



## OTIMIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS DA USIMINAS 2011 – USINA DE IPATINGA<sup>1</sup>

Luciano Nogueira Cardoso<sup>2</sup>  
Vinícius Mariano Gonçalves<sup>3</sup>  
Hiroshi Jorge Takahashi<sup>4</sup>  
Carlos Renato Magalhães Duarte<sup>5</sup>  
Walmir Matos Caminhas<sup>6</sup>

### Resumo

O trabalho objetiva estabelecer um modelo automatizado e otimizado de predição da distribuição de combustíveis, contemplando as previsões operacionais das principais áreas, geração e consumo da Usina de Ipatinga. O projeto prevê a implementação de um modelo de otimização, capaz de distribuir os gases de processo, oxigênio e combustíveis complementares em comparação com a geração de energia elétrica, focando o menor custo operacional. Os benefícios com a implantação do modelo são: otimização da matriz energética, elevação do aproveitamento dos gases de processo e facilidade na tomada de decisão para corte de consumo, abastecimento e venda de combustíveis e geração de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Otimização; Matriz energética; Combustíveis; Custo.

### OPTIMIZATION OF FUEL DISTRIBUTION AT USIMINAS 2011 – IPATINGA STEEL WORKS

### Abstract

This work aims to establish an automated and optimized model of fuel distribution prediction, including expected operation of main areas, generation and consumption at Ipatinga Steel Works. The project comprehends the implementation of an optimized model able to distribute the process gases, oxygen and additional fuels in comparison with the electrical energy generation, focusing on less operational cost.

The benefits of this implementation are: energetic matrix optimization, increasing of process gases utilization and a decision support tool availability for consumption cut, fuels supply and sale and electrical energy generation.

**Key words:** Optimization; Energetic Matrix; Fuels; Cost.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 33º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 27º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 22 a 24 de agosto de 2012, Belo Horizonte, MG.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Eletricista, Certified Quality Engineer (CQE), Green Belt, Engenheiro de Produção Sênior da Gerência Técnica de Energia e Utilidades da Usiminas, Ipatinga, MG.*

<sup>3</sup> *Engenheiro de Controle e Automação, UFMG, Belo Horizonte, MG.*

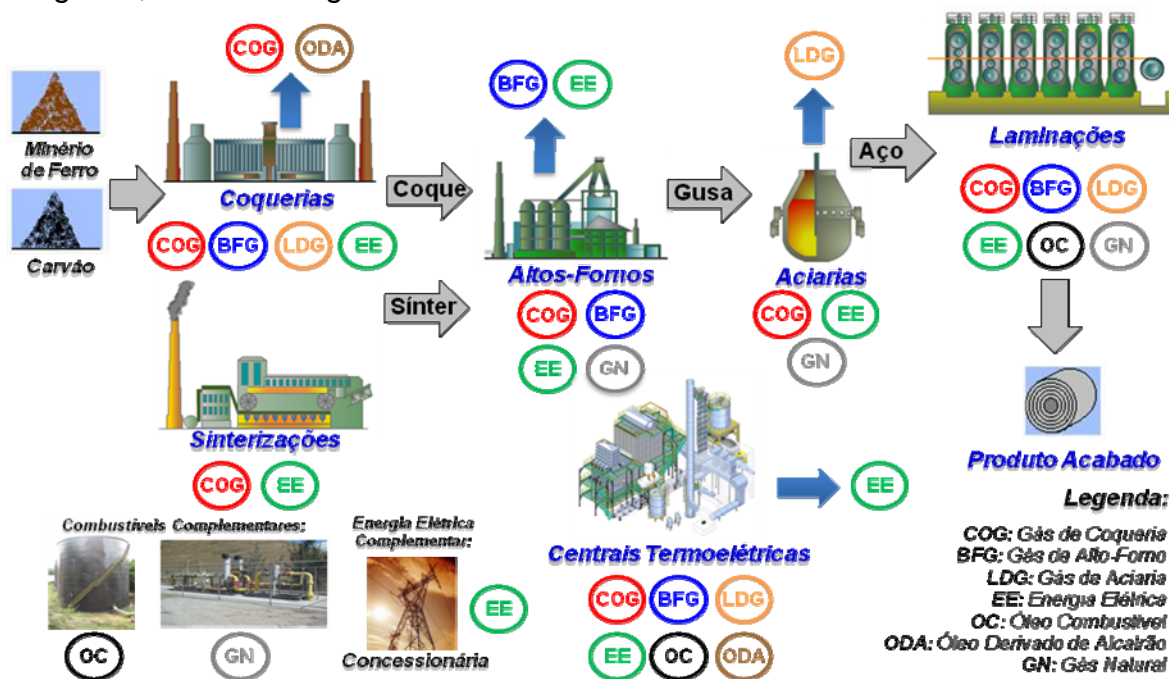
<sup>4</sup> *Mestre em Engenharia, Especialista de Automação Sênior da Gerência de Automação da Usiminas, Ipatinga, MG.*

<sup>5</sup> *Mestre em Engenharia Elétrica, Certified Quality Engineer (CQE), Analista de Automação da Gerência de Automação da Usiminas, Ipatinga, MG.*

<sup>6</sup> *Doutor em Engenharia Elétrica, Professor do Departamento de Engenharia Eletrônica da UFMG, Belo Horizonte, MG.*

## 1 INTRODUÇÃO

No atual cenário econômico-financeiro, conjugado com os elevados preços de combustíveis, a busca por práticas de otimização energética é um fator preponderante para a empresa manter-se competitiva. A Usina de Ipatinga da Usiminas é uma usina siderúrgica integrada a coque e apresenta um fluxo energético, conforme Figura 1.



**Figura 1.** Fluxograma de geração/distribuição de combustíveis da Usina de Ipatinga.

O Centro de Energia da Usiminas é responsável pela distribuição de combustíveis (COG, BFG, LDG, Óleo Combustível, Gás Natural e Óleo Derivado de Alcatrão), produtos criogênicos (oxigênio, nitrogênio e argônio), vapor, energia elétrica e água para as diversas áreas consumidoras da usina. Essa distribuição deve ser a mais eficiente possível, tendo como objetivo buscar a melhor forma de operação das áreas, conjugada com a geração de energia elétrica própria e o consumo de oxigênio para enriquecimento em fornos de combustão. Devido à complexidade da distribuição dos combustíveis, apesar do conhecimento e experiência da equipe, o sistema não é ótimo e vários pontos são questionáveis, tais como:

- Qual deve ser a forma ótima de distribuição dos gases de processo na Usina de Ipatinga?
- Qual deve ser o preço de compra do combustível complementar e/ou energia elétrica adquirida externamente que justifique a operação das caldeiras para geração de energia elétrica própria?
- Qual deve ser a redução de produção das linhas operacionais quando não há combustível complementar?

Visando responder a estas perguntas de forma rápida, o trabalho objetiva estabelecer uma modelagem de otimização (programação inteira mista linear) genérica do processo e um programa que implementa e resolve esse modelo, utilizando os parâmetros inseridos.



## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Uma ampla classe de problemas de otimização pode ser modelada como um problema de programação linear. De fato, este tipo de modelo de otimização é de longe o mais utilizado,<sup>(1)</sup> devido seu bom compromisso entre eficiência no cálculo da solução (tempo de máquina) e poder de modelagem (abrangência da classe de problemas que pode-se escrever). Isso por si só justifica a adoção desse modelo no trabalho.

Neste trabalho, foi escolhido o algoritmo simplex para resolver o problema de programação linear. Há outros métodos como aqueles baseados em pontos interiores. Para problemas de dimensões grandes, o consenso é que o simplex e o algoritmo de Karmarkar<sup>(2)</sup> (o mais competitivo da classe de pontos interiores) são equivalentes em termos de tempo, com certos problemas bem específicos, sendo mais adequados a um ou outro. Portanto, o simplex foi escolhido apenas por preferência pessoal.

A função objetivo do problema de distribuição de combustíveis consiste em minimizar o custo com o balanço energético. Desta forma, fazem-se as seguintes operações:

- soma-se o custo de compra dos combustíveis adquiridos externamente;
- soma-se o custo de compra do oxigênio;
- subtrai-se o ganho com a geração de energia elétrica; E
- subtrai-se o ganho com a venda de combustíveis (ODA).

No entanto, o balanço energético apresenta algumas restrições que devem ser respeitadas, tais como:

- cumprimento das demandas de energia térmica exigidas;
- cumprimento das demandas de vapor de baixa e média pressão exigidas;
- vazão máxima de queima dos combustíveis;
- restrição de queima de combustíveis por área;
- restrição de envio de vapor de processo pela turbina;
- restrição de poder calorífico do gás misto queimado nos fornos de combustão;
- e
- restrição de queima de combustível de baixo poder calorífico apenas com outro combustível de alto poder calorífico.

Neste trabalho, foram desenvolvidos dois programas relacionados ao problema de distribuição de combustíveis, o “Processador de Produções” e o “Distribuição de Combustíveis”, que serão apresentados a seguir.

A Figura 2 apresenta a tela principal do programa “Processador de Produções”.

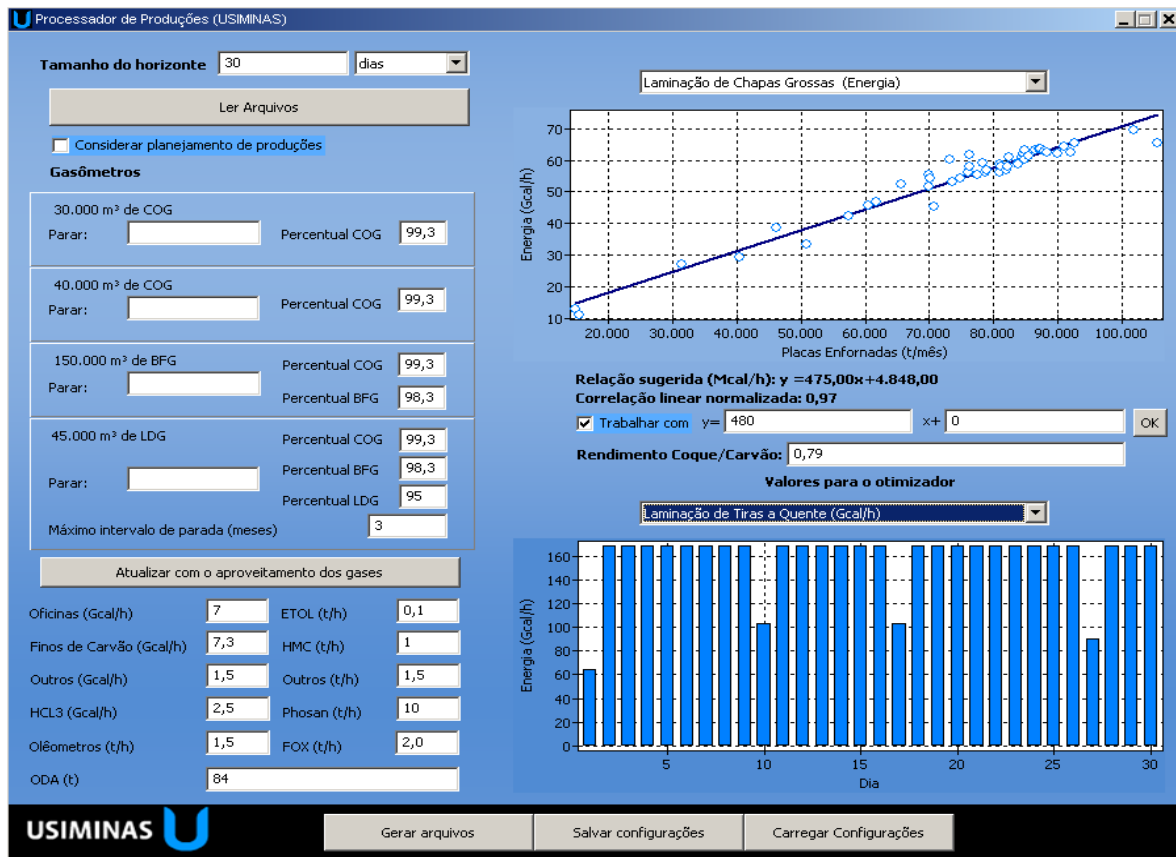


Figura 2. Tela principal do programa “Processador de Produções”.

A Figura 3 apresenta a tela principal do programa “Distribuição de Combustíveis”.

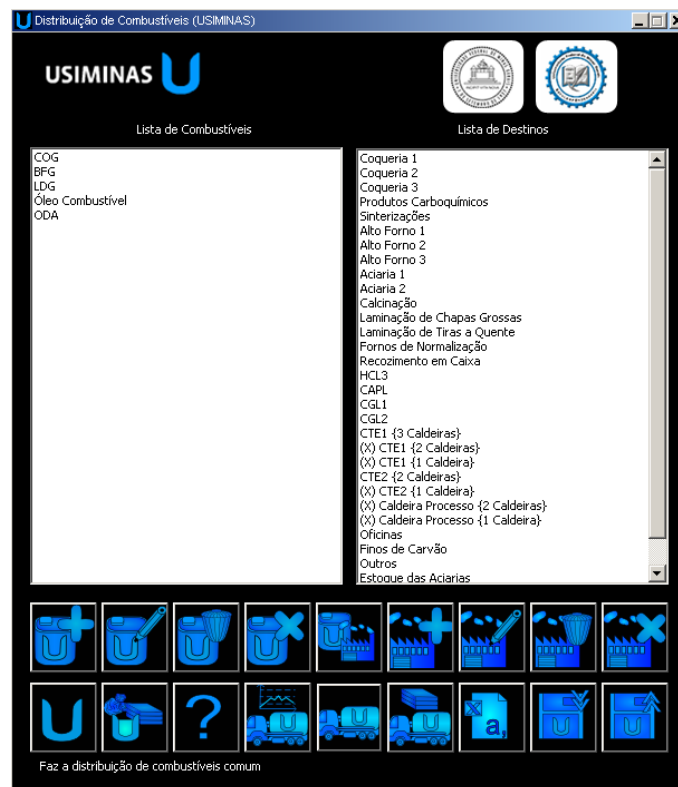


Figura 3. Tela principal do programa “Distribuição de Combustíveis”.



O programa “Processador de Produções” lê os arquivos de produções (coque, gusa, aço líquido, placas enfiadas na laminação a quente, bobinas na laminação a frio, etc) e calcula as demandas de energia térmica, vapor e geração dos gases de processo (COG, BFG e LDG).

O cálculo das demandas energéticas, vapor e geração de gases de processo é definido por meio de índices específicos (Mcal/t, Nm<sup>3</sup>/t gusa etc.) que são gerados por meio de curvas de regressão baseadas em dados históricos ou então inseridos manualmente pelo usuário.

Além destas informações, podem-se inserir dados de consumo que são constantes, independentes do ritmo de produção da usina, tais como consumo de vapor na fábrica de oxigênio e oleômetros (aquecimento de tanques de óleo) e consumo de energia térmica nas oficinas.

Nesta seção, pode-se configurar a operação dos gasômetros, pois as paradas destes equipamentos impactam no aproveitamento dos gases e, conseqüentemente, na compra de combustível complementar. A Usina de Ipatinga possui quatro gasômetros: 30.000 m<sup>3</sup> de COG, 40.000 m<sup>3</sup> de COG, 150.000 m<sup>3</sup> de BFG e 45.000 m<sup>3</sup> de LDG. Em momentos de paradas dos equipamentos para grande reparo ou cumprimento do plano de inspeção, são feitas manobras entre os gasômetros, para melhor aproveitamento dos gases. Por exemplo, em parada do gasômetro de 150.000 m<sup>3</sup>, desloca-se o gás BFG para o gasômetro de 40.000 m<sup>3</sup>.

O Programa “Distribuição de Combustíveis” é consideravelmente mais complexo que o anterior, no entanto é totalmente genérico e permite a inserção e modificação completa de propriedades dos diversos consumidores e combustíveis, ou seja, pode ser adaptado para qualquer usina siderúrgica. O usuário pode criar, editar, excluir ou desabilitar novos combustíveis ou destinos. As propriedades dos combustíveis podem ser configuradas, conforme Figura 4.

Figura 4. Tela do “Editor de Combustíveis”.

Pode-se inserir a unidade e o poder calorífico dos combustíveis. Caso o combustível seja comprado e/ou vendido, pode-se inserir os preços de compra e/ou venda, para que o programa verifique se é viável comprá-lo e/ou vendê-lo. Além disso, pode-se



definir um limite de queima/venda dos combustíveis na simulação. As propriedades dos destinos podem ser configuradas, conforme Figura 5.

Figura 5. Tela do “Editor de Destinos”.

Pode-se inserir a unidade do produto de cada destino e o poder calorífico do gás misto queimado. Em caso de centrais termoeletricas, é permitido definir as vazões de vapor de processo e a curva de extração/geração das turbinas. Além disso, pode-se definir uma expressão de carga emergencial, em caso de necessidade de atendimento às cargas mínimas da usina. Caso haja injeção de oxigênio para enriquecimento da combustão, o destino pode ser modelado, conforme Figura 6.

Figura 6. Tela das “Propriedades Combustível/Destino”.

No caso do Alto-Forno 3 da Usina de Ipatinga, a curva de consumo de COG x O<sub>2</sub> nos regeneradores é considerada na distribuição dos gases de processo.



Conforme Figura 7, pode-se configurar propriedades gerais, tais como preço da energia elétrica e oxigênio e algumas restrições na distribuição dos combustíveis, como, por exemplo: “Se as caldeiras consomem óleo combustível, então não consomem ODA.” Trata-se de uma restrição, para evitar o consumo simultâneo de dois combustíveis no mesmo destino.

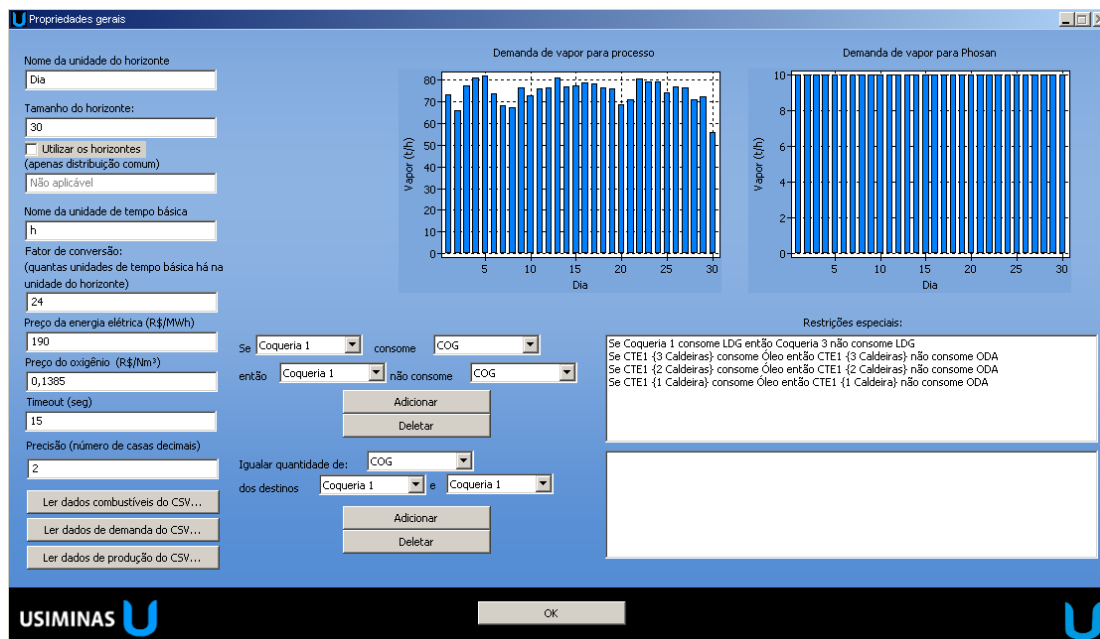


Figura 7. Tela das “Propriedades gerais”.

Os resultados da distribuição ótima dos combustíveis em comparação com a geração de energia elétrica e compra de combustível complementar e oxigênio são observados na Figura 8.

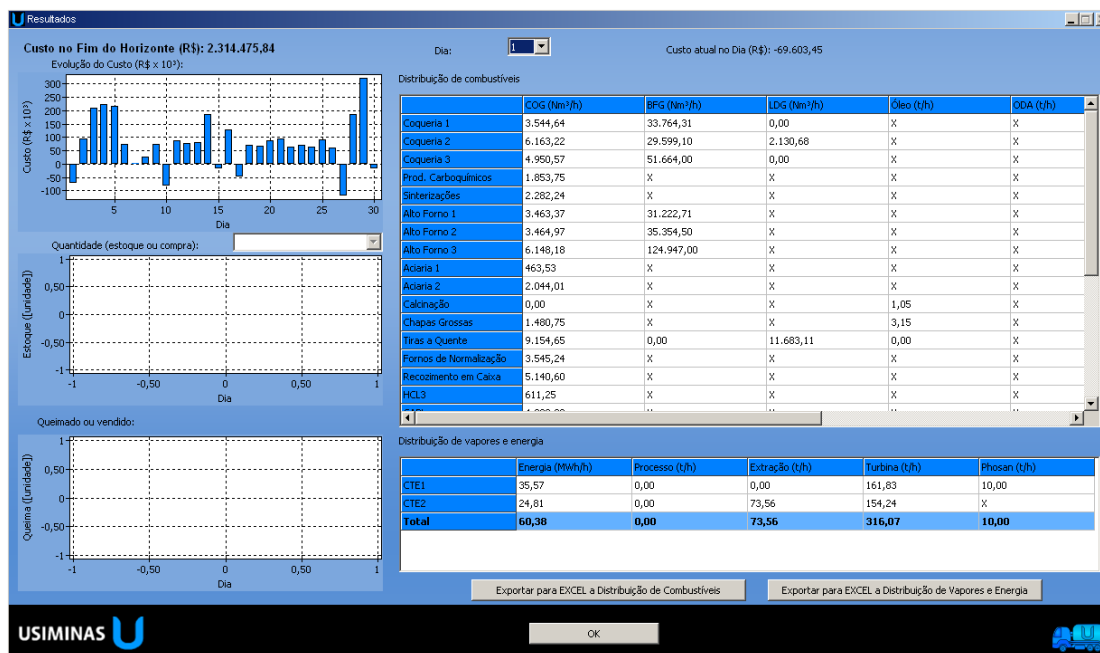


Figura 8. Tela dos “Resultados”.

O programa gera uma primeira tabela com os diversos destinos da usina nas linhas e a distribuição dos combustíveis nas colunas e uma segunda tabela com as



centrais termoeletricas nas linhas e a distribuição de vapor e geração de energia elétrica nas colunas.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Estudo de Caso 1

Comparação entre a distribuição de combustíveis da Usina de Ipatinga prevista pelo método convencional e pelo algoritmo de otimização referente ao mês de Março/2012.

As distribuições previstas de combustíveis da Usina de Ipatinga são observadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Distribuição de combustíveis da Usina de Ipatinga no mês de Março/2012

Variáveis	Distribuição Prevista Convencional	Distribuição Prevista Otimizada	Distribuição Real
Consumo COG [Nm <sup>3</sup> /h]	66.626	66.709	66.230
Consumo BFG [Nm <sup>3</sup> /h]	651.483	665.569	599.466
Consumo LDG [Nm <sup>3</sup> /h]	44.172	44.172	40.675
Geração CTE1 [MW médios]	28,3	29,1	26,2
Geração CTE2 [MW médios]	18,2	30,0	32,8
Consumo OC [t/mês]	8.206	8.407	8.408

#### 3.2 Estudo de Caso 2

Comparação entre a distribuição real de combustíveis da Usina de Ipatinga e a distribuição otimizada, considerando, como premissa, a disponibilidade real dos gases de processo.

As distribuições de combustíveis em relação ao cenário real da Usina de Ipatinga em Março/2012 são observadas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Distribuição de combustíveis em relação ao cenário real do mês de Março/2012

Variáveis	Distribuição Real	Distribuição Real Otimizada
Consumo COG [Nm <sup>3</sup> /h]	66.230	66.318
Consumo BFG [Nm <sup>3</sup> /h]	599.466	601.926
Consumo LDG [Nm <sup>3</sup> /h]	40.675	40.717
Geração CTE1 [MW médios]	26,2	27,3
Geração CTE2 [MW médios]	32,8	37,0
Consumo OC [t/mês]	8.408	7.767





### 3.3 Estudo de Caso 3

Comparação entre a distribuição prevista otimizada com preços de R\$ 160,00 e R\$ 500,00 para energia elétrica (preços hipotéticos para efeito didático). As distribuições de combustíveis em relação aos diferentes preços de energia elétrica são observadas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Distribuição de combustíveis em relação a preços diferentes de energia elétrica

Variáveis	Distribuição Prevista Otimizada Energia Elétrica: 160,00 R\$/MWh	Distribuição Prevista Otimizada Energia Elétrica: 500,00 R\$/MWh
Consumo COG [Nm <sup>3</sup> /h]	66.709	66.709
Consumo BFG [Nm <sup>3</sup> /h]	665.569	665.585
Consumo LDG [Nm <sup>3</sup> /h]	44.172	44.712
Geração CTE1 [MW médios]	29,1	30,3
Geração CTE2 [MW médios]	30,0	42,7
Consumo OC [t/mês]	8.407	11.941

### 3.4 Estudo de Caso 4

Comparação entre a distribuição prevista otimizada com disponibilidade e restrição de consumo de óleo combustível nos Fornos de Reaquecimento de Placas da Laminação de Tiras a Quente.

As distribuições de combustíveis com disponibilidade e restrição de consumo de óleo combustível são observadas na tabela 4.

**Tabela 4.** Distribuição de combustíveis com disponibilidade e restrição de consumo de óleo combustível na Laminação de Tiras a Quente

Variáveis	Distribuição Prevista Otimizada Óleo Combustível Disponível	Distribuição Prevista Otimizada Óleo Combustível Restrito
Consumo COG [Nm <sup>3</sup> /h]	66.709	66.709
Consumo BFG [Nm <sup>3</sup> /h]	665.569	665.584
Consumo LDG [Nm <sup>3</sup> /h]	44.172	44.172
Geração CTE1 [MW médios]	29,1	28,3
Geração CTE2 [MW médios]	30,0	29,6
Consumo OC [t/mês]	8.407	5.922
Produção LTQ [t/mês]	295.400	222.594



## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Estudo de Caso 1

A distribuição prevista de combustíveis na Usina de Ipatinga é realizada, atualmente, através de planilhas convencionais que não fazem rotinas de verificação para se conseguir a distribuição ótima. Alguns detalhes, como a curva de operação da turbina da central termoeletrica 2, não são modelados nas planilhas convencionais e, portanto, a distribuição de combustíveis e vapor de processo pelas caldeiras pode gerar resultados errados.

Desta forma, realizou-se uma simulação do programa, para comparação entre a distribuição de combustíveis da Usina de Ipatinga prevista pelo método convencional e pelo algoritmo de otimização referente ao mês de Março/2012.

Conforme Tabela 1, observa-se que a distribuição otimizada é mais próxima da distribuição real de combustíveis da Usina de Ipatinga. Apesar de a previsão convencional de geração de energia elétrica na CTE1 estar mais próxima da geração real, a previsão para a CTE2 não foi boa. Considerando-se a soma total de geração de energia elétrica nas duas centrais termoeletricas, a previsão convencional apresentou um erro de 26,9%, enquanto a previsão otimizada apresentou um erro de apenas 0,2%. Com relação ao consumo de óleo combustível, a previsão convencional apresentou um erro de 2,5%, enquanto a previsão otimizada apresentou um erro de apenas 0,012%.

### 4.2 Estudo de Caso 2

Sabe-se que durante o mês, há várias paradas não-programadas dos equipamentos que prejudicam o cumprimento da distribuição prevista. Isto é verificado na terceira coluna da Tabela 1, ao compararmos os consumos reais de BFG e LDG com os consumos previstos das colunas 1 e 2.

Diante disso, simulou-se a distribuição ótima dos combustíveis, considerando a disponibilização real de gases de processo (COG, BFG e LDG) e a real demanda de energia térmica das demais áreas consumidoras. Conforme tabela 2, a Usina de Ipatinga poderia ter gerado a mais 5,3 MW médios de energia elétrica e consumido a menos 641 t/mês de óleo combustível. Ressalta-se que apesar de o consumo de BFG e LDG ter sido menor que o previsto, a disponibilidade destes gases para as caldeiras foi, praticamente, a mesma. A geração real otimizada de energia elétrica pela CTE2 é maior que a geração prevista otimizada, devido menor envio de vapor de processo pela turbina. Ressalta-se que a uma mesma vazão de entrada de vapor na turbina, a geração aumenta com a redução de extração de vapor.

### 4.3 Estudo de Caso 3

A Usina de Ipatinga não é auto-suficiente em energia elétrica, ou seja, a geração própria pelas caldeiras não é capaz de fornecer energia elétrica suficiente para atendimento à demanda dos consumidores. Diante disso, faz-se necessário adquirir energia elétrica no mercado externo. Sabe-se que o preço de energia elétrica em leilão varia em função do período de chuvas, disponibilidade do sistema elétrico nacional, etc. Diante disso, simulou-se uma comparação entre a distribuição prevista otimizada com preços de R\$ 160,00 e R\$ 500,00 para a energia elétrica (preços hipotéticos para efeito didático). Conforme Tabela 3, observa-se que para um valor



de 500,00 R\$/MWh de energia elétrica, há um aumento considerável do consumo de óleo combustível para geração de energia elétrica própria pelas caldeiras, reduzindo-se a necessidade de compra de energia elétrica no mercado externo, ou seja, é viável gerar 13,9 MW médios de energia elétrica, mesmo com o aumento mensal de 3.534 t de óleo combustível. O programa analisa os preços da energia elétrica e do óleo combustível, para verificar a viabilidade de geração de energia elétrica a custo de combustível complementar.

#### 4.4 Estudo de Caso 4

Em períodos de crise do mercado siderúrgico ou até mesmo em cenários de racionamento de energia, faz-se necessário reavaliar o plano de produção da usina, principalmente o plano de produção das áreas consumidoras de combustível complementar. No caso da Usina de Ipatinga, a Laminação de Tiras a Quente é um grande consumidor de óleo combustível e dúvidas relacionadas ao seu plano de produção em cenários como os mencionados anteriormente são comumente levantadas. Diante disso, simulou-se uma comparação entre a distribuição prevista otimizada com disponibilidade e restrição de consumo de óleo combustível na Laminação de Tiras a Quente.

Conforme Tabela 4, se houvesse restrição de consumo de óleo combustível nos Fornos de Reaquecimento de Placas da Laminação de Tiras a Quente, o plano de produção da linha deveria ser reduzido de 295.400 t de placa no mês para 222.594 t de placa no mês. O plano de produção é elaborado por uma equipe específica de planejamento e controle, em função da demanda de pedidos dos clientes. No entanto, a equipe de energia tem autonomia, para informar à usina a limitação de produção, em função da restrição de consumo de combustível complementar. Estas simulações permitem auxiliar na tomada de decisões pela alta administração com relação à definição do plano de produção.

### 5 CONCLUSÃO

Por meio do desenvolvimento da modelagem de otimização, chegou-se aos seguintes ganhos:

- Agilidade na realização dos balanços e, conseqüentemente, maior disponibilidade de tempo para análise dos resultados e realização de possíveis mudanças. Considerando um tempo para entrada dos dados e configuração dos cenários, a previsão convencional demora, aproximadamente, 1 dia para gerar resultados, enquanto a previsão realizada pelo programa demora poucos minutos e ainda gera resultados otimizados.
- Aumento da precisão do planejamento de combustíveis devido realização em escalas de tempo menores (dias e horas). Enquanto a previsão convencional é feita por blocos, ou seja, uma mesma previsão é feita para dias similares no mês, a previsão realizada pelo programa contempla todos os dias, independente se os dias são similares ou não. Se estiver disponível um plano de produção horário, o programa também é capaz de gerar uma previsão para cada hora em poucos minutos, um trabalho que seria muito árduo para a previsão convencional.
- Generalização do balanço de combustíveis e geração de energia elétrica para qualquer cenário de uma usina siderúrgica. Os destinos e combustíveis



podem ser modelados, conforme equipamentos instalados em cada usina siderúrgica.

- Tomada de decisão no planejamento da produção, quando há racionamento de combustíveis complementares e/ou redução das linhas operacionais geradoras de gases (coqueiras, alto-fornos e aciarias). O programa permite calcular a produção mínima de uma determinada linha, em função de uma restrição ao consumo de um determinado combustível.
- Tomada de decisão com relação à geração de energia elétrica própria a custo de combustível complementar. O programa analisa os preços de energia elétrica e combustível complementar queimado nas caldeiras, para verificar a viabilidade de geração de energia elétrica própria e redução de aquisição no mercado externo.
- Tratamento dos dados de entrada por meio de ferramentas estatísticas, agregando maior confiabilidade aos resultados.
- Integração da curva de operação das turbinas/extração de vapor na análise da distribuição de combustíveis.

O programa resolve problemas de distribuição que seriam complexos para seres humanos em poucos segundos, permite fazer análises estratégicas e gerar relatórios com a distribuição de cada combustível por área.

Como próxima etapa, está prevista a elaboração da metodologia desenvolvida (balanço estático) em tempo real (“online”) e sua implementação no sistema PIMS.

A distribuição otimizada “online” auxiliará a equipe a realizar a gestão de recebimento e distribuição dos combustíveis de forma ótima e com o menor custo.

## Agradecimentos

Agradecemos aos engenheiros Marcos Moraes Tavares e Ronaldo Mendonça Lima Júnior, pelas idéias sugeridas, para composição do software e à Universidade Federal de Minas Gerais, pelo apoio técnico e desenvolvimento do código-fonte do programa.

## REFERÊNCIAS

- 1 Ron Shamir, The efficiency of the simplex method: A survey, Management Science (1987).
- 2 Narendra Karmarkar, A new polynomial time algorithm for linear programming, Combinatorica (1984).