durães do Carmo<sup>2</sup>

Carlos Roberto Venâncio de Carvalho<sup>3</sup>

Luiz Fernando Andrade de Castro<sup>4</sup>

## Resumo

O presente trabalho objetivou proporcionar uma contribuição relativa aos estudos de redução de custos através de um modelo de análise do impacto da variação de matérias-primas e técnicas de refino no custo final do aço. O modelo desenvolvido utiliza Programação Linear como ferramenta de apoio à decisão e, é parametrizado, principalmente, através da utilização de Regressão Linear Múltipla. O desenvolvimento do trabalho foi baseado em comparações entre situações hipotéticas (cenários) e referências históricas. O cenário "Blending limitado" apresenta, em relação aos dados históricos uma diferença de custo de aproximadamente 8%, a qual pode ser atribuída em parte a otimização, devendo-se, contudo, mencionar as incertezas acerca das análises químicas dos materiais utilizados no processo. A diferença existente entre os cenários "Blending" flexibilizado e "Blending" limitado pode ser atribuída a remoção da margem de segurança característica da prática do processo (conseqüência direta da otimização); mas, também em função de outros efeitos potencialmente atribuídos a formação de cargas, porém não contemplados no escopo desse trabalho. A construção de modelos de Análises de Custos sobre plataformas de Programação Linear e suportados por Análise de Regressão demonstrou ter um grande potencial de contribuição para as decisões de cunho tático e operacional relativas ao processo siderúrgico. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se principalmente a incorporação da metodologia de Projeto de Misturas ao estudo.

**Palavras-chave:** Otimização; Refino; Blendagem; Ferro-Gusa.

## OPTIMIZATION ANALYSIS ON THE PIG IRON REFINING PROCESS

### Abstract

This work tries to give a contribution to cost studies about steel process through a model to analyze impacts of changes in raw materials and refining techniques on final steel costs. This model needs Linear Programming as a support decision tool, and their coefficients are calculated by Multiple Linear Regression. The most important point on this work is the analysis between historical data and hypothetical cases. The first comparison is about: Limited Blending and Historical Results. This analysis has showed a cost difference around 8%. This difference is probably originated by the optimization, but is necessary to mention the uncertainty concerning chemical analysis of the raw materials. The analysis between Flexible Blending and Limited Blending has showed a big difference (around 36%). A possible explication is the reduction/elimination of the security surplus to get the product specification and other effects caused by the blending process, but not included on this study. Cost Analysis Models combined with Linear Programming and Multiple Linear Regression have shown a great potential of contribution to steel decision process in tactical and operational levels. As a suggestion to future works, it is recommended the utilization of Mixture Design methodology.

**Key words:** Optimization; Refining; Blending; Pig Iron.

---

<sup>1</sup> Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia de Produção – UFMG

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia de Produção – UFMG

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia Metalúrgica – UFMG

## INTRODUÇÃO

Em se tratando do aço, ferro-carbono não ligado, ou seja, uma das mais clássicas commodities (produtos de tecnologia padronizada), é inerentemente óbvia, a dedicação de uma significativa parcela dos esforços à obtenção das especificações exigidas pelo mercado da maneira mais econômica possível. Dentre os esforços de minimização de custos e aumento de qualidade, cabe citar os mais amplamente difundidos na siderurgia, conforme descritos no trabalho de Silva:<sup>(1)</sup>

- Maior flexibilidade quanto a matérias-primas e insumos;
- Projeto de equipamentos de maior capacidade e produtividade;
- Maior eficiência nos processos de refino;
- Melhor aproveitamento da energia.

No entanto, as soluções praticadas almejando reduções de custo conduzem, via de regra a resultados antagônicos sob o ponto de vista da qualidade e vice versa.

Um exemplo típico dessa afirmação é relatado no trabalho de Silva:<sup>(1)</sup> “O emprego de matérias-primas e insumos mais baratos, em princípio de pior qualidade, implica na necessidade de operações de refino mais intensas e/ou demoradas, ou ainda, um maior volume ocupado por escória em detrimento do metal. Assim, tanto no alto-forno, quanto no forno elétrico ou no convertedor, ocorre sabidamente uma queda da produtividade e um aumento do consumo energético”.

O mesmo autor, afirma também que as novas exigências motivadas por esforços de redução de custos e aumento de produtividade tornaram imprescindíveis as mudanças tecnológicas nos tratamentos do gusa e do aço, através principalmente de utilizações isoladas ou combinadas de pré-tratamento do gusa e refino secundário.

Campos,<sup>(2)</sup> subsidiou, em parte, essas afirmações, argumentando que: “Se o convertedor LD fosse um bom refinador para o ferro-gusa não estaríamos hoje observando a transferência da maior parte das operações de refino para frente (metalurgia de panela) ou para trás (pré-refino do ferro-gusa)”.

Campolino,<sup>(3)</sup> discutiu a deterioração da qualidade do minério de ferro proveniente das principais jazidas, ou melhor, a quase que exaustão dos minérios de melhor qualidade. Obviamente, em períodos passados, uma vez que minérios de alta qualidade encontravam-se disponíveis no mercado a preços competitivos, a preocupação em se desenvolver tratamentos capazes de propiciar a utilização de minérios de qualidades inferiores era relegada ao segundo plano.

Os argumentos acima ilustram, portanto, a importância das pesquisas orientadas para o aumento de eficiência operacional, traduzidas em termos práticos principalmente por esforços de redução dos custos de refino considerando simultaneamente a manutenção ou, preferencialmente a melhoria do nível de qualidade intrínseca do produto.

Dentre os estudos quantitativos realizados nesse esforço, baseados em métodos estatísticos, matemáticos, econômicos, e que serviram de base ao desenvolvimento do presente trabalho, cabe destacar:

Geiger e Lewis,<sup>(4)</sup> desenvolveram um modelo de programação linear para a otimização da mistura de matérias-primas no carregamento do alto-forno.

Boccuni,<sup>(5)</sup> realizou um estudo de otimização a respeito da influência do teor de silício do gusa na produtividade do sistema alto-forno / aciaria LD.

Czovek,<sup>(6)</sup> comprovou, através de regressões estatísticas, que o incremento de teores de silício, manganês e carbono assim como a temperatura do gusa líquido, dentro dos limites operacionais, permitem diminuir o custo final da elaboração do

aço. Observou também que esse incremento causa uma elevação dos custos operacionais, sendo necessário, portanto, um processo de ajustamento para esses dois fatores.

Oliveira, Cho e Santos,<sup>(7)</sup> realizaram um estudo de otimização das condições operacionais do alto-forno através de análise fatorial. Foram testados os efeitos e as interações das variáveis: fração de sínter na carga, vazão de sopro e temperatura de chama.

Cho e Oliveira,<sup>(8)</sup> desenvolveram um modelo matemático de otimização considerando o sistema integrado de produção: sínter, gusa e aço.

Drumond,<sup>(9)</sup> pesquisou os efeitos na qualidade do aço provocados pelas variações de volumes, composições químicas e temperatura das matérias-primas utilizadas no convertedor LD.

Santos,<sup>(10)</sup> propôs uma metodologia de cálculo do custo de desfosforação. O algoritmo desenvolvido objetivou mensurar o custo da desfosforação para diferentes técnicas a partir da especificação do produto (teor de fósforo) e de uma dada disponibilidade em termos de matérias-primas.

Campolino,<sup>(3)</sup> estudou os benefícios econômicos da realização simultânea da desfosforação e dessulfuração através de experiências realizadas em escala laboratorial.

A proposta do presente trabalho foi, portanto, trazer uma contribuição às análises quantitativas até então desenvolvidas, através da proposição de um modelo econômico / matemático, voltado ao estudo do relacionamento entre a montagem do “blending” e alocação das operações de refino do ferro-gusa.

O escopo do presente trabalho realiza, um recorte no fluxo do processo produtivo. Tem-se como primeira etapa, a seleção das matérias-primas (componentes da carga do alto-forno). Segue-se a redução dos óxidos de ferro através do processo alto-forno, obtendo-se assim, o ferro-gusa. O produto do alto-forno, ferro-gusa, poderá ou não ser submetido a etapa de pré-refino, onde são corrigidos parte dos teores de fósforo, enxofre e silício. O ferro-gusa (refinado ou não) é então submetido ao processo de aciaria a oxigênio (convertedor LD), obtendo-se assim o aço. Doravante, o desenvolvimento do presente trabalho estará concentrado em responder:

“Como produzir o aço dentro das especificações definidas a partir do conjunto de materiais, etapas de processamento e respectivas capacidades de refino disponíveis a mínimo custo?”

## **Material e Métodos**

O estudo de custo desenvolvido no presente trabalho utiliza-se da Programação Linear como ferramenta quantitativa de apoio a decisão e a Análise de Regressão Linear múltipla como o meio de identificação e mensuração das relações de interligação entre o comportamento dos custos e os fatores gerenciáveis passíveis de alterações.

*O modelo matemático:*

O modelo matemático de apoio a decisão objetiva a minimização da composição de custos: “blending” e refino (0) e, assume como restrições a conservação de massa para o elemento ferro (1), o atendimento as especificações de produto (2), as limitações técnicas de refino (3), e a disponibilidade de materiais ferrosos (4):

Variáveis Utilizadas:

- $M$  : conjunto de materiais ferrosos  $i$  componentes do “blending”;

- $E$ : conjunto de elementos químicos  $j$  estudados;
- $R$ : conjunto de etapas de refino  $k$  do processo produtivo;
- $A$ : conjunto de outras adições  $l$  consideradas;
- $P$ : conjunto de produtos  $n$ ;
- $Cs_i$ : custo de suprimento por unidade de massa do material ferroso  $i$ ;
- $Cr_{kj}$ : custo por unidade de massa da etapa  $k$  para refinar o elemento  $j$ ;
- $m_i$ : massa do material ferroso  $i$  utilizada na carga do alto-forno;
- $r_{kj}$ : massa do elemento químico  $j$  refinada na etapa  $k$  do processo;
- $a_l$ : massa da adição  $l$  utilizada no processo;
- $p_n$ : massa do produto  $n$  produzida;
- $f$ : fração em massa de ferro por material;
- $e_j$ : fração em massa do elemento químico  $j$  por material;
- $RLI_{kj}$ : limite inferior do refino (em massa) da etapa  $k$  para o elemento  $j$ ;
- $RLS_{kj}$ : limite superior do refino (em massa) da etapa  $k$  para o elemento  $j$ ;
- $MLI_i$ : quantidade (massa) mínima de utilização do material  $i$  no “blending”;
- $MLS_i$ : quantidade (massa) máxima de utilização do material  $i$  no “blending”.

Função objetivo – Minimizar Custos:

$$\min \sum_{i \in M} Cs_i m_i + \sum_{j \in E} \sum_{k \in R} Cr_{kj} r_{kj} \quad (0)$$

A equação representa as componentes do custo de processo a serem minimizadas: formação do “blending” e operações de refino.

Restrições:

1. Conservação de massa, elemento ferro:

$$\sum_{i \in M} f_i m_i + \sum_{l \in A} f_l a_l = \sum_{n \in P} f_n P_n \quad (1)$$

A equação representa a conservação de massa para o elemento ferro no decorrer do processo produtivo. As entradas, ou seja, o ferro incorporado ao processo através de: carga metálica e outras adições (sucatas, fundentes e carvão) devem ser iguais às saídas: aço e escórias.

2. Atendimento as especificações do produto:

$$\sum_{i \in M} e_{ji} m_i + \sum_{l \in A} e_{jl} a_l - \sum_{k \in R} r_{kj} \leq e_{j\text{aço}} p_{\text{aço}} \quad \forall j \in E \quad (2)$$

Existem duas opções de se atingir as especificações de produto (considerando fixas as contribuições das sucatas, fundentes e carvão): controlar a incorporação dos elementos químicos através da montagem de “blending” e / ou refinar os elementos então já incorporados ao processo. As duas opções combinadas devem significar o atendimento às especificações de produto.

3. Limitações da capacidade de refino:

$$RLI_{kj} \leq r_{kj} \leq RLS_{kj} \quad \forall j \in E, \quad \forall k \in R \quad (3)$$

Os limites técnicos do refino devem representar não só a capacidade técnica propriamente dita, mas também os intervalos operacionais dentro dos quais as inferências estatísticas são válidas, isto é, cada etapa possui limite inferior e limite superior de refino para cada elemento.

4. Limites de disponibilidade e utilização de materiais:

$$MLI_i \leq m_i \leq MLS_i \quad \forall i \in M \quad (4)$$

Eventualmente os materiais disponíveis não podem ser utilizados em quaisquer frações na formação do “blending”, assim são estabelecidas restrições para a utilização de forma a refletir esse tipo de limitação, ou seja, a parametrização dessas equações (limite inferior e superior) deverá ser realizada com base em premissas gerenciais válidas para cada caso em estudo.

A parametrização do modelo é realizada a partir de estudos teóricos / acadêmicos, informações gerenciais, análises químicas, levantamentos de custos e, sobretudo inferências estatísticas.

As principais limitações do modelo proposto se referem às suposições de linearidade nos intervalos de operação; efeitos desprezíveis sobre o balanço térmico do sistema, consumo de carvão e produtividade.

## RESULTADOS

O estudo de caso é baseado no processo VMB para aços convencionais (não ligados). Tal processo pode ser caracterizado como Integrado a carvão vegetal sem pré-refino, ou seja, trata-se de um sistema simples Alto-Forno / Convertedor LD.

Inicialmente, foi realizada uma decomposição dos custos de produção de gusa, etapa Alto-Forno, e do aço, etapa Convertedor LD, ano base 2003. O escopo do presente estudo contempla aproximadamente 22,1% dos custos de alto-forno e 2,9% dos custos de aciaria, os quais totalizam aproximadamente R\$ 45 milhões / ano (aproximadamente U\$ 15 milhões).

O modelo proposto foi construído nos aplicativos: LINDO 6.1 e Microsoft Excel (Suplemento Solver).

A parametrização do modelo foi realizada tomando-se como referência informações gerenciais e análises de regressão linear múltipla (capacidades e custos de refino do alto-forno e convertedor LD) relativas ao ano de 2003.

O modelo então parametrizado foi submetido a dois cenários de análises: com limitações de formação de carga (blending limitado) e sem limitações de formação de carga (blending flexibilizado). Os dois cenários foram comparados à performance histórica (Figura 1)

A partir das comparações realizadas foi possível concluir que:

- Ocorre uma perceptível tendência de aumento da extensão do refino quando da flexibilização do “Blending” em detrimento a escolha de materiais relativamente mais nobres (principalmente os materiais de menor teor de fósforo);
- As diferenças observadas são sensivelmente maiores na formação do “Blending” em relação ao refino;
- O cenário “Blending limitado” apresenta, em relação aos dados históricos uma diferença de custo de aproximadamente 8%, a qual pode ser atribuída em parte a otimização, devendo-se, contudo, mencionar as incertezas acerca das análises químicas dos materiais utilizados no processo.
- A diferença existente entre os cenários “Blending” flexibilizado e “Blending” limitado pode ser atribuída a remoção da margem de segurança característica da prática do processo (conseqüência direta da otimização); mas, também em função de outros efeitos potencialmente atribuídos a formação de cargas, porém não contemplados no escopo desse trabalho;

## Resultados Obtidos: Comparação do Custo de Refino

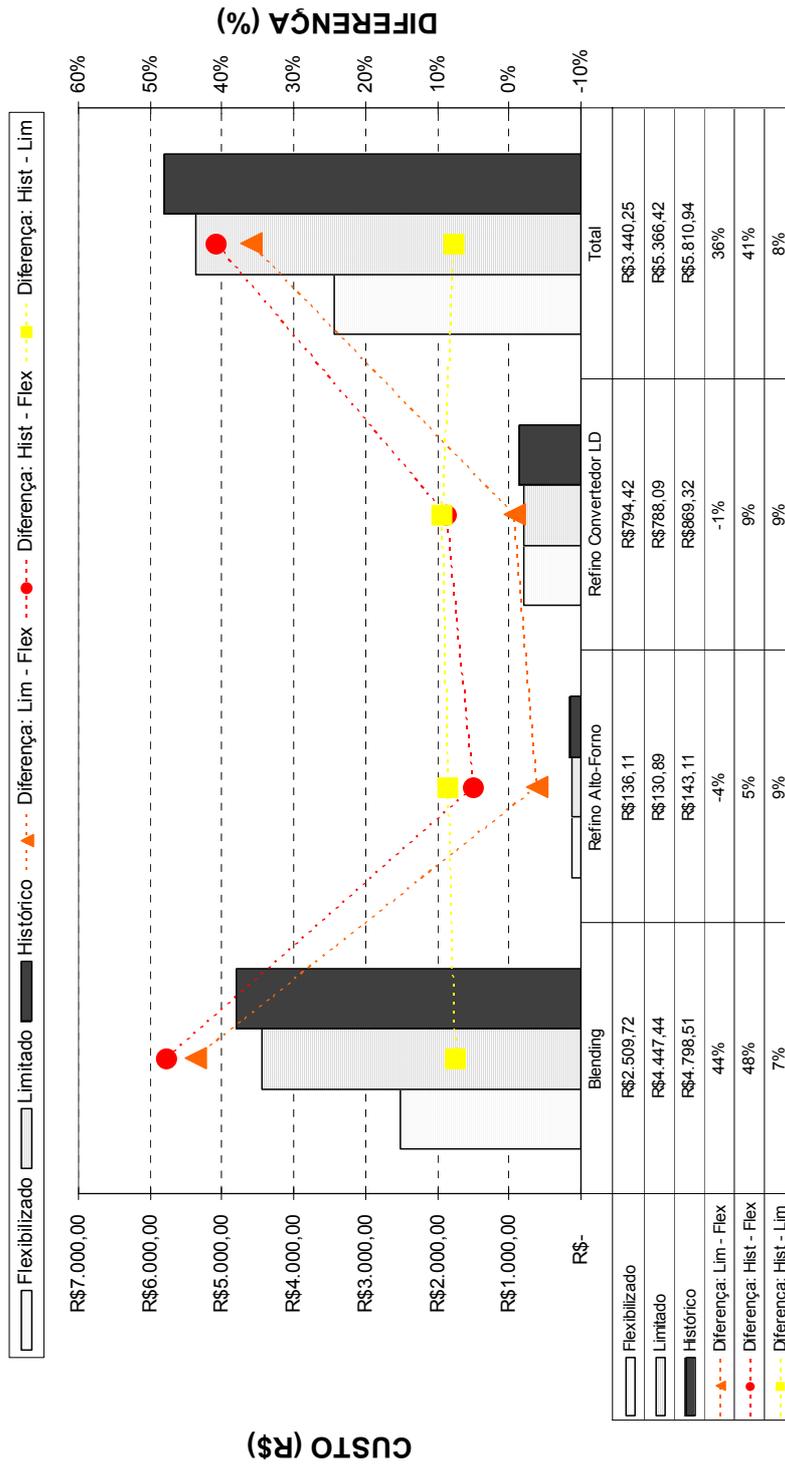


Figura 1. Resultados obtidos: modelo vs. Histórico

## CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou na combinação de diferentes ferramentas de análise proporcionar ao estudo do refino do ferro-gusa uma contribuição em termos de análises quantitativas.

A construção de modelos de Análises de Custos sobre plataformas de Programação Linear e parametrizados através de técnicas estatísticas demonstrou ter um grande potencial de contribuição para as decisões de cunho tático e operacional relativas ao processo siderúrgico.

A idéia principal do modelo proposto é auxiliar a tomada de decisão referente ao balanceamento de alguns dos custos envolvidos no processo de fabricação do aço, mais especificamente, montagem do “Blending” e alocação das Operações de Refino.

Deve-se, entretanto mencionar duas contribuições extremamente interessantes proporcionadas também pelo modelo em questão:

- Negociações de suprimentos: análise de sensibilidade referente a custos de material, ou seja, a partir de qual custo um dado minério poderá ser incorporado ao “Blending” com vantagens econômicas;
- Negociações de vendas: interpretação dual do problema, ou seja, qual o ganho econômico possível de ser obtido a partir do relaxamento de especificações do produto;

Obviamente não foi possível levar a exaustão as idéias aqui apresentadas, tampouco provar irrefutavelmente a viabilidade de suas aplicações práticas.

Destaca-se dentro do conjunto de recomendações para estudos futuros a utilização da metodologia de Projeto de Misturas. Ou seja, o modelo de programação matemática passaria a escolher qual (ais) a mistura (s) a ser (em) utilizada (s). Conseqüentemente, a restrição de disponibilidade de materiais ferrosos deveria ser alterada passando a restringir as quantidades de misturas possíveis de serem formadas. A grande vantagem desta abordagem está no simples argumento de que o carregamento do alto-forno nada mais é, senão uma mistura de materiais metálicos, com características próprias de misturas e não simplesmente uma combinação de materiais metálicos. Entretanto, deve-se mencionar que a implementação dessa abordagem exige a realização de intervenções planejadas e controladas no dia-a-dia do processo;

## Agradecimentos

A Vallourec & Mannesmann Tubes – V&M, empresa onde foram viabilizadas inestimáveis informações acerca da prática do processo sob análise.

A Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, especialmente aos Departamentos de Engenharia de Produção e Engenharia Metalúrgica.

## REFERÊNCIAS

- 1 Silva, I. A. **Aspectos Cinéticos da Dessulfuração do Gusa por Intermédio de Misturas Sintéticas a Base de Carbonato de Cálcio e de Sódio com Adições de Fluorita** Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, Belo Horizonte, 1994
- 2 Campos, V.F. **Curso sobre pré-refino de ferro-gusa**. Belo Horizonte, UFMG, 1984.
- 3 Campolino, G. **Estudo da Viabilidade da Desfosforação e Dessulfuração Simultâneas do Gusa**. Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, Belo Horizonte, 1994.
- 4 Geiger, J., Lewis, J., A Linear Program Model of the Iron Blast Furnace, thesis for degree of M. Sc., The Pennsylvania State University, 1959.
- 5 Bocconi, M., “Otimizzazione della Produttività del complesso Altoforno – Acciaeria. Esame dell’influenza della Percentuale Di Silicio”, *Metallurgia Italiana*, 1971.
- 6 Czovek, B., “Effect of Pig Iron Quality on the Economics of LD Converter Steelmaking”, *Mutnik* vol. 12 (1975), pag. 455-457.
- 7 Oliveira, C. A., Cho, D. S., Santos, J. A., “Otimização das Condições de Operação de um Alto-Forno Através de Experimentação Direta”, XL Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 07/1985.
- 8 Cho, D. S., Oliveira, C. A., “Modelo de Programação Linear para o Processo Sinterização – Alto-Forno – Aciaria LD”, XV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 10/1985.
- 9 Drumond, M., F. B., **Método para Hierarquização das Variáveis de Operação do Conversor LD**. Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, Belo Horizonte, 1985.
- 10 Santos, M.V. **Avaliação Técnica e Econômica para a Produção de Aços da Açominas com Baixos Teores de Fósforo**, Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG, Belo Horizonte, 1998.