

OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE GASES NA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA

João Gustavo Coelho Pena

Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória - ES, Edifício CT-II, CEP 29075-910
jgeng_autcon@yahoo.com.br

José Leandro Félix Salles

Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória - ES, Edifício CT-II, CEP 29075-910
jleandro@ele.ufes.br

Valter Barbosa de Oliveira Junior

ArcelorMittal Brasil S/A
Av. Brig. Eduardo Gomes, 930, Jardim Limoeiro, Serra - ES, CEP 29163-970
valter.oliveira@arcelormittal.com.br

RESUMO

Nos processos para produção de aço em uma usina siderúrgica integrada são produzidos gases que normalmente podem ser aproveitados como combustíveis pela própria planta. Entretanto, gerenciar a distribuição destes gases combustíveis é uma atividade complexa, principalmente por causa dos desequilíbrios entre os perfis de produção e consumo dos gases, das limitações de capacidade dos acumuladores de gases e suas restrições operacionais, além das restrições para aproveitamento energético nas centrais termelétricas. O objetivo deste trabalho é usar a *programação linear inteira mista* (MILP) como uma formulação do problema da distribuição de gases na usina siderúrgica integrada; e, para solucionar a MILP usar um algoritmo que foi desenvolvido usando a *técnica Branch and bound* em conjunto com o *método Simplex*. Por fim, estudos de casos confirmam que o modelo é capaz de encontrar uma solução ótima em termo da redução da função de custo formulada.

PALAVRAS CHAVE. Indústria do ferro e do aço, Utilidades, Distribuição de Combustíveis, Otimização.

Área principal. PO na área de Energia, PO na Indústria.

ABSTRACT

The processes for the production of steel in an integrated steel mill gases are produced which usually can be availed as fuel for the plant itself. However, managing the distribution of combustible gases is a complex activity, mainly because of the imbalances between production and consumption profiles of gases, the capacity constraints of gas accumulators and their operational constraints, and the constraints to energy use in power plants. The objective of this work is to use *mixed integer linear programming* (MILP) as a formulation of the problem of the distribution of gases in the integrated steel mill, and to solve the formulated MILP make use of the algorithm that was developed using the *Branch and bound technique* together with the *Simplex method*. Finally, the case studies confirm that the model is able to find an optimal solution in terms of the reduction of the cost function formulated.

KEYWORDS. Iron and steel industry. Utilities. Byproduct gas distribution. Optimization.

Main area. OR in Energy. OR in Industry

1. Introdução

A atividade siderúrgica normalmente é co-relacionada ao desenvolvimento econômico de um país, isto deriva de sua importância para a construção de infra-estrutura e produção de equipamentos para outros setores da economia. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) vinculado ao Ministério de Minas e Energia (MME), a siderurgia, entre os diversos segmentos industriais, é o segundo maior consumidor de energia e o principal emissor de CO_2 no mundo. “Em 2005, respondeu por cerca de 20% do uso de energia na indústria e por 30% das emissões”, EPE (2009). Além disso, os demais custos dos materiais e equipamentos utilizados na produção do aço são elevados, principalmente nas grandes usinas integradas, que incluem coqueria, sinterização ou pelotização, alto-forno e aciaria.

Por este motivo, para este setor, investir em eficiência energética e na redução das emissões é uma questão mais que estratégica, é primordial. Entre as tecnologias que corroboram para melhoria da eficiência do setor, estão a cogeração de energia, a otimização do ciclo de vida dos materiais, o uso de biomassa e até mesmo o sequestro de carbono. Neste contexto, a cogeração de eletricidade no setor siderúrgico a partir dos gases de processo é uma prática tradicional do setor. Atualmente, segundo a EPE (2009), “a capacidade instalada de cogeração do setor siderúrgico, no Brasil, situa-se em torno de 920 MW, o que admitindo-se um fator de capacidade médio de 85%, permitiria gerar um montante de eletricidade um pouco superior a 6 TWh por ano”.

Os quatro tipos de combustíveis gerados durante o processo de produção de ferro gusa e aço em uma usina siderúrgica integrada são: gás de Alto Forno (*Blast Furnace Gas* - BFG); gás de Coqueria (*Coke Oven Gas* - COG); gás de Aciaria (*Linz-Donawitz Gas* - LDG, também conhecido por *Basic Oxygen Furnace Gas* - BOFG); e Alcatrão (TAR) - óleo viscoso produzido na Coqueria. Estes combustíveis podem ser reaproveitados nas unidades operacionais da própria usina, por exemplo, para uso em fornos industriais, geração de vapor em caldeiras e geração de energia elétrica. Entretanto, o gerenciamento da produção e do consumo de combustíveis em uma usina siderúrgica passa pela necessidade de superação das seguintes dificuldades: diferentes características entre os perfis de produção e consumo de combustíveis; capacidade limitada dos acumuladores de gases (gasômetros); restrições para aproveitamento dos combustíveis produzidos, dos quais uma parte é consumida pelas próprias unidades operacionais da usina e o montante excedente é destinado à geração de energia elétrica em centrais termelétricas.

Toda infra-estrutura destinada à captação, transporte, acumulação, estocagem dos combustíveis e distribuição dos mesmos às unidades consumidoras, de uma forma ampla, é chamada de sistema de distribuição de combustíveis. Neste sistema se incluem as redes de dutos, válvulas, atuadores elétricos ou pneumáticos, instrumentos de medição, sistemas de controle digitais ou analógicos e as estações de operação. Na usina siderúrgica, os gases são acumulados em equipamentos, comumente conhecidos como gasômetros, os quais são grandes recipientes, que através do uso da pressão proveniente do peso de um pistão móvel, têm como finalidade armazenar e compensar as diferenças entre os volumes instantâneos dos gases de alto forno, coqueria e de aciaria. Funcionam como pulmões para as redes de distribuição de gás.

As centrais termelétricas são as principais unidades consumidoras dos combustíveis produzidos na usina, pode-se simplificar a análise da distribuição de combustíveis siderúrgicos considerando apenas dois tipos de consumo: (a) Consumo não controlado pelo operador do sistema de distribuição de combustíveis: ajustado pelos diversos consumidores da usina, possuindo um comportamento pseudo-aleatório, que é dependente do plano de produção de gusa (ferro fundido) e aço; (b) Consumo controlado pelo operador do sistema de distribuição de combustíveis: ajustado pelos operadores das centrais termelétricas. A **figura 1** a seguir ilustra esta configuração, onde é apresentado um esquema simplificado do processo.

O problema de distribuição de combustíveis siderúrgicos engloba a necessidade de minimizar os desequilíbrios entre a geração e consumo dos mesmos e maximizar a eficiência do aproveitamento energético, mantendo-se os níveis dos gasômetros em uma faixa segura de trabalho, para que sempre haja disponibilidade de combustível às unidades consumidoras e seja evitada a queima direta de gases nas torres de queima, diminuindo-se as perdas.

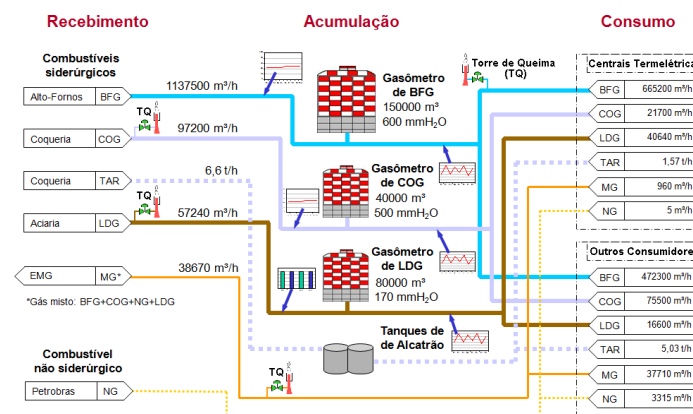


Figura 1. Esquema simplificado da distribuição de combustíveis siderúrgicos

A maior oferta de sistemas de controle digital e avanços na área de informática a partir da década de 90 tornaram disponíveis os meios para a aquisição e análise de dados de forma rápida e confiável. Neste cenário, Akimoto et al. (1991) implantaram em 1988, em uma usina siderúrgica japonesa, o primeiro modelo de programação linear inteira mista (MILP) para solução desse tipo de problema. O software desenvolvido na época funcionava como um guia para os operadores do sistema de distribuição de combustíveis, determinando a solução ótima para economia de energia. Nesta abordagem, um maior enfoque foi dado ao controle dos níveis dos gasômetros por meio da manutenção do equilíbrio entre o balanço de massa da planta e a minimização da queima de óleo combustível. Melhorias na solução proposta por Akimoto et al. (1991) foram realizadas por Kim et al. (2002, 2003), que mantiveram a estrutura do modelo MILP, mas estabeleceram valores diferenciados para o consumo em cada central termelétrica, de acordo com a eficiência de cada uma, para minimização do custo total.

Depois, Kong et al. (2010) aprimoraram a abordagem feita por Kim et al. (2002, 2003), e obtiveram uma redução de 7,5% no custo total, considerando o mesmo estudo de caso realizado por de Kim et al. (2002, 2003). Estudo similar também é reportado por Tao Du et al. (2011) para maximização da eficiência energética de uma usina siderúrgica. Zhang et al. (2011), propuseram uma nova abordagem para solução do problema da distribuição de combustíveis siderúrgicos, tendo como base o método de aprendizagem de máquina (machine learning method). Para melhorar a exatidão da predição do modelo, um novo algoritmo de otimização híbrido, envolvendo gradiente descendente e algoritmo genético quântico (QGA) foi proposto para sintonizar os parâmetros do modelo, determinando, dessa maneira, os ajustes ótimos das quantidades de gás que asseguram os níveis dos gasômetros dentro da zona normal de operação.

Por meio do estudo destas várias abordagens, foi possível identificar algumas oportunidades de melhorias em relação aos modelos propostos por Kim et al. (2002, 2003) e Kong et al. (2010). Dentre elas, destacam-se a inclusão de faixas de variação de vazão para os queimadores das fornalhas das caldeiras, aplicação da energia útil ao invés da energia potencial para determinação da potência gerada e a imposição de restrições adicionais para manutenção da estabilidade do processo. O método aplicado, a modelagem (formulação matemática) do sistema, estudos de casos e os resultados obtidos são apresentados nas seções a seguir.

2. Método

Para otimizar o modelo do sistema para distribuição de combustíveis cuja formulação matemática é feita através da programação linear inteira mista, foi desenvolvido um algoritmo usando a técnica *Branch and Bound* em conjunto com o método *Simplex*. Este algoritmo é útil para solucionar problemas lineares nos quais as variáveis de decisão são mistas, ou seja, as variáveis que determinam o valor da função objetivo são inteiras binárias ou não e reais. Este algoritmo foi elaborado no ambiente de programação do MatLab®. Sua estrutura consiste em usar o método *Simplex* como subrotina do algoritmo que soluciona a programação inteira e binária, o *Branch and Bound*.

A principal vantagem no desenvolvimento do algoritmo (ao invés de utilizar um software comercial) é que o mesmo pode ser implantado em qualquer linguagem de programação, salvo as modificações necessárias para adequar o algoritmo às particularidades de cada linguagem. Como resultado, ao invés do modelo ter sido estabelecido usando pacotes típicos dos principais softwares comerciais de programação operacional, o mesmo foi introduzido no programa através do próprio ambiente em que o algoritmo foi desenvolvido. E, portanto, também pode ser facilmente adaptado a qualquer outro ambiente de programação.

A propósito da formulação MILP, pode ser dito que esta formulação possui como vantagem o fato de poder ser solucionada através do algoritmo proposto. Isso porque, o algoritmo *Simplex*, segundo Wolsey (1998), mostra ser um algoritmo robusto e eficiente. Também de acordo com Wolsey (1998) a técnica *Branch and Bound*, que usa a filosofia do “dividir para conquistar” é bem sucedida no uso da enumeração parcial para solucionar problemas onde a enumeração completa pode ser inviável. Como consequência, esse algoritmo usa árvores de enumeração como estruturas para representar as soluções parciais obtidas. Logo, esta técnica permite reescrever um problema grande em uma série de problemas menores e, mais fáceis de serem resolvidos.

3. Modelagem do sistema

A função objetivo formulada visa reduzir o consumo de alcatrão, reduzir as penalidades devido à operação do nível do gasômetro fora da faixa visada de operação e as penalidades referentes às mudanças de estado dos queimadores, reduzir a geração em excesso do vapor de processo; além disso, visa maximizar a geração de energia elétrica. A **equação 1** expressa esses objetivos e foi reescrita à partir do trabalho de Kim et al. (2002, 2003). Note que os termos relativos ao vapor de processo implicam em consumo de energia e, portanto, também pode ser considerado como uma variável que possui custo a ser minimizado.

$$\begin{aligned}
 \text{Min}_{N_{i,t}^{Oil}, f_{i,t}^{Oil}} \left\{ C^{Oil} \sum_{\substack{t:1,\dots,P \\ i:1,\dots,NB}} f_{i,t}^{Oil} + W_{HH}^G \sum_{\substack{t:1,\dots,P \\ G:A,B}} s_{HH,t}^G + W_H^G \sum_{\substack{t:1,\dots,P \\ G:A,B}} s_{H,t}^G + W_L^G \sum_{\substack{t:1,\dots,P \\ G:A,B}} s_{L,t}^G + W_d^{G^+} \sum_{\substack{t:1,\dots,P \\ G:A,B}} s_{d,t}^{G^+} \right. \\
 + W_d^{G^-} \sum_{\substack{t:1,\dots,P \\ G:A,B}} s_{d,t}^{G^-} + W_{sw}^G \sum_{\substack{t:1,\dots,P \\ i:1,\dots,NB \\ G:A,B}} \Delta N_{i,t}^G + W_{2s}^G \sum_{\substack{t:1,\dots,P \\ i:1,\dots,NB \\ G:A,B}} [W_{2s}(ibn_{2,i,t}^{G^+} + ibf_{2,i,t}^{G^-})] \\
 \left. + W_{3s}^G \sum_{\substack{t:1,\dots,P \\ i:1,\dots,NB \\ G:A,B}} [W_{3s}(ibn_{3,i,t}^{G^+} + ibf_{3,i,t}^{G^-})] + W_t^{FSD} \sum_{t:1,\dots,P} f_{i,t}^{SD} - \sum_{t:1,\dots,P} C^{elec}(pw_{pwgen,t}) \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Restrições

- a) Balanço de massa e de volume dos gasômetros e das caldeiras:

$$h_t^G = h_{t-1}^G + (F_{predgen,i,t}^G - F_{predconist,i,t}^G - F_{conpp,i,t}^G) * \Delta t \quad (2)$$

$$F_{conpp,i,t}^G = \sum_{\substack{0 \leq t \leq P \\ i:1,\dots,NB \\ G:A,B}} f_{i,t}^G \quad (3)$$

$$f_{i,t}^G = U_i^G * N_{i,t}^G - sf_{i,t}^G \quad (4)$$

$$sf_{i,t}^G \leq 0.3 * U_i^G * N_{i,t}^G \quad (5)$$

$$f_{i,t}^{stm} = f_{i,t}^{ps} + f_{i,t}^{tb} \quad (6)$$

Nos artigos anteriores, o consumo previsto de combustíveis na usina é considerado fixo. Um melhor entendimento do problema motivou a reescrita das **equações 2 e 3** que incorpora a idéia de que este consumo pode ser variável. Nos processos industriais, utiliza-se o queimador como dispositivo para a combustão. Este dispositivo mistura o combustível e o ar de combustão em proporções dentro de uma faixa de inflamabilidade, o que possibilita a ignição e manutenção permanente da combustão. Segundo Bega (1989), a curva de operação do queimador fornecida pelo fabricante apresenta regiões adequadas (faixas intermediárias) de operação que devem ser respeitadas. Neste trabalho, considerou-se que os queimadores de gases são capazes de operar em

uma faixa típica de vazão de 70% a 100% da vazão máxima, por isso as **equações 4 e 5**.

A **equação 6**, expressa que a vazão total de vapor é igual à soma da vazão de vapor que é extraída para a usina e a parcela que é destinada à turbina.

b) Balanço de energia das caldeiras e das turbinas:

$$\sum_{\substack{0 \leq t \leq P \\ i:1,\dots,NB \\ G:A,B}} f_{i,t}^G * C_p^G + f_{i,t}^{Oil} * C_p^{Oil} = \frac{H_{i,t}^{stm} * f_{i,t}^{stm} - H_{i,t}^{water} * f_{i,t}^{water}}{\eta_i^b} \quad (7)$$

$$pw_{gen_{i,t}} = f_{i,t}^{tb} * (H_{i,t}^{stm} - H_{i,t}^{exh}) * \eta_i^{Tb} \quad (8)$$

$$f_{i,t}^{stm} = f_{i,t}^{water} \quad (9)$$

A **equação 7** expressa o balanço de energia das caldeiras. De acordo com Bega (1989), o tubulão superior de uma caldeira aquatubular tem seu nível de água controlado em cerca de 50%, sendo os outros 50% de vapor saturado. Assim, a pressão de vapor é mantida em uma faixa de variação estreita, o que é necessário para a operação estável das turbinas; também, neste caso, o nível do tubulão superior é controlado em uma faixa estreita, preservando a segurança operacional da caldeira. Esse o motivo principal do acréscimo da **equação 9**. Outra modificação pertinente é apresentada na **equação 8**, define que somente uma parte da energia útil é aproveitada para geração de potência no eixo da turbina.

c) Controle do nível dos gasômetros:

$$GH_{LL}^G \leq h_t \leq GH_{HH}^G + s_{HH}^G \quad (10)$$

$$GH_L^G \leq h_t \leq GH_H^G + s_H^G \quad (11)$$

$$h_t - GH_N^G = s_{d+}^G - s_{d-}^G \quad (12)$$

$$sdq_{i,t}^{G+} - U_i^G [sw_{1,t}^{G+} + sw_{2,t}^{G+} + sw_{3,t}^{G+} + sw_{4,t}^{G+}] * \Delta t \leq GH_H^G - GH_N^G \quad (13)$$

$$sdq_{i,t}^{G-} - U_i^G [sw_{1,t}^{G-} + sw_{2,t}^{G-} + sw_{3,t}^{G-} + sw_{4,t}^{G-}] * \Delta t \leq GH_N^G - GH_L^G \quad (14)$$

As **equações 10, 11 e 12** provenientes dos trabalhos de Kim et al. (2002, 2003) regem o controle do nível dos gasômetros dentro dos limites de capacidade críticos de operação. As **equações 13 e 14** foram incluídas com o objetivo de assegurar que os níveis jamais sejam conduzidos para cima nem abaixo da capacidade crítica do gasômetro. É uma redundância que aumenta a confiabilidade do sistema.

d) Restrições que estabelecem a satisfação da demanda de eletricidade e vapor para a usina:

$$f_{i,t}^{PS} \geq F_{i,t}^{SD} \quad (15)$$

$$\sum_{i,t}^{NB} pw_{gen_{i,t}} \geq PD_t \quad (16)$$

e) Restrições para limites de operação dos equipamentos e caldeiras:

$$F_{i,t}^{Minstm} \leq f_{i,t}^{stm} \leq F_{i,t}^{Maxstm} \quad (17)$$

$$F_{i,t}^{Mintb} \leq f_{i,t}^{tb} \leq F_{i,t}^{Maxtb} \quad (18)$$

$$F_{i,t}^{MinG} \leq f_{i,t}^G \leq F_{i,t}^{MaxG} \quad (19)$$

f) Equações auxiliares:

$$\Delta N_{i,t}^G = sw_{i,t}^{G+} + sw_{i,t}^{G-} \quad (20)$$

$$N_{i,t}^G - N_{i,t-1}^G + e_{i,t}^G = sw_{i,t}^{G+} \quad (21)$$

$$N_{i,t-1}^G - N_{i,t}^G + sw_{i,t}^{G+} = sw_{i,t}^{G-} \quad (22)$$

$$sw_{i,t}^{G+} = ibn_{1,i,t}^{G+} + ibn_{2,i,t}^{G+} + ibn_{3,i,t}^{G+} \quad (23)$$

$$sw_{i,t}^{G-} = ibf_{1,i,t}^{G-} + ibf_{2,i,t}^{G-} + ibf_{3,i,t}^{G-} \quad (24)$$

$$ibn_{1,i,t}^{G+} \geq ibn_{2,i,t}^{G+} \geq ibn_{3,i,t}^{G+} \quad (25)$$

$$ibf_{1,i,t}^{G-} \geq ibf_{2,i,t}^{G-} \geq ibf_{3,i,t}^{G-} \quad (26)$$

As equações auxiliares operam a mudança de estado dos queimadores. As **equações 21 e 22** foram formuladas para possibilitar este tipo de manobra, uma vez que nos trabalhos anteriores as equações não ficaram claras de como este procedimento era feito. As demais equações determinam que essa intervenção ocorra gradualmente e são expressas pelas variáveis binárias. Na próxima seção, estudos de casos demonstram o funcionamento coerente do modelo e a eficácia do algoritmo proposto em calcular os valores ótimos para as variáveis de decisão sujeitas às restrições apresentadas. Todas as variáveis são definidas como não negativas.

4. Estudo de caso

Para simular o algoritmo proposto e encontrar a distribuição ótima de gases siderúrgicos, foi feita a modelagem do sistema por meio de variáveis lineares mistas. Uma usina siderúrgica situada no estado do Espírito Santo, Brasil, foi tomada como referência para verificação de consistência entre os dados simulados e os dados reais. O algoritmo foi desenvolvido usando o MatLab® versão 2013, sendo o mesmo utilizado como ambiente de programação e simulação, e instalado em um micro computador tipo PC 64 bits, processador Intel(R) Core(TM) i5-2500, CPU de 3,30 GHz, 4 núcleos (4 processadores) e memória RAM de 8 GB. O problema contém 710 variáveis, das quais 400 são inteiras entre as quais 240 são binárias.

A usina considerada possui quatro centrais termelétricas, perfazendo um total de quatro caldeiras e quatro turbinas. Os rendimentos das duas primeiras caldeiras é 0,8% enquanto que das outras duas é 0,85%. Já os rendimentos das turbinas um e dois são 0,8% enquanto que das duas últimas são 0,82%. Os combustíveis considerados são o óleo alcatrão e os gases BFG e COG. O poder calorífico destes combustíveis são 3,4 [MJ/m³] e 17,6 [MJ/m³] para os respectivos gases citados e 37,7 [MJ/kg] para o alcatrão. Os limites dos gasômetros são apresentados na **tabela 1**.

Para essa planta, sabe-se também que a vazão máxima para queima em cada queimador de BFG é 30.600 [m³/h], de COG é 2.700 [m³/h] e de TAR é 2.880 [kg/h]; que os limites máximos de vazão dos combustíveis para a fornalha da caldeira são 288 [dam³/h] para o BFG, 43,2 [dam³/h] para o COG e 36 [ton/h] para o TAR; que as vazões máximas de vapor da caldeira para os vários processos industriais e para cada turbina são respectivamente 306 [ton/h] e 270 [ton/h].

Tabela 1: Informações sobre os limites operacionais dos Gasômetros

Volume [Nm ³]	Capacidade	Limite superior	Nível visado	Limite inferior	Nível crítico
BFG	150.000	135.000	100.000	50.000	35.000
COG	40.000	36.000	30.000	12.000	8.000

A entalpia típica do vapor na entrada da turbina, na exaustão da turbina e da água de alimentação da caldeira são respectivamente 3.470, 2.555 e 1.160 [kJ/kg]. Com respeito aos pesos das variáveis de decisão na função objetivo, a **tabela 2** mostra os valores que foram obtidos de maneira empírica, os quais são referenciados como preço por unidade de energia (pu) e que por ora são valores que se ajustam bem para manter a dinâmica suave de operação do sistema.

Tabela 2. Valores das penalidades e custos da função objetivo

Penalidades	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Custo do alcatrão [U\$\$/pu/kg]	2	10.000	200
Penalidade por nível acima da capacidade máxima [U\$\$/pu/m ³]	15.000	15.000	0,1
Penalidade por nível acima do limite superior [U\$\$/pu/m ³]	1.000	1.000	0,1
Penalidade por nível abaixo do limite inferior [U\$\$/pu/m ³]	1.000	1.000	0,1
Penalidade por desvio do nível do valor visado [U\$\$/pu/m ³]	1.200	1.200	0,1
Penalidade por acender ou apagar um queimador [U\$\$/pu/unidade]	200	200	20
Penalidade por acender/apagar 2 queimadores [U\$\$/pu/2 unidades]	420	420	25
Penalidade por acender/apagar 3 queimadores [U\$\$/pu/3 unidades]	750	750	30
Custo pelo uso de vapor de processo [U\$\$/pu/kg/h]	1	1	1
Valor da energia elétrica [U\$\$/pu/kW]	1	1	1

De posse de todas essas informações e conhecendo-se o número de queimadores ligados no instante inicial é possível calcular o número de queimadores, de cada combustível, necessário em cada período para minimizar a função de custo da **equação 1**. Para os cinco períodos de simulação apresentados neste artigo, com doze minutos de duração cada, foi considerado que o nível inicial era noventa mil metros cúbicos de BFG e trinta e quatro mil metros cúbicos de COG.

5. Resultados obtidos

A **figura 2** apresenta os queimadores de BFG e COG que estão acesos nas fornalhas das caldeiras no início e os que devem estar acesos nos períodos consequentes de simulação. Estes resultados foram obtidos à partir da aplicação do algoritmo desenvolvido para resolver a MILP, segundo as penalidades para o **caso 1**. O objetivo é atender as demandas de energia e vapor requeridas pela usina, respeitando-se as limitações do sistema e otimizando-se o aproveitamento energético, conquanto que houvesse poucas mudanças no estado dos queimadores entre um período e outro, evitando-se assim perturbações indesejáveis ao sistema.

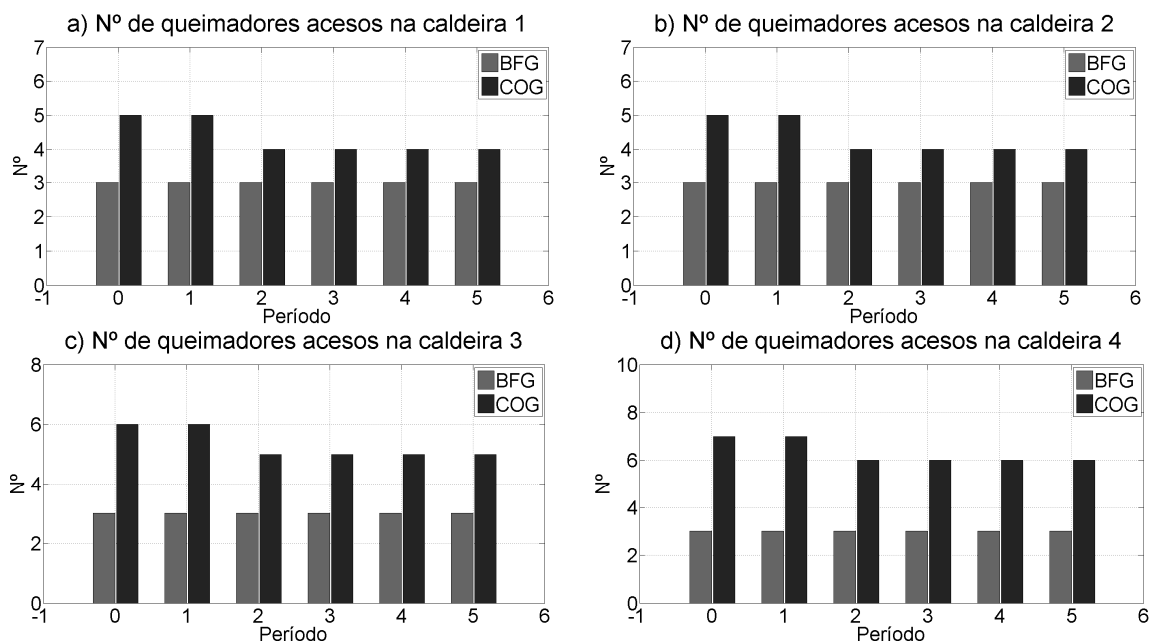


Figura 2. Nº de queimadores de BFG e COG acesos nas fornalhas das caldeiras

Nota-se que não houve mudança, em nenhum período, no estado dos queimadores do gás de alto forno, ou seja, não houve necessidade de acender nem apagar nenhum queimador de BFG em caldeira alguma. No entanto, para o gás de coqueria, o algoritmo calculou que para otimização do modelo proposto, segundo as penalidades impostas a cada parcela das variáveis de decisão que compõem a função objetivo, **equação 1**, conforme apresentado na **tabela 2**, é preciso apagar, no segundo período, um queimador na fornalha de cada caldeira.

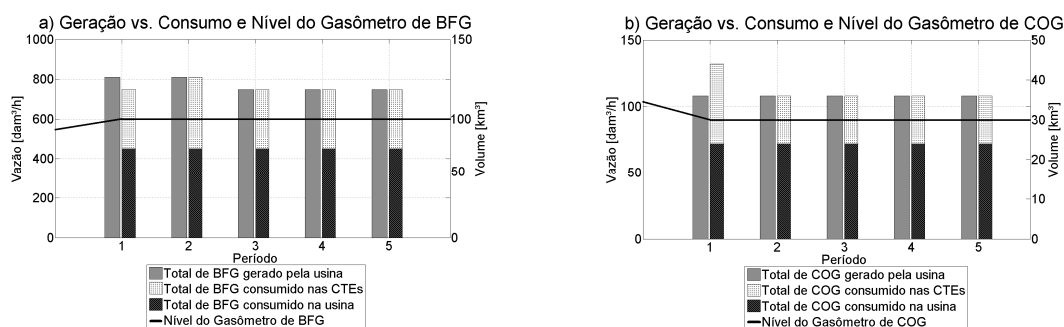


Figura 3. Geração vs consumo dos combustíveis e nível dos gasômetros

O resultado desta manobra é o comportamento que pode ser visto na **figura 3(a)** para o gás de alto forno e na **figura 3(b)** para o gás de coqueria. Note que no primeiro período há um desbalanço entre o total de gás gerado no alto forno e na coqueria e a soma total do gás consumido nas centrais termelétricas (CTEs) e pela própria usina. No caso do BFG, como o consumo total, no período 1, foi menor que o total gerado, então o nível do gasômetro de BFG subiu de noventa mil metros cúbicos para cem mil metros cúbicos. Nos demais instantes, a igualdade fez com que o nível permanecesse em cem mil metros cúbicos, que é o valor visado para o gasômetro de BFG. Uma pergunta que pode ser feita é: se houve variação no consumo do gás BFG nas centrais termelétricas, então por que o algoritmo indicou que não houve necessidade de acendimento nem apagamento dos queimadores?

A resposta é óbvia, isso ocorreu por que foi incorporada ao modelo, neste trabalho, a capacidade de os queimadores poderem operar ao longo de uma faixa de trabalho que pode variar entre 70 e 100%, conforme explicado anteriormente. Certamente, a diferença entre a quantidade gerada e consumida não foi suficiente para apagar nem acender nenhum queimador de BFG, pois as variáveis de folga permitiram ajustar o consumo de BFG pelos queimadores sem que fosse necessário apagá-los no período 1, ou acendê-los no período 2, e depois apagá-los novamente no terceiro, quarto ou quinto períodos subsequentes. Esse é um resultado bastante conveniente, uma vez que diminui perturbações e distúrbios na operação das centrais termelétricas.

Para o gás de coqueria, o nível do seu gasômetro que inicialmente era de trinta e quatro mil metros cúbicos, no período inicial, desceu para trinta mil metros cúbicos, no período 1, por conta do aumento de seu consumo nas CTEs. Este valor foi mantido ao longo dos outros períodos. Note que neste caso, a diminuição no consumo deste gás à partir do período dois, foi suficiente para fazer com que houvesse o desligamento dos queimadores de COG. Isto é visível nos gráficos da **figura 2** onde se ver que um queimador de COG foi apagado nas fornalhas de todas as caldeiras.

A respeito da geração de energia, pode-se notar que a potência ativa se manteve constante ao longo dos períodos de simulação e sempre acima da quantidade necessária para atender as necessidades da planta industrial, ou seja, há uma garantia de que o excedente pode ser vendido para concessionárias de energia (ver geração vs demanda de potência ativa na **figura 4(b)**).

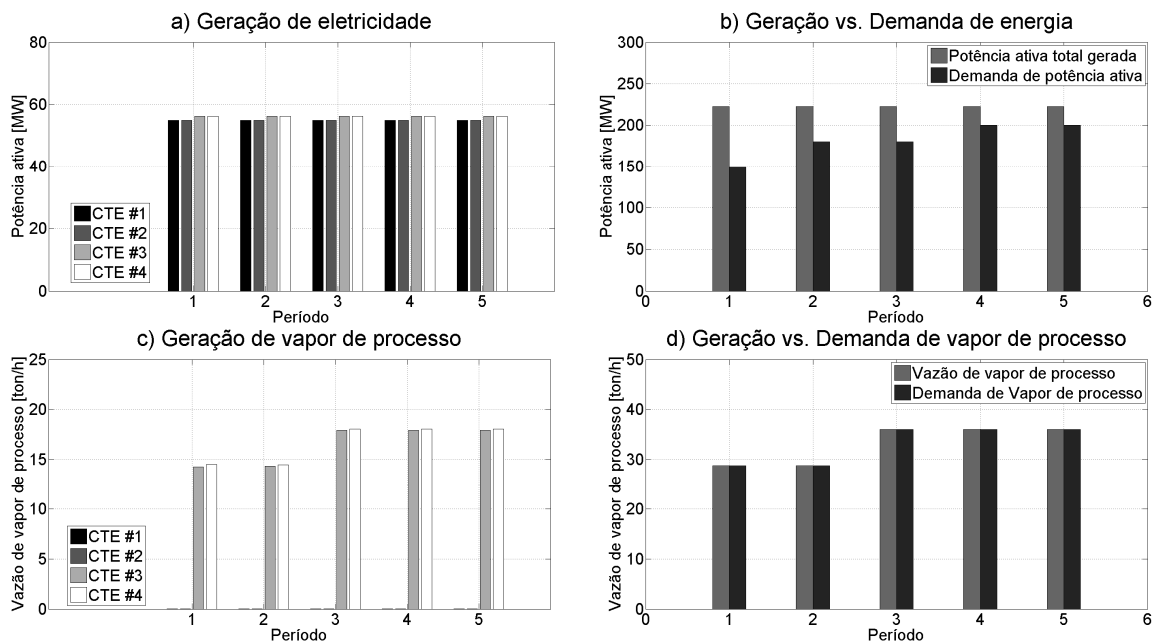


Figura 4. Geração e demanda de eletricidade e vapor de processo

No entanto, o aumento da demanda fez com que este excedente para venda diminuisse. A figura 4(a) indica que a potência gerada nas turbinas 3 e 4 são levemente maiores que nas duas primeiras. Isso porque seus rendimentos são levemente superiores aos das duas primeiras. Já, no que diz respeito à produção de vapor, uma diferença de 5% no rendimento entre essas caldeiras e as duas primeiras já é o suficiente para que toda a extração de vapor destinada ao processo seja feita nas saídas destas caldeiras, figura 4(c). Outra consequência da melhoria proposta neste trabalho e que pode ser verificada nos resultados é que a imposição de penalidade ao consumo de vapor de processo fez com que a produção do mesmo fosse justamente igual ao demandado, figura 4(d). Essa idéia levou em conta o fato de que na produção de vapor, a energia térmica, que pode ser transformada em energia elétrica, está sendo transferida à planta na forma de calor.

No que diz respeito à análise de sensibilidade quanto a influência dos custos e penalidade nos fatores que compõem a função objetivo, equação 1, vale ressaltar que a análise qualitativa é mais conveniente que a análise quantitativa, isso porque, a maior parte dos fatores envolvidos são ponderados empiricamente por custos pouco tangíveis sob o aspecto econômico. Assim, sob o aspecto financeiro é importantes comparar apenas os custos pelo uso do alcatrão e os dividendos advindos da geração de energia, sendo desejável que o óleo seja economizado para ser vendido separadamente. Em relação aos outros fatores, é imprescindível que os mesmos sejam sintonizados de maneira a garantir condições necessárias ao funcionamento da planta de maneira segura e estável ao mesmo tempo em que são atendidas as demandas solicitadas pelas outras unidades operacionais do complexo industrial. Assim, sempre é bom que ocorra o menor número de mudança de estado dos queimadores das fornalhas das caldeiras nas centrais termelétricas.

Para facilitar a análise quantitativa, a figura 5 é usada, pois, expressa a influência que alterações no preço do alcatrão podem impactar na operação das centrais termelétricas. É considerado no estudo de caso 1 que o consumo foi alto, já que o preço do óleo foi baixo, no caso, igual a 2 [U\$/pu/kg] de acordo com a tabela 1. Nesta condição, a solução ótima encontrada possibilitou uma geração de energia acima da demandada pela usina, garantindo assim a venda do excedente. Um caso hipotético, usado para análise, é quando o preço do alcatrão é aumentado exagerada e intencionalmente para dez mil vezes o valor original, caso 2, isso para que seja ressaltado o seu efeito no resultado global. É fácil perceber que o consumo diminuiu em relação ao caso do preço original figura 5(a), e neste caso, na figura 5(b), a potência ativa gerada nas centrais termelétricas é justamente igual à potência demandada para atender ao consumo interno da usina, não sendo gerado nenhum excedente, salvo um pouco no período 1.

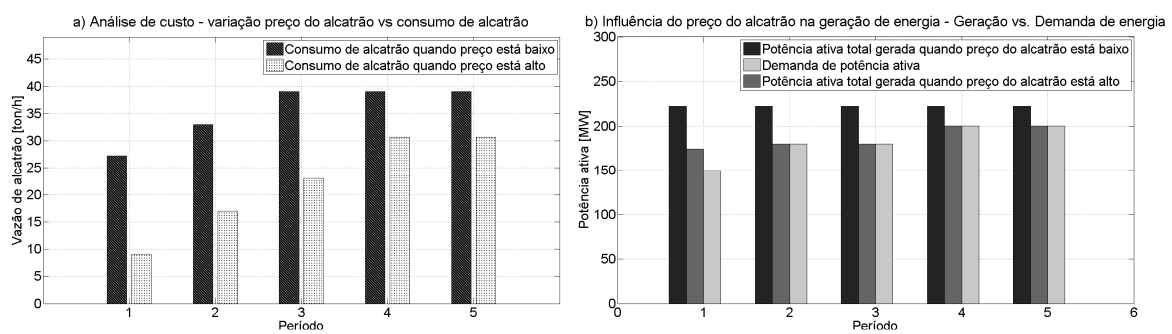


Figura 5. Geração e demanda de eletricidade e vapor de processo

Uma análise qualitativa do problema pode ser estendida através da comparação do número de queimadores de gases acesos nas fornalhas das caldeiras no caso 1 e no caso 3. Note na figura 6 que no caso 3 a resposta ótima foi sensível as modificações dos parâmetros. Assim, aumentou o número de mudanças nos estados dos queimadores de COG em relação ao caso apresentado originalmente (ver figura 2). O caso 3 é qualitativamente pior que o primeiro, uma vez que é indesejável que ocorra modificações frequentes no número de queimadores acesos.

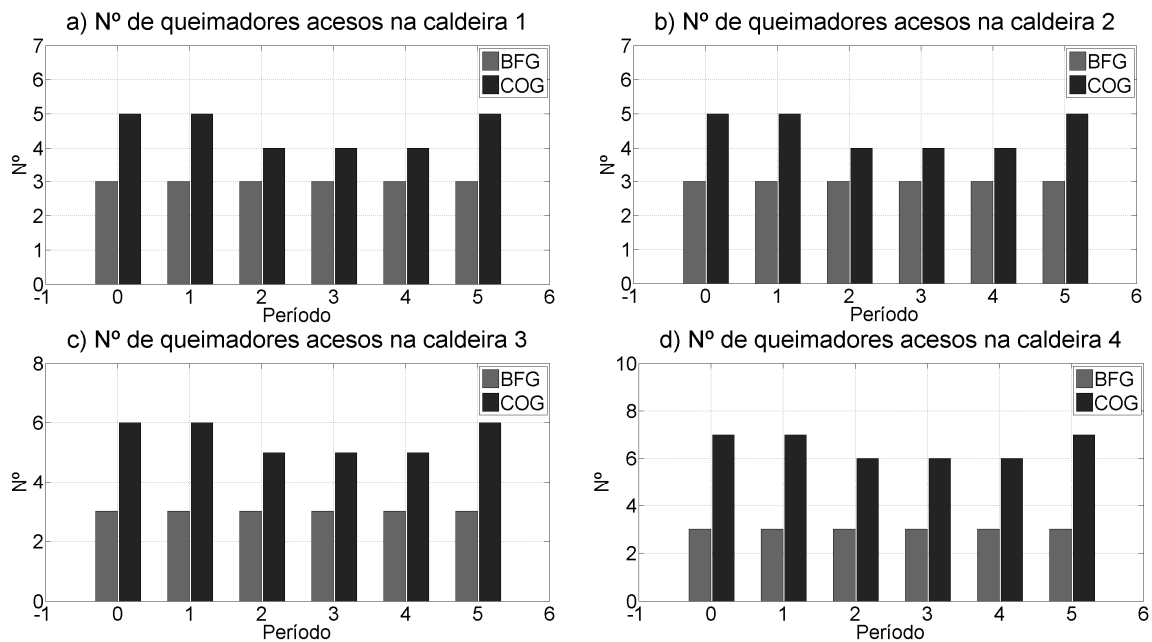


Figura 6. Nº de queimadores de BFG e COG acesos nas fornalhas das caldeiras

6. Conclusão

O problema da distribuição de combustíveis na usina siderúrgica, que envolve garantir a disponibilidade de combustíveis, de vapor e energia às unidades consumidoras, a maximização do aproveitamento energético além de outros parâmetros operacionais apresentados, é um problema complexo sendo necessário ser resolvido por um algoritmo capaz de calcular as variáveis de controle necessárias para otimização da distribuição. O algoritmo usado foi útil para estabelecer os valores ótimos para as variáveis de decisão do problema linear inteiro misto formulado, conforme pôde ser conferido nos estudos de casos apresentados.

As simulações realizadas com o algoritmo proposto indicam que o balanço de massa e energia é coerentemente ajustado para que os níveis dos gasômetros permaneçam próximos aos valores visados, ao passo que a energia gerada seja suficiente para assegurar o consumo interno e ainda um excedente que possa ser vendido. Além disso, o consumo de alcatrão e a variação do número de queimadores acesos são minimizados.

Os resultados apontam que o método foi bem sucedido para solucionar este tipo de problema, podendo vir a se tornar uma ferramenta importante para auxiliar os operadores do sistema de distribuição de combustíveis siderúrgicos e, por conseguinte os operadores nas centrais termelétricas. Este é o estímulo principal para dar seqüência a este trabalho e comparar resultados com outros modelos que o antecederam.

7. Nomenclatura

Índices	
i	Caldeira ($i = 1, \dots, NB$)
j	Turbina ($j = 1, \dots, NT$)
t	Período ($t = 1, \dots, P$)
G	Gases residuais ($G = BFG, COG$)

Parâmetros de processo	
C^{Oil}	Custo do alcatrão [U\$/pu/kg]
C^{elec}	Valor da energia elétrica [U\$/pu/kW]
C_p^G	Poder calorífico dos combustíveis gasosos [kJ/m ³]

C_p^{Oil}	Poder calorífico óleo combustível [kJ/kg]
$F_{i,t}^{min,G}$	Vazão mínima do gás G para a caldeira i no período t [m ³ /h]
$F_{i,t}^{max,G}$	Vazão máxima do gás G para a caldeira i no período t [m ³ /h]
$F_{i,t}^{min,stm}$	Vazão mínima de vapor gerado na caldeira i no período t [kg/h]
$F_{i,t}^{max,stm}$	Vazão máxima de vapor gerado na caldeira i no período t [kg/h]
$F_{i,t}^{min,tb}$	Vazão mínima de vapor da caldeira i para a turbina j no período t [kg/h]
$F_{i,t}^{max,tb}$	Vazão máxima de vapor da caldeira i para a turbina j no período t [kg/h]
$F_{i,t}^{SD}$	Vazão de vapor da caldeira i para a usina no período t [kg/h]
$F_{predcon,i,t}^G$	Vazão do gás G previsto para um consumo fixo na usina no período t [m ³ /h]
$F_{conpp,t}^G$	Vazão de consumo do gás G nas centrais termelétricas no período t [m ³ /h]
$F_{predgen,i,t}^G$	Vazão do gás G previsto para ser gerado na usina no período t [m ³ /h]
GH_{LL}^G	Volume mínimo crítico do gasômetro G no período t [Nm ³]
GH_L^G	Volume mínimo a ser armazenado no gasômetro G no período t [Nm ³]
GH_N^G	Volume normal (visado) à ser operado o gasômetro G no período t [Nm ³]
GH_H^G	Volume máximo a ser armazenado no gasômetro G no período t [Nm ³]
GH_{HH}^G	Capacidade máxima do gasômetro G no período t [Nm ³]
$N_{i,0}^G$	Número de queimadores acesos na caldeira i no período zero
PD_t	Potência total demandada pela usina no período t [MW]
Δt	Intervalo de tempo [h]
U_i^G	Capacidade de queima do queimador de gás G na fornalha da caldeira i [m ³ /h]
W_{HH}^G	Penalidade por nível acima da capacidade máxima no período t [U\$/pu/m ³]
W_H^G	Penalidade por nível acima do limite superior no período t [U\$/pu/m ³]
W_L^G	Penalidade por nível abaixo do limite inferior no período t [U\$/pu/m ³]
W_d^{G+}	Penalidade por desvio do nível acima do valor visado no período t [U\$/pu/m ³]
W_d^{G-}	Penalidade por desvio do nível abaixo do valor visado no período t [U\$/pu/m ³]
W_{SW}^G	Penalidade por acender ou apagar um queimador no período t [U\$/pu/unidade]
W_{2s}^G	Penalidade por acender ou apagar simultaneamente dois queimadores de gás G no período t [U\$/pu/2 unidades]
W_{3s}^G	Penalidade por acender ou apagar simultaneamente três queimadores de gás G no período t [U\$/pu/3 unidades]
W_t^{FSD}	Custo pelo uso de vapor de processo no período t [U\$/pu/kg/h]
W_t^{water}	Custo pela geração de vapor de água no período t [U\$/pu/m ³ /h]
η_i^B	Rendimento da caldeira i
η_j^{TB}	Rendimento da turbina j
$H_{i,t}^{stm}$	Entalpia do vapor no tubulão superior da caldeira i no período t [kJ/kg]
$H_{i,t}^{exh}$	Entalpia do vapor na saída da turbina j no período t [kJ/kg]
$H_{i,t}^{water}$	Entalpia da água no tubulão superior da caldeira i no período t [kJ/kg]

Variáveis contínuas

$f_{i,t}^{Oil}$	Vazão total de alcatrão para a fornalha da caldeira i no período t [kg/h]
$f_{i,t}^G$	Vazão total do gás G para a fornalha da caldeira i no período t [m ³ /h]
$sf_{i,t}^G$	Variável de folga de vazão dos queimadores [m ³ /h]
$f_{i,t}^{stm}$	Vazão de vapor produzido na caldeira i no período t [kg/h]
$f_{i,t}^{water}$	Vazão de água de alimentação da caldeira i no período t [kg/h]
$f_{i,t}^{ps}$	Vazão de vapor da caldeira i destinado à planta industrial no período t [kg/h]
$f_{i,t}^{tb}$	Vazão de vapor da caldeira i destinado à turbina j no período t [kg/h]
h_t^G	Volume do gasômetro de gás G no período t [m ³]
$pW_{gen,t}^G$	Potência gerada no período t [MW]
$S_{HH,t}^G$	Variável de folga para volume de G superior à capacidade máxima do gasômetro no período t [m ³]
$S_{H,t}^G$	Variável de folga para volume de G acima do limite superior no período t [m ³]
$S_{L,t}^G$	Variável de excesso para volume de G abaixo do limite inferior no período t [m ³]
$S_{d,t}^{G+}$	Variável de folga para volume de G acima do valor visado no período t [m ³]

$s_{d,t}^{G-}$	Variável de excesso para volume de G abaixo do valor visado no período t [m ³]
$sdq_{i,t}^{G+}$	Variável de folga para restrição do nível superior do gasômetro [m ³]
$sdq_{i,t}^{G-}$	Variável de excesso para restrição do nível inferior do gasômetro [m ³]

Variáveis inteiras em geral

$N_{i,t}^G$	Nº de queimadores de gás G acesos na fornalha da caldeira i no período t
$\Delta N_{i,t}^G$	Quantidade de queimadores de gás G na caldeira i que foram ou acesos ou apagados no período t
$sw_{i,t}^{G+}$	Nº de queimadores de gás G na fornalha da caldeira i que foram acesos no período t
$sw_{i,t}^{G-}$	Nº de queimadores de gás G na fornalha da caldeira i que foram apagados no período t
$e_{i,t}^G$	Variável auxiliar para acendimento/apagamento de queimadores no período t

Variáveis binárias

$ibn_{1,i,t}^{G+}$	1 – se um queimador de gás G acender na caldeira i no instante t 0 – se nenhum queimador de gás G acender na caldeira i no instante t
$ibn_{2,i,t}^{G+}$	1 – se dois queimadores de gás G acender na caldeira i no instante t 0 – se não acenderem dois queimadores de gás G na caldeira i no instante t
$Ibn_{3,i,t}^{G+}$	1 – se três queimadores de gás G acender na caldeira i no instante t 0 – se não acenderem três queimadores de gás G na caldeira i no instante t
$ibf_{1,i,t}^{G-}$	1 – se um queimador de gás G apagar na caldeira i no instante t 0 – se nenhum queimador de gás G apagar na caldeira i no instante t
$ibf_{2,i,t}^{G-}$	1 – se dois queimadores de gás G apagar na caldeira i no instante t 0 – se não apagarem dois queimadores de gás G na caldeira i no instante t
$Ibf_{3,i,t}^{G-}$	1 – se três queimadores de gás G apagar na caldeira i no instante t 0 – se não apagarem três queimadores de gás G na caldeira i no instante t

Referências

- Akimoto, K.; Sannomiya, N.; Nishikawa, Y.; Tsuda, T.** An Optimal Gas Supply for a Power Plant using a Mixed Integer Programming Model. *Automatica*, 27, 1991, p. 513-518.
- Bega, E. A.** Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras, 2ª Edição, JR Editora Técnica, Rio de Janeiro, 1989.
- Du, Tao; Liu, Xiang Bin; Pang, Xing Lu.** Journal of Applied Mechanics and Materials: Information Technology for Manufacturing Systems II. v. 58-60, p. 816-821, June 2011.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética].** Nota Técnica DEA 02/09: Caracterização do uso da Energia no Setor Siderúrgico brasileiro, Rio de Janeiro-RJ, Abril de 2009.
- Kim, Jeong Hwan; Y., Heui-Seok; H., Chonghun.** The Development of the Real Time Optimal Byproduct Gas Supply System. In Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2002), Jeonbuk, Korea, 2002, p. 1112-1117.
- Kim, J.H.; Yi, H.; Han, C.; Park, C.; Kim, Y.** Plant-wide multiperiod optimal energy resource distribution and byproduct gas holder level control in the iron and steel making process under varying energy demands. In Proceedings of the 8th International Symposium on Process Systems Engineering, Kunming, China, 2003, p. 882-887.
- Kong, Haining ; Qi, Ershi; Li, Hui; Li, Gang; Zhang, Xing.** An MILP model for optimization of byproduct gases in the integrated iron and steel plant. *Journal of Applied Energy*, 2010, 87, p. 2156–2163.
- Wolsey, L. A.** Integer programming, John Wiley & Sons, New York, 1998.