

Referências bibliográficas

ANDRADE, Eduardo L. de. **Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e modelos para análise de decisões**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

ARAÚJO, Luiz Antônio de. **Siderurgia**. São Paulo: Editora F.T.D. S.A., 1967.

CAMPOS, Flávia 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, RJ, 1997.

CARNEIRO, Rogério T. da Silva. O papel do coque no alto-forno. In: ULHÔA, Murilo B. et al. **Carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno**. São Paulo: ABM, 2003. p. 1 – 9.

CARNEIRO, Kleber Barbosa. Avaliação de carvão para coqueria. In: MASSUDA, Hiroshi. **Carvão e coque aplicados à metalurgia**. São Paulo: ABM – Associação Brasileira de Metais, 1980. Vol. 2, p. 453 – 465.

ECHEVERRÍA, Manuel Sirgado. **Desarrollo de un modelo para la preestimación de la resistencia mecánica del coque**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) – Escuela de Minas, Universidad de Oviedo, Avilés, 1985.

GAL, T. **Postoptimal Analysis, Parametric Programming and Related Topics**. McGraw-Hill. New York, 1979.

GANDOLPHO, André Alves. **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, RJ, 1996.

GREENBERG, Harvey J. **A computer-assisted analysis system for mathematical programming models and solutions: a user's guide for ANALYZE**. Kluwer Academic Publishers, 1993.

LUSTOSA, Leonardo J. **Técnicas de Otimização**. Notas de aula. Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, R.J., 2003.

LUSTOSA, Leonardo 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.

MARTINS, Gleiber M. **Integrando construção e análise de modelos de programação linear num ambiente computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, R.J., 1994.

MURTY, Katta G. **Linear and Combinatorial Programming**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1976.

Programa (*software*) Aimms 3.6, licença Educational Stand-Alone (Educational License), **Paragon Decision Technology B.V.**, 1993 – 2006.

RODRIGUES NETO, Tobias. Seleção e formulação de misturas de carvão usando uma abordagem multicritério e programação linear. In: ULHÔA, Murilo B. et al. **Carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno**. São Paulo: ABM, 2003. p. 159 – 189.

ULHÔA, Murilo B. Mineração de carvão. In: ULHÔA, Murilo B. et al. **Carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno**. São Paulo: ABM, 2003a. p. 16 – 32.

ULHÔA, Murilo B. Preparação de carvão para bateria de coque de fornos horizontais. In: ULHÔA, Murilo B. et al. **Carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno**. São Paulo: ABM, 2003b. p. 33 – 50.

ULHÔA, Murilo B. Petrografia de carvão. In: ULHÔA, Murilo B. et al. **Carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno**. São Paulo: ABM, 2003c. p. 51 – 67.

ULHÔA, Murilo B. Caracterização de carvão para fabricação de coque de alto-forno. In: ULHÔA, Murilo B. et al. **Carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno**. São Paulo: ABM, 2003d. p. 117 – 148.

ULHÔA, Murilo B. Transporte, caracterização e controle de qualidade de coque de alto-forno. In: ULHÔA, Murilo B. et al. **Carvão aplicado à fabricação de coque de alto-forno**. São Paulo: ABM, 2003e. p. 224 – 230.

WILLIAMS, H. P. **Model Building in Mathematical Programming**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1979.

WINSTON, Wayne L. **Operations Research: Applications and Algorithms**. 3. ed. California: Duxbury Press, 1994.

YAZAKI, Kiyohiko. **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, R.J., 1991.

Apêndice I – Modelo algébrico do problema da mistura de carvões

Tabela 13: Modelo algébrico da mistura de carvões para o caso da CST.

qj	Carvões															Operador/Limites
Quantidade (ton)	CV-01	CV-02	CV-03	CV-04	CV-05	CV-06	CV-07	CV-08	CV-09	CV-10	CV-11	CV-12	CV-13	CV-14	CV-15	
cj	Função Objetivo															Soma [cj*qj] =
Preço (US\$)	104,57	103,65	104,23	106,87	106,36	108,22	108,13	107,53	108,42	107,27	107,58	109,89	109,55	109,28	109,74	Custo Mínimo
pi	Restrições de Limite Inferior de Qualidade da Mistura															Soma [pi*qj] >=
Mat. Volátil (%)	34,50	35,00	29,40	26,30	27,30	25,80	21,20	26,30	24,30	27,00	27,30	18,70	17,00	19,50	17,20	23,50
Fluidez (ddpm)	4,18	4,23	4,10	2,00	1,00	0,60	1,00	6,00	3,00	1,43	0,70	1,30	3,00	2,13	1,22	2,50
Refletância (%)	0,82	0,90	0,75	1,15	1,05	1,12	1,28	1,18	1,25	1,14	1,07	1,58	1,49	1,47	1,58	1,10
Dilatação (%)	124,00	197,00	185,00	100,00	35,00	80,00	100,00	240,00	210,00	276,00	60,00	33,00	57,00	66,00	32,00	75
pi	Restrições de Limite Superior de Qualidade da Mistura															Soma [pi*qj] <=
Umidade (%)	7,00	7,00	7,60	8,50	8,50	9,00	10,00	10,00	10,00	9,00	8,50	8,70	9,00	7,70	7,10	10,00
Mat. Volátil (%)	34,50	35,00	29,40	26,30	27,30	25,80	21,20	26,30	24,30	27,00	27,30	18,70	17,00	19,50	17,20	26,00
Cinzas (%)	9,40	7,00	6,60	9,30	10,70	8,90	9,20	9,10	9,10	8,00	9,40	9,20	8,10	5,30	4,70	10,70
Enxofre (%)	0,90	0,85	0,79	0,80	0,85	0,40	0,45	0,65	0,65	0,95	0,45	0,23	0,30	0,84	0,79	0,70
Fósforo (%)	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,06	0,01	0,06	0,06	0,05	0,02	0,04	0,05	0,06	0,03	0,04
Fluidez (ddpm)	4,18	4,23	4,10	2,00	1,00	0,60	1,00	6,00	3,00	1,43	0,70	1,30	3,00	2,13	1,22	3,20
Refletância (%)	0,82	0,90	0,75	1,15	1,05	1,12	1,28	1,18	1,25	1,14	1,07	1,58	1,49	1,47	1,58	1,30
Dilatação (%)	124,00	197,00	185,00	100,00	35,00	80,00	100,00	240,00	210,00	276,00	60,00	33,00	57,00	66,00	32,00	130

qj	Restrição de Rendimento															Soma [qj*(1 – 0,875*p2)] >=
Quantidade (ton)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100
qj	Restrição de Balanço															Soma [qj] =
Quantidade (ton)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	QTCA
qj	Restrição de Pressão															Soma [qj] <=
Baixo Voláteis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0,26*QTCA
qj	Restrição de Não-Negatividade															Soma [qj] >=
Quantidade (ton)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Fonte: própria

Apêndice II – Módulos e lógica do sistema protótipo no ambiente AIMMS

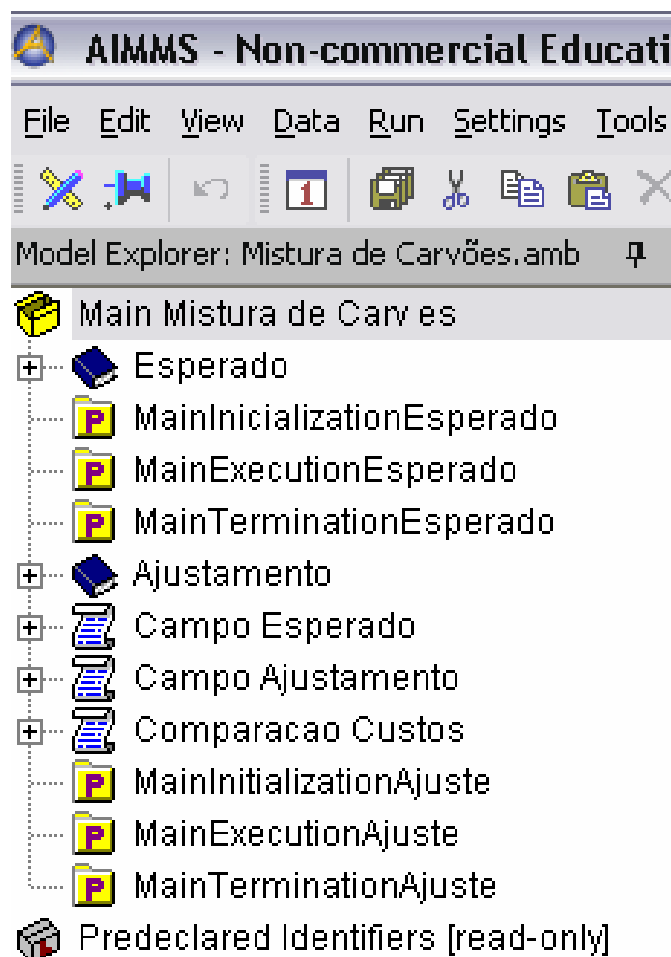


Figura 19: Estrutura geral do sistema protótipo.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

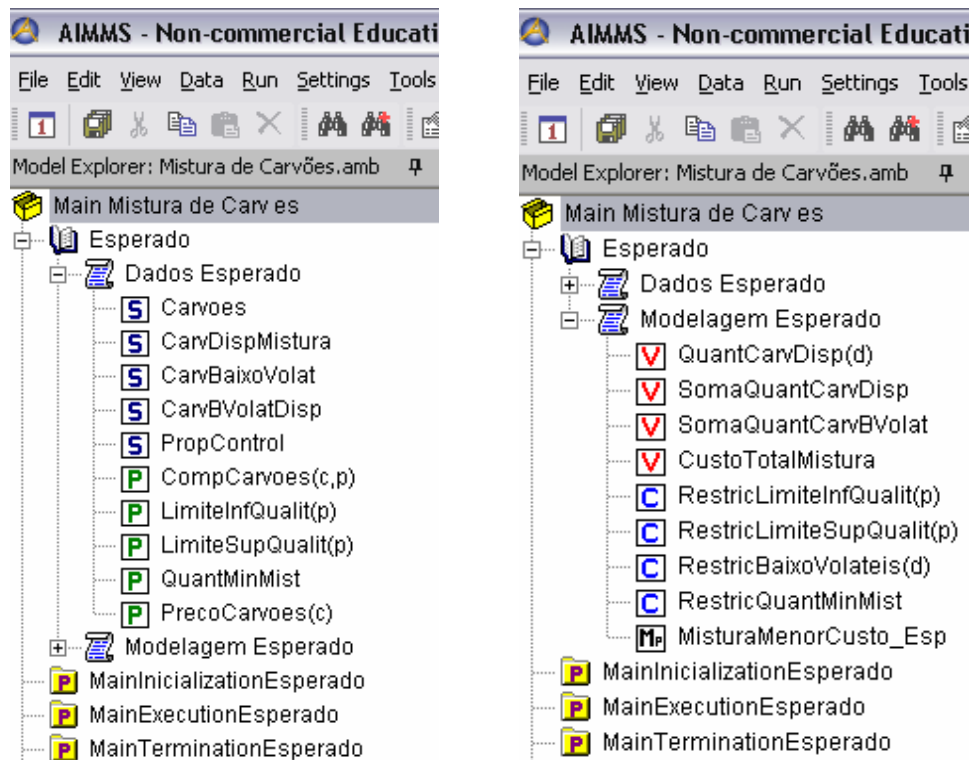


Figura 20: Estrutura do módulo “Esperado”. Sub-módulos “Dados” e “Modelagem”.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

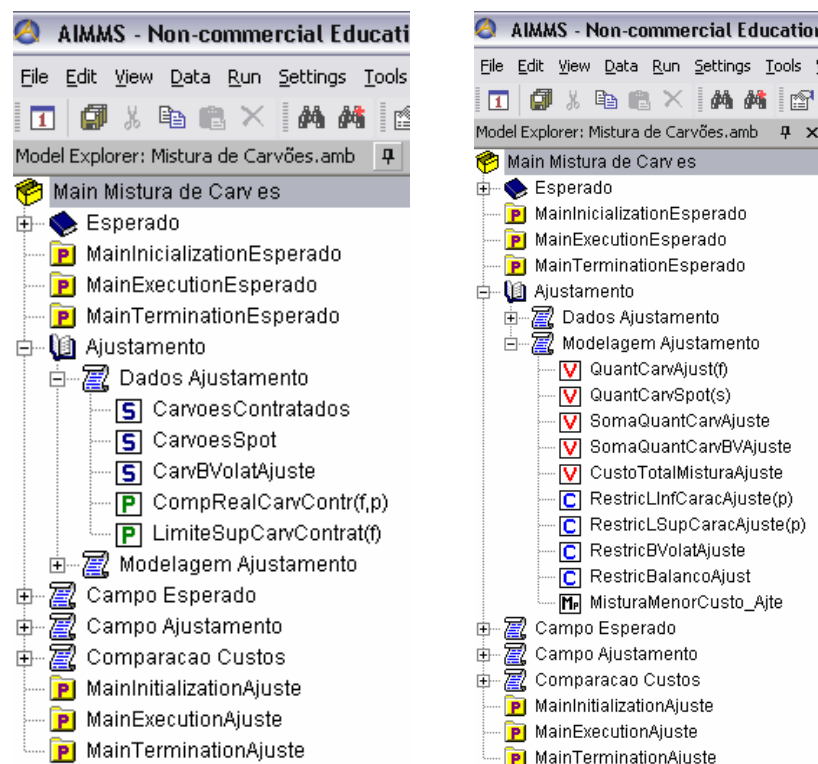


Figura 21: Estrutura do módulo “Ajustamento”. Sub-módulos “Dados Ajustamento” e “Modelagem Ajustamento”.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Apresentamos a seguir um resumo da lógica do sistema protótipo de determinação de penalidades contratuais.

Módulo “Esperado”:

Dados Esperado

Type: Set

Identifier: Carvões

Index domain:

Subset:

Text: Todos os carvões disponíveis para o período, incluindo os on spot.

Index: c

Definition: data {CV-01, CV-02, CV-03, CV-04, CV-05, CV-06, CV-07, CV-08, CV-09, CV-10, CV-11, CV-12, CV-13, CV-14, CV-15, SP-01, SP-02, SP-03, SP-04, SP-05, SP-06}

Type: Set

Identifier: CarvDispMistura

Index domain:

Subset: Carvões

Text: Carvões disponíveis para mistura no período.

Index: d

Definition: data {CV-01, CV-02, CV-03, CV-04, CV-05, CV-06, CV-07, CV-08, CV-09, CV-10, CV-11, CV-12, CV-13, CV-14, CV-15}

Type: Set

Identifier: CarvBaixoVolat

Index domain:

Subset: Carvões

Text: Carvões baixo voláteis.

Index: b

Definition: data {CV-12, CV-13, CV-14, CV-15, SP-06}

Type: Set
 Identifier: CarvBVolatDisp
 Index domain:
 Subset: CarvBaixoVolat
 Text: Carvões baixo voláteis disponíveis para mistura.
 Index: bd
 Definition: data {CV-12, CV-13, CV-14, CV-15}

Type: Set
 Identifier: PropControl
 Index domain:
 Subset:
 Text: Propriedades de controle dos carvões.
 Index: p
 Definition: data {Umidade, 'Matria Voltil', Cinzas, Enxofre, 'Fsforo', Fluidez, 'Refletncia', 'Dilatao'}

Type: Parameter
 Identifier: CompCarvoes
 Index domain: (c,p)
 Text: Composição dos carvões (%).
 Definition: (CV-14, 'Fsforo'): 0.060, (CV-14, Fluidez): 2.130, (CV-14, 'Refletncia'): 1.470, (CV-14, 'Dilatao'): 66.000, (CV-15, Umidade): 7.100, (CV-15, 'Matria Voltil'): 17.200, (CV-15, Cinzas): 4.700, (CV-15, Enxofre): 0.790, (CV-15, 'Fsforo'): 0.030, (CV-15, Fluidez): 1.220, (CV-15, 'Refletncia'): 1.580, (CV-15, 'Dilatao'): 32.000, (SP-01, Umidade): 9.000, (SP-01, 'Matria Voltil'): 27.500, (SP-01, Cinzas): 6.800, (SP-01, Enxofre): 0.670, (SP-01, 'Fsforo'): 0.070, (SP-01, Fluidez): 3.130, (SP-01, 'Refletncia'): 1.050, (SP-01, 'Dilatao'): 111.000, (SP-02, Umidade): 9.200, (SP-02, 'Matria Voltil'):

```

27.000, (SP-02, Cinzas): 6.600, (SP-02, Enxofre):
0.910, (SP-02, 'Fsforo'): 0.010, (SP-02,
Fluidez): 3.500, (SP-02, 'Refletncia'): 1.170,
(SP-02, 'Dilatao'): 124.000, (SP-03, Umidade):
7.000, (SP-03, 'Matria Voltil'): 26.000, ( SP-
03, Cinzas): 6.600, (SP-03, Enxofre): 0.800, (SP-
03, 'Fsforo'): 0.030, ( SP-03, Fluidez): 3.310,
(SP-03, 'Refletncia'): 1.120, (SP-03, 'Dilatao'):
58.000, (SP-04, Umidade): 8.900, (SP-04, 'Matria
Voltil'): 29.300, (SP-04, Cinzas): 8.000, (SP-04,
Enxofre): 1.130, (SP-04, 'Fsforo'): 0.050, (SP-
04, Fluidez): 3.890, (SP-04, 'Refletncia'):
1.000, (SP-04, 'Dilatao'): 147.000, (SP-05,
Umidade): 10.000, (SP-05, 'Matria Voltil'):
24.200, (SP-05, Cinzas): 9.700, (SP-05, Enxofre):
0.560, (SP-05, 'Fsforo'): 0.020, (SP-05,
Fluidez): 2.900, (SP-05, 'Refletncia'): 1.070,
(SP-05, 'Dilatao'): 90.000, (SP-06, Umidade):
6.600, (SP-06, 'Matria Voltil'): 16.800, (SP-06,
Cinzas): 5.800, (SP-06, Enxofre): 0.770, (SP-06,
'Fsforo'): 0.040, (SP-06, Fluidez): 1.410, (SP-
06, 'Refletncia'): 1.600, (SP-06, 'Dilatao'):
41.000 }

```

Type: Parameter

Identifier: LimiteInfQualit

Índex domain: p

Text: Limite inferiore de qualidade da mistura (%).

Definition: data {'Matria Voltil': 23.500, Fluidez: 2.500, 'Refletncia': 1.100, 'Dilatao': 75.000}

Type: Parameter

Identifier: LimiteSupQualit

Índex domain: p

Text: Limite Limite superior de qualidade da mistura (%).

Definition: data {*Umidade*: 10.000, '*Matria Voltil*': 26.000, *Cinzas*: 10.700, *Enxofre*: 0.700, '*Fsforo*': 0.040, *Fluidez*: 3.200, '*Refletncia*': 1.300, '*Dilatao*': 130.000}

Type: Parameter

Identifier: QuantMinMist

Index domain:

Text: Quantidade mínima de mistura a ser formada (ton).

Definition: 100;

Type: Parameter

Identifier: PrecoCarvoes

Index domain: c

Text: Preço CIF dos carvões (US\$/ton).

Definition: data {*CV-01*: 104.570, *CV-02*: 103.650, *CV-03*: 104.230, *CV-04*: 106.870, *CV-05*: 106.360, *CV-06*: 108.220, *CV-07*: 108.130, *CV-08*: 107.530, *CV-09*: 108.420, *CV-10*: 107.270, *CV-11*: 107.580, *CV-12*: 109.890, *CV-13*: 109.550, *CV-14*: 109.280, *CV-15*: 109.740, *SP-01*: 112.960, *SP-02*: 112.630, *SP-03*: 112.320, *SP-04*: 111.440, *SP-05*: 113.780, *SP-06*: 113.870}

Modelagem Esperado

Type: Variable

Identifier: QuantCarvDisp

Index domain:

Text: Quantidade dos carvões na mistura (ton).

Range: nonnegative

Property: ReducedCost, CoefficientRange, Basic

Definition:

Type: Variable

Identifier: SomaQuantCarvDisp
 Index domain:
 Text: Soma das quantidades dos carvões da mistura (ton).
 Range:
 Property:
 Definition: $\text{sum}[d, \text{QuantCarvDisp}(d)]$

Type: Variable
 Identifier: SomaQuantCarvBVolat
 Index domain:
 Text: Soma das quantidades de carvões baixo voláteis da mistura (ton).
 Range:
 Property:
 Definition: $\text{sum}[bd, \text{QuantCarvDisp}(bd)]$

Type: Variable
 Identifier: CustoTotalMistura
 Index domain:
 Text: Custo total da mistura esperada (\$).
 Range:
 Property:
 Definition:
 $\text{sum}[d, \text{PrecoCarvoes}(d) * \text{QuantCarvDisp}(d)]$

Type: Constraint
 Identifier: RestricLimiteInfQualit
 Index domain: p
 Text: Restrição de limite inferior das propriedades.
 Property: Bound, ShadowPrice, RightHandSideRange, ShadowPriceRange, Level, Basic
 Definition:
 $\text{sum}[d, \text{CompCarvoes}(d, p) * \text{QuantCarvDisp}(d)] \geq \text{LimiteInfQualit}(p) * \text{QuantMinMist}$

Type: Constraint
 Identifier: RestricLimiteSupQualit
 Index domain: p
 Text: Restrição de limite superior das propriedades.
 Property: Bound, ShadowPrice, RightHandSideRange, ShadowPriceRange, Level, Basic
 Definition:

$$\sum[d, \text{CompCarvoes}(d, p) * \text{QuantCarvDisp}(d)] \leq \text{LimitesSupQualit}(p) * \text{QuantMinMist}$$

Type: Constraint
 Identifier: RestricPressao
 Index domain: d
 Text: Restrição de pressão dos fornos.
 Property: Bound, ShadowPrice, RightHandSideRange, ShadowPriceRange, Level, Basic
 Definition:

$$\sum[bd, \text{QuantCarvDisp}(bd)] \leq 0.26 * \text{QuantMinMist}$$

Type: Constraint
 Identifier: RestricQuantMinMist
 Index domain:
 Text: Restrição de Quantidade minima de mistura.
 Property: Bound, ShadowPrice, RightHandSideRange, ShadowPriceRange, Level, Basic
 Definition:
$$\sum[d, \text{QuantCarvDisp}(d)] \geq \text{QuantMinMist}$$

Type: Mathematical Program
 Identifier: MisturaMenorCusto_Esp
 Objective: CustoTotalMistura
 Direction: minimize
 Constraint: RestricoesEsp
 Variable: VariaveisEsp
 Text: Mistura de menor custo, ref. ao esperado.
 Type: LP

Procedure: MainExecutionEsperado

```

Bory:
solve MisturaMenorCusto_Esp;
if      (MisturaMenorCusto_Esp.ProgramStatus    <>
'Optimal')
then empty QuantCarvDisp, CustoTotalMistura;
endif;

```

Módulo “Ajustamento”:

Dados Ajustamento

```

Type: Set
Identifier: CarvoesContratados
Índex domain:
Subset: CarvDispMistura
Text: Carvões contratados para o período.
Índex: f
Definition: data {CV-02, CV-03, CV-05, CV-07, CV-
13, CV-15}

```

```

Type: Set
Identifier: CarvoesSpot
Índex domain:
Subset: Carvoes
Text: Carvões spot para ajuste da mistura.
Índex: s
Definition: data {SP-01, SP-02, SP-03, SP-04, SP-
05, SP-06}

```

```

Type: Set
Identifier: CarvBVolatAjuste
Índex domain:
Subset: CarvBaixoVolat
Text: Carvões baixo voláteis disponíveis para o
ajuste.
Índex: ba
Definition: data {CV-13, CV-15, SP-06}

```

Type: Parameter

Identifier: CompRealCarvContr

Index domain: (f,p)

Text: Composição real dos carvões contratados (%).

Definition: data

```
{(CV-02,  Umidade):  7.000,  (CV-02,  'Matria
Voltil'): 35.000, (CV-02, Cinzas): 7.000, (CV-02,
Enxofre): 0.850, (CV-02, 'Fsforo'): 0.020, (CV-
02,  Fluidez):  4.230,  (CV-02,  'Refletncia'):
0.900,  (CV-02,  'Dilatao'): 197.000, (CV-03,
Umidade):  7.600,  (CV-03,  'Matria  Voltil'):
29.400, (CV-03, Cinzas): 6.600, (CV-03, Enxofre):
0.790,  (CV-03,  'Fsforo'):  0.020,  (CV-03,
Fluidez):  4.100,  (CV-03, 'Refletncia'):  0.750,
(CV-03,  'Dilatao'): 555.000, (CV-05, Umidade):
8.500, (CV-05, 'Matria Voltil'): 27.300, (CV-05,
Cinzas): 10.700, (CV-05, Enxofre): 0.850, (CV-05,
'Fsforo'): 0.040, (CV-05, Fluidez): 1.000, (CV-
05,  'Refletncia'): 1.050, (CV-05, 'Dilatao'):
35.000, (CV-07, Umidade): 10.000, (CV-07, 'Matria
Voltil'): 21.200, (CV-07, Cinzas): 9.200, (CV-07,
Enxofre): 0.450, (CV-07, 'Fsforo'): 0.010, (CV-
07,  Fluidez):  1.000,  (CV-07,  'Refletncia'):
1.280,  (CV-07,  'Dilatao'): 100.000, (CV-13,
Umidade):  9.000,  (CV-13,  'Matria  Voltil'):
17.000, (CV-13, Cinzas): 8.100, (CV-13, Enxofre):
0.300,  (CV-13,  'Fsforo'):  0.050,  (CV-13,
Fluidez):  3.000,  (CV-13, 'Refletncia'): 1.490,
(CV-13,  'Dilatao'): 57.000, (CV-15, Umidade):
7.100, (CV-15, 'Matria Voltil'): 17.200, (CV-15,
Cinzas): 4.700, (CV-15, Enxofre): 0.790, (CV-15,
'Fsforo'): 0.030, (CV-15, Fluidez): 1.220, (CV-
15,  'Refletncia'): 1.580, (CV-15, 'Dilatao'):
32.000 }
```

Type: Parameter
 Identifier: LimiteSupCarvContrat
 Index domain: f
 Text: Limite superior dos carvões contratados (ton).
 Definition: QuantCarvDisp(f)

Modelagem Ajustamento

Type: Variable
 Identifier: QuantCarvAjust
 Index domain: f
 Text: Quantidade de carvão após o ajustamento (ton).
 Range: [0, LimiteSupCarvContrat(f)]
 Property: ReducedCost, CoefficientRange, Basic
 Definition:

Type: Variable
 Identifier: QuantCarvSpot
 Index domain: s
 Text: Quantidade dos carvões spot utilizados no ajuste (ton).
 Range: nonnegative
 Property: ReducedCost, CoefficientRange, Basic
 Definition:

Type: Variable
 Identifier: SomaQuantCarvAjuste
 Index domain:
 Text: Soma da quantidade de carvões após ajuste (ton).
 Range:
 Property:
 Definition: $\text{sum}[f, \text{QuantCarvAjust}(f)] + \text{sum}[s, \text{QuantCarvSpot}(s)]$

Type: Variable

Identifier: SomaQuantCarvBVAjuste

Index domain:

Text: Soma da quantidade de carvões baixo voláteis após o ajuste (ton).

Range:

Property:

Definition: $\text{sum}[\text{ba}, \text{QuantCarvAjust}(\text{ba}) + \text{QuantCarvSpot}(\text{ba})]$

Type: Variable

Identifier: CustoTotalMisturaAjuste

Index domain:

Text: Soma Custo total da mistura após ajuste (\$).

Range:

Property:

Definition: $\text{sum}[\text{f}, \text{PrecoCarvoes}(\text{f}) * \text{QuantCarvAjust}(\text{f})] + \text{sum}[\text{s}, \text{PrecoCarvoes}(\text{s}) * \text{QuantCarvSpot}(\text{s})]$

Type: Constraint

Identifier: RestricLInfCaracAjuste

Index domain: p

Text: Restrição de limite inferior das características no ajuste.

Property: Bound, ShadowPrice, RightHandSideRange, ShadowPriceRange, Level, Basic

Definition:

$\text{sum}[\text{f}, \text{CompRealCarvContr}(\text{f}, \text{p}) * \text{QuantCarvAjust}(\text{f})] + \text{sum}[\text{s}, \text{CompCarvoes}(\text{s}, \text{p}) * \text{QuantCarvSpot}(\text{s})] \geq \text{LimiteInfQualit}(\text{p}) * \text{QuantMinMist}$

Type: Constraint

Identifier: RestricLSupCaracAjuste

Index domain: p

Text: Restrição de limite superior das características no ajuste.

Property: Bound, ShadowPrice, RightHandSideRange, ShadowPriceRange, Level, Basic

Definition:

$$\text{sum}[f, \text{CompRealCarvContr}(f, p) * \text{QuantCarvAjust}(f)] + \text{sum}[s, \text{CompCarvoes}(s, p) * \text{QuantCarvSpot}(s)] \leq \text{LimiteSuperQualit}(p) * \text{QuantMinMist}$$

Type: Constraint

Identifier: RestricBVolatAjuste

Index domain:

Text: Restrição de baixo voláteis no ajuste.

Property: Bound, ShadowPrice, RightHandSideRange, ShadowPriceRange, Level, Basic

Definition:

$$\text{sum}[ba, \text{QuantCarvAjust}(ba) + \text{QuantCarvSpot}(ba)] \leq 0.26 * \text{QuantMinMist}$$

Type: Constraint

Identifier: RestricBalancoAjust

Index domain:

Text: Restrição de balanço no ajustamento.

Property: Bound, ShadowPrice, RightHandSideRange, ShadowPriceRange, Level, Basic

Definition: $\text{sum}[f, \text{QuantCarvAjust}(f)] + \text{sum}[s, \text{QuantCarvSpot}(s)] \geq \text{QuantMinMist}$

Type: Mathematical Program

Identifier: MisturaMenorCusto_Ajte

Objective: CustoTotalMisturaAjuste

Direction: minimize

Constraint: RestricAjuste

Variable: VariaveisAjuste

Text: Mistura de menor custo no ajuste (\$).

Type: LP

Procedure: MainExecutionAjuste

```

Bory:
solve MisturaMenorCusto_Ajte;
if (MisturaMenorCusto_Ajte.ProgramStatus <>
'Optimal')
then empty QuantCarvAjust, QuantCarvSpot,
CustoTotalMisturaAjuste;
endif;

```

Campo Esperado

```

Type: Set
Identifier: VariaveisEsp
Index domain:
Subset: AllVariables
Text: Variáveis do cenário esperado.
Index: ve
Definition: Data {QuantCarvDisp,
SomaQuantCarvDisp, SomaQuantCarvBVolat,
CustoTotalMistura, Diferenca}

```

```

Type: Set
Identifier: RestricoesEsp
Index domain:
Subset: AllConstraints
Text: Restrições do cenário esperado.
Index: re
Definition: Data {SomaQuantCarvDisp,
SomaQuantCarvBVolat, CustoTotalMistura,
Diferenca, RestricLimiteInfCaracter,
RestricLimiteSupCaracter, RestricBaixoVolateis,
RestricBalanco}

```

Campo Ajustamento

```

Type: Set
Identifier: VariaveisAjuste

```

Índex domain:

Subset: AllVariables

Text: Variáveis da seção ajustamento.

Índex: va

Definition: Data {*QuantCarvAjust*, *QuantCarvSpot*,
SomaQuantCarvAjuste, *SomaQuantCarvBVAjuste*,
CustoTotalMisturaAjuste, *Diferenca*}

Type: Set

Identifier: RestricAjuste

Índex domain:

Subset: AllConstraints

Text: Restrições da seção ajustamento.

Índex: ra

Definition: Data {*SomaQuantCarvAjuste*,
SomaQuantCarvBVAjuste, *CustoTotalMisturaAjuste*,
Diferenca, *RestricLInfCaracAjuste*,
RestricLSupCaracAjuste, *RestricBVolatAjuste*,
RestricBalancoAjust}

Comparacao Custos

Type: Variable

Identifier: Diferenca

Índex domain:

Text: Diferença entre os custos esperado e ajustado (\$).

Range:

Property: *ReducedCost*, *ValueRange*,
CoefficientRange, *Bound*, *ShadowPrice*,
RightHandSideRange, *ShadowPriceRange*, *Level*,

Basic Definition:

CustoTotalMisturaAjuste - *CustoTotalMistura*

Apêndice III – Alterações algébricas na estrutura do modelo em função dos desvios de especificações

As Figuras 22 e 23 mostram as quantidades de cada carvão na mistura ótima sugerida pelo módulo “Esperado” do sistema protótipo, ficando evidente a não necessidade de utilização dos carvões spot.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot Q

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
CV-02	24.10999903		Basic	-1.369941890	1.492644546
CV-03	28.41825265		Basic	-1.536119948	0.596577540
CV-05	3.290783269		Basic	-0.515128763	3.660333091
CV-07	18.18096505		Basic	-0.248348937	1.195245191
CV-13	9.107181264		Basic	-0.206402058	0.354070564
CV-15	16.89281874		Basic	-3.170206552	0.206402058

Figura 22: Mistura ótima de carvões no módulo “Esperado”.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot Q

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
SP-01		6.927446839	NonBasic	-6.927446839	inf
SP-02		6.252561163	NonBasic	-6.252561163	inf
SP-03		5.568799946	NonBasic	-5.568799946	inf
SP-04		6.279987308	NonBasic	-6.279987308	inf
SP-05		6.928067444	NonBasic	-6.928067444	inf
SP-06		4.022339608	NonBasic	-4.022339608	inf

Figura 23: Utilização dos carvões spot no módulo “Esperado”.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

As Figuras 24 a 31 expressam o comportamento da mistura de carvões em função dos desvios de especificação no teor de matéria volátil do carvão CV-07, evidenciando o mecanismo de troca entre os carvões a fim de restabelecer a qualidade da mistura.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
CV-02	23.21778500		Basic	-9.704615385	1.37
CV-03	28.41825265	-4.672592593	NonBasic	-inf	4.672592593
CV-05	3.290783269	-4.512314815	NonBasic	-inf	4.512314815
CV-07	18.18096505	-7.966768519	NonBasic	-inf	7.966768519
CV-13	9.107181264	-4.132407407	NonBasic	-inf	4.132407407
CV-15	16.89281874	-3.754814815	NonBasic	-inf	3.754814815

Figura 24: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 2,5% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
SP-01		2.275277778	NonBasic	-2.275277778	inf
SP-02		1.476296296	NonBasic	-1.476296296	inf
SP-03		0.228333333	NonBasic	-0.228333333	inf
SP-04		2.443611111	NonBasic	-2.443611111	inf
SP-05	0.892214026		Basic	-4.065384615	0.274
SP-06			Basic	-3.754814815	6.850925926

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.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
CV-02	13.33310531		Basic	-4.567591686	0.799724771
CV-03	28.41825265	-4.304061187	NonBasic	-inf	4.304061187
CV-05	3.290783269	-4.556876738	NonBasic	-inf	4.556876738
CV-07	9.456812996		Basic	-0.484277778	0.427921986
CV-13	9.107181264	-3.967055447	NonBasic	-inf	3.967055447
CV-15	16.89281874	-3.733608498	NonBasic	-inf	3.733608498

Figura 26: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 45,0% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
SP-01		2.225844133	NonBasic	-2.225844133	inf
SP-02		1.253343393	NonBasic	-1.253343393	inf
SP-03		0.107113439	NonBasic	-0.107113439	inf
SP-04		2.427706373	NonBasic	-2.427706373	inf
SP-05	19.50104578		Basic	-5.257269967	0.145811986
SP-06			Basic	-3.733608498	7.490840878

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.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
CV-02	12.97039279		Basic	-1.549755102	1.462373865
CV-03	28.41825265	-3.950599533	NonBasic	-inf	3.950599533
CV-05	3.290783269	-4.590619986	NonBasic	-inf	4.590619986
CV-07	7.160925249		Basic	-0.044880615	6.374096906
CV-13	9.107181264	-3.829786619	NonBasic	-inf	3.829786619
CV-15	16.89281874	-3.713101583	NonBasic	-inf	3.713101583

Figura 28: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 47,50% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
SP-01		2.179816823	NonBasic	-2.179816823	inf
SP-02		1.053124255	NonBasic	-1.053124255	inf
SP-03	8.409505964		Basic	-0.855666862	0.010942390
SP-04		2.430510356	NonBasic	-2.430510356	inf
SP-05	13.75014008		Basic	-0.014606832	0.811749231
SP-06			Basic	-3.713101583	8.081212999

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.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

Windows Explorer

Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
CV-02	24.10999903	-0.01654874	NonBasic	-inf	0.01654874
CV-03	16.92101508		Basic	-0.020552009	7.085633034
CV-05	3.290783269	-3.791031185	NonBasic	-inf	3.791031185
CV-07	0.019854550		Basic	-0.058547961	11.47920725
CV-13	9.107181264	-1.632676454	NonBasic	-inf	1.632676454
CV-15	16.89281874		Basic	-1.632676454	3.462004098

Figura 30: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 107,5% proporcional à quantidade de matéria volátil do carvão CV-07.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

Windows Explorer

Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
SP-01		1.841276593	NonBasic	-1.841276593	inf
SP-02		0.595918805	NonBasic	-0.595918805	inf
SP-03	2.694343687		Basic	-0.029226683	0.390490540
SP-04		4.827180512	NonBasic	-4.827180512	inf
SP-05	26.96400438		Basic	-0.902296501	0.025300567
SP-06		3.462004098	NonBasic	-3.462004098	inf

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.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

As Figuras 32 a 3 expressam o comportamento da mistura de carvões em função dos desvios de especificação no nível de dilatação do carvão CV-03,

evidenciando o mecanismo de troca entre os carvões a fim de restabelecer a qualidade da mistura.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
CV-02	23.73177049		Basic	-0.057279783	7.295617978
CV-03	28.41825265	-0.053097122	NonBasic	-inf	0.053097122
CV-05	3.290783269	-7.394604317	NonBasic	-inf	7.394604317
CV-07	18.18096505	-1.570287770	NonBasic	-inf	1.570287770
CV-13	9.107181264		Basic	-1.369352518	2.832374101
CV-15	16.89281874	-1.369352518	NonBasic	-inf	1.369352518

Figura 32: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 1,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
SP-01		3.945827338	NonBasic	-3.945827338	inf
SP-02		4.426690647	NonBasic	-4.426690647	inf
SP-03	0.378228542		Basic	-0.727142857	4.489532710
SP-04		4.671294964	NonBasic	-4.671294964	inf
SP-05		3.455971223	NonBasic	-3.455971223	inf
SP-06		3.322014388	NonBasic	-3.322014388	inf

Figura 33: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um desvio de 1,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
CV-02	23.61402009		Basic	-0.08673944	0.58831523
CV-03	25.93835796		Basic	-0.587229527	0.083643021
CV-05	3.290783269	-6.673773585	NonBasic	-inf	6.673773585
CV-07	18.18096505	-6.086603774	NonBasic	-inf	6.086603774
CV-13	9.107181264	-4.803094340	NonBasic	-inf	4.803094340
CV-15	16.89281874		Basic	-4.803094340	4.209735849

Figura 34: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 8,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
SP-01		2.101924528	NonBasic	-2.101924528	inf
SP-02		5.493698113	NonBasic	-5.493698113	inf
SP-03	2.975873626		Basic	-3.545744934	0.404336283
SP-04		8.357320755	NonBasic	-8.357320755	inf
SP-05		0.344830189	NonBasic	-0.344830189	inf
SP-06		4.403924528	NonBasic	-4.403924528	inf

Figura 35: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um desvio de 8,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
CV-02	24.10999903	-0.023137077	NonBasic	-inf	0.023137077
CV-03	25.09352676		Basic	-0.022604977	7.548980140
CV-05	3.290783269	-6.591284401	NonBasic	-inf	6.591284401
CV-07	18.18096505	-6.586438400	NonBasic	-inf	6.586438400
CV-13	9.107181264	-5.480824745	NonBasic	-inf	5.480824745
CV-15	16.89281874		Basic	-5.480824745	4.206282059

Figura 36: Mistura de carvões ajustada em função de um desvio de 9,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
SP-01		1.891886345	NonBasic	-1.891886345	inf
SP-02		5.599149491	NonBasic	-5.599149491	inf
SP-03	3.186195647		Basic	-0.101727489	3.096389259
SP-04		8.744744408	NonBasic	-8.744744408	inf
SP-05	0.138530246		Basic	-2.669048383	0.092186643
SP-06		4.371059258	NonBasic	-4.371059258	inf

Figura 37: Carvões spot utilizados no ajustamento da mistura em função de um desvio de 9,0% proporcional à dilatação do carvão CV-03.

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
CV-02	24.10999903	-5.970464022	NonBasic	-inf	5.970464022
CV-03	7.204896603		Basic	-20.31597254	6.054672897
CV-05	3.290783269	-5.924421654	NonBasic	-inf	5.924421654
CV-07	18.18096505	-6.395906187	NonBasic	-inf	6.395906187
CV-13	9.107181264	-3.834082044	NonBasic	-inf	3.834082044
CV-15	16.89281874		Basic	-3.834082044	3.090307666

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

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Stand-Alone Version (UIC Bioengineering - AIMMS Educational Package)

File Edit View Help

[Data Page] CompRealCarvContr [Data Page] QuantCarvAjust [Data Page] QuantCarvSpot

Suffix	Level	ReducedCost	basic	SmallestCoefficient	LargestCoefficient
SP-01		0.435675857	NonBasic	-0.435675857	inf
SP-02		2.305664089	NonBasic	-2.305664089	inf
SP-03	20.32946621		Basic	-3.05613933	1.118911917
SP-04		3.314576328	NonBasic	-3.314576328	inf
SP-05	0.883889835		Basic	-1.874804341	0.808801498
SP-06		4.112479825	NonBasic	-4.112479825	inf

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

Fonte: AIMMS, 1993 – 2006.

Apêndice IV – Exemplo numérico do cálculo da penalidade contratual

- Penalidade unitária ou custo marginal (P_U):
 - é a penalidade em dólares por tonelada de mistura de carvões e por desvio absoluto ou ponto percentual de desvio a ser aplicada contratualmente ao fornecedor por uma mudança na estrutura da mistura proporcionada pelo ajustamento da qualidade da mesma.

- Penalidade total (P_T):

É composta do somatório entre o custo do ajustamento, o custo de manutenção em estoque das sobras e o custo de aquisição do indesejável (matéria volátil, enxofre etc.):

$$P_T = C_A + C_I + C_E$$

$$C_A = P_U * D_A * QTCA = C_{SP} - C_{SO}$$

Onde:

C_A = Custo do ajustamento, em dólares;

C_I = Custo de aquisição do indesejável, em dólares;

C_E = Custo de estocagem, em dólares;

C_{SP} = Custo dos carvões spot utilizados no ajustamento da mistura, em dólares;

C_{SO} = Custo da sobra dos carvões comprados e não utilizados após ajustamento da mistura, em dólares;

D_A = Desvio absoluto em uma das características de controle dos carvões;

P_T = Penalidade total, em dólares para 100 toneladas de mistura;

P_U = Penalidade unitária, em dólares por tonelada total de mistura por desvio absoluto;

$QTCA$ = quantidade total de carvão que compõe a mistura ótima, em toneladas.

- Para um desvio de 9,54% sobre a matéria volátil do carvão CV-07:

$$C_A = 16,61 * 100 * 0,0954 = (19,50 * 113,78) - [(24,11 - 13,33) * 103,65 + (18,18 - 9,46) * 108,13] = US\$158,46$$

$$C_I = 0,0954 * 18,18 * 108,13 = US\$187,54$$

$$P_T = 158,46 + 187,54 + C_E = US\$346,00 + C_E$$