7
Testes ilustrativos

Com o propósito de ilustrar e de analisar o funcionamento do sistema protótipo desenvolvido, são realizados dois testes, simulando cenários de desvios de especificações em duas propriedades dos carvões, um teste para cada propriedade. Após as simulações, os resultados são 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, dado um desvio de especificação.

7.1.
Mistura ótima de carvões

Após a otimização do modelo de programação linear da mistura, definido na seção 4.2, considerando todas as suas restrições, observa-se que a mistura é formada somente por quatro tipos de carvões, sendo que um deles possui quantidade igual a zero, conforme mostrado na Tabela 4. Tal fato se deve ao pequeno número de carvões (quinze ao todo) que compõe o banco de dados utilizado no modelo, associado à restrição de rendimento da mistura, que nesta simulação limita a quantidade de coque em 100 ton. Esse limitado número de carvões na mistura ótima não ocorre quando o modelo é tratado em escala real. Um exemplo disso é a CST, que trabalha com um elevado número de carvões com diferentes especificações sendo possível a formação de misturas com até doze carvões distintos.

Outra constatação importante é que o carvão CV-01 pertence à mistura ótima, mas com quantidade igual a zero, configurando uma particularidade dos problemas de programação linear, chamada de solução degenerada.

Considerando que a limitada quantidade de carvões presente na mistura ótima e a peculiaridade referente à solução ótima citada no parágrafo anterior dificultam a simulação de cenários de desvio e a análise do comportamento da mistura, pois, dependendo do desvio, o problema se torna facilmente infactível, relaxa-se o modelo substituindo a restrição de rendimento por uma restrição de quantidade mínima de mistura a ser formada. É importante observar que a simplificação feita não compromete a importância e a validade das análises

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

realizadas, uma vez que o modelo simplificado permanece similar ao modelo real, pois a restrição de rendimento indiretamente determina uma quantidade mínima de mistura.

Em função dos dados dos carvões disponíveis para formação de mistura, destacados na seção 6.2, e de seu incremento no módulo “Esperado” do sistema protótipo, encontra-se a mistura de menor custo, apresentada na Tabela 5, formada pelos carvões: CV-02, CV-03, CV-05, CV-07, CV13 e CV-15.

Tabela 4: Mistura ótima de carvões no módulo “Esperado” do sistema protótipo, considerando a restrição de rendimento.

Coal	Level	Reduced Cost	Basic	Smallest Coefficient	Largest Coefficient
CV-01	**zero**	**zero**	**Basic**	**-0,407**	**inf**
CV-02	zero	8,948	Non Basic	-8,948	inf
CV-03	zero	2,295	Non Basic	-2,295	inf
CV-04	zero	1,304	Non Basic	-1,304	inf
CV-05	**23,341**	**zero**	**Basic**	**-5,425**	**0,292**
CV-06	zero	5,196	Non Basic	-5,196	inf
CV-07	**65,160**	**zero**	**Basic**	**-0,465**	**3,610**
CV-08	**37,929**	**zero**	**Basic**	**-16,261**	**0,550**
CV-09	zero	6,319	Non Basic	-6,319	inf
CV-10	zero	19,375	Non Basic	-19,375	inf
CV-11	zero	4,307	Non Basic	-4,307	inf
CV-12	zero	5,732	Non Basic	-5,732	inf
CV13	zero	zero	Non Basic	-inf	zero
CV-14	zero	6,467	Non Basic	-6,467	inf
CV-15	zero	4,454	Non Basic	-4,454	inf

Fonte: própria

Tabela 5: Mistura ótima de carvões no módulo “Esperado” do sistema protótipo, substituindo a restrição de rendimento pela de quantidade mínima de mistura.

Coal	Level	Reduced Cost	Basic	Smallest Coefficient	Largest Coefficient
CV-01		0,776	Non Basic	-0,776	inf
CV-02	**24,110**	**zero**	**Basic**	**-1,370**	**0,527**
CV-03	**28,418**	**zero**	**Basic**	**-0,330**	**0,596**
CV-04	zero	0,272	Non Basic	-0,272	inf
CV-05	**3,291**	**zero**	**Basic**	**-0,515**	**0,771**
CV-06	zero	1,368	Non Basic	-1,368	inf
CV-07	**18,181**	**zero**	**Basic**	**-0,248**	**0,558**
CV-08	zero	1,441	Non Basic	-1,441	inf
CV-09	zero	1,577	Non Basic	-1,577	inf
CV-10	zero	1,750	Non Basic	-1,750	inf
CV-11	zero	1,101	Non Basic	-1,101	inf
CV-12	zero	0,189	Non Basic	-0,189	inf
CV13	**9,107**	**zero**	**Basic**	**-0,206**	**0,153**
CV-14	zero	0,529	Non Basic	-0,529	inf
CV-15	**16,893**	**zero**	**Basic**	**-0,796**	**0,206**

Fonte: própria

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

Os níveis (level) de cada carvão, nas Tabelas 4 e 5, são dados em toneladas.

Tabela 6: Níveis e valores duais das restrições de limite inferior de qualidade da mistura de carvões. Módulo “Esperado” do sistema protótipo.

Properties	Lower	Level	Smallest Right Hand Side	Nominal Right Hand Side	Largest Right Hand Side	Shado w Price
Umidade	zero	796.434	-inf	zero	796,434	zero
Matéria Volátil	2350	2600	-inf	2350	2600	zero
Cinzas	zero	711,971	-inf	zero	711,971	zero
Enxofre	zero	70	-inf	zero	70	zero
Fósforo	zero	2,326	-inf	zero	2,326	zero
Fluidez	250	287,903	-inf	250	287,903	zero
Refletância	**110**	**110**	**101,515**	**110**	**113,450**	**3,491**
Dilatação	7500	13000	-inf	7500	13000	zero

Fonte: própria

Tabela 7: Níveis e valores duais das restrições de limite superior de qualidade da mistura de carvões. Módulo “Esperado” do sistema protótipo.

Properties	Level	Upper	Smallest Right Hand Side	Nominal Right Hand Side	Largest Right Hand Side	Shadow Price
Umidade	796,434	1000	796,434	1000	inf	zero
Matéria Volátil	**2600**	**2600**	**2533,039**	**2600**	**2839,655**	**-0,182**
Cinzas	711,971	1070	711,971	1070	inf	zero
Enxofre	**70**	**70**	**61,814**	**70**	**74,413**	**-0,426**
Fósforo	2,326	4	2,326	4	inf	zero
Fluidez	287,903	320	287,903	320	inf	zero
Refletânci a	110	130	110	130	inf	zero
Dilatação	**13000**	**13000**	**9324,260**	**13000**	**13350,387**	**-0,005**

Fonte: própria

As Tabelas 6 e 7 apresentam cada uma das restrição de limite inferior e superior de qualidade da mistura de carvões para o nosso modelo simplificado. Os níveis (level) de cada restrição, seus limites inferiores (lower) e superiores (upper) e seus valores duais ou preços sombra (shadow price) estão destacados. As restrições ativas do modelo são apresentadas na Tabela 8. Como a contribuição percentual de cada carvão em relação às propriedades de controle foi inserida no modelo em valor relativo, os níveis de cada restrição e

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

seus respectivos limites devem ser divididos por 100 para que sejam comparáveis aos limites especificados na Tabela 3 da seção 6.2.

Tabela 8: Restrições ativas no ótimo: níveis e valores duais.

Restrição ativa	Nível inferior	Nível superior	Valor dual
Matéria volátil	-	26,00	-0,182
Enxofre	-	0,70	-0,426
Refletância	1,10	-	3,491
Dilatação	-	130,00	-0,050

Fonte: própria

Comparando os níveis das restrições ativas no ótimo com os limites especificados na Tabela 3, seção 6.2, pode-se verificar o módulo “Esperado” do sistema proposto e dar seqüência às simulações de desvios e análises, visto que todas as restrições do problema foram atendidas.

A Tabela 8 destaca as quantidades de cada carvão e o custo total da mistura ótima, definidos no módulo “Esperado”.

Tabela 9: Quantidades dos carvões e custo total da mistura ótima no módulo “Esperado”.

Carvão	Quantidade (ton)
CV-02	24,110
CV-03	28,418
CV-05	3,291
CV-07	18,181
CV-13	9,107
CV-15	16,893
Custo Total	**US$ 10.628,46**

Fonte: própria

7.2. Testes e análises

Supondo que os carvões participantes da mistura ótima são comprados, recebidos e analisados pela siderúrgica em questão, simulam-se desvios de especificação em duas propriedades dos carvões, uma química e uma física.

Analisando os resultados das Tabelas 6 e 7, 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 de maneira lógica e superficial que um desvio de especificação para uma dessas propriedades,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

dependendo de sua ordem de grandeza, não resultará em uma mudança na estrutura da mistura, podendo permanecer inalterado o valor da função objetivo. No entanto, 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.

Imaginando a estrutura de um tableau, na aplicação do método Simplex, após a alteração de um coeficiente tecnológico inicial de uma variável básica 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 alterado, se não for um pivô, deverá ser igual a zero. 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.

Sendo assim, são selecionadas duas propriedades com restrição ativa para a simulação dos desvios: a matéria volátil do carvão CV-07 e a dilatação do carvão CV-03, que possuem proporção abaixo e acima, respectivamente, dos limites de qualidade especificados.

Inicialmente, são aplicados desvios progressivos de 2,5%, proporcionais à quantidade inicial de matéria volátil contida em 1 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 10 os desvios absolutos, os custos totais do ajustamento e as variações de custo em relação ao custo total esperado. A última coluna da Tabela 10 informa a penalidade unitária (penalidade por tonelada de carvão e por desvio absoluto ou ponto percentual) 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.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

Tabela 10: 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

Fonte: própria

Observando os resultados da Tabela 10, 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

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

penalidade unitária não mais é constante, pois seu valor decresce tendendo a zero como mostram os gráficos das Figuras 11 e 12.

É importante ressaltar que a primeira coluna das Tabelas 10, 11 e 12 representa desvios proporcionais aos teores das propriedades analisadas dos carvões evidenciados, ou seja, representa porcentagem de porcentagem. Já a segunda coluna das mesmas tabelas representa os desvios absolutos das mesmas propriedades, ou seja, ponto percentual de desvio sobre 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.

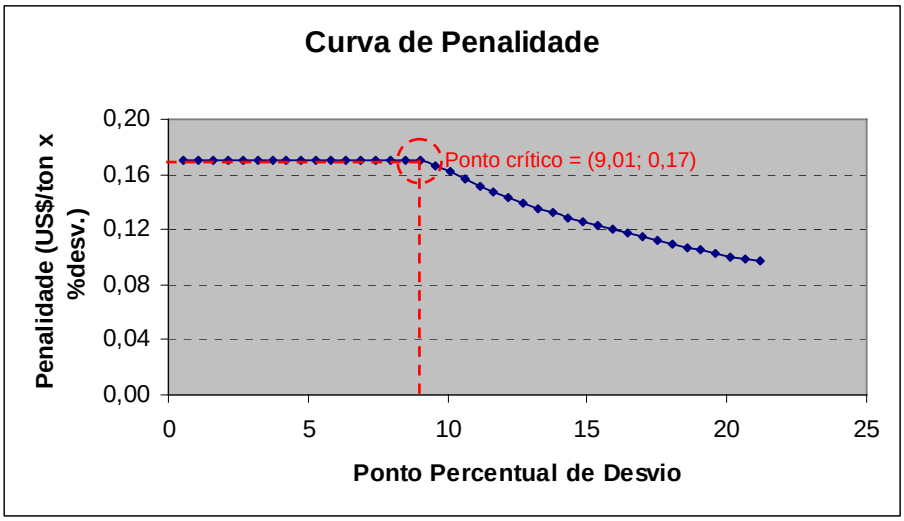

Figura 11: Curva de Variação da penalidade unitária por ponto percentual de desvio.

Fonte: própria

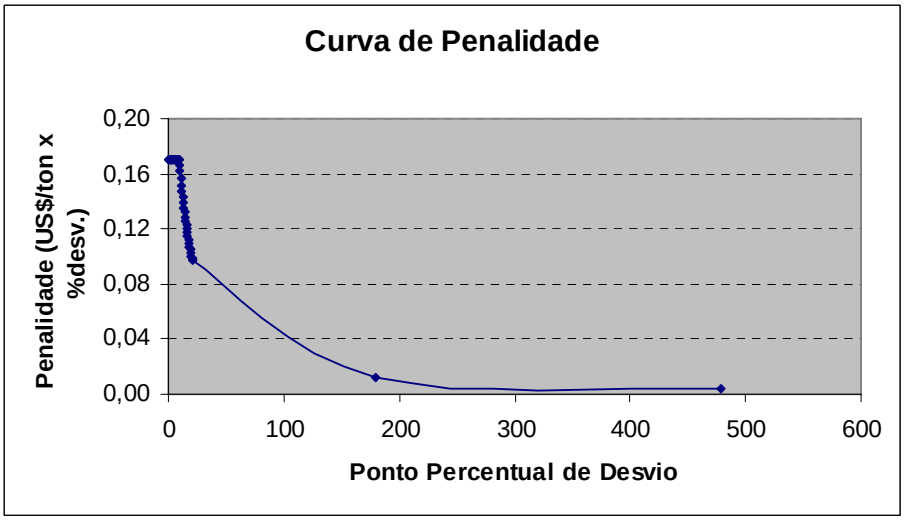

Figura 12: Penalidade tendendo a zero em função da elevação excessiva do desvio percentual da matéria volátil do carvão CV-07.

Fonte: própria

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

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 13 e 14.

Os comportamentos da variação do custo total e da penalidade unitária são discutidos com mais detalhes na próxima seção.

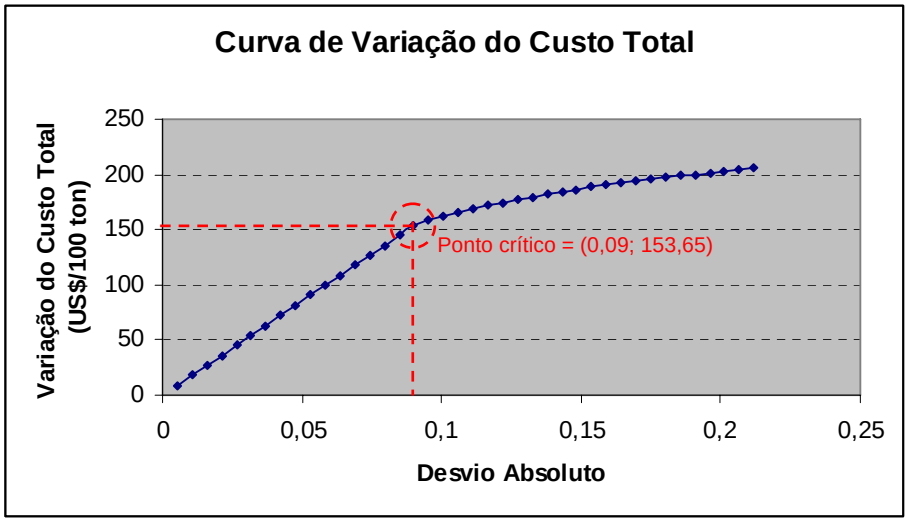

Figura 13: Curva de variação do custo total em função do desvio absoluto no teor de matéria volátil do carvão CV-07.

Fonte: própria

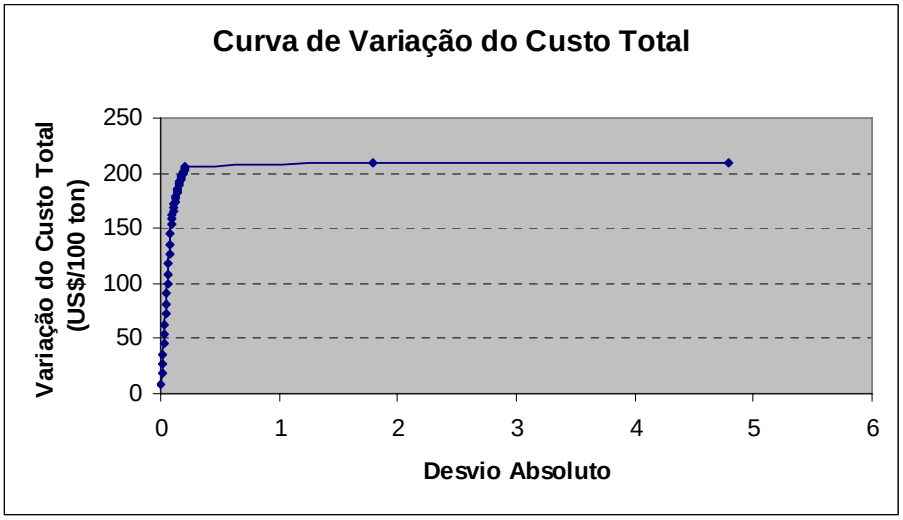

Figura 14: Estabilização da variação do custo total em função dos excessivos desvios sobre a matéria volátil do carvão CV-07.

Fonte: própria

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

De semelhante modo, são simulados desvios progressivos de 5,0%, proporcionais à dilatação inicial do carvão CV-03, até atingir um desvio de 100% em relação à especificação inicial, que é de 185,0%, e observa-se o comportamento da mistura.

É importante destacar que as interfaces entre as faixas de desvios em destaque nas Tabelas 10, 11 e 12 informam uma mudança na estrutura da mistura, ou seja, uma mudança de base, marcando a saída ou o ingresso de um novo carvão na mistura.

Tabela 11: Custo total ajustado e variação do custo total para desvios proporcionais de 5,0% na dilatação do carvão CV-03.

Desvio percentual (%)	**Desvio absoluto**	**Custo total ajustado (US$/100 ton)**	**∂ Custo (US$/100 ton)**	**∂ Custo/Desvio absoluto (US$/ton x unid. desvio)**
0	0	10628,46097	0	0
5,0	**0,0925**	**10644,20265**	**15,74168**	**0,017018**
10,0	0,1850	10658,18490	29,72393	0,016067
15,0	0,2775	10670,35863	41,89766	0,015098
20,0	0,3700	10681,14786	52,68689	0,014240
25,0	0,4625	10690,77605	62,31508	0,013474
30,0	0,5550	10699,42104	70,96008	0,012786
35,0	0,6475	10707,22614	78,76517	0,012165
40,0	0,7400	10714,30805	85,84708	0,011601
45,0	0,8325	10720,76285	92,30188	0,011087
50,0	0,9250	10726,67029	98,20932	0,010617
55,0	1,0175	10732,09718	103,63621	0,010185
60,0	1,1100	10737,09985	108,63888	0,009787
65,0	1,2025	10741,72617	113,26520	0,009419
70,0	1,2950	10746,01708	117,55611	0,009078
75,0	1,3875	10750,00777	121,54680	0,008760
80,0	1,4800	10753,72870	125,26773	0,008464
85,0	1,5725	10757,20630	128,74534	0,008187
90,0	1,6650	10760,46371	132,00274	0,007928
95,0	1,7575	10766,32114	137,86017	0,007844
100,0	1,8500	10766,39660	137,93563	0,007456

Fonte: própria

Para o incremento proporcional especificado de 5,0% nos desvios da dilatação, diferentemente da matéria volátil, constata-se, à primeira vista, que as variações nos custos totais não são proporcionais aos desvios absolutos aplicados. E, também, que a penalidade por tonelada e por ponto percentual de desvio em momento algum é constante, pois a penalidade unitária apresentada na quinta coluna da Tabela 11 é variável em relação ao desvio absoluto ocorrido.

Em parte, essa constatação é verdadeira, basta observar as curvas nas Figuras 15 e 16. No entanto, ao levar em consideração que na faixa de 0 a 10%

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

de desvio houve duas mudanças na estrutura da mistura, não seria prudente tirar qualquer conclusão sem antes verificar o que realmente acontece com a mistura ao simular desvios proporcionais de 1,0% sobre o coeficiente de dilatação do carvão CV-03, até atingir o nível de 10%.

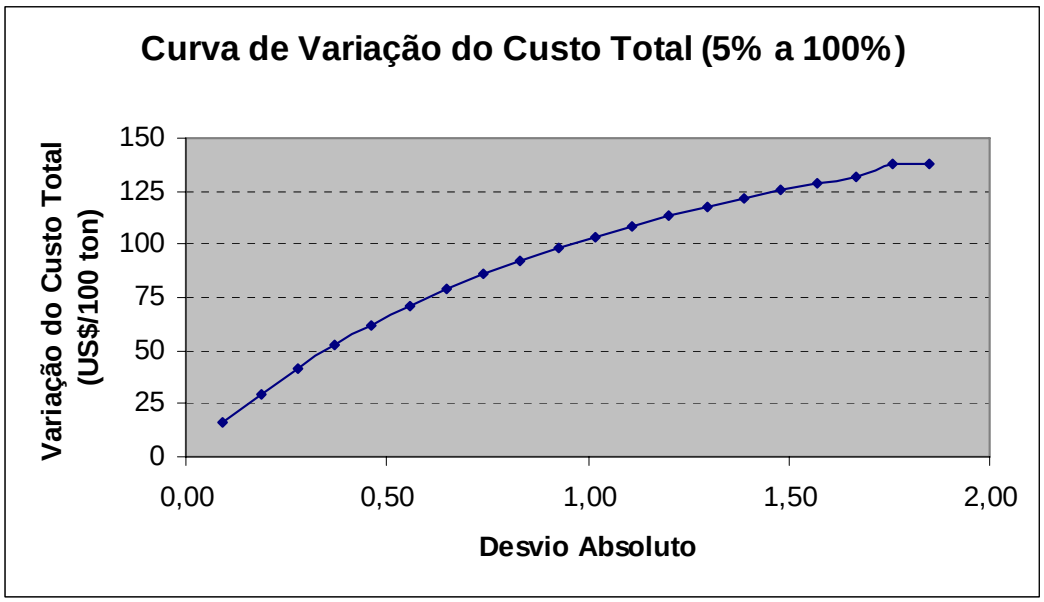

Figura 15: Variação do custo total em função do desvio absoluto na dilatação do carvão CV-03.

Fonte: própria

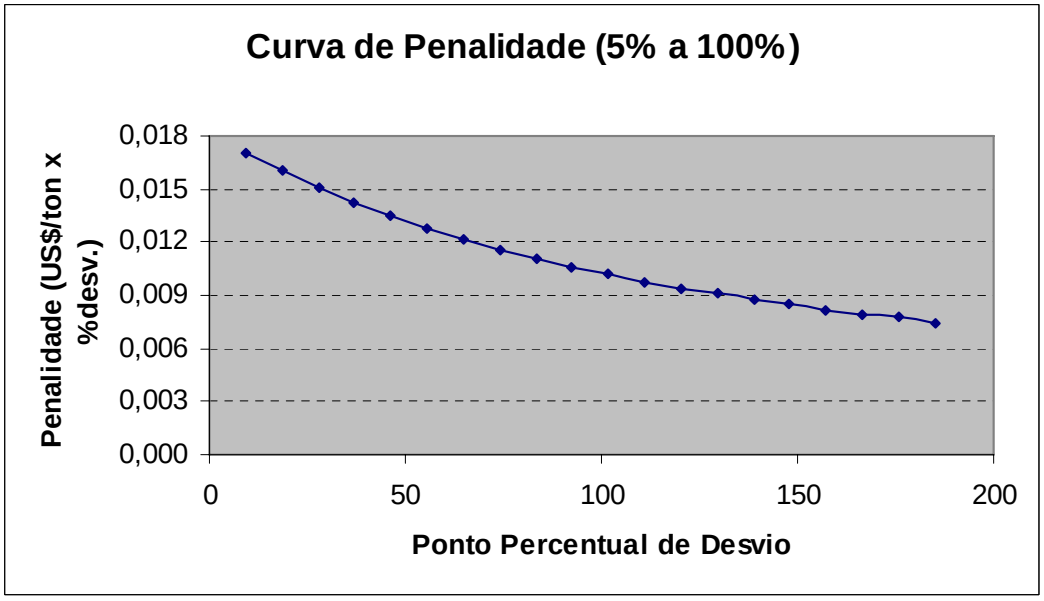

Figura 16: Penalidade unitária tendendo a zero em função do desvio excessivo da dilatação do carvão CV-03.

Fonte: própria

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

Analisando os resultados da Tabela 12, verifica-se que na faixa de desvios entre 1,0% e 8,0%, incluindo estes, apesar das variações nos custos totais serem proporcionais aos desvios absolutos aplicados, a penalidade por tonelada e por ponto percentual de desvio não é constante. No entanto, para fins práticos a penalidade pode ser ajustada a uma constante, pois seus valores sofrem pequenas variações em torno de um ponto médio. Portanto, somente a partir do desvio de 9,0% é que valem as observações inferidas da Tabela 11.

Tabela 12: Custo total ajustado e variação do custo total para desvios proporcionais de 1,0% na dilatação do carvão CV-03.

Desvio percentual (%)	**Desvio absoluto**	**Custo total ajustado (US$/100 ton)**	**∂ Custo (US$/100 ton)**	**∂ Custo/Desvio absoluto (US$/ton x unid. desvio)**
0	0	10628,46097	0	0
1,0	**0,0185**	**10631,11981**	**2,65884**	**0,014372**
2,0	**0,0370**	**10634,97813**	**6,51716**	**0,017614**
3,0	**0,0555**	**10638,12392**	**9,66295**	**0,017411**
4,0	**0,0740**	**10641,19795**	**12,73698**	**0,017212**
5,0	**0,0925**	**10644,20265**	**15,74168**	**0,017018**
6,0	**0,1110**	**10647,14034**	**18,67937**	**0,016828**
7,0	**0,1295**	**10650,01324**	**21,55227**	**0,016643**
8,0	**0,1480**	**10652,82345**	**24,36248**	**0,016461**
9,0	0,1665	10655,56025	27,09929	0,016276
10,0	0,1850	10658,18490	29,72393	0,016067

Fonte: própria

As Figuras 17 e 18 mostram o comportamento da mistura em termos de variação do custo total e penalidade unitária, respectivamente, quando aplicados desvios entre 1,0 % e 10,0% proporcionais ao nível inicial da dilatação do carvão CV-03.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

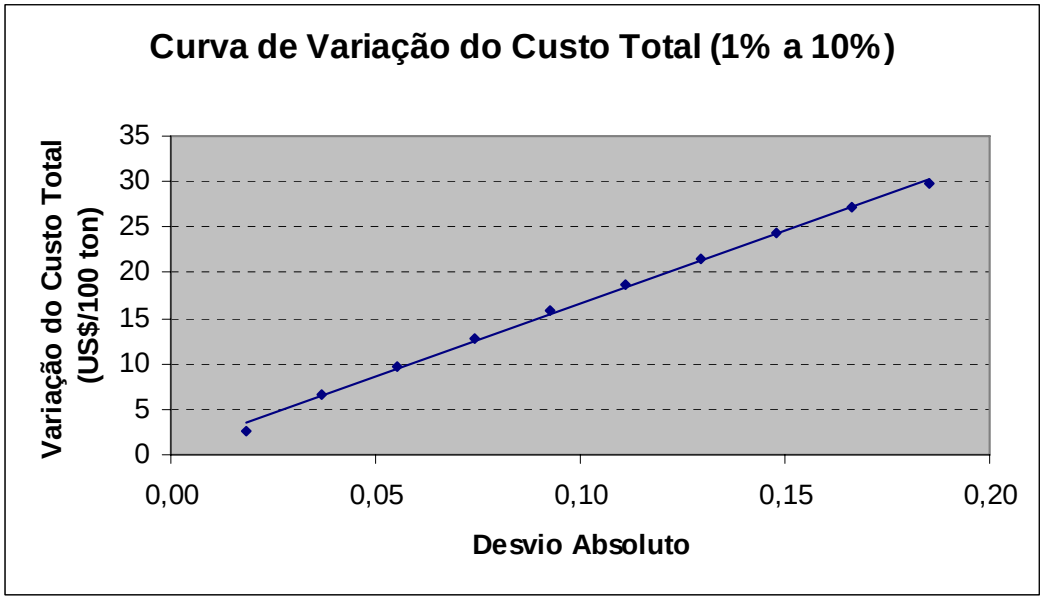

Figura 17: Variação do custo total proporcional aos desvios aplicados no valor da dilatação do carvão CV-03 para a faixa de 1,0% a 10,0%.

Fonte: própria

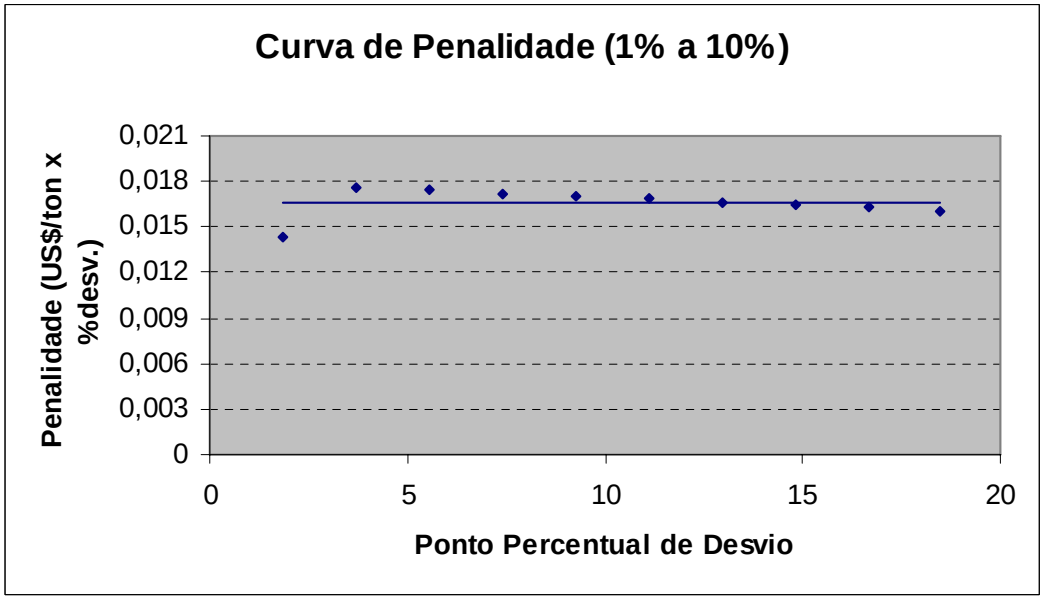

Figura 18: Penalidade unitária constante para desvios aplicados dentro da faixa de 1,0% a 10,0% no valor da dilatação do carvão CV-03.

Fonte: própria

7.3. Discussão dos resultados

Como os carvões definidos pelo módulo “Esperado” ficticiamente foram contratados, suas quantidades que dão entrada no módulo “Ajustamento” são limitadas superiormente, isso quer dizer que, na necessidade de ajustamento da

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

mistura uma quantidade menor de um carvão já contratado poderá ser utilizada, gerando sobras, mas 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 “spot”.

Os comportamentos similares das curvas de variação de custo e de penalidade, tanto para os desvios na matéria volátil do carvão CV-07, quanto para os desvios na dilatação do carvão CV-03, são justificáveis, uma vez que os resultados apresentam relativa coerência com os cenários propostos e condições impostas.

No caso dos desvios na matéria volátil, ao analisar algebricamente o comportamento da mistura nas diversas simulações que realizadas, observa-se que, pelo fato da restrição estar ativa, o primeiro desvio aplicado sobre sua proporção no carvão CV-07 provocou uma mudança na estrutura inicial da mistura com o ingresso do carvão “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 (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 recorre ao “spot” com teor de matéria volátil relativamente baixo, neste caso o SP-05, adequando a qualidade da mistura.

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 45,0%, 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 47,5%, 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%)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

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 “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 (Figura 14, seção 7.2), 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 (Figura 12, seção 7.2).

O mesmo raciocínio utilizado para entender o comportamento da estrutura da mistura em função dos desvios no teor de matéria volátil do carvão CV-07, assim como para assimilar o comportamento das curvas de variação de custo total e de penalidade unitária, pode ser utilizado no entendimento do comportamento desta mesma mistura quando simulamos desvios na propriedade dilatação do carvão CV-03. Como o valor da dilatação do referido carvão (185%) já está acima do limite superior especificado (130%), a faixa de desvios proporcionais para os quais as quantidades dos demais carvões permanecem inalteradas, inclusive a do CV-03, com a redução da quantidade do carvão que possui a maior dilatação, neste caso novamente o CV-02 com 197%, é bem curta, entre 1% e 8%. Nessa faixa, a quantidade do carvão CV-02 é reduzida em prol do ingresso na mistura e acréscimo da quantidade do carvão “spot” SP-03.

Similarmente ao caso da matéria volátil do carvão CV-07, desvios proporcionais acima de 8% provocam a redução da quantidade do carvão CV-03 e a reutilização do CV-02, com o ingresso de mais um “spot” na mistura, o SP-05, para compensar a redução do CV-03. Ao nível de 100% de desvio proporcional, que corresponde a um desvio absoluto de 185 pontos percentuais, a curva de variação do custo total já tende à estabilização (Figura 15, seção 7.2), com a curva de penalidade tendendo a zero (Figura 16, seção 7.2). De igual

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA

modo, desvios excessivos na dilatação do carvão CV-03 inviabilizam sua permanência na mistura ótima.

O fato da penalidade unitária tender a zero, com o aumento progressivo dos desvios nas proporções de ambas as propriedades estudadas, não quer dizer que não será aplicada nenhuma penalidade por um desvio que seja demasiadamente excessivo, é lógico que desvios proporcionais acima de 100%, correspondendo a desvios de 21,2 e 185,0 pontos percentuais para a matéria volátil e dilatação respectivamente, não são praticáveis e dificilmente ocorrerão, mas, supondo uma ocorrência desta grandeza, penalidades serão aplicadas para compensar a aquisição de um carvão que, possivelmente, nunca será utilizado.

As alterações algébricas na estrutura da mistura para os desvios na matéria volátil do carvão CV-07 e na dilatação do carvão CV-03, discutidas nesta seção, são apresentadas na forma matricial no Apêndice III.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0511101/CA