



José de Castro Ferreira Filho

Sistema para determinação de penalidades para desvios de especificações em contratos de compra de carvões siderúrgicos

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Leonardo Junqueira Lustosa

Rio de Janeiro

Julho de 2007



José de Castro Ferreira Filho

Sistema para determinação de penalidades para desvios de especificações em contratos de compra de carvões siderúrgicos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Leonardo Junqueira Lustosa

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Madiagne Diallo

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Nélio Domingues Pizzolato

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de julho de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

José de Castro Ferreira Filho

Graduou-se em Engenharia de Produção Civil pela UCL - Faculdade do Centro Leste em Janeiro de 2005. Estagiou na Tracomal Terraplenagem e Construções Machado Ltda. em 2003 e 2004, atuando na gestão de obras de infra-estrutura rodoviária. Trabalhou durante quatro anos como técnico em metalurgia pela Companhia Siderúrgica de Tubarão na área de elaboração de ligas metálicas e programação da produção do Laminador de Tiras a Quente (LTQ).

Ficha Catalográfica

Ferreira Filho, José de Castro

Sistema para determinação de penalidades para desvios de especificações em contratos de compra de carvões siderúrgicos / José de Castro Ferreira Filho ; orientador: Leonardo Junqueira Lustosa. – 2007.

104 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Siderurgia. 3. Coque. 4. Contratos de fornecimento. 5. Carvões. 6. Programação linear. I. Lustosa, Leonardo Junqueira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

À minha mãe Isabel por seu amor, dedicação e fé, ao meu pai José de Castro,
em memória, por seus ensinamentos e exemplos.

Agradecimentos

A Deus pela oportunidade, amor, sustento e proteção.

Aos meus pais e irmãos Adelaide e Renato que, mesmo distantes, foram companheiros e me apoiaram.

À minha noiva e futura esposa Sarah pelo amor, confiança, dedicação, paciência e espera nestes dois anos de distância e de muita saudade. Por sua amizade, cumplicidade e orações. Te amo.

Ao meu sogro Raimundo e sogra Lucia pelas orações e por toda a contribuição para o sucesso deste trabalho.

À Dona Lucia, Sr. Leir e Michelle pela acolhida e do o apoio dispensado.

A todos os amigos que contribuíram para a o sucesso e conclusão deste projeto, me apoiando moral e financeiramente.

Ao professor Doutor Leonardo J. Lustosa pela orientação, dedicação e disciplina.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pelo apoio material e financeiro que nos foi dado e que contribuíram para o sucesso deste projeto.

À Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), mais especificamente, aos Srs. José Servino (Gerente do Setor de Pessoal), Odilon José (Especialista da Coqueria) e Marcelo Tardin (Gerente da Divisão de Redução) por viabilizarem esta pesquisa e por todo suporte técnico.

À Paragon Decision Technology por disponibilizar o Software AIMMS 3.6 em sua versão Educational Stand-Alone, viabilizando a modelagem do problema estudado.

Ao CNPq pelo incentivo à pesquisa e apoio financeiro.

Resumo

Ferreira Filho, José de Castro; Lustosa, Leonardo Junqueira (Orientador). **Um sistema para determinar penalidades para desvios de especificações em contratos de compra de carvões siderúrgicos.** Rio de Janeiro, 2007. 104p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

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 custo mínimo para produção de coque que atendam aos requisitos de qualidade. Para garantir essa qualidade, elas impõem aos seus fornecedores de carvão cláusulas contratuais relativas à umidade, cinzas, enxofre, fósforo, matéria volátil, fluidez, refletância e dilatação e, eventualmente, outras. Como nem sempre essas exigências são atendidas pelos fornecedores, penalidades contratuais são especificadas com o propósito de evitar que as siderúrgicas arquem com os custos causados por desvios de especificações. Entretanto, tais penalidades nem sempre refletem os custos realmente causados, pois estes decorrem não só da redução do material aproveitável, mas, também, dos reajustes necessários na mistura para que o coque se mantenha dentro da qualidade exigida. Essa dissertação propõe um sistema para determinação do ônus efetivamente causado por desvios nas especificações 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; carvões; coque; contratos de fornecimento; programação linear.

Abstract

Ferreira Filho, José de Castro; Lustosa, Leonardo Junqueira (Advisor). **A system for evaluating penalties for specification deviations in coal purchase contracts**. Rio de Janeiro, 2007. 104p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

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 minimum cost coal blends for producing coke within the quality requirements. To guarantee this quality the steelmaking mills impose to their coal vendors some contractual clauses regarding humidity, ashes, sulfur, phosphor, volatile matter, fluidity, reflectance and dilatation, and sometimes, still others. Since these requirements are not always met by the vendors, contractual penalties are specified with the purpose of avoiding that the steelmakers end up with the burden of the costs caused by such specs deviations. Nonetheless, such penalties do not always reflect the actual costs they cause, because the latter derive not only from the reduction of the usable material, but also from the blend adjustments necessary to keep the coke within the required quality. This thesis proposes a system for determining the burden effectively caused by specs 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; coke; supply contracts; linear programming.

Sumário

1	Introdução	14
1.1.	Apresentação do problema	14
1.2.	Objetivos	16
1.2.1.	Objetivo principal	16
1.2.2.	Objetivos secundários	16
1.3.	Estrutura da dissertação	17
2	Carvão e coque na siderurgia	19
2.1.	Etapas do processo de produção de coque	19
2.2.	Principais propriedades dos carvões coqueificáveis	22
2.2.1.	Propriedades físicas	24
2.2.2.	Propriedades químicas	26
2.3.	O contrato de fornecimento de carvões	28
3	Programação linear aplicada ao problema da mistura de carvões	30
3.1.	Modelo clássico da mistura de carvões	31
3.2.	Curvas de demanda	33
3.3.	Análise de sensibilidade e interpretação econômica	34
3.4.	Avaliação dos custos de desvios de especificação	37
4	Modelo da mistura de carvões	41
4.1.	Observações importantes sobre modelagem matemática	41
4.2.	Aspectos relevantes do problema e definição do modelo da mistura de carvões	43
5	Metodologia e lógica do sistema de determinação de penalidades	47
5.1.	Lógica do sistema de contratação de carvões e determinação de penalidades	48
6	Implementação do sistema protótipo	50
6.1.	Módulos do sistema protótipo	50
6.2.	Dados do sistema protótipo	54

7 Testes ilustrativos	57
7.1. Mistura ótima de carvões	57
7.2. Testes e análises	60
7.3. Discussão dos resultados	68
8 Conclusões e sugestões	72
Referências bibliográficas	75
Apêndice I – Modelo algébrico do problema da mistura de carvões	77
Apêndice II – Módulos e lógica do sistema protótipo no ambiente AIMMS	79
Apêndice III – Alterações algébricas na estrutura do modelo em função dos desvios de especificações	94
Apêndice IV – Exemplo numérico do cálculo da penalidade contratual	103

Lista de figuras

Figura 1: Fluxo do carvão mineral em usina siderúrgica a coque.	21
Fonte: Ulhôa, 2003, p. 35.	21
Figura 2: Estrutura interna do alto-forno e suas principais zonas.	22
Fonte: Carneiro, 2003, p. 6.	22
Figura 3: Levantamento de parâmetros metalúrgicos para carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno.	24
Figura 4: Plastômetro de Gieseler e curva de variação da fluidez com a elevação da temperatura da amostra de carvão.	25
Figura 5: Curva em S x Função Objetivo.	34
Figura 6: Lógica do sistema de contratação de carvões e determinação de penalidades.	48
Figura 7: Continuação da lógica do sistema de contratação de carvões e determinação de penalidades.	49
Figura 8: Representação geral dos principais módulos disponíveis na plataforma de programação.	52
Figura 9: Representação do módulo “Esperado” do sistema de determinação de penalidades.	53
Figura 10: Representação do módulo “Ajustamento” do sistema de determinação de penalidades.	53
Figura 11: Curva de Variação da penalidade unitária por ponto percentual de desvio.	63
Figura 12: Penalidade tendendo a zero em função da elevação excessiva do desvio percentual da matéria volátil do carvão CV-07.	63
Figura 13: Curva de variação do custo total em função do desvio absoluto no teor de matéria volátil do carvão CV-07.	64
Figura 14: Estabilização da variação do custo total em função dos excessivos desvios sobre a matéria volátil do carvão CV-07.	64
Figura 15: Variação do custo total em função do desvio absoluto na dilatação do carvão CV-03.	66
Figura 16: Penalidade unitária tendendo a zero em função do desvio excessivo da dilatação do carvão CV-03.	66
Figura 17: Variação do custo total proporcional aos desvios aplicados no valor da dilatação do carvão CV-03 para a faixa de 1,0% a 10,0%.	68

Figura 18: Penalidade unitária constante para desvios aplicados dentro da faixa de 1,0% a 10,0% no valor da dilatação do carvão CV-03.	68
Figura 19: Estrutura geral do sistema protótipo.	79
Figura 20: Estrutura do módulo “Esperado”. Sub-módulos “Dados” e “Modelagem”.	80
Figura 21: Estrutura do módulo “Ajustamento”. Sub-módulos “Dados Ajustamento” e “Modelagem Ajustamento”.	80
Figura 22: Mistura ótima de carvões no módulo “Esperado”.	94
Figura 23: Utilização dos carvões spot no módulo “Esperado”.	94
Figura 24: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 2,5% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.	95
Figura 25: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um desvio de 2,5% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.	95
Figura 26: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 45,0% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.	96
Figura 27: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um desvio de 45,0% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.	96
Figura 28: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 47,50% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.	97
Figura 29: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um desvio de 47,5% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.	97
Figura 30: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 107,5% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.	98
Figura 31: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um desvio de 107,5% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.	98
Figura 32: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 1,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.	99
Figura 33: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um desvio de 1,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.	99
Figura 34: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 8,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.	100
Figura 35: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um desvio de 8,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.	100
Figura 36: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 9,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.	101
Figura 37: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um	

desvio de 9,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03. 101

Figura 38: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 200,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03. 102

Figura 39: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um desvio de 200,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03. 102

Lista de tabelas

Tabela 1: Contribuição percentual estimada dos carvões para mistura.	55
Tabela 2: Contribuição percentual estimada dos carvões “on spot”.	55
Tabela 3: Limites de qualidade para a mistura de carvões.	56
Tabela 4: Mistura ótima de carvões no módulo “Esperado” do sistema protótipo, considerando a restrição de rendimento.	58
Tabela 5: Mistura ótima de carvões no módulo “Esperado” do sistema protótipo, substituindo a restrição de rendimento pela de quantidade mínima de mistura.	58
Tabela 6: Níveis e valores duais das restrições de limite inferior de qualidade da mistura de carvões. Módulo “Esperado” do sistema protótipo.	59
Tabela 7: Níveis e valores duais das restrições de limite superior de qualidade da mistura de carvões. Módulo “Esperado” do sistema protótipo.	59
Tabela 8: Restrições ativas no ótimo: níveis e valores duais.	60
Tabela 9: Quantidades dos carvões e custo total da mistura ótima no módulo “Esperado”.	60
Tabela 10: Custo total ajustado e variação do custo total em função do desvio absoluto da proporção de matéria volátil do carvão CV-07.	62
Tabela 11: Custo total ajustado e variação do custo total para desvios proporcionais de 5,0% na dilatação do carvão CV-03.	65
Tabela 12: Custo total ajustado e variação do custo total para desvios proporcionais de 1,0% na dilatação do carvão CV-03.	67
Tabela 13: Modelo algébrico da mistura de carvões para o caso da CST.	77