

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE GASES NUMA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA

JOÃO GUSTAVO COELHO PENA*, VALTER BARBOSA DE OLIVEIRA JÚNIOR*, JOSÉ LEANDRO FÉLIX SALLES*

* *Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Edifício CT-II, CEP 29.075-910
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, Espírito Santo, Brasil*

Emails: jgeng_autcon@yahoo.com.br, valter.oliveira@arcelormittal.com.br,
jleandro@ele.ufes.br

Abstract— The production process in an integrated steel mill produces gases, which can typically be used as fuel by the plant itself. A rational way to manage the use of these gases is through the formulation of the problem by mixed integer linear programming. This article aims to make a sensitivity analysis of the objective function parameters proposed for the optimizing model of the distribution of fuel gases in a steel complex, for the purpose of supporting the choice of appropriate values for the parameters of the optimizer designed.

Keywords— Energy, Fuel, Mixed Integer Linear programming, Sensitivity analysis, Steel mill.

Resumo— Nos processos para produção de aço numa usina siderúrgica integrada são produzidos gases que normalmente podem ser aproveitados como combustíveis pela própria planta. Uma maneira racional para gerenciar o uso destes gases é através da formulação do problema por meio da programação linear inteira mista. Este artigo tem como objetivo analisar a sensibilidade da função objetivo em relação às penalidades associadas aos custos das variáveis de decisão do problema de otimização da distribuição de gases combustíveis. O estudo tem a finalidade de subsidiar a escolha de valores apropriados para tais penalidades a fim de garantir uma operação estável entre produção e consumo.

Palavras-chave— Análise de sensibilidade, Combustível, Energia, Programação Linear Inteira Mista, Siderurgia.

1 Introdução

O uso dos gases subprodutos dos processos siderúrgicos para cogeração de energia é uma prática comum, sobretudo em usinas siderúrgicas integradas, isto é, nos complexos que executam as três principais etapas para produção de aço, ou seja, redução de minério (onde ocorre a transformação de minério de ferro em metal líquido), refino de aço (onde o metal líquido é transformado em aço), e laminação (onde o aço em processo de solidificação é transformado em produtos utilizados pela indústria de transformação). Deste modo, apesar do alto consumo energético, estas usinas, em muitos casos, geram mais eletricidade do que a sua própria necessidade, e, portanto, são exportadoras de energia elétrica, que é uma importante fonte de renda financeira. Nas últimas décadas foram executados alguns trabalhos que abordam o uso racional destes gases, com destaque para o uso da programação linear inteira mista (Hillier and Lieberman, 2013) como modelo do sistema de distribuição.

Um dos primeiros trabalhos foi apresentado por (Akimoto et al., 1991) os quais propõem um modelo de programação linear inteira mista (MILP) para otimização do suprimento de gás para as termelétricas da Kawasaki Steel Mizushima Works, uma siderúrgica japonesa. Nessa empresa foi criado um sistema de controle de energia para lidar com o gerenciamento de energia e

outras utilidades da siderúrgica; assim os operadores deste sistema poderiam aplicar a solução obtida para o modelo na planta, o que resultou em uma considerável redução no consumo de óleo nas centrais termelétricas. Nesse trabalho, as limitações do processo são representadas por restrições que penalizam situações desfavoráveis como falta ou excesso de gases, uso do óleo alcatrão, flutuações dos níveis dos gasômetros, permutações dos queimadores etc. Mas, no modelo de (Akimoto et al., 1991) não foi concebida a distribuição dos combustíveis entre uma caldeira e outra, isso porque não foram consideradas as eficiências das caldeiras nem as demandas de vapor e eletricidade.

Um modelo matemático para fornecer suporte à tomada de decisão na siderúrgica indiana Tata Steel foi realizado por (Sinha et al., 1995). Essa abordagem é voltada mais para a gestão da produção que a otimização e planejamento da distribuição de gases siderúrgicos, vapor e energia, mas oferece algumas diretrizes importantes como o uso da MILP para modelagem de processos siderúrgicos e sua resolução através do algoritmo *Branch and Bound*. Na sequência, o trabalho de (Hui and Natori, 1996) descreve a implantação da programação linear inteira mista como modelo do sistema de utilidades da Mitsubishi Chemical Corporation no Japão. O objetivo era fazer um estudo para se encontrar qual o melhor arranjo de investimento para o setor de utilidades da usina a fim de maximizar a geração de eletricidade para ser

vendida para a concessionária local de energia,

Um novo paradigma para a formulação do problema de gerenciamento da distribuição de gases siderúrgicos para geração elétrica e vapor é apresentado por (Kim et al., 2003) através da introdução das penalidades por ligar e/ou apagar um queimador, das informações sobre as eficiências dos equipamentos e das equações que regem a conversão de energia térmica em eletricidade. Em (de Oliveira Junior et al., 2016) propuseram algumas melhorias ao modelo formulado por (Kim et al., 2003) e desenvolveram um método heurístico que fornece as penalidades dos gasômetros e queimadores presentes na função custo do problema MILP através da análise de sensibilidade. O objetivo do presente artigo é estender a análise da sensibilidade feita em (de Oliveira Junior et al., 2016) para avaliar a variação do preço do alcatrão na solução do problema MILP. O alcatrão é um combustível usado na central termelétrica com alto valor de mercado e que deve substituir os gases gerados no processo siderúrgico somente quando a reserva dos gases armazenados for pequena. Como resultado, deve-se garantir a escolha das penalidades de maneira que o otimizador forneça uma estratégia de distribuição de gases que atenda a demanda de energia. Na próxima seção é apresentada a função custo do sistema de distribuição de gases, e também as respectivas restrições operacionais. Na seção 3 é feita a análise de sensibilidade e por fim, na seção 4, é apresentada a conclusão do artigo.

2 Modelo

A infraestrutura destinada à captação, transporte, acumulação e distribuição dos gases siderúrgicos é chamada de sistema de distribuição de combustíveis. Na usina siderúrgica, os gases são acumulados nos gasômetros, que funcionam como pulmões para as redes de distribuição de gás. As centrais termelétricas, por sua vez, são as principais unidades consumidoras dos combustíveis produzidos na usina. A Figura 1 ilustra o sistema de distribuição de combustíveis siderúrgicos.

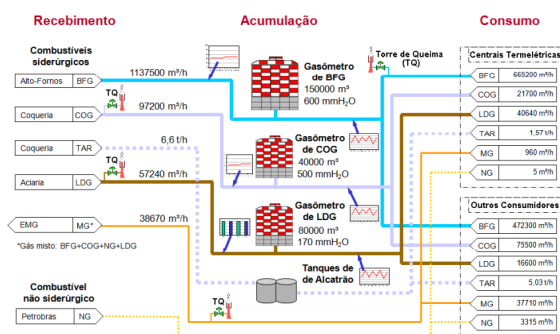


Figura 1: Esquema simplificado da distribuição de combustíveis siderúrgicos

Durante o processo de produção de ferro gusa e aço na usina siderúrgica integrada quatro tipos de combustíveis são gerados: gás de alto forno (*blast furnace gas* - BFG); gás de coqueria (*coke oven gas* - COG); gás de aciaria (*Linz-Donawitz gas* - LDG) e alcatrão (TAR) - óleo viscoso produzido na coqueria. Estes materiais podem ser reaproveitados nas unidades operacionais como combustíveis em diversas atividades. Na figura, os setores industriais que usam estes combustíveis são genericamente referenciados como "outros consumidores". Mas também, estes combustíveis podem ser usados nas centrais termelétricas para geração de vapor e força eletromotriz.

2.1 Função Objetivo

A função objetivo formulada visa reduzir as penalidades devido à operação do nível do gasômetro fora da faixa visada de operação e as referentes às mudanças de estado dos queimadores; reduzir a geração em excesso do vapor de processo e o consumo de alcatrão; além disso, maximizar a geração de energia elétrica. A função (1) expressa os custos totais que devem ser minimizados (termos positivos) e maximizados (termo negativo) e, assim como as restrições que serão apresentadas na sequência, foram reescritas conforme o trabalho (de Oliveira Junior et al., 2016).

As variáveis de decisão envolvidas na otimização da função objetivo são: a vazão de alcatrão para a caldeira i , no período t ($f_{i,t}^{Oil}$); a potência ativa gerada no turbogerador j no período t ($pw_{gen,j,t}$); a vazão de vapor da caldeira i para a usina no período t ($f_{i,t}^{ps}$); a variável de folga que representa o volume que deve ser enviado à torre de queima ($S_{H,t}^G$); a variável de excesso que representa o volume a ser preservado no interior do gasômetro para que seja mantida a pressão de linha no período t ($S_{L,t}^G$); a variável de folga que representa o volume superior à capacidade máxima do gasômetro G no período t ($S_{HH,t}^G$); a variável que contabiliza o volume do gás que se desvia para cima e para baixo do valor visado no período t , respectivamente, ($S_{d+,t}^G$) e ($S_{d-,t}^G$); também a variável de decisão que determina quantos queimadores de um determinado combustível devem ser acesos ou apagados na fornalha da caldeira i no período t ($\Delta N_{i,t}^F$); e, por fim as variáveis binárias que indicam quando 2 e 3 dos queimadores devem ser acesos no período t , na sequência, ($ibn_{2,i,t}^{F+}$) e ($ibn_{3,i,t}^{F+}$), ou apagados, ($ibf_{2,i,t}^{F-}$) e ($ibf_{3,i,t}^{F-}$).

Analisando-se a função objetivo, fica claro que o modelo, discreto e multi-período, o qual é implementado computacionalmente, permite a otimização da função custo (1) através da fixação dos valores que cada uma das variáveis de decisão devem assumir em cada período t determinado, onde P é o número de períodos de simulação. Assim, onde houver o índice t assume-se que este representa os

períodos de simulação ($t = 1, 2, \dots, P$), sendo P o último período de simulação; enquanto que os índices i e j serão usados respectivamente para enumerar as caldeiras ($i = 1, \dots, NB$) e turbinas ($j = 1, \dots, NT$) do sistema, sendo NB o número total de caldeiras e NT o número total de turbinas. Por outro lado, G enumera os gases selecionados ($A = BFG$, $B = COG$ e $C = LDG$), e o índice F indica além dos gases citados, o óleo alcatrão "TAR" indicado pela sigla (Oil).

O primeiro termo da expressão (1) é referente ao custo pelo consumo de alcatrão na fornalha de cada caldeira contabilizado ao fim de cada período. Sendo C^{Oil} o preço do kilograma do alcatrão [R\$/kg]. O segundo termo, por sua vez, é o termo referente à geração de energia elétrica cujo objetivo é ser maximizado. Nesta parcela, C^{Elec} é o preço de venda da energia elétrica gerada, [R\$/kW]. Já o terceiro termo refere-se ao custo pelo uso de vapor de processo na usina, [R\$/kg/h], sendo a constante C^{PS} o custo do vapor.

$$\begin{aligned}
 & C^{Oil} \sum_{\substack{t: 1, \dots, P \\ i: 1, \dots, NB}} f_{i,t}^{Oil} - C^{Elec} \sum_{t: 1, \dots, P} pw_{gen,j,t} \\
 & + C^{PS} \sum_{t: 1, \dots, P} f_{i,t}^{ps} + W_{HH}^G \sum_{\substack{t: 1, \dots, P \\ G: A, B, C}} S_{HH,t}^G \\
 & + W_H^G \sum_{\substack{t: 1, \dots, P \\ G: A, B, C}} S_{H,t}^G + W_L^G \sum_{\substack{t: 1, \dots, P \\ G: A, B, C}} S_{L,t}^G \\
 & + W_{d+}^G \sum_{\substack{t: 1, \dots, P \\ G: A, B, C}} S_{d+,t}^G + W_{d-}^G \sum_{\substack{t: 1, \dots, P \\ G: A, B, C}} S_{d-,t}^G \\
 & + W_{3s}^F \sum_{\substack{t: 1, \dots, P \\ i: 1, \dots, NB \\ F: A, B, C, Oil}} [W_{3s} (ibn_{3,i,t}^{F+} + ibf_{3,i,t}^{F-})] \\
 & + W_{2s}^F \sum_{\substack{t: 1, \dots, P \\ i: 1, \dots, NB \\ F: A, B, C, Oil}} [W_{2s} (ibn_{2,i,t}^{F+} + ibf_{2,i,t}^{F-})] \\
 & + W_{sw}^F \sum_{\substack{t: 1, \dots, P \\ i: 1, \dots, NB \\ F: A, B, C, Oil}} \Delta N_{i,t}^F
 \end{aligned} \quad (1)$$

Os próximos termos: W_{HH}^G , W_H^G e W_L^G em [R\$/m³] são as respectivas penalidades por conta da operação do gasômetro do gás G acima de sua capacidade máxima e do seu limite superior de segurança ou abaixo do seu limite inferior de trabalho. Na sequência, W_{d+}^G e W_{d-}^G são as penalidades pelo desvio acima e abaixo do valor visado de operação do gasômetro e são dados em [R\$/m³].

Os próximos termos W_{3s}^F e W_{2s}^F são as penalidades pela mudança simultânea nos estados de 3 ou 2 queimadores de combustível no período t , na fornalha da caldeira i ; e, são dados em [R\$/3 unidades] e [R\$/2 unidades], respectivamente. Por fim, W_{sw}^F contabiliza a penalidade por se acender ou apagar um queimador de um determinado com-

bustível, seja o óleo ou algum dos gases, em um dado período, W_{sw}^F é dado em [R\$/unidade].

2.2 Restrições do Sistema

2.2.1 Balanço mássico e volumétrico nos gasômetros e caldeiras

A Equação 2 expressa as restrições relacionadas com os níveis dos gasômetros, onde h_t é o volume em [m³] do gasômetro de gás G calculado para o período t , $F_{pge,t}^G$ e $F_{pco,t}^G$ são as vazões previstas para geração e consumo na própria usina, $f_{i,t}^G$ são as vazões do gás G para a fornalha da caldeira i no período t , em [m³/h] e $S_{H,t}^G$ são as parcelas referentes ao volume de gás que é enviado à torre de queima sempre que o volume do gasômetro está acima do volume de segurança máximo.

A Equação (3) modela a vazão total de um gás para fornalha de uma caldeira como o produto da capacidade de queima do queimador, U_i^F em [m³/h], pelo número de queimadores calculados para estarem acesos naquele período, $N_{i,t}^F$. Deste produto é descontado a capacidade do queimador que não está sendo usada, a qual é representada através da variável de folga $sf_{i,t}^F$, em [m³/h]. A Equação 4 por sua vez, é a que representa a manobra de operar o queimador em faixas intermediárias. Nesta equação, C_{opr}^F é a faixa operacional dos queimadores, e pode variar entre 0 e 1.

A Equação (5) expressa o balanço mássico de vapor nas caldeiras. Nela a vazão total do vapor extraído da caldeira é igual à soma da vazão de vapor que é extraída para a usina com a parcela que é destinada à turbina. Estas vazões são representadas na equação pelas variáveis $f_{i,t}^{stm}$, $f_{i,t}^{ps}$ e $f_{i,t}^{tb}$, respectivamente, e são dadas em [kg/h].

$$\begin{aligned}
 h_t^G &= h_{t-1}^G - S_{H,t}^G + (F_{pge,t}^G - F_{pco,t}^G \\
 &- \sum_{i: 1, \dots, NB} f_{i,t}^G) * \Delta t
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$f_{i,t}^F = U_i^F * N_{i,t}^F - sf_{i,t}^F \quad (3)$$

$$sf_{i,t}^F \leq C_{opr}^F * U_i^F * N_{i,t}^F \quad (4)$$

$$f_{i,t}^{stm} = f_{i,t}^{ps} + f_{i,t}^{tb} \quad (5)$$

2.2.2 Balanço energético nas caldeiras e turbinas

A Equação (6) expressa o balanço de energia das caldeiras e a Equação (7) expressa uma condição necessária para a estabilidade da operação do sistema real. A Equação (8), no entanto, corresponde à aplicação da primeira lei da termodinâmica à turbina. Note que somente uma parcela da energia disponível no fluxo de entrada do volume

de controle é usada para gerar potência.

$$C_P^{Oil} * f_{i,t}^{Oil} + C_P^G * \sum_{G: A, B, C} f_{i,t}^G \quad (6)$$

$$= \frac{H_{i,t}^{stm} * f_{i,t}^{stm} - H_{i,t}^{water} * f_{i,t}^{water}}{\eta_i^{NB}} \quad (7)$$

$$pw_{gen_{j,t}} = f_{j,t}^{tb} * (H_{j,t}^{stm} - H_{j,t}^{exh}) * \eta_j^{TB} \quad (8)$$

O processo na prática é submetido a perdas, logo, é usado o conceito de rendimento, onde o fator η_j^{TB} é o coeficiente que corrige os fluxos de energia que não são convertidos em potência de eixo, por conta das perdas na turbina em geral e o fator η_i^{NB} expressa a eficiência térmica da caldeira. A Equação 6 é a expressão da primeira lei da termodinâmica para uma caldeira. Nesta fórmula, C_P^{Oil} é o poder calorífico do alcatrão [kJ/kg] e C_P^G o poder calorífico dos combustíveis gasosos [kJ/m³]. As entalpias do vapor na saída da caldeira e da água de alimentação são respectivamente, $H_{i,t}^{stm}$ e $H_{i,t}^{water}$ e suas unidades são [kJ/kg].

A Equação (7) expressa uma condição imprescindível para manutenção da estabilidade operacional da caldeira: a necessidade de manter a vazão de água de alimentação na caldeira ($f_{i,t}^{water}$) igual   vazão do vapor que sai da caldeira ($f_{i,t}^{water}$), ambas as grandezas são expressas em [kg/h]. Na Equação (8) considera-se que a vazão de vapor na entrada é igual   vazão na saída da turbina, ou seja, ambas as vazões representadas por $f_{j,t}^{tb}$ cuja unidade   [kg/h]. Aqui a real potência mecânica disponível no eixo do turbogerador   função da vazão de vapor na turbina, da entalpia do vapor na entrada ($H_{j,t}^{stm}$) e na saída da turbina ($H_{j,t}^{exh}$).

2.2.3 Limites dos gasômetros

As equações que governam as restrições operacionais dos gasômetros são apresentadas a seguir. Define-se GH_{HH}^G , GH_H^G , GH_N^G , GH_{LL}^G e GH_L^G , respectivamente, a capacidade máxima do gasômetro G, o volume máximo crítico, o volume normal desejável, o volume nominal mínimo e o volume mínimo crítico do gás G. Nas expressões abaixo, as variáveis $s_{HH,t}^G$ e $s_{H,t}^G$ são as variáveis de folga que representam o volume de gás acima da capacidade máxima do gasômetro e o volume a ser enviado à torre de queima. Enquanto que $s_{L,t}^G$ são as variáveis de excesso que contabilizam o volume a ser preservado no gasômetro acima do valor mínimo crítico. As respectivas variáveis de folga e excesso para contabilizar o desvio do volume do gasômetro acima e abaixo do valor visado de operação são respectivamente $s_{d+,t}^G$ e $s_{d-,t}^G$. Todas essas medidas volumétricas são dadas em [m³].

$$GH_{LL}^G \leq h_t^G \leq GH_{HH}^G + s_{HH,t}^G \quad (9)$$

$$GH_L^G - s_{L,t}^G \leq h_t^G \leq GH_H^G + s_{H,t}^G \quad (10)$$

$$h_t^G - GH_N^G = s_{d+,t}^G - s_{d-,t}^G \quad (11)$$

$$s_{HH,t}^G, s_{H,t}^G, s_{L,t}^G, s_{d+,t}^G, s_{d-,t}^G \geq 0 \quad (12)$$

2.2.4 Prescrição da demanda de eletricidade e vapor

Considera-se que as demandas de eletricidade e vapor para uso nos processos industriais são valores conhecidos *  priori*. A Equação 13 estabelece que o total de vapor gerado nas caldeiras durante cada período deve ser maior que a demanda da usina, F_t^{SD} . A Equação 14 estabelece que o total de energia elétrica gerada pelos turbogeradores deve ser maior que a energia demandada na usina, PD_t^{SD} . A potência ativa elétrica é dada em [kW] e a vazão de vapor em [kg/h].

$$\sum_{i: 1, \dots, NB} f_{i,t}^{ps} \geq F_t^{SD} \quad (13)$$

$$\sum_{i: 1, \dots, TB} pw_{gen_{i,t}} \geq PD_t^{SD} \quad (14)$$

2.2.5 Restrições diversas sobre equipamentos nas centrais termelétricas

Outras restrições são necessárias para operação segura das termelétricas: limitação da vazão de combustível nas fornalhas das caldeiras, limitação da geração de vapor nas caldeiras e na capacidade de admissão de vapor pelos turbogeradores.

$$F_{i,t}^{MinFuel} \leq f_{i,t}^{Fuel} \leq F_{i,t}^{MaxFuel} \quad (15)$$

$$F_{i,t}^{Minstm} \leq f_{i,t}^{stm} \leq F_{i,t}^{Maxstm} \quad (16)$$

$$F_{j,t}^{Minth} \leq f_{j,t}^{th} \leq F_{j,t}^{Maxth} \quad (17)$$

2.2.6 Equações lógicas e auxiliares

As equações abaixo são responsáveis por estabelecer a conexão entre as diversas restrições e a função objetivo, manipulando de maneira metódica as relações do sistema através do acendimento ou apagamento dos queimadores de forma a fazer com que a permutação ou não dos combustíveis possa manter a estabilidade do sistema como um todo.

$$\Delta N_{i,t}^F = sw_{i,t}^{F+} + sw_{i,t}^{F-} \quad (18)$$

$$N_{i,t}^F - N_{i,t-1}^F = sw_{i,t}^{F+} - sw_{i,t}^{F-} \quad (19)$$

$$n_{i,0}^F = N_{i,0}^F \quad (20)$$

$$sw_{i,t}^{F+} = ibn_{1,i,t}^{F+} + ibn_{2,i,t}^{F+} + ibn_{3,i,t}^{F+} \quad (21)$$

$$sw_{i,t}^{F-} = ibf_{1,i,t}^{F-} + ibf_{2,i,t}^{F-} + ibf_{3,i,t}^{F-} \quad (22)$$

$$ibn_{1,i,t}^{F+} \geq ibn_{2,i,t}^{F+} \geq ibn_{3,i,t}^{F+} \quad (23)$$

$$ibf_{1,i,t}^{F-} \geq ibf_{2,i,t}^{F-} \geq ibf_{3,i,t}^{F-} \quad (24)$$

$$sw_{i,t}^{F+}, sw_{i,t}^{F-}, \Delta N_{i,t}^F \text{ e } N_{i,t}^F \in \mathbb{Z}_+ \quad (25)$$

$$ibn_{1,i,t}^{F+}, ibn_{2,i,t}^{F+} e ibn_{3,i,t}^{F+} \in \{0, 1\} \quad (26)$$

$$ibf_{1,i,t}^{F-}, ibf_{2,i,t}^{F-} e ibf_{3,i,t}^{F-} \in \{0, 1\} \quad (27)$$

As Equações (23) e (24) possibilitam o acendimento ou apagamento gradual dos queimadores através das restrições estabelecidas sobre as variáveis binárias. A Equação (21) contabiliza quantos queimadores do combustível selecionado devem acender ($sw_{i,t}^{F+}$) e a Equação 22 contabiliza quantos queimadores devem apagar ($sw_{i,t}^{F-}$). Na Equação (18), o termo $\Delta N_{i,t}^{F+}$ representa a soma de todos os queimadores acesos ou apagados em uma caldeira. A lógica que envolve a operação de acender ou apagar um queimador é feita sobretudo pela Equação (19). A Equação (20) é útil no início do algoritmo. As demais restrições apresentadas servem para declarar a natureza das variáveis de decisão envolvidas. A Equação (25) corresponde às variáveis que são inteiras e as equações (26) e (27) para as binárias. As demais variáveis apresentadas são reais e não-negativas. O Algoritmo *Branch and Bound* foi implementado no *Matlab* para resolver o problema de otimização da função custo (1), permitindo assim realizar simulações com dados reais de produção e consumo de gases e obter a análise de sensibilidade descrita na próxima seção.

3 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade tem por objetivo determinar o efeito que a variação de algum fator ou grupo de fatores pode influenciar no comportamento geral do sistema sob análise. Pode-se concluir que a maior parte dos termos relativos à função custo (1) está relacionada com a operação do sistema e, portanto, responsável por ditar o comportamento dinâmico do mesmo e nem sempre relacionada diretamente aos custos efetivamente financeiros. A exceção fica por conta do preço de venda da energia, do custo pela geração de vapor de processo e do custo pelo uso de alcatrão. Deste modo, justifica-se a importância deste trabalho, pois além de estudar o efeito dos termos relacionados aos custos financeiros, avalia o impacto provocado no sistema por alterações das penalidades que são intangíveis sob o aspecto econômico, como as penalidades relacionadas à comutação dos queimadores e ao nível do gasômetro. Como resultado, é possível ajustar apropriadamente os pesos operacionais para que o otimizador garanta uma operação estável entre produção e consumo.

Na sequência serão apresentados três ensaios nos quais serão observados os efeitos provocados por alterações no preço do alcatrão, nas penalidades de comutação dos queimadores e nos pesos que governam as operações dos gasômetros. Em todos os ensaios foi considerado o intervalo de simulação, Δt é 1/5 [h], o preço de venda da energia

elétrica, C^{Elec} , é 1 [R\$/kW] e o custo pelo uso do vapor de processo, C^{PS} , é 1 [R\$/kg/h.

3.1 Resultados para o primeiro ensaio

No Ensaio 1, o parâmetro C^{Oil} foi alterado no intervalo $[10^{-2} \ 10^5]$ que engloba uma larga escala de alterações. Os demais pesos, por ora, fixados de modo empírico, são: para as penalidades nos queimadores: $W_{sw}^F = 10$, $W_{2s}^F = 20$ e $W_{3s}^F = 30$; e para as penalidades nos gasômetros: $W_{HH}^G = 10$, W_H^G e $W_L^G = 0,1$, e W_{d+}^G e $W_{d-}^G = 0,001$. A Figura 2 exibe os principais resultados que essas variações provocam sobre: o valor da função objetivo (Figura 2(a)), os gastos pelo consumo de alcatrão nas termelétricas (Figura 2(b)), os custos operacionais dos gasômetros (Figura 2(c)) e os custos de operação dos queimadores (na Figura 2(d)).

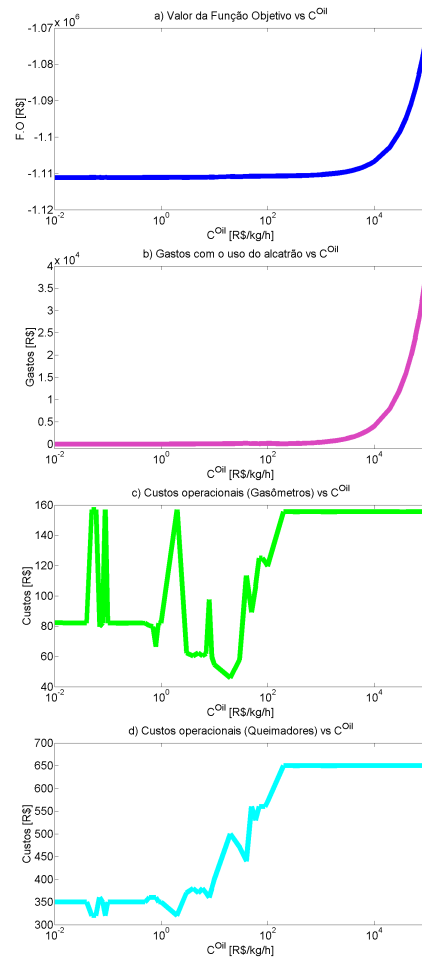


Figura 2: Primeiro ensaio

A observação conjunta dos gráficos da Figura 2 confirma que o preço do alcatrão produz um impacto direto na função objetivo, especialmente, após $C^{Oil} \geq 200$ [R\$/kg/s], pois, conforme as Figuras 2(c) e (d), a partir deste ponto não houve alterações nas curvas dos custos operacionais dos gasômetros e dos queimadores, logo toda a influência sobre o valor da função objetivo apresentada

na Figura 2(a) é causada pelo gasto com o alcatrão, como apresentado na Figura 2(b). Com o auxílio da Figura 3 é possível verificar que desde que o preço do alcatrão é superior a 200 [R\$/kg/s], foi consumido apenas o volume necessário para estabilidade operacional das termelétricas, isto é, 1,44 toneladas. Mas, quando o preço é menor que 200 [R\$/kg/s], ou seja, quando não afeta significativamente a F.O, o sistema faz uso de modo inversamente proporcional ao preço. Sendo assim, conclui-se que o preço do alcatrão é importantíssimo, pois quando é alto impacta visivelmente o comportamento da função objetivo e quando baixo, o sistema é bem sensível e faz uso em quantidades consideráveis, o que pode ser justificado, sobretudo em razão do seu alto poder calorífico.

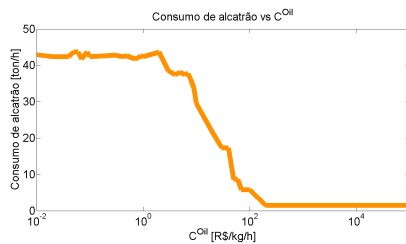


Figura 3: Consumo de alcatrão

A Figura 3 relaciona o consumo de alcatrão nas centrais termelétricas e o custo do alcatrão. Observa-se três regiões distintas, na primeira região C^{Oil} varia entre $[10^{-2} 10^0]$ e ocorre o maior consumo de alcatrão para geração de energia, na segunda região C^{Oil} varia entre $[10^0 10^2]$ e ocorre uma redução gradual e significativa no consumo de alcatrão e na terceira região, onde C^{Oil} varia entre $[10^2 10^5]$, o consumo do alcatrão é mínimo e constante. Sob esta perspectiva, sabe-se que à proporção que o consumo de alcatrão cai, ocorre a substituição deste combustível por outro, justificando o crescimento dos custos operacionais dos queimadores (veja a Fig. 2.d); esse resultado é bem visível no intervalo delimitado pela segunda região.

3.2 Resultados para o segundo ensaio

Neste ensaio foi usado o valor de mercado do alcatrão, ou seja, C^{Oil} é 2.520 [R\$/kg/s]. As penalidades nos gasômetros foram as mesmas do ensaio 1. Como as Equações (23) e (24) possibilitam que o acendimento ou apagamento dos queimadores ocorram de maneira suave e gradual, é aceitável fazer a análise de sensibilidade sobre os termos que governam a comutação dos queimadores, em bloco, ou seja, alterando-se conjunta e simultaneamente cada um destes pesos, para que não ocorra nenhuma situação absurda. Neste segundo ensaio, as penalidades para comutação dos queimadores foram alterados no intervalo de $[10^{-3} 10^4]$, ou seja, W_{sw}^{Fuel} variou de 0,001 até 10.000

[R\$/unidade], simultaneamente W_{2s}^{Fuel} variou de 0,002 até 20.000 [R\$/2 unidades] e W_{3s}^{Fuel} variou de 0,003 até 30.000 [R\$/3 unidades]. Os gráficos da Figura 4 apresentam os resultados da simulação. A Figura 4(a) revela uma relação entre a

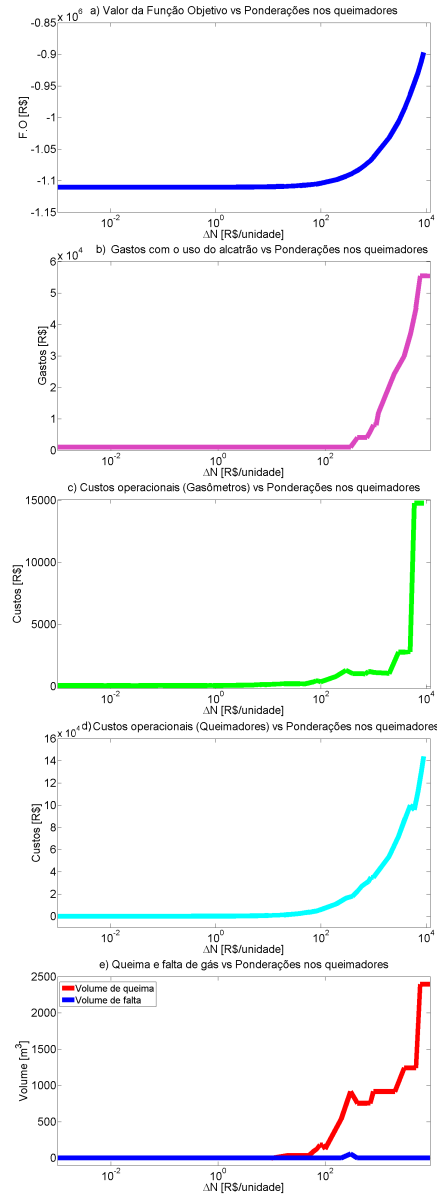


Figura 4: Segundo ensaio

função objetivo e as penalidades operacionais dos queimadores e a Figura 4(d) apresenta a relação entre os custos operacionais totais devido a operação dos queimadores e as penalidades de comutação dos mesmos. Nota-se facilmente a correlação entre estas duas curvas, principalmente, quando o custo operacional relacionado com a operação dos queimadores é responsável pelo aumento da função objetivo. A Figura 4(c), por sua vez, exibe a relação entre os custos operacionais dos gasômetros e as ponderações sobre a operação dos queimadores. Observa-se que o aumento do custo operacional dos queimadores condiciona o sistema a ter um mínimo de comutações, o que pode afe-

tar os gasômetros de tal forma que algum dentre eles pode ser forçado a queimar seu gás através das torres de queima e algum outro operar em regiões críticas baixas, onde a pressão de linha pode cair e provocar riscos operacionais ao sistema. A Figura 4(e) exemplifica situações onde esses resultados ocorrem e a Figura 4(c) contabiliza os custos financeiros para essas situações.

Uma das consequências pelo mal ajuste dos pesos que governam o acendimento e apagamento dos queimadores de combustíveis nas caldeiras das centrais de cogeração, além do desperdício de combustível através da queima de gases nas torres de proteção dos gasômetros, é o uso indiscriminado de alcatrão. Como pode ser visto na Figura 4(b), quando o preço pela comutação dos queimadores supera 300 R\$, então inicia-se o uso de alcatrão em uma taxa crescente à proporção que aumenta-se este custo, isso ocorre, pois o aumento deste custo provocou uma rigidez na operação de distribuição de gases para a cogeração, causando a queima de gases e como consequência a necessidade de fazer uso de alcatrão, conforme pode ser confirmado através da Figura 4(f).

De modo geral, confirma-se que a operação do sistema é sensível às ponderações sobre as comutações dos queimadores, isso porque os queimadores são variáveis de controle que são imprescindíveis para controle do uso dos combustíveis siderúrgicos nas centrais termoelétricas e, portanto para distribuição de combustíveis siderúrgicos. Nota-se, por exemplo, que, para valores superiores à 10 R\$ por comutação, o sistema começa a ter alguma queima ou falta de gás (ver Figuras 4(c) e (e)), para valores superiores à 300 R\$ por comutação, o sistema começa a fazer uso crescente de alcatrão (ver Figuras 4(b) e (f)) e para valores superiores à 100 R\$ por comutação, este custo operacional começa a ter um impacto considerável na função objetivo (ver Figuras 4(a) e (d)).

3.3 Resultados para o terceiro ensaio

Neste ensaio é feito a análise da sensibilidade sobre as penalidades custos de operação dos gasômetros. Foram consideradas penalidades dos comutadores dos queimadores iguais ao do ensaio 1, e o preço do alcatrão foi o mesmo do ensaio 2. De modo a facilitar a análise e por razões técnicas, a análise de sensibilidade sobre as ponderações dos gasômetros foi feita em bloco, ou seja, os termos W_{HH}^G , W_H^G , W_L^G , W_{d+}^G e W_{d-}^G foram alterados em conjunto. Na simulação foi estabelecida, por exemplo, que o custo pela queima ou pela falta do gás são iguais (respectivamente W_H^G e W_L^G), e essas penalidades são cem vezes superiores às penalidades sobre os desvios para cima ou para baixo do valor visado de operação do gasômetro, e são cem vezes inferiores à penalidade pela operação acima da capacidade máxima do gasômetro (W_{HH}^G). Esse vínculo entre

essas variáveis é fundamental, pois é preciso por um lado permitir que ocorra uma flexibilidade do gasômetro para que o mesmo possa absorver as oscilações causadas pelo desbalanço entre os perfis de geração e consumo dos gases. Por outro lado é preciso que seja, sempre que possível, evitada a queima ou a falta de gás. Também é obrigatório que o sistema opere em segurança, ou seja, que a capacidade máxima do gasômetro não exceda o seu limite, em outras palavras, é preciso que $S_{HH,t}^G$ seja igual a zero.

No terceiro ensaio, o peso W_H^G foi alterado no intervalo de $[10^{-4} \ 10^3]$, isto é, W_H^G variou de 0,0001 $[R\$/m^3]$ até 1.000 $[R\$/m^3]$. Concomitantemente o peso W_L^G foi alterado no mesmo intervalo e os demais pesos foram modificados de tal sorte que W_{d+}^G e W_{d-}^G fossem cem vezes menores que W_H^G e W_{HH}^G cem vezes maior que o valor corrente de W_H^G . Os efeitos que essas alterações provocaram no sistema podem ser vistos nos gráficos apresentados na Figura 5.

Analisando-se a Figura 5, descobre-se que há, naturalmente, uma correlação, desta vez, entre Figura 5(a) e (c), como esperado. Na Figura 5(a) é expresso a relação entre o valor da função objetivo e as ponderações nos gasômetros. Já a Figura 5(c) exibe a relação entre os custos operacionais dos gasômetros e o valor das ponderações que atuam sobre as operações deste equipamento. Observa-se que à proporção que os custos de operação tornam-se relevantes o impacto na função objetivo também torna-se relevante.

Os gráficos das Figuras 5(b) e (e) evidenciam que para valores inadequados nas ponderações dos gasômetros, podem ser criadas condições nas quais são permitidas operações caracteristicamente indesejáveis, como excursões excessivas dos níveis dos gasômetros (quando o nível do gasômetro varia muito, pode, por exemplo, causar a falta de algum gás e queima de outro gás nas torres) ou a rigidez dos níveis dos gasômetros (quando o gasômetro fica com nível estático em torno do valor visado de operação, mas, por exemplo, com consumo excessivo de alcatrão). As duas situações foram encontradas, sendo a primeira delas quando o peso W_H^G era menor que 0,05 $[R\$/m^3]$ de acordo com a Figura 5(e) e a segunda situação quando o peso W_H^G era maior que 10 $[R\$/m^3]$ de acordo com a Figura 5(b).

Constata-se através da Figura 5(c), que a partir de $W_H^G > 5$ o custo operacional do gasômetro aumenta, e consequentemente os custos de operação dos queimadores começam a cair (vide Figura 5(d)) e aumenta-se o consumo de alcatrão (Figura 5(b)). Quando a penalidade do gasômetro é maior que 100, observe na Figura 5(d) que os custos de operação dos queimadores ficam fixos, ou seja, os queimadores não são mais acendidos e nem apagados e, por outro lado, gasta-se mais com o alcatrão, a fim de garantir a demanda de gás e energia

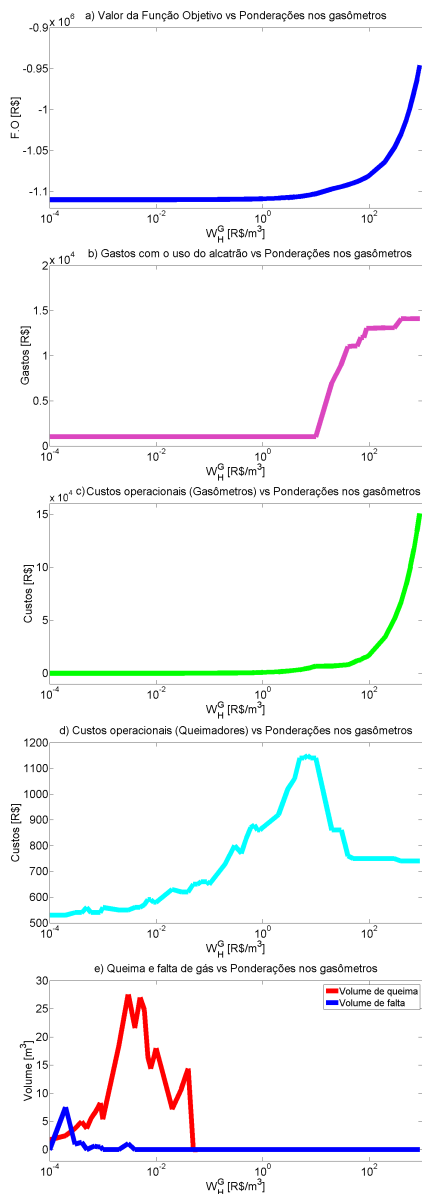


Figura 5: Terceiro ensaio

elétrica conforme observado na Figura 5(b).

Os resultados apontam que o sistema formulado é sensível aos ajustes dos valores das ponderações sobre o funcionamento do gasômetro, desta forma, é necessário que os ajustes destes valores sejam feitos de modo bastante criterioso, pois um valor suficientemente grande pode levar a sérios prejuízos motivados pela substituição indevida de gás por alcatrão nas centrais termoeletricas. Por outro lado, os valores bem pequenos podem levar à queima indevida de gás ou a falta deste recurso, o que pode ocasionar desequilíbrios indesejáveis no controle de pressão do sistema de distribuição de gases. Observa-se que a função objetivo também é afetada pela sintonia destes parâmetros, principalmente, quando o custo pelo uso do alcatrão começa a ser contabilizado.

4 Conclusões

Realizar a análise de sensibilidade do modelo proposto para otimização da distribuição de gases é fundamental para sua aplicação numa planta real, pois é útil para compreensão do funcionamento do sistema e, portanto para validação do modelo e é conveniente para entendimento do seu desempenho perante oscilações de seus parâmetros. Também, porque permite estimar valores de custos intangíveis do ponto de vista financeiro, os quais são difíceis de serem especificados de modo empírico. Neste caso, foi visto que é possível escolher esses valores em intervalos que permitem o sistema operar de modo seguro, econômico, coerente e estável. Além disso, com respeito ao alcatrão foram analisadas situações nas quais seu uso é lucrativo e quando seu uso deve ser restringido.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro e à ArcelorMittal Tubarão pelo auxílio técnico necessário para compreensão dos processos e pelos materiais e informações concedidas para realização deste estudo.

Referências

- Akimoto, K., Sannomiya, N., Nishikawa, Y. and Tsuda, T. (1991). An optimal gas supply for a power plant using a mixed integer programming model, *Automatica* **27**(3): 513–518.
- de Oliveira Junior, V. B., Pena, J. G. C. and Salles, J. L. F. (2016). An improved plant-wide multiperiod optimization model of a byproduct supply system in the iron and steel-making process, *Applied energy* **164**: 462–474–21.
- Hillier, F. S. and Lieberman, G. J. (2013). *Introdução à Pesquisa Operacional*, MCGRAW-HILL: Brasil.
- Hui, C.-W. and Natori, Y. (1996). An industrial applications using mixed integer programming technique: A multi-period utility system model, *Computers and Chemical Engineering* **20**: 1577–1582.
- Kim, J. H., Yi, H. S. and Han, C. (2003). A novel milp model for plantwide multiperiod optimization of byproduct gas supply system in the iron- and steel-making process, *Chemical Engineering Research Design* **81**(8): 1015–1025.
- Sinha, G. P., Chandrasekaran, B. S., Mitter, N., Dutta, G., Singh, S. B., Choudhury, A. R. and Roy, P. N. (1995). Strategic and operational management with optimization at tata steel, *Interfaces* **25**: 6–19.