

## 4 Modelo da mistura de carvões

É imprescindível que se conheça com profundidade o problema a ser resolvido ou estudado e que se saiba com precisão quais são as variáveis, quais são os parâmetros e restrições de quantidade, qualidade, capacidade etc., que devem ser consideradas para que o modelo matemático construído represente com propriedade a realidade modelada. A influência de uma boa modelagem é refletida sobre a qualidade e confiabilidade dos resultados alcançados.

Além de se reforçar a importância de uma boa modelagem matemática, é apresentado o modelo de programação linear para o problema da mistura de carvões específico para o caso em estudo, onde são consideradas algumas modificações na estrutura do modelo quando comparado ao modelo clássico apresentado no Capítulo 2. Destacam-se as principais características técnicas e operacionais do setor de produção de coque de uma das principais siderúrgicas brasileiras, definindo-se para este ambiente específico as principais restrições ao problema da mistura de carvões.

### 4.1. Observações importantes sobre modelagem matemática

Os modelos são utilizados em diversas aplicações científico-tecnológicas, nas quais se deseja estudar com profundidade um determinado objeto, que pode ser um fenômeno natural, um problema específico ou um objeto propriamente dito. Portanto, na construção de um modelo, busca-se representar todas as possíveis características e propriedades do objeto ou problema real, para que sejam válidos e aplicáveis os resultados encontrados e as conclusões acerca da realidade modelada.

Os modelos podem ser concretos, como os protótipos de aeronaves para experimentos em túneis de vento, ou abstratos, que normalmente são matemáticos, onde o simbolismo algébrico é usado para espelhar as relações internas do objeto modelado. No campo da Pesquisa Operacional, tem-se, freqüentemente, maior interesse nos modelos abstratos, que normalmente retratam algum problema organizacional. A principal característica desses

modelos está na correspondência entre as relações matemáticas representadas pelas equações, inequações, dependências lógicas etc., e as relações entre os aspectos do problema real, tais como relações tecnológicas, leis físicas, restrições de mercado, etc. (Williams, 1978).

São vários os motivos que justificam a construção de modelos matemáticos, dentre os quais podemos citar: (1) o exercício da construção de um modelo matemático revela relações que não eram aparentes, como conseqüência, proporciona um maior entendimento acerca do objeto modelado; (2) tendo construído um modelo, torna-se possível analisá-lo matematicamente, favorecendo a sugestão de cursos e ações a serem tomadas, que de outra forma não seriam aparentes, e; (3) um dos mais importantes, senão o principal, é que se torna 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, havendo grande probabilidade de fracasso e de perdas (Williams, 1978).

Os modelos matemáticos, ou modelos de programação matemática, podem assumir diferentes formas que não dependem exclusivamente do objeto a ser modelado, mas de um conjunto de aspectos inerentes à realidade do objeto, tais como a área de conhecimento (economia, engenharia, física, medicina etc.), os diversos campos de aplicação dentro de cada área de conhecimento (administração de recursos humanos, financeiros, produção, distribuição, logística, cadeia de suprimentos etc.) e a dificuldade de expressar matematicamente o objetivo e as restrições do problema de estudo. Além dos modelos tradicionais de programação matemática, onde estão inseridas a programação linear, a programação inteira e a programação não-linear, destacam-se os modelos de simulação, os modelos de planejamento de redes, os modelos econométricos, os modelos de séries temporais e os modelos estocásticos.

A presente dissertação se concentra na utilização da programação linear, que sob muitos aspectos, possui relevante importância no campo da programação matemática. Primeiro, por sua fácil adequação à modelagem de uma diversidade de problemas de decisões gerenciais. Segundo, por proporcionar relativa facilidade na interpretação das soluções, principalmente com relação a aspectos econômicos. Finalmente, porque pode ser útil como input para outros métodos de otimização (Lustosa, 2003). Este capítulo aborda de forma resumida os principais conceitos da programação linear.

Considerando os aspectos citados acima, pode-se concluir que para formular um bom modelo de programação linear ou um modelo que represente com fidelidade um determinado problema ou situação real, antes de tudo, é preciso conhecer com profundidade o problema a ser modelado, mesmo que simplificações ou aproximações sejam utilizadas.

#### 4.2.

#### **Aspectos relevantes do problema e definição do modelo da mistura de carvões**

A Companhia Siderúrgica de Tubarão, hoje CST – Arcelor Brasil, uma das maiores siderúrgicas do mundo, possui atualmente capacidade produtiva de 5,0 milhões de toneladas de aço por ano (placas e bobinas), o que gera uma demanda anual de carvão mineral da ordem de 2,3 milhões de toneladas, necessárias para produzir aproximadamente 1,8 milhão de toneladas de coque por ano. Em fase final de suas obras de expansão da capacidade produtiva para 7,5 milhões de toneladas de aço por ano, sua demanda anual de carvão mineral para produção de coque deverá subir para 4,3 milhões de toneladas, o que justifica qualquer tentativa de reduzir ao máximo o custo de aquisição de carvões e, principalmente, de controlar a qualidade dos carvões já adquiridos.

Torna-se evidente a necessidade de definir com precisão as penalidades que devem ser aplicadas em caso de desvios de especificação dos carvões contratados. Se for considerado um preço médio de aquisição de US\$ 100,00 por tonelada de carvão, incluindo o frete, o atendimento da demanda, após a expansão da capacidade produtiva, custaria algo em torno de US\$ 430 milhões por ano. Somente para efeito de ilustração, mesmo não sendo o ideal, visto que a penalidade pode não ser linear, supondo a aplicação de uma penalidade fixa de US\$ 0,10 por tonelada de carvão para cada ponto percentual de desvio de especificação em uma propriedade, teríamos uma economia anual da ordem de US\$ 43 mil.

A bateria de fornos da CST é composta por 147 fornos e cada forno possui capacidade média de carga de 32 toneladas, considerando carvões base úmida. Sua nova unidade de produção de coque (Sun Coke), prevista na expansão da capacidade produtiva, será composta de quatro baterias de 80 fornos cada, com capacidade produtiva de 1,5 tonelada de coque por ano. Em função das características físicas do seu processo, a empresa pode utilizar até doze carvões diferentes em uma mistura.

O modelo da mistura de carvão para a siderúrgica em questão possui as mesmas características do modelo clássico apresentado na seção 3.1, com mesma função objetivo, além de todas as restrições presentes. No entanto, outras três restrições devem ser consideradas, adequando o modelo à situação específica desta empresa: restrição de rendimento, de balanço da mistura e de pressão interna dos fornos.

Normalmente, o rendimento de um carvão em coque é função do seu teor de matéria volátil, assim, o rendimento da mistura de carvões para produção de coque pode ser calculado em função do total de matéria volátil presente na mesma. Como o rendimento do processo de coqueificação correlaciona-se linearmente com o teor de matéria volátil, aumentando com a diminuição da referida propriedade, as empresas desenvolvem suas próprias equações de rendimento. Experiências comprovam que de 10 a 15% do total de matéria volátil da mistura de carvões fica retida na massa de coque produzido. Essa matéria volátil retida é denominada de gás interno.

Definida a restrição de rendimento pode-se estabelecer uma restrição de balanço da mistura, que define a quantidade total de carvão necessária ao atendimento da demanda de coque.

Deve-se destacar que a bateria de fornos possui uma restrição de pressão de coqueificação projetada para o limite máximo de 1,5 psi. Normalmente, são os carvões baixo e médio voláteis (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 comprometa a operação. No entanto, a participação dos carvões baixo voláteis na mistura é limitada em 26%.

Em função dos aspectos evidenciados acima, pode-se definir o modelo da mistura de carvões para o caso em estudo como segue:

- **Definições:**

$i$  = 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.

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

$QTCO$  = quantidade total de coque a ser produzida aplicando o rendimento sobre  $QTCA$ , 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.

$p_{MVj}$  = Percentual de matéria volátil de cada carvão  $j$ .

- **Função Objetivo**: Minimizar o custo total da mistura de carvões.

$$\sum_{j=1}^{15} c_j q_j$$

Sujeito a:

- **Restrições de Qualidade – LS**: Limite superior de cada uma das  $m$  propriedades de controle da mistura.

$$\sum_{j=1}^{15} p_{ij} q_j \leq LS_i * QTCA, \quad i = 1, 2, \dots, 8.$$

- **Restrições de Qualidade – LI**: Limite inferior de cada uma das  $m$  propriedades de controle da mistura.

$$\sum_{j=1}^{15} p_{ij} q_j \geq LI_i * QTCA, \quad i = 1, 2, \dots, 8.$$

- **Restrição de Rendimento**: Informa a quantidade de coque que pode se produzir a partir de certa quantidade de carvão. Ou seja, estabelece a quantidade de carvão necessária para produzir uma determinada quantidade de coque. Considerando que, em média, 12,5% da matéria volátil total presente na mistura de carvões é transferida para a massa de coque, pode-se escrever o rendimento da mistura de carvões em função do percentual total de matéria volátil presente na mesma.

$$\sum_{j=1}^{15} q_j * (1 - 0,875 p_{MVj}) = QTCO$$

- **Restrições de Quantidade e Balanço**: Estabelece um limite inferior para a quantidade de coque a ser produzida e, então, determina a quantidade de carvão necessária para a produção de coque.

$$QTCO \geq 100ton \quad \text{e} \quad \sum_{j=1}^{15} q_j = QTCA$$

- **Restrição de Pressão**: Restrição que limita ao máximo a pressão interna de operação dos fornos de coque a 1,5 psi. Normalmente limita-se em 26% a participação dos carvões baixo voláteis na mistura para que a pressão de trabalho da bateria de fornos não seja comprometida.

$$\sum_{k=1}^s q_k \leq 0,26 * QTCA$$

- **Restrições de Não-Negatividade**: Variáveis somente com quantidades não-negativas.

$$q_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 15.$$

Outra consideração importante é que durante o processo de negociação de fornecimento, os carvões são considerados à base úmida, com penalidade para o excesso de umidade, cujo teor máximo varia de contrato para contrato. É importante também saber que as quantidades a serem contratadas dependem das condições de mercado, qualidade, interesse, logística etc., o que torna o processo de negociação extremamente dinâmico e complexo. O modelo algébrico completo da mistura de carvões é apresentado no Apêndice I.