

MODELO TERMODINÂMICO PARA CÁLCULO DE VALOR EM USO NO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

Bruno Cezar Evaristo Pereira ¹
Luiz Fernando Andrade de Castro ²
Henrique Dias Gatti Turrer ³

Resumo

Esse artigo apresenta uma ferramenta para análise técnica econômica rotineira do valor em uso da carga metálica em uma sinterização de minério de ferro para apoio técnico comercial em negociações de preço final do minério de ferro. Tal ferramenta permite avaliar, de forma comparativa, o impacto da qualidade química e granulométrica dos finos de minério de ferro no custo final de produção destacando-se os principais itens de custo variável. A metodologia de cálculo do valor em uso pode ser utilizada tanto pelas siderúrgicas na aquisição do minério quanto pelas minerações, possibilitando a valorização de pontos específicos da qualidade do seu produto no processo produtivo do cliente.

Palavras-chave: Processo de sinterização; Minério de ferro; Valor em uso; Custo.

DEVELOPMENT OF A THERMODYNAMIC MODEL TO ASSESSMENT OF THE VALUE IN USE OF METALLIC BURDEN IN THE IRON ORE SINTERING PROCESS

Abstract

This paper introduces a tool for a technical economic analysis of value in use of the metallic burden in iron ore sintering process for commercial technical support in a final price negotiations for iron ore. This tool allows doing a comparative analysis of the impact of the chemical and sizing quality of the iron ore fines on the final cost of production, highlighting the main variable cost items. The methodology of calculation of the value in use can be used by both the steelmakers in the acquisition of the ore and the mining, enabling the valuation of the quality items in the productive process of the customer.

Keywords: Sintering process; Iron ore; Value in use; Cost.

I INTRODUÇÃO

No atual cenário econômico mundial, a siderurgia vem passando por momentos desafiadores que exigem, cada vez mais, maior rendimento operacional com menor custo [1]. Além disso, a mudança na qualidade química e granulométrica do minério de ferro vem exigindo adequações de processo objetivando o menor impacto possível no uso pleno da capacidade instalada das sinterizações [1,2].

A sinterização do ferro é um processo em contracorrente de componentes gasosos e sólidos com o objetivo de aglomerar finos de minério de ferro sob condições termoquímicas controlados. Consiste basicamente em misturar os finos de minério de ferro, fundentes, combustíveis sólidos e resíduos siderúrgicos sendo a mistura resultante alimentada

em uma grelha móvel permeável. Além de aglomerar, a sinterização visa aumentar o tamanho físico das fontes de ferro para formar um aglomerado de alta porosidade e, consequentemente, boa redutibilidade [3].

Muitos pesquisadores já desenvolveram modelos matemáticos robustos com forte embasamento equacional de transferência de calor para simulação de todo processo térmico [4] e do impacto da granulometria na permeabilidade do leito de sinterização [5,6]. Todos sempre com um foco bastante técnico e mostrando, de forma bem efetiva os impactos de variáveis representativas das matérias-primas na qualidade final do sinter produzido e em algumas variáveis de processo como vazão de gás e temperatura média.

¹Assistência Técnica e Manutenção de Equipamentos, Pedras Congonhas Ltda., Nova Lima, MG, Brasil. E-mail: brunocezar78@hotmail.com

²Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³Gerencia de Processos e Desenvolvimento, AngloAmerican, Conceição do Mato Dentro, MG, Brasil.



Paralelo a uma análise técnica, estudos de impactos econômicos podem ser determinante para a viabilidade de uso de um determinado minério na carga metálica.

Portanto, pensando em termos financeiros, durante a rodada de negociação é razoável e oportuno discutir algum tipo de reconhecimento ou prêmio pelo impacto positivo da qualidade do minério no processo.

Com esse enfoque, este trabalho visa desenvolver um modelo híbrido do processo de sinterização, de natureza termoquímica e semi-empírico com o objetivo de mensurar o impacto financeiro da qualidade química e granulométrica, adicionado ou subtraído, pela utilização de diferentes matérias-primas no custo final de produção da sinterização, destacando-se os principais itens de custo variável.

2 METODOLOGIA

O modelo proposto nesse trabalho possui uma característica híbrida, ou seja, compreenderá de um balanço de massa acoplado a um balanço térmico [7].

No balanço de massa, a qualidade alimentada na grelha será um dado de entrada e a qualidade do produto final será calculada. Equações empíricas foram utilizadas para determinar o comportamento do cálculo de vazão de gás, espaços vazios, delta P, %FeO e MgO final do sínter produzido além da massa de carvão mínima necessária para ignição do processo nas condições alimentadas. Tais variáveis contribuirão para cálculo do custo final de produção, além do balanço de massa e térmico.

Avaliou-se também, o impacto da qualidade granulométrica das matérias-primas no custo final com base no consumo energético dos ventiladores de processo. A equação de Ergun ajustada para leitos de minério de ferro foi utilizada como equação para cálculo da velocidade superficial dos gases [8].

Para viabilizar a integração entre os balanços, empregou-se o código “Visual Basic for Applications” (VBA) como uma linguagem de programação única, que por sua vez é constante na plataforma Excel do ambiente Windows. Principalmente nas áreas de interface com o usuário, optou-se em cada modelo pelo emprego da língua inglesa, naturalmente levando-se em consideração o potencial público-alvo para utilização desta ferramenta.

Foi preservada a característica de fácil transportabilidade deste programa de computador, tendo em vista que o mesmo pode ser instalado e operado, normalmente, em computadores portáteis comuns ou mesmo em “desktops” pelos usuários.

3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O motivador principal para o desenvolvimento do modelo proposto foi a possibilidade de ter uma ferramenta de fácil manuseio e interface gráfica amigável, que pudesse

gerar para o usuário a possibilidade de análises técnico econômica do impacto da qualidade química e granulométrica no processo de sinterização.

Para tal, a qualidade das cargas alimentadas na esteira teriam características definidas/conhecidas e conseqüentemente sairão como produtos na forma de sínter. Determinou-se também que o balanço do FeO seguiriam políticas de equacionamentos determinados. Além disso, o impacto do diâmetro médio no resultado final será baseado na equação de Ergun, alimentando rotinas para cálculo de energia gasta de ventiladores de processo. Políticas, nesse caso, é a coerência de fatos operacionalmente aceitos com as previsões obtidas nos resultados modelados.

No desenvolvimento do modelo foram definidas as principais variáveis impactadas pelas alterações na qualidade das cargas metálicas, chamadas de “outputs” do modelo, são elas: Consumo total e específico de carga metálica (kg/t sínter), qualidade química do sínter produzido (%), consumo energético específico (kWh/t sínter), consumo de carvão específico (kg/t sínter), custo do sínter produzido (US\$/t sínter). Para atingir tais resultados, são necessários alguns dados de “inputs” que, no modelo proposto, são: massa da carga metálica específica (kg/t sínter), análise química da carga metálica (%), massa dos fundentes alimentados (kg/t sínter), análise química dos fundentes (%), diâmetro médio específico de cada matéria-prima alimentada (mm), análise química do coque alimentado (%), volume (Nm³/t sínter) e PCI (kcal/m³) dos gases utilizados no processo, volume (Nm³/t sínter) e PCI (kcal/m³) do carvão utilizado no processo, temperatura final do processo de sinterização (°C), composição química do gás de topo (%), altura, comprimento e largura do leito (mm); diferencial de pressão no leito (mmH₂O).

As perdas térmicas foram calculadas pelo balanço térmico final (Entrada – Saida).

A arquitetura do modelo utiliza como base de cálculo a produção total a ser atingida deixando flexível sua escolha. Os cálculos envolvem um extenso balanço de massa e energético do processo de sinterização de minérios de ferro e contemplam diversas flexibilidades, como a utilização de várias fontes metálicas; utilização de fluxantes para obtenção de qualidade química específica; escolha de alternativas para fontes energéticas no processo; características dimensionais do forno; propriedades físicas do gás.

É feita uma análise do custo de produção de sínter e a análise de Valor em Uso dos diversos insumos utilizados no processo é realizada, inclusive considerando fatores econômicos e de mercado como custos fixos.

A Figura 1 abaixo mostra a estrutura macro de funcionamento do modelo proposto.

3.1 Balanço de Massa

Em todo processo metalúrgico, o balanço de massa está atrelado ao fato de que a matéria não pode ser criada ou destruída dentro do sistema. Assim como vários outros processos siderúrgicos, na sinterização não existe acumulação

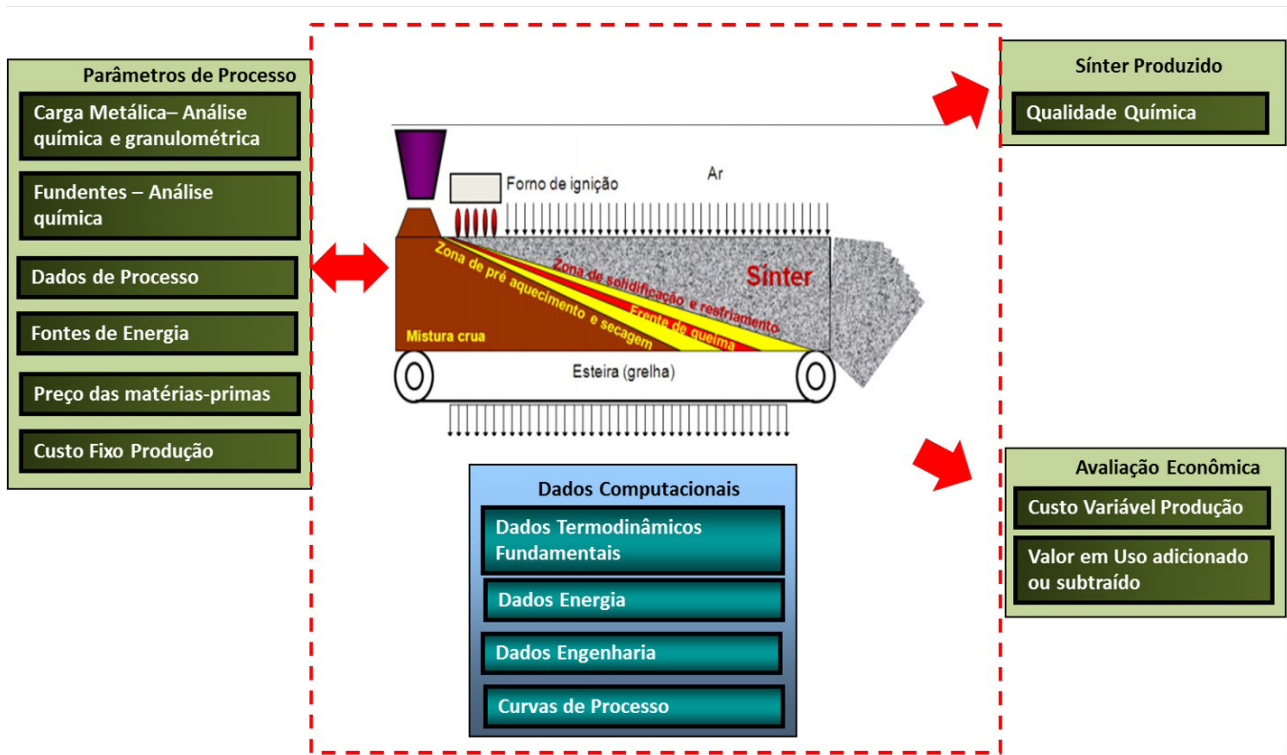


Figura 1. Estrutura macro de funcionamento do modelo.

de massa nos e por isso podemos considerar necessariamente entrada igual a saída [9].

No balanço em questão, os principais parâmetros para o cálculo são os elementos químicos, da qual nomeamos como qualidade química, e quantidade (kg/ton) da carga metálica, fundentes e carvão. Como nos minérios e fundentes há uma variedade grande de elementos químicos, foi no balanço apenas os principais com base no realizado na prática industrial. São eles: %Fe, %SiO₂, %FeO, %Al₂O₃, %CaO, %MgO, %Mn, %P, %S, %TiO₂, %H₂O e LOI (Loss of Ignition). Com base no teor de ferro e FeO, estima-se o %Fe₂O₃ presente em cada minério alimentado.

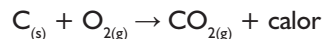
3.2 Balanço de Energia

Para o cálculo do balanço térmico, definiu-se a temperatura final de processo como a temperatura de referência. O sistema considerado foi o forno de sinterização com entradas e saídas de calor definidas a seguir.

3.2.1 Entradas de calor

O modelo engloba como “entradas de calor” no sistema os seguintes itens [9,10]:

- A. Calor da queima do carvão;
 - B. Calor das reações exotérmicas envolvidas;
 - C. Calor da reação de hidratação da cal;
 - D. Calor gerado pelos gases de ignição.
- A. Calor da queima do carvão



A reação acima rege a queima do carbono no sistema. Todo calor necessário é calculado a partir da massa de carvão necessária para a queima. Estudos de uma grande siderúrgica mundial [11] realizados em várias plantas do grupo mostrou que a partir da quantidade de calor inserida no processo via gás de coqueria, gás de alto-forno ou gás natural, é possível estimar a quantidade de carbono fixo a ser consumido de acordo com a curva mostrada na Figura 2 [11].

Para o cálculo citado, o modelo utiliza a Equação 1, que representa a curva na figura acima.

$$M_{\text{carvão}} = 118,11Q_{\text{ignição}}^{-0,232} \quad (1)$$

B. Calor das reações exotérmicas envolvidas

O calor das reações exotérmicas foi estabelecido a partir do cálculo da entalpia padrão de cada reação e do número de moles presentes de cada substância. As reações exotérmicas consideradas no processo de construção do modelo foram [9,10]:

1. $C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + \text{calor}$
2. $3Fe_2O_{3(s)} + CO_{(g)} \rightarrow 2Fe_3O_{4(s)} + CO_{2(g)}$
- C. Calor da reação de hidratação da cal
- $CaO_{(s)} + H_2O_{(l)} \rightarrow Ca(OH)_{2(s)}$
- D. Calor gerado pelos gases de ignição

Os gases de ignição considerados são gás de coqueria, gás de alto-forno e gás natural sendo que esse último como

opção de utilização. Todos os calores baseados no valor de PCI e na quantidade utilizada no processo.

3.2.2 Saídas de calor

Para saídas de calor do sistema, consideraram-se os seguintes itens:

- A. Calor de aquecimento do sinter produzido;
- B. Calor das reações endotérmicas;
- C. Calor dos gases produzidos;
- D. Calor de aquecimento do ar de entrada;
- E. Perdas Térmicas do sistema.

A. Calor de Aquecimento do Sinter Produzido

Toda carga metálica e fundentes são alimentados no sistema à temperatura ambiente, porém, com possibilidade de alteração.

B. Calor das Reações Endotérmicas

As reações endotérmicas consideradas foram [9, 10]:

1. $\text{CaCO}_{3(s)} \rightarrow \text{CaO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$
2. $\text{MgCO}_{3(s)} \rightarrow \text{MgO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$
3. $\text{Fe}_3\text{O}_{4(s)} + \text{CO}_{(g)} \rightarrow 3\text{FeO}_{(s)} + \text{CO}_{2(g)}$
4. $\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(g)}$

C. Calor dos Gases Produzidos

Calor de aquecimento dos componentes H₂O, O₂, CO₂ e CO do gás de topo da sinterização. A temperatura da chaminé (dado de entrada) foi utilizada como referência para o cálculo da entalpia. A composição química do gás configura-se como um dado de entrada por ser uma particularidade de cada usina.

D. Calor de Aquecimento do ar de Entrada

Por se tratar de um processo de queima por sucção de ar, faz-se necessário a quantificação do calor necessário para aquecer esse ar que está sendo sugado para queimar a carga. Considerou-se composição química padrão do ar (79% N₂ e 21% O₂), temperatura de referência e quantidade

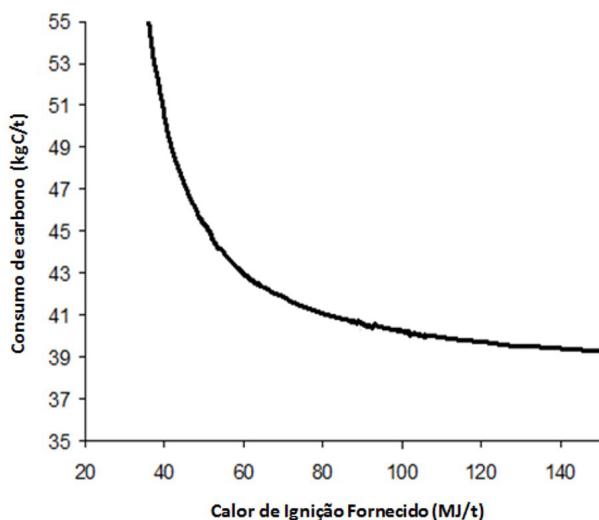


Figura 2. Variação do consumo de carbono versus energia necessária para ignição.

de oxigênio calculado a partir do mínimo necessário para queima da massa de carbono no processo.

E. Perdas Térmicas do Sistema

Assim como todo processo industrial, a sinterização não possui eficiência térmica de 100%, ou seja, parte da energia convertida é perdida no processo. No caso aqui estudado, as perdas térmicas foram calculadas como a diferença simples entre entrada e saída [9].

$$\text{ENTRADA DE CALOR} - \text{SAIDA DE CALOR} = \text{PERDAS TÉRMICAS}$$

3.2.3 Estimativa do cálculo do consumo energético

A estimativa do consumo energético necessário nos ventiladores tem como premissa o tamanho médio alimentado que influenciará a fração de vazios do leito. A Figura 3 mostra a rotina de cálculo utilizada.

No processo de sinterização, o valor do ΔP é normalmente um dado conhecido. Portanto, no modelo proposto decidimos deixá-lo como dado de entrada.

Primeiro passo, cálculo da velocidade superficial do gás, conforme Equação 2 [6, 10, 11]:

$$V_o = \frac{-323 \cdot \mu \cdot L \cdot (1 - \epsilon)^2 + \sqrt{4.3 \cdot 78 \cdot L \cdot \rho \cdot D_p^3 \cdot \Delta P \cdot (1 - \epsilon) \cdot \epsilon^3 + 323^2 \cdot L^2 \cdot \mu^2 \cdot (1 - \epsilon)^4}}{2.3 \cdot 78 \cdot L \cdot \rho \cdot D_p \cdot (1 - \epsilon)} \quad (2)$$

Sequencialmente, calcula-se a vazão de ar correspondente ao ΔP alimentado [12] conforme Equação 3:

$$Q = \frac{V_o}{\rho(1,05 \cdot V_o + 0,6)} \quad (3)$$

onde: Q = Vazão de ar (Nm³/min); V_o = Velocidade superficial do gás (m/s); ρ = Densidade do gás (kg/m³).

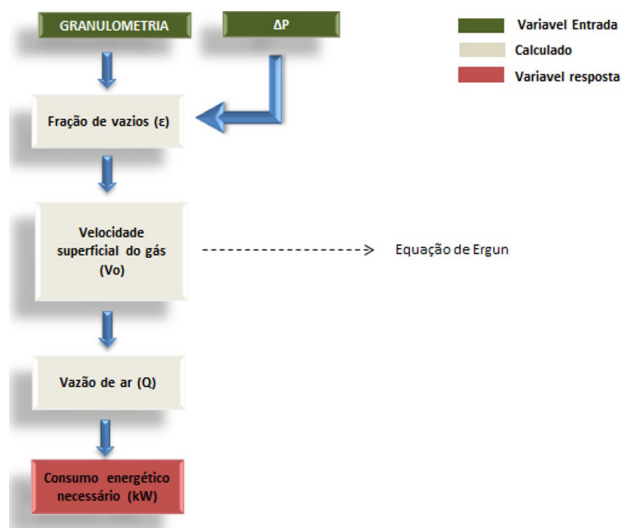


Figura 3. Rotina de cálculo para estimativa do consumo energético influenciado pela granulometria alimentada.

Finalmente, a potência necessária para a vazão de ar calculada é dado abaixo na Equação 4:

$$P = \frac{Q_{ar} \cdot \Delta P}{(1000 \cdot \eta)} \quad (4)$$

onde: Q = Vazão de ar (Nm³/min); ΔP = Diferencial de Pressão (Pa); P = Potência necessária para a vazão determinada (kW); η = eficiência da instalação.

Considerando todas as premissas de cálculos adotadas conforme citado anteriormente, o consumo energético dos ventiladores possui uma variação pelo diâmetro médio conforme Figura 4.

4 RESULTADOS

Para o presente estudo, uma forma de explorar as funcionalidades do modelo, diz respeito ao cálculo de um possível ponto de equilíbrio na utilização de um determinado minério. Por motivos de redução de custo, é comum a área de produção ser obrigada a utilizar determinado minério com qualidade pior e, conseqüentemente, muito mais barato. Para isso, foi calculado o máximo que poderia ser utilizado desse minério sem aumentar o custo de produção final comparado ao cenário base, ou seja, o normalmente utilizado na empresa.

Utilizamos dois minérios com teor de ferro bem distintos. Os cenários considerados estão descritos na Tabela 1.

A Tabela 2 mostra a qualidade química dos dois minérios utilizados no cálculo do ponto de equilíbrio.

Considerando as variações propostas, foi possível mensurar que o máximo de participação do minério C, cujo preço é aproximadamente 33% menor que o minério A, que poderemos utilizar na produção sem alterar de forma significativa a composição química final do sinter está entre 5 e 6%, conforme Figura 5.

Em uma outra situação, a usina vê-se obrigada a utilizar no mínimo 50% do mesmo minério B do exemplo anterior.

Nessa análise, foi calculado o preço máximo que poderá ser pago no minério sem aumentar o custo de produção final comparado ao cenário base, ou seja, aquele normalmente utilizado na empresa.

Considerando o proposto, o preço máximo a ser pago em um minério com aproximadamente 55% e com utilização de 50% no leito é de U\$ 34,00/tonelada. Acima desse valor, o custo operacional extrapola o praticado pela usina (cenário base) inviabilizando seu uso (Figura 6).

Em uma terceira possibilidade, é possível verificar o impacto financeiro que uma determinada granulometria pode causar. Utilizamos três diferentes minérios com granulometria média diferente, conforme Tabela 3.

Considerando as variações propostas, foi possível mensurar o impacto financeiro do aumento na participação do minério mais fino no blend. O aumento de 50% do

minério mais fino (Sinter C) gerou um acréscimo no custo energético de aproximadamente 5%, conforme Figura 7.



Figura 4. Variação do consumo energético com o diâmetro médio alimentado.

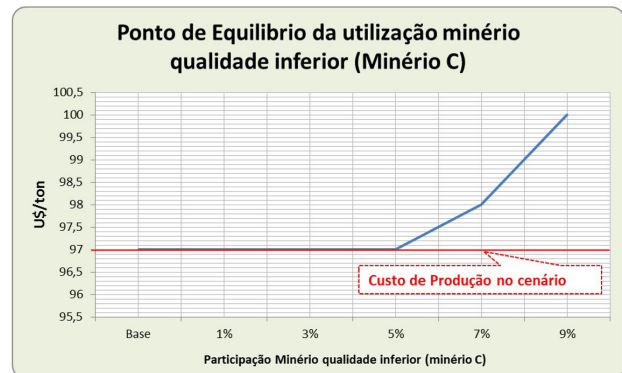


Figura 5. Ponto de Equilíbrio da utilização de um minério de baixo teor de ferro.

Tabela 1. Cenários para cálculo do ponto de equilíbrio

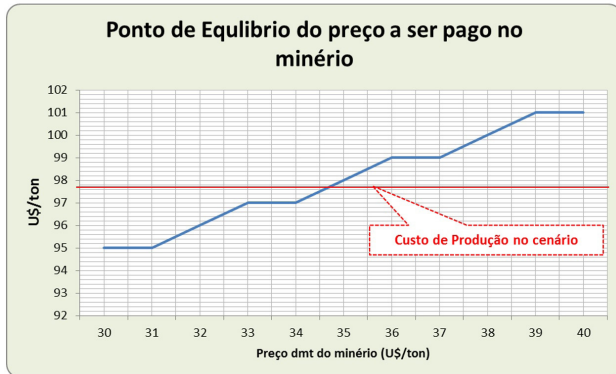
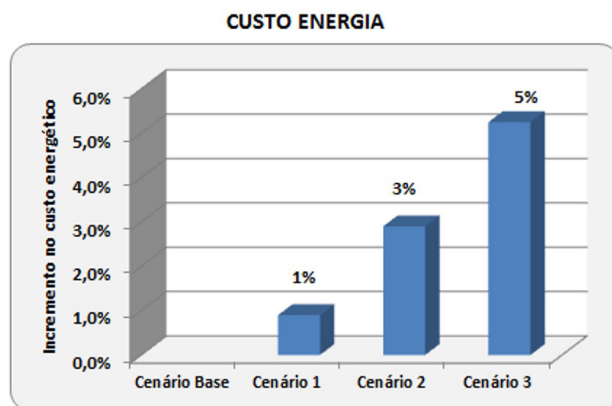
	%Fe	Preço (U\$/ton)	Base	Cenários				
				1	2	3	4	5
% Sinter A	65,5	60	100	99	97	95	93	91
% Sinter C	55,6	40	0	1	3	5	7	9

Tabela 2. Qualidade química dos minérios utilizados no cálculo do ponto de equilíbrio do minério

%	Minério A	Minério B
Fe	65,5	55,6
SiO ₂	4,24	10,11
Al ₂ O ₃	0,64	2,52
CaO	0,09	1,33
MgO	0,05	0,24
Mn	0,07	0,29
P	0,019	0,067
PPC	1,05	5,6

Tabela 3. Cenários para cálculo do impacto da granulometria

	Tamanho Médio (mm)	Base	Cenários		
			1	2	3
% Sinter A	3,50	80	70	50	30
% Sinter B	3,00	10	10	10	10
% Sinter C	2,00	10	20	40	60

**Figura 6.** Ponto de Equilíbrio do preço máximo a ser pago em um minério na situação proposta.**Figura 7.** Impacto no custo de energia com diferentes granulometria.

5 CONCLUSÕES

A ferramenta propiciou o cálculo de um ponto de equilíbrio para qualidade em dois cenários diferentes. No primeiro, mostrou que o máximo de utilização de um minério com qualidade química inferior (teor de ferro 10% menor) e preço 33% menor sem alterar a qualidade final do sinter e o custo final de produção, foi de 5%. No segundo cenário, foi possível verificar que no caso de utilização de no mínimo 50% do mesmo minério de qualidade inferior, o preço máximo a ser pago sem alterar o custo final seria de US\$ 34,00. Além disso, foi possível calcular o impacto financeiro que um minério de granulometria mais fina pode causar no processo.

Tais informações poderão ser fundamentais para a criação de um plano estratégico de negociação de preço de venda e/ou compra de minério para a usina.

Agradecimentos

- Ao Departamento de Metalurgia e Materiais da UFMG;
- Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq);
- Aos Engenheiros Metalurgistas Mauricio Marcos Otaviano e Maycon Athayde;
- Ao Engenheiro de Minas Henrique Dias Gatti Turrer;
- Ao Professor Luiz Fernando Andrade de Castro.

REFERÊNCIAS

- 1 Leocadio LGE. Análise econométrica do comportamento dos preços do minério de ferro no mercado mundial [dissertação]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto; 2014.
- 2 Gonçalves CG, Souza RP. Estratégia de marketing para diferenciação e posicionamento do produto/serviço no mercado. *Diálogos & Saberes*. 2015;11(1):29-58.
- 3 Pereira HC. Avaliação em escala piloto do comportamento dos produtos pellets feed, pellet screenings e micro pellet em substituição ao sinter feed em uma mistura de sinterização [dissertação]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2004.
- 4 Yang W, Ryu C, Choi S, Choi E, Ri DW, Huh W. Mathematical model of thermal processes in an iron ore sintering bed. *Metals and Materials International*. 2004;10(5):493-500. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03027355>.
- 5 Venkataramana R, Gupta SS, Kapur PC. A combined model for granule size distribution and cold bed permeability in the wet stage of iron ore sintering process. *International Journal of Mineral Processing*. 1999;57(1):43-58.
- 6 Formoso A, Moro A, Fernández Pello G, Menéndez JL, Muñiz M, Cores A. Influence of nature and particle size distribution on granulation of iron ore mixtures used in a sinter strand. *Ironmaking & Steelmaking*. 2003;30(6):447-460. <http://dx.doi.org/10.1179/030192303225004187>.

- 7 Lessa AM. Avaliação do valor em uso de cargas ferríferas para alto-forno [tese]. Rio de Janeiro: PUC-Rio; 2009.
- 8 Venkataramana R, Gupta SS, Kapur PC. Mathematical modelling and simulation of the iron ore sintering process. Tata Search. 1998;5:25-30.
- 9 Castro LFA, Tavares RP, Sampaio RS. Apostila Termodinâmica Metalúrgica. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, UFMG; 2004.
- 10 Carvalho JLR, Assis PS, Camilo RD, Figueira RM, Campos VF. Dados termodinâmicos para metalurgistas. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, UFMG; 1977.
- 11 Douce JF. Ignition during sintering incidence on metallurgical results and industrial return of industrial experience. Luxembourg: ArcelorMittal University; 2009.
- 12 Sato S, Kawaguchi T, Kato M. Lower limit of the energy consumption and the double ignition process for iron re sintering. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1988;28:705-713.

Recebido em: 3 Mar. 2017

Aceito em: 14 Jun. 2017