

ALTERAÇÕES NOS PARÂMETROS DA INJEÇÃO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE ÓTIMA DE CARVÃO INJETADO¹

Bruno Orlando de Almeida Santos²

Elton Destro³

Larissa Camilo de Souza Lima e Silva⁴

Paulo Santos Assis⁵

Resumo

Os gastos associados ao coque, ao carvão injetado e à matéria-prima que irá compor a carga metálica do alto-forno, representam as maiores parcelas na determinação do custo final por tonelada de gusa produzido. Assim, uma vez estabelecidas as características físicas e químicas do gusa e da escória, faz-se necessário determinar qual mistura de matérias-primas irá compor a carga metálica e também o *fuel-rate* (coque + carvão injetado) que será utilizado. Nesse contexto, este trabalho propõe determinar estas variáveis de tal forma que o custo final por tonelada de gusa seja minimizado, utilizando-se para isso técnicas da Pesquisa Operacional. A quantidade de PCI encontrada poderá exigir alterações nos parâmetros de injeção do alto-forno. Neste caso, uma análise das adaptações necessárias na injeção também será realizada, visando manter as quantidades ótimas de cada matéria-prima encontradas com o modelo de otimização.

Palavras-chave: Otimização; ICP; Alto-forno.

CHANGES IN THE INJECTION PARAMETERS IN FUNCTION OF THE OPTIMAL AMOUNT OF INJECTED COAL

Abstract

The costs related to coke, injected coal and raw materials that will compose the blast furnace metallic load represent the greatest parcel in the final cost for ton of hot metal produced. Therefore, once established the hot metal and slag chemical and physical characteristics, it is necessary to determine which raw material mixture will compose the metallic load and also fuel-rate (coke + injected coal) utilized. In this context, this paper proposes to determine these variables in order to minimize the final cost of a hot metal ton, using operational research techniques. The PCI quantity found may demand changes in the blast furnace injection parameters. In this case, an analysis of necessary adaptations in injection will also be done, aiming to maintain the best quantities of raw material found in the optimization model.

Key words: Optimization; PCI; Blast-furnace.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Membro da ABM. Engenheiro de Materiais. Mestrando pela REDEMAT - UFOP/ Lumar Metals Ltda.

³ Membro da ABM. Mestre em Engenharia Mineral. Doutorando pela REDEMAT - UFOP

⁴ Membro da ABM. Tecnóloga em Conservação e Restauo. Mestranda pela REDEMAT - UFOP

⁵ Membro da ABM. Doutor em Metalurgia. Prof. Titular da Escola de Minas e Prof. da REDEMAT - UFOP

1 INTRODUÇÃO

A injeção de carvão pulverizado (ICP) nas ventaneiras dos altos-fornos tem sido cada vez mais utilizada em substituição ao coque, pois permite uma redução no consumo do mesmo, diminuindo custos e minimizando os efeitos negativos da coqueificação. Além disso, o carvão injetado é mais viável economicamente quando comparado ao óleo diesel e ao gás natural.

A quantidade do carvão injetado nas ventaneiras depende da relação percentual entre sinter, pelotas e minério granulado que, juntamente com os fundentes, constituem as matérias-primas que irão compor a carga do alto-forno. Neste trabalho, propõe-se utilizar técnicas da pesquisa operacional para otimizar a quantidade de cada tipo de minério utilizado, visando uma minimização do custo por tonelada de gusa produzido. O sistema de equações/inequações lineares que representará o modelo de otimização será resolvido pelo Método Simplex, sendo a quantidade de carvão injetado fornecida através da solução do modelo proposto.

Eventualmente, a quantidade ótima de PCI encontrada pelo modelo de otimização irá exigir alterações nos parâmetros da injeção, tais como enriquecimento de oxigênio, vazão de ar injetado, vazão do gás de arraste e, eventualmente, adaptações nos diâmetros do tubo de injeção de finos e das ventaneiras. Uma vez que essas alterações são necessárias para o funcionamento adequado do alto-forno, será feito um estudo de viabilidade econômica levando-se em conta o impacto que essas alterações causam no custo por tonelada de gusa.

Serão consideradas duas instâncias testes. A primeira delas representará o cenário atual de operação de um alto-forno, com parâmetros de injeção pré-fixados. O segundo cenário, obtido a partir da otimização, utilizará a quantidade de PCI fornecida pela solução do modelo proposto e das alterações necessárias nos parâmetros de injeção. Posteriormente, o custo final por tonelada de gusa produzido em cada cenário será comparado.

Pretende-se com este trabalho divulgar a utilização deste modelo em situações reais de operação dos altos-fornos no Brasil, e que a metodologia possa auxiliar na análise de cenários e tomada de decisões.

2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para análise das mudanças necessárias nos parâmetros da injeção, serão considerados dois cenários: o Cenário 1 (ou Inicial) e o Cenário 2 (ou Otimizado). Para cada cenário há 15 tipos de minérios disponíveis que foram divididos em 3 classes (sinter, pelota e minério granulado) e 3 fundentes (f1, f2 e f3), conforme pode ser visto na Tabela 1. As análises químicas, as quantidades mínima e máxima disponíveis de cada matéria-prima e o custo por kg também são conhecidos.

A matéria-prima que irá compor a carga do alto-forno deverá satisfazer restrições relacionadas às quantidades mínima e máxima dos elementos químicos no gusa e na escória, à basicidade binária e à fração $\text{Massa}_{\text{escória}}/\text{Massa}_{\text{gusa}}$. Estas restrições são mostradas na Tabela 2.

Será considerado como Cenário 1, ou Cenário Inicial, aquele que utiliza as quantidades de cada matéria-prima mostradas na coluna Peso da Tabela 1. Para esta situação, as porcentagens dos elementos químicos no gusa e na escória, a basicidade binária e a fração mássica são mostrados na Tabela 2, nos campos indicados por “calculado”. Para este cenário, foram utilizadas as quantidade para carvão injetado e de coque de 144,00 kg/t.gusa e 364,43 kg/t.gusa, respectivamente.

O custo por tonelada de gusa produzido é R\$406,59, sendo admitido R\$0,20 e R\$0,38 os preços por quilograma de carvão pulverizado e coque, respectivamente.

Tabela 1 - Quantidade de cada matéria-prima utilizada na composição da carga do alto-forno do Cenário 1 (1000 kg de matéria-prima = 605,20 kg de gusa)

MINÉRIO	Mín (kg)	Máx (kg)	Custo (R\$/kg)	Peso (kg)	COMPOSIÇÃO (%)							
					Mn	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	
sínter	s1	0	3000	0,13	81,14	0,41	58,50	0,04	4,76	1,09	7,94	1,31
	s2	0	4500	0,16	258,51	0,22	63,20	0,05	5,98	2,41	9,89	0,72
	s3	0	2800	0,14		0,14	60,10	0,04	3,18	0,92	5,78	3,02
	s4	0	3900	0,18		0,23	64,20	0,03	3,09	1,44	6,22	2,03
	s5	0	3250	0,15		0,09	62,80	0,04	4,22	1,56	4,37	1,45
pelota	p1	0	6500	0,21		0,08	65,90	0,03	2,35	0,55	2,60	0,05
	p2	0	4300	0,19		0,22	64,70	0,05	1,90	1,80	1,75	0,23
	p3	0	5000	0,18		0,36	63,40	0,10	5,30	1,10	0,94	0,50
	p4	0	3900	0,19		0,52	65,02	0,08	3,77	2,19	1,03	0,42
	p5	0	2650	0,17		0,11	62,10	0,04	2,99	0,73	0,89	0,07
granulado	g1	0	7000	0,16		0,05	65,80	0,05	2,47	1,76	0,03	0,06
	g2	0	3000	0,16	48,76	0,16	65,20	0,09	3,60	2,40	1,12	0,00
	g3	0	4500	0,17	41,34	0,36	63,40	0,10	5,30	1,10	0,94	0,50
	g4	0	2800	0,15	473,98	0,44	62,70	0,06	4,76	0,91	1,17	0,70
	g5	0	2600	0,14	15,20	0,13	59,23	0,13	4,43	3,32	0,05	0,02
Fundentes	f1	0	3900	0,07		0,00	0,00	0,00	10,10	2,89	27,94	16,67
	f2	0	5600	0,05		0,00	1,20	0,02	14,20	1,70	31,20	14,80
	f3	0	4200	0,06	81,08	0,00	0,08	0,03	12,71	0,97	29,03	12,57

Tabela 2 - Quantidades calculadas para porcentagens dos elementos químicos no gusa e na escória, basicidade binária e a fração mássica relativas ao Cenário 1

	Gusa				Escória					
	Mn	Fe	Si	P	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO
rendimento (%)	94,00	98,50	15,00	95,00	-	-	-	-	-	-
perdas por gases (%)	-	-	-	-	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,10
Mín (%)	0,50	93,00	0,30	0,05	0,10	28,00	8,00	41,00	5,00	2,00
Máx (%)	1,50	96,00	2,00	0,50	2,00	35,00	20,00	46,00	11,00	7,00
Calculado (%)	0,50	93,60	0,66	0,09	0,14	31,54	9,48	41,00	11,00	6,84

No Gusa: C = 4,3% e outros = 0,85%

ESCÓRIA	Mín	Máx	calculado
Fração (%)	0,25	0,30	0,25
Bas. binária	1,15	1,30	1,30

Os dados de entrada utilizados para cálculo da quantidade de coque e da relação CO₂/(CO+CO₂), através do Balanço de Massa, são mostrados na Tabela 3 e os resultados na Tabela 4. Observa-se que os valores para a quantidade de coque utilizada (364,43kg/t.gusa) e calculada pelo balanço de massa (364,82kg/t.gusa) são bem próximos.

Tabela 3 - Parâmetros da injeção utilizados no Cenário 1. Nota-se um enriquecimento de Oxigênio de 2 %

Vazão de ar (Nm ³ /t.gusa)	1000
Taxa de injeção (kg/t.gusa)	144
Carbono no PCI (%)	60
Carbono no coque (%)	89
Oxigênio no ar injetado (%)	23
Umidade do ar (g/Nm ³)	20
Minério + Fundentes (kg/t.gusa)	1652,35
Carbono no Gusa (%)	4,3
Oxigênio topo (%) (em relação ao O ₂ total)	0,3

Tabela 4 - Valores calculados para o Cenário 1

Coque (kg/t.gusa)	364,82
CO ₂ /(CO+CO ₂)	0,496
Composição do gás do topo (%)	
N ₂	51,29
CO	23,64
CO ₂	23,26
O ₂ topo	0,11
H ₂	1,70

Considerando uma produção diária de 4000 t, 24 ventaneiras, velocidades do ar injetado e do PCI de 180m/s e 40m/s, respectivamente, os resultados da simulação realizada para o Cenário 1 são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados da simulação para o Cenário 1

Vazão de ar (kg/s)	59,85
PCI (kg/s)	6,67
Vazão de ar por ventaneira (kg/s)	2,49
PCI por ventaneira (kg/s)	0,28
Diâmetros e Velocidades	
Área da ventaneira (m ²)	0,012259
Diâmetro da ventaneira (mm)	124,9
Área do tubo PCI (m ²)	0,000116
Diâmetro do tubo PCI (mm)	12,1

3 METODOLOGIA

O problema de otimização da carga do alto-forno utilizará uma modelagem linear com solução através do método Simplex. Será utilizado o modelo de programação matemática proposto por Destro *et al.*,⁽¹⁾ que visa minimizar os custos relativos à carga do alto-forno e ao *fuel rate* (carvão injetado + coque) por tonelada de gusa produzido. Esses autores consideram os seguintes dados de entrada e variáveis de decisão:



R	: conjunto das matérias-primas
G	: conjunto dos parâmetros de controle no gusa
S	: conjunto dos parâmetros de controle na escória
Car	: carga total do alto-forno: carga metálica + fundentes (kg)
C_i	: custo da matéria-prima i (R\$/kg)
C_{coque}	: custo do coque (R\$/kg)
C_{pci}	: custo do carvão injetado (R\$/kg)
tg_{ij}	: teor do parâmetro j do gusa na matéria-prima i (%)
ts_{ij}	: teor do parâmetro j da escória na matéria-prima i (%)
tg_j	: teor mínimo do parâmetro j no gusa (%)
tg_u_j	: teor máximo do parâmetro j no gusa (%)
ts_j	: teor mínimo do parâmetro j na escória (%)
ts_u_j	: teor máximo do parâmetro j na escória (%)
$rend_j$: rendimento do parâmetro j (%/100)
$perda_j$: perda por gases do parâmetro j (%/100)
Q_{l_i}	: quantidade mínima a ser utilizada da matéria-prima i (kg)
Q_{u_i}	: quantidade máxima disponível da matéria-prima i (kg)
Bl	: basicidade binária mínima da escória
Bu	: basicidade binária máxima da escória
sl	: fração mínima da escória em relação ao gusa (%/100)
su	: fração máxima da escória em relação ao gusa (%/100)
C	: quantidade de carbono (%/100) no gusa
outros	: quantidade de outros elementos (%/100) no gusa

Variáveis de decisão:

X_i	: quantidade da matéria-prima i (kg)
X_{coque}	: quantidade de coque (kg) para Car = 1000kg
X_{pci}	: quantidade de carvão injetado (kg) para Car = 1000kg

A forma literal do modelo de programação matemática utilizado é apresentada a seguir.

$$\min \sum_{i \in R} c_i \cdot X_i + c_{\text{coque}} \cdot X_{\text{coque}} + c_{\text{pci}} \cdot X_{\text{pci}} \quad (3.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i \in R} \text{tg}_{ij} \cdot X_i \cdot \text{rend}_i - \text{tgl}_j \cdot \frac{\sum_{i \in R} \sum_{j \in G} \text{tg}_{ij} \cdot X_i \cdot \text{rend}_i}{1 - C - \text{outros}} \geq 0 \quad \forall j \in G \quad (3.2)$$

$$\sum_{i \in R} \text{tg}_{ij} \cdot X_i \cdot \text{rend}_i - \text{tgu}_j \cdot \frac{\sum_{i \in R} \sum_{j \in G} \text{tg}_{ij} \cdot X_i \cdot \text{rend}_i}{1 - C - \text{outros}} \leq 0 \quad \forall j \in G \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in R} (1 - \text{rend}_i - \text{perda}_i) \cdot \text{ts}_{ij} \cdot X_i - \text{tsl}_j \cdot \sum_{i \in S} \sum_{i \in R} (1 - \text{rend}_i - \text{perda}_i) \cdot \text{ts}_{ij} \cdot X_i \geq 0 \quad \forall j \in S \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in R} (1 - \text{rend}_i - \text{perda}_i) \cdot \text{ts}_{ij} \cdot X_i - \text{tsu}_j \cdot \sum_{i \in S} \sum_{i \in R} (1 - \text{rend}_i - \text{perda}_i) \cdot \text{ts}_{ij} \cdot X_i \leq 0 \quad \forall j \in S \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in F} (1 - \text{rend}_{(CaO)} - \text{perda}_{(CaO)}) \cdot \text{ts}_{i(CaO)} \cdot X_i - \text{Bl} \cdot \sum_{i \in F} (1 - \text{rend}_{(SiO_2)} - \text{perda}_{(SiO_2)}) \cdot \text{ts}_{i(SiO_2)} \cdot X_i \geq 0 \quad (3.6)$$

$$\sum_{i \in F} (1 - \text{rend}_{(CaO)} - \text{perda}_{(CaO)}) \cdot \text{ts}_{i(CaO)} \cdot X_i - \text{Bu} \cdot \sum_{i \in F} (1 - \text{rend}_{(SiO_2)} - \text{perda}_{(SiO_2)}) \cdot \text{ts}_{i(SiO_2)} \cdot X_i \leq 0 \quad (3.7)$$

$$X_{\text{pci}} = \frac{-36 \cdot X_{\text{gran}}}{\text{Car}} + 108 \quad (3.8)$$

$$X_{\text{coque}} = \frac{-48 \cdot (X_{\text{sinter}} + X_{\text{pelota}}) + 36 \cdot X_{\text{gran}}}{\text{Car}} + 216 \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{i \in R} (1 - \text{rend}_j - \text{perda}_j) \cdot \text{ts}_{ij} \cdot X_j - \text{sl} \cdot \frac{\sum_{i \in R} \sum_{j \in G} \text{tg}_{ij} \cdot X_i \cdot \text{rend}_i}{1 - C - \text{outros}} \geq 0 \quad (3.10)$$

$$\sum_{j \in S} \sum_{i \in R} (1 - \text{rend}_j - \text{perda}_j) \cdot \text{ts}_{ij} \cdot X_j - \text{su} \cdot \frac{\sum_{i \in R} \sum_{j \in G} \text{tg}_{ij} \cdot X_i \cdot \text{rend}_i}{1 - C - \text{outros}} \leq 0 \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in R} X_i - \text{Car} = 0 \quad (3.12)$$

$$X_i - \text{Qu}_i \leq 0 \quad \forall i \in R \quad (3.13)$$

$$X_i - \text{Ql}_i \geq 0 \quad \forall i \in R \quad (3.14)$$

$$X_i \geq 0 \quad \forall i \in R \quad (3.15)$$

A função objetivo está representada pela relação (3.1), indicando que se pretende minimizar o custo relativo à carga do alto-forno, ao coque e ao carvão injetado (PCI). As restrições (3.2) e (3.3) limitam os teores dos parâmetros de controle do gusa ao intervalo definido pelos valores mínimo e máximo atribuídos a cada parâmetro. De forma análoga, as restrições (3.4) e (3.5) limitam os teores dos parâmetros de controle da escória ao intervalo definido por tsl_j e tsu_j . As restrições associadas às basicidades mínima e máxima da escória foram colocadas nas relações (3.6) e (3.7). As relações que definirão o valor do fuel rate (X_{pci} e X_{coque}) são mostradas pelas equações (3.8) e (3.9). As relações (3.10) e (3.11) limitam a quantidade de escória em função da quantidade de gusa. Em (3.12) foi colocada a restrição que impede que a carga do alto-forno seja diferente do valor atribuído à Car. As restrições relacionadas com as quantidades limites de cada matéria-prima na constituição da carga foram consideradas nas relações (3.13) e (3.14). A relação (3.15) considera a não-negatividade da variável de decisão x .

Para o estudo das adaptações que devem ser realizadas nos parâmetros da injeção em função da alteração na quantidade de PCI, foram feitos cálculos estequiométricos visando à obtenção do volume de ar injetado para atender a nova quantidade de carvão obtido pelo modelo de otimização. Esses cálculos também permitem verificar a necessidade do enriquecimento de O_2 .

Com a intenção de garantir a eficiência da condição otimizada encontrada para o Cenário 2, alterações nos diâmetros das ventaneiras e do tubo de injeção de carvão pulverizado foram sugeridas e avaliadas através de simulação computacional. Para isso, utilizou-se de relações entre a vazão volumétrica do ar injetado e velocidade média na ventaneira, garantindo a mesma velocidade e comprimento de chama. Para o carvão injetado, o diâmetro do tubo foi dimensionado através da força de arraste de partículas. Neste caso, as partículas de carvão pulverizado são tratadas como fase dispersa, usando o método Lagrangiano, onde o comportamento da partícula é calculado ao longo da trajetória sem que haja interação entre elas.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

O resultado da otimização é mostrado nas Tabelas 6 e 7. Para este cenário, definido anteriormente como Cenário 2, as quantidade de carvão injetado e de coque são 175,05kg/t.gusa e 302,89kg/t.gusa, respectivamente. O custo por tonelada de gusa produzido é R\$397,19.

Tabela 6 - Quantidade de cada matéria-prima utilizada na composição da carga do alto-forno do Cenário 2 (1000 kg de matéria-prima = 595,30 kg de gusa)

MINÉRIO	Mín (kg)	Máx (kg)	Custo (R\$/kg)	Peso (kg)	COMPOSIÇÃO (%)							
					Mn	Fe	P	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	
sinter	s1	0	3000	0,13	373,37	0,41	58,50	0,04	4,76	1,09	7,94	1,31
	s2	0	4500	0,16	68,96	0,22	63,20	0,05	5,98	2,41	9,89	0,72
	s3	0	2800	0,14		0,14	60,10	0,04	3,18	0,92	5,78	3,02
	s4	0	3900	0,18		0,23	64,20	0,03	3,09	1,44	6,22	2,03
	s5	0	3250	0,15		0,09	62,80	0,04	4,22	1,56	4,37	1,45
pelota	p1	0	6500	0,21		0,08	65,90	0,03	2,35	0,55	2,60	0,05
	p2	0	4300	0,19		0,22	64,70	0,05	1,90	1,80	1,75	0,23
	p3	0	5000	0,18	380,23	0,36	63,40	0,10	5,30	1,10	0,94	0,50
	p4	0	3900	0,19		0,52	65,02	0,08	3,77	2,19	1,03	0,42
	p5	0	2650	0,17		0,11	62,10	0,04	2,99	0,73	0,89	0,07
granulado	g1	0	7000	0,16		0,05	65,80	0,05	2,47	1,76	0,03	0,06
	g2	0	3000	0,16		0,16	65,20	0,09	3,60	2,40	1,12	0,00
	g3	0	4500	0,17		0,36	63,40	0,10	5,30	1,10	0,94	0,50
	g4	0	2800	0,15		0,44	62,70	0,06	4,76	0,91	1,17	0,70
	g5	0	2600	0,14	105,36	0,13	59,23	0,13	4,43	3,32	0,05	0,02
Fundentes	f1	0	3900	0,07		0,00	0,00	0,00	10,10	2,89	27,94	16,67
	f2	0	5600	0,05		0,00	1,20	0,02	14,20	1,70	31,20	14,80
	f3	0	4200	0,06	72,08	0,00	0,08	0,03	12,71	0,97	29,03	12,57

Tabela 7 - Quantidades calculadas para porcentagens dos elementos químicos no gusa e na escória, basicidade binária e a fração mássica relativas ao Cenário 2

	Gusa				Escória					
	Mn	Fe	Si	P	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO
rendimento (%)	94,00	98,50	15,00	95,00	-	-	-	-	-	-
perdas por gases (%)	-	-	-	-	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,10
Mín (%)	0,50	93,00	0,30	0,05	0,10	28,00	8,00	41,00	5,00	2,00
Máx (%)	1,50	96,00	2,00	0,50	2,00	35,00	20,00	46,00	11,00	6,86
Calculado (%)	0,50	93,57	0,66	0,12	0,14	31,54	9,48	41,00	11,00	6,84

No Gusa: C = 4,3% e outros = 0,85%

ESCÓRIA	Mín	Máx	Calculado
Fração (%)	0,25	0,30	0,25
Bas. binária	1,15	1,30	1,30

De maneira semelhante à realizada para o Cenário 1, os dados de entrada utilizados para cálculo da quantidade de coque e da relação $CO_2/(CO+CO_2)$, através do Balanço de Massa, são mostrados na Tabela 8 e os resultados na Tabela 9. Observa-se, novamente, que os valores para a quantidade de coque calculada pelo modelo matemático (302,89kg/t.gusa) e a calculada pelo balanço de massa (302,10kg/t.gusa) são bem próximos.

Tabela 8 - Parâmetros da injeção utilizados no Cenário 2. Para este cenário, não há enriquecimento de Oxigênio

Vazão de ar (Nm ³ /t.gusa)	1000
Taxa de injeção (kg/t.gusa)	175,05
Carbono no PCI (%)	60
Carbono no coque (%)	89
Oxigênio no ar injetado (%)	21
Umidade do ar (g/Nm ³)	20
Minério + Fundentes (kg/t.gusa)	1679,83
Carbono no Gusa (%)	4,3
Oxigênio topo (%) (em relação ao O ₂ total)	0,3

Tabela 9 - Valores calculados para o Cenário 2

Coque (kg/t.gusa)	302,10
CO ₂ /(CO+CO ₂)	0,605
Composição do gás do topo (%)	
N ₂	54,48
CO	17,24
CO ₂	26,41
O ₂ topo	0,11
H ₂	1,76

Consideradas as mesmas condições utilizadas para o Cenário 1, ou seja, uma produção diária de 4.000 t, 24 ventaneiras, velocidades do ar injetado e do PCI de 180 m/s e 40 m/s, respectivamente, os resultados da simulação realizada para o Cenário 2 são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados da simulação para o Cenário 2

Vazão de ar (kg/s)	59,85
PCI (kg/s)	8,10
Vazão de ar por ventaneira (kg/s)	2,49
PCI por ventaneira (kg/s)	0,34
Diâmetros e Velocidades	
Área da ventaneira (m ²)	0,012284
Diâmetro da ventaneira (mm)	125,1
Área do tubo PCI (m ²)	0,000141
Diâmetro do tubo PCI (mm)	13,4

No Cenário Inicial, mais da metade da carga do alto-forno (57,93%) é constituída por minério granulado e o restante por sínter e fundentes. Já no cenário otimizado, ocorreu uma diminuição no percentual do minério granulado, correspondendo a 10,54% da carga, e o uso de pelotas passou a ter uma participação percentual de 38,02%. Esta variação na participação percentual dos componentes que constituem a carga metálica explica o aumento ocorrido na relação $CO_2/(CO+CO_2)$, uma vez que a redução do óxido é favorecida no minério aglomerado. Assim, como era esperado, este valor que era de 0,496 no Cenário 1, assume um valor maior no Cenário 2, ou seja, 0,605. Além das mudanças nos constituintes da carga metálica, a quantidade de carvão injetado também mudou, passando de 144,00 kg/t.gusa no Cenário Inicial para 175,05 kg/t.gusa no Cenário Otimizado.

Nota-se, também, que em função das mudanças ocorridas na composição percentual da carga do alto-forno e das diferenças nas quantidades de coque e carvão injetado nos dois cenários, ocorreu uma redução no custo de produção de 1 t de gusa, passando de R\$406,59 no Cenário 1 para R\$397,19 no Cenário 2.

Esse aumento na quantidade de carvão injetado e diminuição na quantidade de coque permitem que não seja mais necessário o enriquecimento de O_2 na injeção para o Cenário 2 (no Cenário 1, o enriquecimento é de 2 %). No entanto, deverá ocorrer um aumento no diâmetro da ventaneira de 0,2 mm (125,1 mm - 124,9 mm) e do tubo PCI de 1,3 mm (13,4 mm - 12,1 mm).

Como forma de avaliar as mudanças sugeridas pelo Cenário 2 (Otimizado), foi realizado uma simulação computacional, onde são comparados os perfis de velocidade, temperatura e do gás oxigênio durante a queima do carvão pulverizado.

Os detalhes do domínio de simulação para o modelo de combustão de carvão pulverizado é mostrado pela Figura 1. Esse modelo foi dimensionado considerando os cálculos de diâmetros de ventaneira e tubo de injeção de finos encontrados antes e após a otimização.

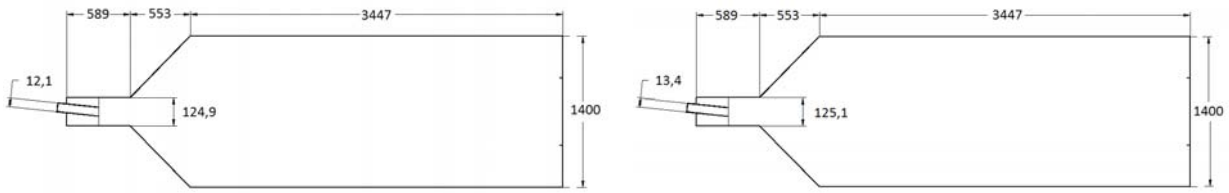


Figura 1 – Principais dimensões (em mm) do modelo de combustão de carvão pulverizado. À direita o modelo do Cenário 1 e à esquerda o modelo do Cenário 2.

As propriedades e condições do carvão pulverizado utilizado foram as mesmas para ambos os cenários. De acordo com Guo *et al.*,⁽²⁾ a pirólise do carvão inicia a temperaturas próximas a 1000K para partículas pequenas, podendo ser mais elevadas para partículas maiores. Para manter as condições de análise constantes, os diâmetros das partículas, bem como suas composições, foram mantidas.

A Figura 2 mostra o perfil de temperatura na zona de combustão. Pode-se observar que o perfil da zona de combustão é muito próximo em ambos os cenários.

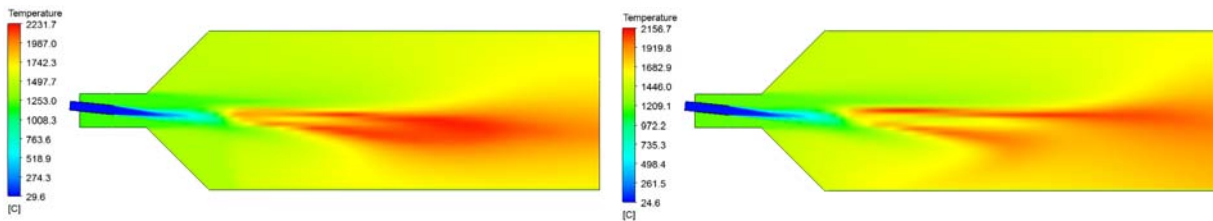


Figura 2 - Perfil de temperatura do Cenário 1 (esquerda) e do Cenário 2 (direita).

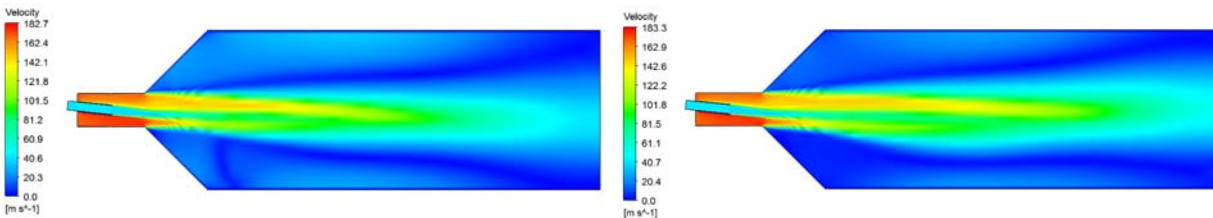


Figura 3 - Perfil de velocidade do Cenário 1 (esquerda) e do Cenário 2 (direita).

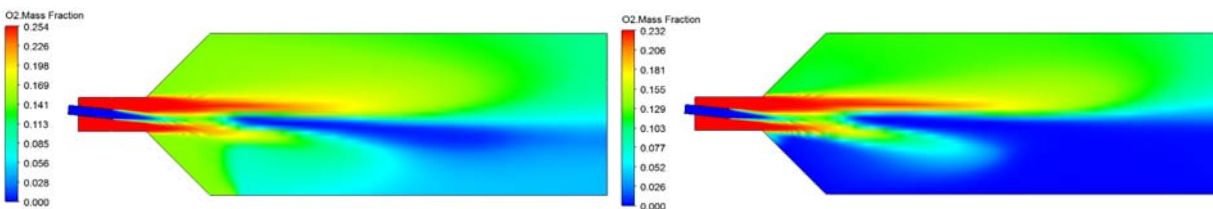


Figura 4 - Distribuição de oxigênio na zona de combustão do Cenário 1 (esquerda) e do Cenário 2 (direita).

Já as Figuras 3 e 4 mostram que uma pequena variação de temperatura interna leva a uma expansão do gás, aumentando a penetração na zona de

combustão. O volume de oxigênio também se difere, entendendo-se que não há necessidade de enriquecimento no Cenário 2.

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados mostram que o Cenário Otimizado é mais vantajoso que o Cenário Inicial, permitindo uma redução no custo por tonelada de gusa de

$$R\$406,59 - R\$397,19 = R\$9,40,$$

relativa somente aos custos com a carga do alto-forno e carvões (coque + PCI), não sendo levado em conta a economia com a redução relacionada ao enriquecimento de O₂, que para o Cenário Otimizado não será necessário.

Para que as condições operacionais do alto-forno sejam mantidas, deverão ocorrer adaptações nos diâmetros das ventaneiras e dos tubos PCI, visto que tais alterações contribuirão, principalmente, para a injeção do carvão pulverizado.

Agradecimentos

Os autores agradecem a REDEMAT (UFOP-CETEC-UEMG), CAPES, Escola de Minas-UFOP e à Lumar Metals Ltda.

REFERÊNCIAS

- 1 DESTRO, E.; ASSIS, P. S.; SILVA, G. L. R.; CARIAS, R. D. A.; OLIVEIRA, F. O. M. *Operational Research to Optimize the Iron Raw Materials for Blast Furnace Burden*. 5th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking. October 19-23, Shanghai, China, 2009.
- 2 GUO, B.; ZULLI, P.; ROGERS, H.; MATHIESON, J.G.; YU, A. *Three-dimensional Simulation of Flow and Combustion for Pulverized Coal Injection*. ISIJ International, Vol. 45. No. 9, pp1272-1281, 2005.