

Sistema para aplicação de penalidades por desvios na qualidade estimada de carvões siderúrgicos para a produção de coque

J. C. Ferreira Filho*; R. L. Medeiros

Departamento de Engenharias e Computação – Universidade Federal do Espírito Santo,
Rodovia BR 101 Norte, km. 60, Bairro Litorâneo, CEP 29932-540, São Mateus – Espírito Santo

(Recebido em 09/09/2010; revisado em 21/12/2010; aceito em 23/12/2010)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Além do seu importante papel metalúrgico, o coque representa mais da metade do custo de produção do ferro gusa e cerca de 20% do custo de fabricação do aço. Por isso, as siderúrgicas integradas buscam misturas de carvões minerais de custo mínimo para produção de coque que atendam aos requisitos de qualidade. Como nem sempre os carvões são entregues dentro da especificação contratual, o presente artigo apresenta uma proposta de sistema para a determinação e aplicação do ônus efetivamente causado por desvios na qualidade estimada de um carvão contratado. Uma apresentação detalhada do problema, sua formulação como modelo de programação linear e um procedimento para a análise são propostos. Um sistema protótipo funcional foi desenvolvido e ilustrações numéricas das análises são discutidas.

Palavras-chave: Siderurgia; Carvão; Contrato de fornecimento; Programação linear.

Abstract:

In addition to its important metallurgical role, the coke accounts for more than half of the total production cost of the pig iron and around 20% of the total cost of steel production. For this reason, the integrated steelmaking mills seek mineral coals blends with minimum cost for producing coke looking up to quality requirements. As the coals are not always delivered within contract specification, this paper show a proposes of system for determining and application of the damage effectively caused by specification deviations. A detailed presentation of the problem, its formulation as a linear programming model and a procedure for analysis are proposed. A functional prototype system was developed and numerical illustrations of the analyses are discussed.

Keywords: Steelmaking; coal; supply contract; linear programming.

1. Introdução

Em usinas siderúrgicas integradas e semi-integradas, o carvão mineral tem papel fundamental, pois é matéria-prima básica para a produção do coque, combustível artificial utilizado no processo de redução do minério de ferro, que além de sua grande importância metalúrgica é responsável por mais de 50% do custo de produção do ferro gusa e cerca de 20% do custo de fabricação do aço [1], o que evidencia sua elevada importância econômica para o processo siderúrgico.

O coque é formado pela “destilação”, em fornos de coqueificação com atmosfera e temperatura controladas, de uma mistura de carvões minerais que devem possuir propriedades físico-químicas tais que o coque produzido seja capaz de atender a requisitos de qualidade [2]. Tais requisitos são importantes para que o bom funcionamento do processo e a qualidade final do aço não sejam comprometidos.

Como os processos de todas as siderúrgicas integradas são similares, as propriedades físico-químicas mais desejadas

também tendem a ser as mesmas, e são elas que determinam o preço de aquisição de cada carvão [3].

Para que o processo da coqueria seja técnica e economicamente viável, as siderúrgicas utilizam misturas de carvões com diferentes composições, objetivando a formação de misturas adequadas, reduzindo ao máximo o custo de aquisição dos mesmos.

Dentre as propriedades físico-químicas diretamente ligadas à qualidade dos carvões coqueificáveis, e que são desejadas dentro de certos limites de tolerância, pode-se destacar como mais importantes a umidade, o carbono fixo, as cinzas, o enxofre, a matéria volátil, a fluidez, a refletância e a dilatação.

Dentre as pesquisas mais relevantes abordando o tema da mistura ótima de carvões para produção de coque convém destacar três. Na primeira, utilizou-se a programação inteira mista no desenvolvimento de uma ferramenta computacional útil no planejamento e programação de suprimento de carvões em uma usina siderúrgica [4].

*Email: josefilho@ceunes.ufes.br (J. C. Ferreira Filho)

Na segunda, com o propósito de estimar o valor que um determinado carvão tem para o comprador, utilizou-se da programação linear para gerar curvas de demanda que relacionam o preço do carvão com sua quantidade ótima de aquisição, a partir das misturas ótimas dos carvões [1].

Na terceira, realizou-se uma aprofundada análise pós-ótima para estabelecer os níveis em que se pode variar algumas das propriedades dos carvões, inclusive o preço, sem afetar a mistura ótima, dando subsídios para que, durante uma negociação de carvões, o comprador tenha flexibilidade na determinação da relação qualidade-preço [5].

É importante observar que em certos níveis de variação da qualidade dos carvões fornecidos, com relação ao especificado nos contratos, há prejuízos no custo e na qualidade do coque produzido. Numa situação mais desfavorável, em que esses desvios de qualidade extrapolem os limites permissíveis, outros tipos de carvões deverão ser adicionados à mistura para que se ajustem os desvios de qualidade proporcionados pelo não atendimento do contrato.

Esses prejuízos, portanto, devem ser expressos nos contratos através de penalidades ao fornecedor, caso contrário, o custo de tais desvios será imposto ao comprador, onerando o processo de fabricação do coque e, conseqüentemente, o de produção do aço.

Quando um determinado carvão é entregue fora da especificação contratada, no que se refere às suas propriedades, duas situações distintas podem ocorrer: se a propriedade é extensiva, como as cinzas e a matéria volátil, o desvio tem influência direta sobre a massa do carvão adquirido; se a propriedade é intensiva, como a refletância e a fluidez, a massa do carvão não é alterada pelo desvio de especificação, o que torna ainda mais difícil determinar a penalidade a ser aplicada [5].

Independente da forma em que o desvio de especificação ocorra, torna-se não somente interessante, mas também necessário conhecer de que maneira essas penalidades podem ser determinadas para que o fornecedor pague o ônus de tais desvios.

Este artigo apresenta uma proposta de sistema para a determinação e aplicação dos custos decorrentes de desvios na qualidade estimada dos carvões contratados para a produção de coque [6].

O sistema proposto foi desenvolvido em uma plataforma de programação orientada ao objeto, onde se utilizou a programação linear, particularmente, as técnicas de análise de sensibilidade e interpretação canônica para analisar os resultados obtidos.

Os dados utilizados foram fornecidos por uma companhia siderúrgica de grande porte, o que propiciou a seleção de um modesto banco de dados de 21 (vinte e um) carvões com diferentes composições e preços, disponíveis para a formação de misturas.

Após a determinação da mistura ótima, base para a negociação de aquisição, foram simulados desvios em algumas das propriedades extensivas e intensivas dos carvões, com o propósito de favorecer a utilização do sistema e as análises dos resultados, facilitando a compreensão sobre a

determinação dos custos gerados pelos desvios e sua transformação em penalidades ao fornecedor.

2. Materiais e Métodos

Além de revisão de literatura, realizou-se coleta de dados reais e modelagem matemática para a análise dos cenários propostos.

A construção de modelos matemáticos se justifica por, principalmente, três motivos [7]. Primeiramente, o exercício da construção de um modelo matemático revela relações que não eram aparentes, proporcionando um maior entendimento acerca do objeto modelado. Em segundo lugar, tendo construído um modelo, torna-se possível analisá-lo matematicamente, favorecendo a sugestão de ações a serem tomadas. Por último, torna-se possível e desejável realizar diversos experimentos com o modelo, supondo cenários variados, visto que é economicamente inviável e, portanto, gerencialmente indesejável que testes sejam realizados em escala real, em virtude da maior probabilidade de fracassos e perdas.

O modelo da mistura de carvões utilizado na pesquisa possui as mesmas características do modelo clássico apresentado na literatura [1,5], com mesma função objetivo e restrições básicas, salvo pela introdução da restrição de pressão interna dos fornos.

As baterias de fornos possuem uma restrição de pressão de coqueificação projetada para o limite máximo de 1,5 psig. Normalmente, são os carvões baixo e médio voláteis, com matéria volátil entre 16 e 23%, que contribuem com essa pressão de coqueificação. Isso não significa que seja uma regra, pois existem carvões deste grupo sem pressão que comprometam a operação dos fornos. No entanto, a participação dos carvões baixo voláteis na mistura foi limitada em 26%, seguindo orientação do especialista da siderúrgica que participou da pesquisa.

Sendo assim, segue abaixo o modelo matemático básico da mistura de carvões para produção de coque:

$$\text{Minimizar CT} = \sum_{j=1}^n c_j \cdot q_j \dots\dots \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n q_j = \text{QTCA} \dots\dots\dots \quad (2)$$

$$\text{QTCA} \geq 100 \text{ ton} \dots\dots \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} q_j \leq \text{LS}_i \cdot \text{QTCA}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m. \dots \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} q_j \geq \text{LI}_i \cdot \text{QTCA}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m. \dots \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^s q_k \leq 0,26 \cdot \text{QTCA} \quad (6)$$

$$q_j \geq 0, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Onde:

i = índice de cada uma das m propriedades de controle.

j = índice de cada um dos n carvões.

k = índice de cada um dos s carvões baixo voláteis.

c_j = preço de aquisição de cada carvão j , em dólares por tonelada.

q_j = quantidade de cada carvão j que participa da mistura de custo mínimo, em toneladas.

p_{ij} = contribuição unitária do carvão j para a propriedade i , em valor absoluto ou porcentagem.

CT = custo total da mistura de carvões em dolares.

QTCA = quantidade total de carvão considerando os que compõem a mistura ótima, em toneladas.

LS_i = Limite Superior da participação de cada propriedade i na quantidade total de carvão da mistura ótima, em valor absoluto ou porcentagem.

LI_i = Limite Inferior da participação de cada propriedade i na quantidade total de carvão da mistura ótima, em valor absoluto ou porcentagem.

A função objetivo do modelo (1) define o custo total de aquisição dos carvões como uma função da quantidade de carvão, dado o preço de mercado. Seis grupos distintos de restrições completam o modelo, em (2) e (3) as restrições definem a demanda por carvão para o período de

planejamento, em (4) e (5) são estabelecidos os limites superior e inferior, respectivamente, para as propriedades físicas e químicas da mistura de carvões. Os níveis dessas propriedades impactam diretamente na qualidade da mistura e do coque produzido. A restrição (6) estabelece o limite superior para a pressão interna dos fornos, condicionada pelo teor de matéria volátil dos carvões. A quantidade de cada um dos carvões selecionados para a mistura ótima deve ser não negativa, como definido pela restrição (7).

O sistema protótipo foi desenvolvido no ambiente de programação do software AIMMS 3.8, da Paragon Decision Technology B.V., que combina linguagem de programação com interface gráfica ao usuário e resolvidores numéricos (*solvers*).

De maneira simplificada, a plataforma de programação utilizada permite a construção de sistemas através de três principais módulos, conforme Figura 1: entrada de dados (*input*), processamento de dados (*setup*) e saída de dados (*output*) [8].

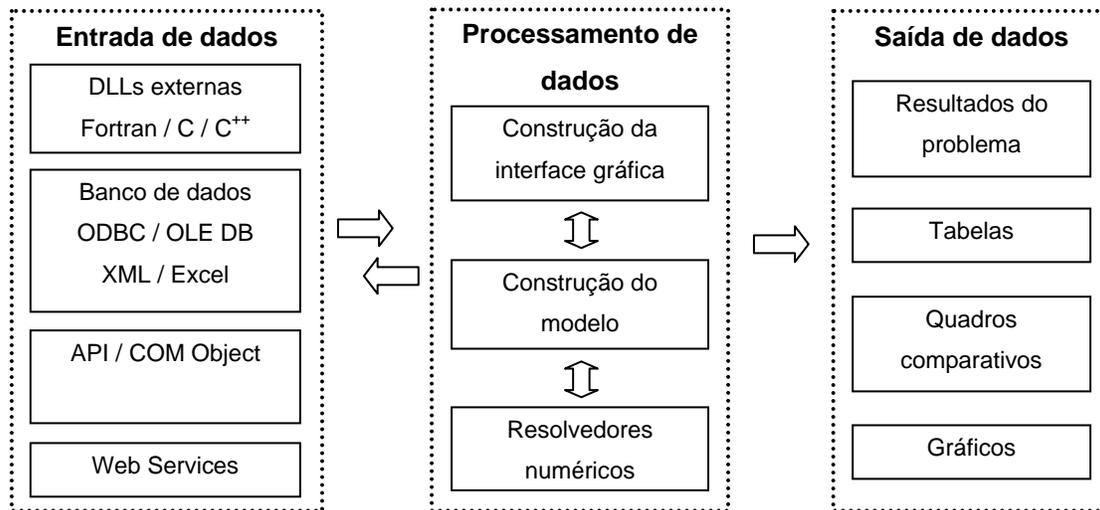


Figura 1: Representação geral dos módulos disponíveis na plataforma de programação

No que se refere ao problema da mistura de carvões, o sistema proposto está dividido em dois módulos: Esperado e Ajustamento. Ambos os módulos são constituídos de entrada de dados, modelagem e interface gráfica ao usuário.

A diferença básica entre os dois módulos é que o Esperado é responsável por apoiar o processo de negociação dos carvões que deverão ser contratados para suprir a demanda anual de coque; ele seleciona dentre um conjunto de carvões disponíveis os que melhor atendem às exigências de qualidade a um custo mínimo.

Definidos, contratados e entregues os carvões para composição das misturas, o módulo Ajustamento se responsabiliza por corrigir algum desvio na qualidade estimada desses carvões, caso tal desvio comprometa a qualidade da mistura para produção de coque.

Considerando a situação em que os carvões contratados já foram recebidos, torna-se inviável devolução dos mesmos em caso de não atendimento às especificações do contrato, pois as quantidades transacionadas são da ordem de milhares de toneladas.

Havendo a necessidade de que algum dos carvões tenha a sua quantidade aumentada para favorecer a correção da mistura, o modelo de ajustamento deverá recorrer aos carvões disponíveis no mercado à vista de pequenas quantidades (*on spot*), visto que as quantidades dos carvões já contratados se tornam limites superiores para o ajustamento. Os carvões *on spot* são utilizados somente em casos excepcionais, visto que são carvões mais nobres e, conseqüentemente, mais caros.

O módulo Ajustamento também é responsável pela comparação dos custos totais reais e ajustados, e a

contabilização da diferença entre os mesmos, favorecendo a determinação das penalidades contratuais a serem aplicadas.

Os dados que alimentaram o sistema foram fornecidos por uma siderúrgica nacional de grande porte e são provenientes de um banco de dados de carvões disponíveis para formação de misturas, que deve ser anualmente atualizado após avaliação dos fornecedores, dos preços e da qualidade dos carvões.

Para a formação da mistura ótima, simulação dos cenários de desvio e cálculo das penalidades, foi selecionada uma amostra de vinte e um carvões, dos quais quinze (CV-01 ao CV-15) são para a formação da mistura ótima, e seis (SP-01 ao SP-06) são os *on spot* para o ajustamento da mistura em caso de desvio de especificação. Os limites de qualidade para a mistura de carvões são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Limites de qualidade para a mistura de carvões

Limites	Umidade (%)	Matéria Volátil (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)	Fósforo (%)	Fluidez (10 ³ ddpm)	Refletância (%)	Dilatação (%)
LI	-	23,50	-	-	-	2,50	1,10	75
LS	10,00	26,00	10,70	0,70	0,04	3,20	1,30	130

3. Resultados

Foram realizados testes com o sistema protótipo simulando cenários de desvios de especificações em algumas das propriedades extensivas e intensivas dos carvões, aplicando desvios percentuais em apenas uma propriedade de cada vez.

Após a simulação, os resultados foram analisados com a finalidade de se entender o comportamento e as conseqüências dos desvios sobre a mistura ótima de carvões, estudando a viabilidade de sistematizar o cálculo da penalidade a ser aplicada.

Com o propósito de ilustrar o funcionamento do sistema protótipo desenvolvido e as análises realizadas, apresenta-se a seguir um exemplo ilustrativo dos desvios aplicados sobre apenas uma das propriedades de um dos carvões contidos na mistura ótima.

Com base nos carvões disponíveis para formação de mistura, conforme banco de dados fornecido pela siderúrgica, após a otimização do modelo de misturas do módulo Esperado do sistema protótipo, obteve-se a mistura de custo mínimo,

formada pelos carvões: CV-02, CV-03, CV-05, CV-07, CV-13 e CV-15, como apresentado na Tabela 2.

Supondo que os carvões participantes da mistura ótima foram comprados, recebidos e analisados pela siderúrgica, simularam-se desvios de especificação em uma das propriedades de um dos carvões que compõem a mistura.

Analisando os dados das Tabelas 3 e 4, observa-se que as restrições que se referem às propriedades químicas: umidade, cinzas e fósforo, e a que se refere à propriedade física: fluidez, não estão ativas, possuindo relativa folga em relação aos seus limites superiores, o que permite concluir que um desvio de especificação para uma dessas propriedades, dependendo de sua magnitude, não resultará em uma mudança na estrutura da mistura, podendo permanecer inalterado o valor da função objetivo.

Entretanto, como tais desvios se referem a alterações nos coeficientes tecnológicos iniciais das variáveis básicas finais (matriz B^{-1}), não é possível prever com tanta facilidade e simplicidade os efeitos de tais desvios sobre a estrutura e o custo da mistura.

Tabela 2: Mistura ótima de carvões no módulo Esperado do sistema protótipo

Carvão	Quantidade (ton)	Custo Reduzido (US\$)	Básica / Não Básica
CV-01	-	0,78	Não Básica
CV-02	24,11	-	Básica
CV-03	28,42	-	Básica
CV-04	-	0,27	Não Básica
CV-05	3,29	-	Básica
CV-06	-	1,37	Não Básica
CV-07	18,18	-	Básica
CV-08	-	1,44	Não Básica
CV-09	-	1,58	Não Básica
CV-10	-	1,75	Não Básica
CV-11	-	1,10	Não Básica
CV-12	-	0,19	Não Básica
CV-13	9,11	-	Básica
CV-14	-	0,53	Não Básica
CV-15	16,89	-	Básica

Imaginando a estrutura de um tableau, na aplicação do método Simplex, após a modificação de um coeficiente tecnológico inicial de uma variável básica final e a reaplicação das mesmas operações sobre linhas que foram inicialmente aplicadas, até chegar ao tableau final, certamente deverá ser restabelecida a forma canônica do tableau, visto que o coeficiente modificado, se não for um pivô, deverá ser igual a zero [9]. Se o coeficiente em questão for de uma propriedade que se refere a uma restrição ativa, o restabelecimento da forma canônica pode culminar na alteração da estrutura da mistura (mudança de base) ou até mesmo tornar o problema infactível, uma vez que o nível da restrição será alterado pelo restabelecimento da forma canônica.

Dessa forma, foi selecionada uma propriedade com restrição ativa para a simulação dos desvios: a matéria volátil do carvão CV-07, que possui proporção inicial abaixo do limite superior de qualidade especificado. Nas Tabelas 3 e 4, os valores duais diferentes de zero indicam as restrições ativas do problema.

Tabela 3: Níveis e valores duais das restrições de limite inferior de qualidade da mistura de carvões no módulo Esperado do sistema protótipo

Propriedades	Limite Inferior	Nível	Valor Dual
Umidade (%)	-	7,96	-
Matéria Volátil (%)	23,50	26,00	-
Cinzas (%)	-	7,12	-
Enxofre (%)	-	0,70	-
Fósforo (%)	-	0,02	-
Fluidez (10 ³ ddpm)	2,50	2,88	-
Refletância (%)	1,10	1,10	3,49
Dilatação (%)	75,00	130,00	-

Tabela 4: Níveis e valores duais das restrições de limite superior de qualidade da mistura de carvões no módulo Esperado do sistema protótipo

Propriedades	Nível	Limite Superior	Valor Dual
Umidade (%)	7,96	10,00	-
Matéria Volátil (%)	26,00	26,00	-0,18
Cinzas (%)	7,12	10,70	-
Enxofre (%)	0,70	0,70	-0,43
Fósforo (%)	0,02	0,04	-
Fluidez (10 ³ ddpm)	2,88	3,20	-
Refletância (%)	1,10	1,30	-
Dilatação (%)	130,00	130,00	-0,01

Observando os dados da Tabela 5, verifica-se que para a faixa de desvios entre 2,5% e 42,5%, tanto os custos totais ajustados quanto as variações dos custos são proporcionais em relação aos desvios aplicados.

Esse resultado fica evidente quando se constata que a penalidade unitária, que é a razão entre a variação do custo total e o desvio absoluto, é constante. Entretanto, na faixa de desvios que vai de 45,0% a 100%, observa-se que a penalidade unitária não mais é constante, pois seu valor

Inicialmente, foram aplicados desvios progressivos de 2,5%, proporcionais à quantidade inicial de matéria volátil contida em 1,0 ton (uma tonelada) do carvão CV-07, até atingir um desvio de 100% em relação à especificação inicial, que é de 21,2%, e observa-se o comportamento da mistura. Vale destacar que todo ajustamento necessário à mistura, em função dos desvios, é responsabilidade dos carvões on spot, que, como citado anteriormente, são carvões reservados pelo mercado para suprir pequenas demandas provenientes, principalmente, de ajustes de misturas. São, portanto, carvões mais refinados e normalmente mais caros.

Estão computados na Tabela 5 os desvios absolutos, os custos totais do ajustamento e as variações de custo em relação ao custo total esperado. A última coluna da tabela informa a penalidade unitária (penalidade por tonelada de carvão e por desvio absoluto) a ser aplicada por uma mudança na estrutura da mistura, em dólares por tonelada e por desvio absoluto, bastando dividir por 100 os valores da última coluna para que a penalidade seja dada por ponto percentual de desvio no teor da referida propriedade.

decrece tendendo a zero como mostram os gráficos nas Figuras 2 e 3.

É importante ressaltar que os dados da primeira coluna da Tabela 5 representam desvios proporcionais aos teores da propriedade analisada, ou seja, representa porcentagem de porcentagem. Já os dados da segunda coluna representam os desvios absolutos, ou seja, ponto percentual de desvio dividido por 100. Exemplificando, o desvio proporcional de 5% sobre o teor de matéria volátil do carvão CV-07 representa um desvio absoluto de 0,0106 ou 1,06 ponto percentual de desvio da referida propriedade.

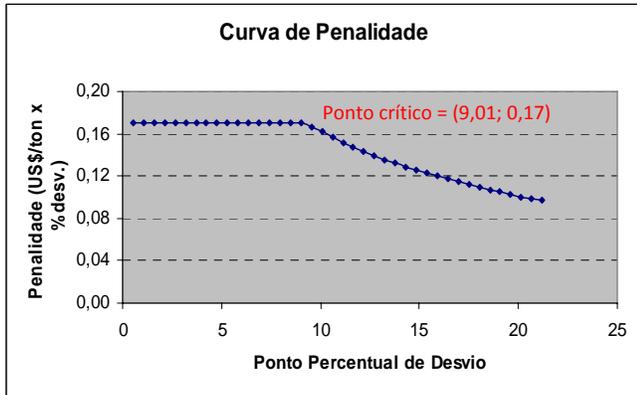


Figura 2: Curva de Variação da penalidade unitária por ponto percentual de desvio na matéria volátil do carvão CV-07

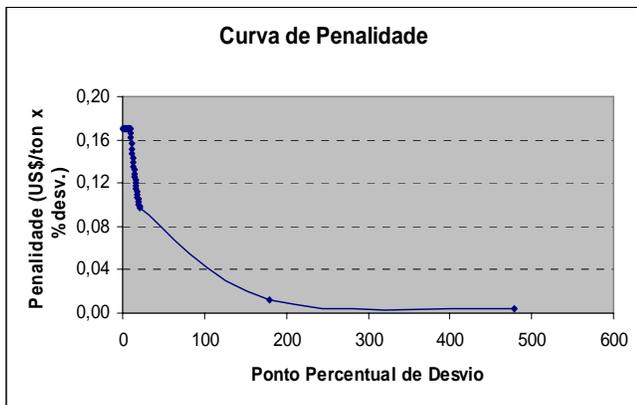


Figura 3: Penalidade tendendo a zero em função da elevação excessiva do desvio percentual da matéria volátil do carvão CV-07.

A curva de variação do custo total também mostra o comportamento da mistura marcado por duas fases distintas, compreendidas nas mesmas faixas de desvios analisadas acima.

Com desvios entre 2,5% e 42,5% a curva de variação do custo total é praticamente linear. A partir do desvio de 45,0% a curva tende a um comportamento logarítmico e o custo total a estacionar, como mostram os gráficos nas Figuras 4 e 5.

4. Discussão

Como os carvões definidos pelo módulo Esperado teoricamente são contratados, suas quantidades que dão entrada no módulo Ajustamento são limitadas superiormente, isso quer dizer que, na necessidade de ajustamento da mistura uma quantidade menor de um carvão já contratado poderá ser utilizada, gerando sobras. Contudo, caso a demanda para o ajuste seja por uma quantidade maior de um carvão, também já contratado, o sistema deverá recorrer obrigatoriamente à utilização dos carvões on spot. Este comportamento de fato

ocorre durante a simulação dos cenários de desvio no sistema protótipo desenvolvido.

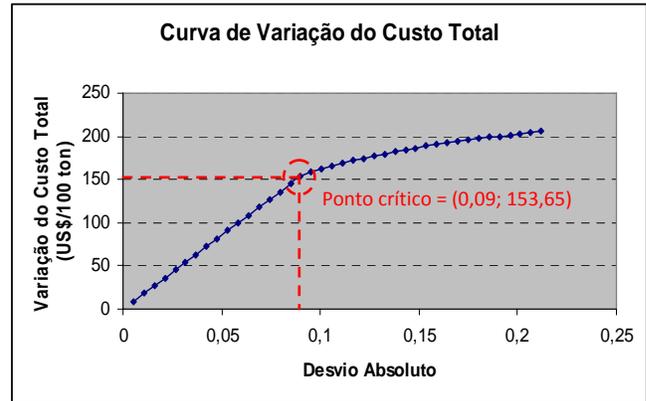


Figura 4: Curva de variação do custo total em função do desvio absoluto no teor de matéria volátil do carvão CV-07

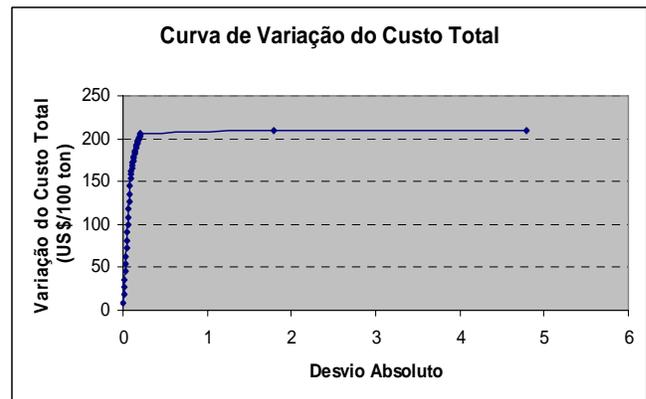


Figura 5: Estabilização da variação do custo total em função dos excessivos desvios sobre a matéria volátil do carvão CV-07.

Ao analisar algebricamente o comportamento da mistura de carvões quando submetida aos vários desvios na proporção da matéria volátil do carvão CV-07, observa-se que, pelo fato da restrição estar ativa, o primeiro desvio aplicado provocou uma mudança na estrutura inicial da mistura com o ingresso do carvão on spot SP-05.

Com a simulação contínua dos desvios é constatado o constante decréscimo da quantidade do carvão CV-02 em prol do acréscimo da quantidade do carvão SP-05. A substituição entre os dois carvões citados é lógica e coerente. Como o carvão com CV-07 é o que possui o menor teor de matéria volátil (21,2%) dos que foram contratados, e sua proporção está abaixo dos limites especificados para a mistura (23,5% a 26,0%), um acréscimo no teor da referida propriedade deste carvão, pela lógica, provocaria a redução da quantidade do carvão que participa com o maior teor de matéria volátil, neste caso o carvão CV-02 (35,0%), e é exatamente o que ocorre.

Como as quantidades de todos os carvões contratados estão limitadas superiormente, impedindo o aumento de um

destes para compensar a diminuição de outro, o sistema baixo, neste caso o SP-05, ajustando a qualidade da mistura. recorre ao *on spot* com teor de matéria volátil relativamente

Tabela 5: Custo total ajustado e variação do custo total em função do desvio absoluto da proporção de matéria volátil do carvão CV-07

Desvio percentual (%)	Desvio absoluto	Custo total ajustado (US\$/100 ton)	∂ Custo (US\$/100 ton)	∂ Custo/Desvio absoluto (US\$/ton x unid. desvio abs.)
0	0	10628,46097	0	0
2,5	0,0053	10637,49910	9,03813	17,05308
5,0	0,0106	10646,53722	18,07626	17,05308
7,5	0,0159	10655,57535	27,11438	17,05307
10,0	0,0212	10664,61348	36,15251	17,05307
12,5	0,0265	10673,65161	45,19064	17,05307
15,0	0,0318	10682,68974	54,22877	17,05307
17,5	0,0371	10691,72786	63,26690	17,05307
20,0	0,0424	10700,76599	72,30502	17,05307
22,5	0,0477	10709,80412	81,34315	17,05307
25,0	0,0530	10718,84225	90,38128	17,05307
27,5	0,0583	10727,88038	99,41941	17,05307
30,0	0,0636	10736,91851	108,45754	17,05307
32,5	0,0689	10745,95663	117,49566	17,05307
35,0	0,0742	10754,99476	126,53379	17,05307
37,5	0,0795	10764,03289	135,57192	17,05307
40,0	0,0848	10773,07102	144,61005	17,05307
42,5	0,0901	10782,10915	153,64818	17,05307
45,0	0,0954	10786,92236	158,46139	16,61021
47,5	0,1007	10791,29053	162,82956	16,16977
50,0	0,1060	10794,56162	166,10065	15,66987
52,5	0,1113	10797,63653	169,17556	15,19996
55,0	0,1166	10800,53239	172,07142	14,75741
57,5	0,1219	10803,26439	174,80342	14,33990
60,0	0,1272	10805,84606	177,38509	13,94537
62,5	0,1325	10808,28947	179,82850	13,57196
65,0	0,1378	10810,60545	182,14448	13,21803
67,5	0,1431	10812,80370	184,34273	12,88209
70,0	0,1484	10814,89298	186,43201	12,56280
72,5	0,1537	10816,88120	188,42023	12,25896
75,0	0,1590	10818,77552	190,31455	11,96947
77,5	0,1643	10820,58243	192,12146	11,69333
80,0	0,1696	10822,30786	193,84689	11,42965
82,5	0,1749	10823,95718	195,49621	11,17760
85,0	0,1802	10825,53533	197,07436	10,93642
87,5	0,1855	10827,04681	198,58585	10,70544
90,0	0,1908	10828,49577	200,03480	10,48400
92,5	0,1961	10829,88601	201,42504	10,27155
95,0	0,2014	10831,22101	202,76004	10,06753
97,5	0,2067	10832,50402	204,04305	9,87146
100,0	0,2120	10833,73800	205,27703	9,68288

Enquanto o carvão CV-02 é substituído pelo SP-05, as quantidades dos demais carvões permanecem inalteradas. O incremento na variação do custo total ocorre proporcionalmente ao desvio aplicado, enquanto a penalidade unitária associada ao desvio é constante. Este comportamento da mistura permanece inalterado dentro de toda faixa de desvio que vai de 2,5% até 42,5%, dando a falsa impressão de

que a variação do custo total será sempre linear e a penalidade unitária sempre constante.

Entretanto, a partir do desvio de 45,0%, uma nova alteração estrutural ocorre na mistura. Somente o carvão SP-05 já não é mais suficiente para ajustar a qualidade da mistura, e já não é tão interessante assim manter a quantidade do carvão CV-07 inalterada, visto que seu novo teor de matéria volátil (31,27%) já ultrapassou o limite superior de qualidade da mistura para a referida propriedade e se aproxima

sensivelmente do teor de matéria volátil do carvão CV-02, o mais elevado da mistura.

Deste ponto em diante o sistema opta por diminuir a quantidade do carvão CV-07 e volta a utilizar o CV-02, que, inicialmente, tivera sua quantidade reduzida, e um novo carvão *on spot* entra na mistura, o SP-03, que somado ao SP-05 compensam a redução do CV-07.

Ao nível de 107,5% de desvio proporcional, que corresponde a um desvio de 22,79 pontos percentuais no teor de matéria volátil do carvão CV-07, verifica-se que a quantidade do mesmo (0,01985 ton) é extremamente inferior à quantidade dos demais carvões da mistura, tendendo a zero com o aumento do desvio, enquanto as quantidades dos demais carvões tendem a permanecer inalteradas.

Essa mecânica de alteração na estrutura da mistura justifica o comportamento da curva de variação do custo total, mostrado nas Figuras 4 e 5, que tende a ser constante com a elevação contínua dos desvios, resultado da não utilização do carvão CV-07 e de insignificantes alterações na estrutura da mistura, fazendo com que a penalidade unitária para desvios na proporção de matéria volátil do referido carvão tenda a zero, como evidenciado nas Figuras 2 e 3.

Mesmo se tratando de um modelo simplificado, no que diz respeito às dimensões do problema real e às relações não-lineares entre as propriedades do coque e às dos carvões, o modelo matemático construído e utilizado neste trabalho se mostrou eficiente na determinação de misturas ótimas, neste caso, misturas de custo mínimo. O modelo respeitou todas as restrições impostas e forneceu subsídios para a simulação dos cenários de desvio.

Os desvios de especificação simulados foram imprescindíveis para o entendimento do comportamento da mistura em termos estruturais e de variação do custo.

Tanto o comportamento da curva de variação do custo total, quanto o da curva de penalidade unitária, a princípio, pareciam se comportar de maneira incoerente, pois ao invés de um desvio excessivo provocar uma grande elevação na taxa de variação do custo total, que é a penalidade unitária, o inverso ocorreu, com a mesma tendendo a zero, e a variação do custo total tendendo a se estabilizar num patamar fixo.

Esses resultados mostram que um desvio excessivo em alguma das propriedades de um carvão o torna indesejável à mistura, ocorrendo sua completa substituição por outro para que a qualidade da mistura seja reestabelecida.

Para as propriedades químicas dos carvões, além dos custos de aquisição do indesejável (impurezas) e do reajustamento da mistura com a compra de carvões no mercado *on spot*, se faz necessário computar o custo de manter em estoque a sobra de carvão que seria completamente utilizado, mas que não o foi em decorrência do desvio de especificação. Assim, torna-se possível determinar a penalidade para desvios de especificação que se referem às propriedades químicas dos carvões.

De diferente modo, sabe-se que um desvio de especificação em uma propriedade física do carvão não tem influência direta sobre sua massa. A maior consequência de um desvio dessa natureza é a redução do rendimento do coque

no alto-forno, com conseqüente aumento do custo de produção do ferro gusa.

No entanto, as relações matemáticas entre as propriedades físicas dos carvões e, conseqüentemente, do coque e o custo de produção do gusa são complexas e difíceis de serem determinadas, o que torna difícil determinar uma penalidade que realmente represente os custos gerados por desvios em uma propriedade física do carvão.

5. Conclusões

Mesmo não sendo fácil medir o impacto de um desvio de especificação sobre uma propriedade física do carvão, como a fluidez, por exemplo, os resultados apresentados permitem concluir que o sistema protótipo proposto para determinação de penalidades se mostrou útil, uma vez que os resultados estão coerentes com a realidade representada pelos desvios simulados, podendo-se destacar a boa utilidade prática dessa ferramenta.

Um aspecto importante que não foi discutido no desenvolvimento dessa pesquisa é a possibilidade de se pagar prêmios aos fornecedores por entregar um ou mais carvões em condições melhores do que as especificadas nos contratos de compra. Deve-se, portanto, levar em consideração que tal evento pode provocar a sobra de um ou mais carvões, que deverão ser aproveitados posteriormente em outra mistura, uma vez que as quantidades compradas de cada carvão, em função da qualidade inicialmente estimada, são totalmente recebidas.

Do ponto de vista técnico, torna-se interessante estudar a influência dos desvios de especificações nas propriedades físicas dos carvões sobre o custo de produção do ferro gusa, tanto no sentido da aplicação de penalidades, quanto no sentido da premiação, visto que a maior contribuição de tais desvios, em termos de custo, se dá no alto-forno, equipamento que utiliza como insumo o coque produzido

Agradecimentos

À Universidade Federal do Espírito Santo e à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pelo apoio material e financeiro. À companhia siderúrgica pelas informações e suporte técnico. À Paragon Decision Technology por disponibilizar a plataforma do Software AIMMS 3.8. Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] Gandolpho, A. A. *Interpretação econômica de modelos para compra de carvões em siderúrgicas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1996.
- [2] Araújo, L. A. de. *Siderurgia*. São Paulo: Editora F.T.D. S.A., 1967.
- [3] Lustosa, L. J. *Análise técnico-econômica de mistura de carvão através de programação linear*. Trabalho

- apresentado no VI Seminário de Engenharia Industrial da ABM. Volta Redonda, R.J., 5 a 7 de novembro de 1996.
- [4] Yazaki, K. *Planejamento e programação de suprimento de carvões em uma usina siderúrgica a coque*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.
- [5] Campos, F. S. *Programação linear como ferramenta de apoio à negociação de carvões para coque*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1997.
- [6] Ferreira Filho, J. de C. *Um sistema para determinar penalidades para desvios de especificações em contratos de compra de carvões siderúrgicos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.
- [7] Williams, H. P. *Model Building in Mathematical Programming*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1979.
- [8] Bisschop, J.; Roelofs, M. *AIMMS: User's Guide*. Haarlem: Paragon Decision Technology, 2007. p. 3 – 8. ISBN 978-1-4357-0617-0.
- [9] Winston, W. L. *Operations Research: Applications and Algorithms*. 3. ed. California: Duxbury Press, 1994