

# METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO CONTÍNUA DO CONSUMO ESPECÍFICO POR COMBUSTÍVEL E PRIORIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ENTRE CALDEIRAS \*

José Geraldo da Silva Moreira<sup>1</sup>  
Eder Quental de Araújo<sup>2</sup>  
Flávio Neves Teixeira<sup>3</sup>

## Resumo

O presente trabalho tem como principal objetivo apresentar os resultados mais importantes sobre a aplicação de modelos de regressão linear múltipla em caldeiras multi-combustível, visando a identificação da performance da caldeira na queima de cada combustível isoladamente, mesmo em situações onde esteja havendo a queima simultânea de vários combustíveis. Buscou-se também comprovar a aplicabilidade das técnicas propostas através de ferramentas que foram elaboradas e implantadas em uma planta existente, visando a coleta e tratamento dos dados em tempo real. Com base nos dados coletados em tempo real, pode-se identificar a performance individual, por combustível e por caldeira..

**Palavras-chave:** Caldeira multi-combustível; Regressão linear múltipla; Consumo específico de combustível; Gases siderúrgicos.

## METHODOLOGY FOR CONTINUOUS DETERMINATION OF SPECIFIC CONSUMPTION BY FUEL AND PRIORITIZATION OF FUEL DISTRIBUTION BY BOILERS

### Abstract

The present work has as main objective to present the most important results on the application of multiple linear regression models in multi-fuel boilers, aiming to identify the boiler performance in the burning of each fuel alone, even in situations where there is the simultaneous burning of several fuels. It also intends to prove the applicability of the proposed techniques through tools that have been developed and implemented in an existing plant, aiming at the collection and treatment of data in real time. Based on data collected in real time, where individual performance can be identified by fuel and boiler.

**Keywords:** Multi-fuel boilers, multiple linear regression models, optimization of fuel distribution, steel plant gases.

<sup>1</sup> Engenheiro Eletricista, Mestre em Engenharia de Energia CEFET/UFSJ, Consultor Técnico, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia de Energia CEFET/UFSJ, Assessor Técnico, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil..

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Mecânica UNIFEI, Professor Titular, Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ, São João del Rei, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia e os resultados de um projeto realizado com intuito de reduzir o consumo térmico específico (Mcal/t vapor) das caldeiras de uma Central Termoelétrica de uma Usina Siderúrgica.

Nesta Central Termoelétrica há 4 caldeiras onde são queimados simultaneamente 6 combustíveis diferentes: GCO(Gás de Coqueria), GAF(Gás de Alto-Forno), GAC(Gás de Aciaria), GN(Gás Natural), Óleo combustível 1A e Alcatrão.

A quantidade queimada dos gases siderúrgicos é função da sobra dos mesmos, baseada nos respectivos processos produtores e consumidores. A distribuição entre as caldeiras é feita livremente, respeitando-se as limitações dos equipamentos.

Uma forma de se reduzir o consumo específico sem grandes investimentos seria a identificação da resposta de cada caldeira a um determinado combustível, o que permitiria a distribuição otimizada dos combustíveis entre as caldeiras.

Para isto foi elaborado um sistema para tratamento dos dados recentes do histórico de produção; estes dados são armazenados em um sistema comumente conhecido por sua sigla em inglês PIMS - Plant Information Management System.

A partir do tratamento estatístico destes dados foi possível a identificação do desempenho individual de cada combustível, e a conseqüente distribuição otimizada dos combustíveis, com seu efeito no consumo específico total da planta.

### 1.1 A Central Termoelétrica em estudo

A central termoelétrica em estudo é responsável pela produção de vapor, pela geração de energia elétrica e pelo envio de ar soprado para os Altos-Fornos de uma usina siderúrgica. É basicamente composta pelos seguintes equipamentos: 4 caldeiras com capacidade de 140 t/h cada, 2 turbogeradores com capacidade de 15 MW cada, 1 turbogerador com capacidade de 25 MW, 2 turbosopradores com capacidade de 5300 Nm<sup>3</sup>/min e 1 turbogerador-soprador com capacidade de 29 MW ou 5300 Nm<sup>3</sup>/min.

As caldeiras utilizam como combustível os gases gerados nos processos de Alto-Forno (GAF), Coqueria (GCO) e Aciaria (GAC), assim como gás natural (GN), alcatrão e óleo combustível 1A.

A figura 1 apresenta um diagrama da Central Termoelétrica em estudo com os suas respectivas fontes de combustível.

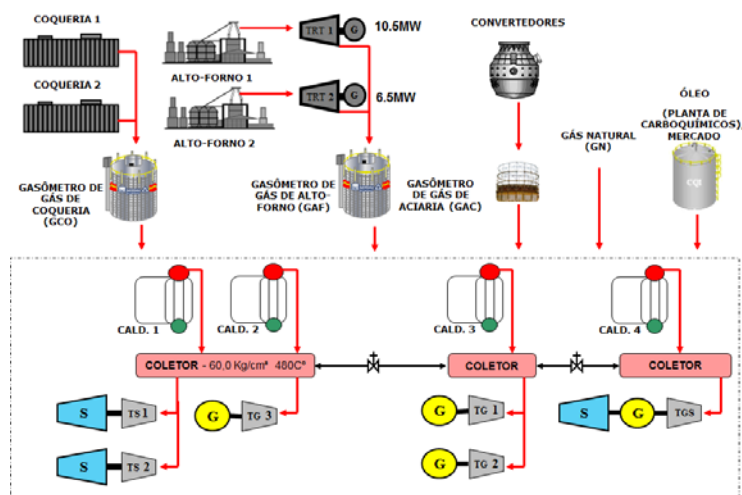


Figura 1. Central Termoelétrica analisada

## 1.2 Combustíveis e trocas de calor

Nas centrais termoelétricas de uma indústria siderúrgica são utilizados gases de processo e combustíveis adquiridos externamente. Cada um destes combustíveis tem características próprias que determinam onde são melhor aproveitados nos diversos componentes de uma caldeira. Na central termoelétrica em estudo são utilizados os combustíveis:

- Gás de Coqueria (GCO): produzido durante a coqueificação do carvão na planta de coqueria. O gás de coqueria tem um teor alto de hidrogênio e metano, o que lhe confere um PCI mais elevado, com temperatura de chama e velocidade de queima também elevados. Desta forma, este combustível troca bastante calor com as paredes da fornalha das caldeiras e com os superaquecedores. Possui o PCI aproximado de 4.200 kcal/Nm<sup>3</sup>;

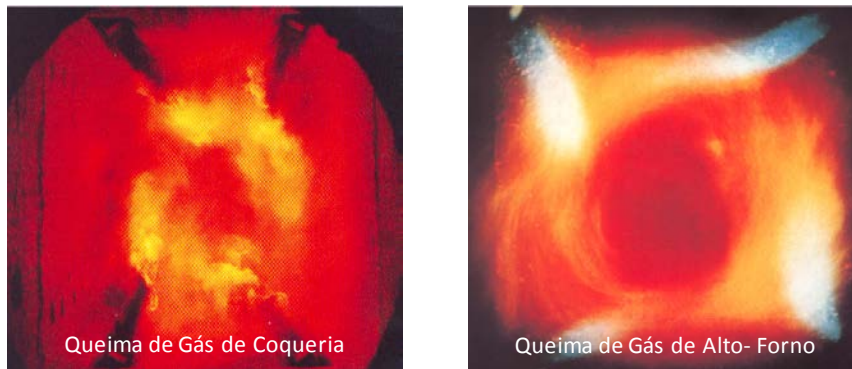
- Gás de Alto-forno (GAF): produzido durante a redução do minério de ferro nos altos-fornos. O gás de alto-forno é um combustível com um teor bastante alto de nitrogênio, próximo de 50%, o que faz com que o volume de fumos gerados por energia de combustível seja muito alto, aproximadamente 1,9 Nm<sup>3</sup>/Mcal. Com um volume de fumos alto, o tempo de residência dos gases na fornalha fica menor, necessitando de maior troca de calor no caminho dos gases para a chaminé, principalmente no economizador e no pré-aquecedor de ar, para que haja um melhor aproveitamento da energia dos combustíveis. Possui o PCI aproximado de 800 kcal/Nm<sup>3</sup>;

- Gás de Aciaria (GAC): produzido durante o processo de sopro na aciaria. A parte combustível do gás de aciaria é basicamente composta de monóxido de carbono, gás com alta toxicidade, que se caracteriza por ter uma troca de calor na fornalha e também no caminho dos fumos para a chaminé. Possui o PCI aproximado de 1.750 kcal/Nm<sup>3</sup>;

- Gás Natural (GN): é composto basicamente por metano, e seu alto PCI lhe confere altas temperaturas de chama, o que faz com que as trocas de calor deste combustível ocorram principalmente na região da fornalha. Possui o PCI aproximado de 9.000 kcal/Nm<sup>3</sup>;

- Óleo Combustível/ Alcatrão: combustíveis líquidos, queimados após atomização com vapor, trocam calor principalmente com a fornalha e o superaquecedor. Possui PCI aproximado de 9000 kcal/kg.

Desta forma, em uma caldeira multcombustível, como as existentes na Central Termoelétrica estudada, cada combustível tem um desempenho diferente em função das suas características e das formas de recuperação de calor. Na figura 2, tem-se imagens reais, obtidas por um sistema de circuito fechado de câmeras de TV (CFTV) colocado na parte superior de uma caldeira de queimadores tangenciais, de uma fornalha queimando gás de coqueria (GCO) e gás de alto-forno (GAF). Observa-se que a queima do gás de coqueria apresenta uma chama mais avermelhada, o que favorece as trocas por radiação com as paredes da fornalha e o superaquecedor. [2]



**Figura 2.** Vista superior de uma fornalha durante a queima de GCO e GAF.

Baseados nestas características espera-se que as caldeiras apresentem um desempenho diferenciado em função do combustível utilizado, e, dependendo da manutenção e limpeza dos diversos equipamentos de troca de calor este desempenho pode ser diferente para cada caldeira individualmente. [1] [3]

Surgem então algumas questões técnicas e operacionais que impactam nos resultados da central termoelétrica em estudo. Entre estas questões, pode-se citar:

- Como identificar variações de desempenho de cada caldeira para cada combustível à medida que as superfícies de troca se tornam sujas ou incrustadas?
- Como identificar as diferenças de consumo específico de cada combustível em uma caldeira sem alterar a rotina de operação para queimá-lo isoladamente?
- Há alguma forma de se utilizar os dados de desempenho isolado dos combustíveis para identificar preditivamente a necessidade de manutenção dos componentes da caldeira?
- Qual a melhor forma de implantar e automatizar a utilização das metodologias desenvolvidas visando torná-las utilizáveis por pessoas de nível operacional e técnico de uma empresa?
- Há alguma forma de se utilizar as diferenças de desempenho dos combustíveis para orientar os operadores para que priorizem sua utilização na caldeira onde seu desempenho seja melhor?

Procurou-se então, criar uma metodologia que tornasse possível a identificação das diferenças de desempenho entre os combustíveis nas caldeiras de uma central termoelétrica e a priorização da distribuição dos combustíveis nas caldeiras onde apresentassem melhor rendimento. Desta forma, seria possível obter um melhor rendimento global na Central Termoelétrica, o que permitiria uma maior produção de vapor e conseqüentemente de energia elétrica a partir do mesmo consumo de combustível.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Aquisição de dados em tempo real e armazenamento em base histórica

Visando a aquisição de dados em tempo real, foram utilizados os Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCD) responsáveis pelo controle de processos das caldeiras, os quais enviam os dados para um sistema de gerenciamento de dados históricos (PIMS - Process Information Management Systems), utilizando para isto o protocolo OPC (OLE for Process Control). Uma vez armazenados, estes dados ficam disponíveis para consulta via suplemento do Microsoft Excel.

### 2.2 Metodologia para identificação do desempenho individual de cada combustível em cada caldeira.

Para a identificação do desempenho individual de cada combustível a partir dos dados históricos recentes armazenados no sistema PIMS existente na central termelétrica, foi desenvolvida uma metodologia baseada na regressão linear múltipla da equação de geração de vapor a partir das vazões e PCI (Poder Calorífico Inferior) dos combustíveis enviados para cada caldeira, conforme será detalhado a seguir.

#### 2.2.1 Equação Linear de Geração de Vapor em Função da Energia dos Combustíveis

Supondo a caldeira como um sistema linear, pode-se estimar a geração de vapor a partir dos combustíveis pela seguinte equação:

$$Q_{\text{vapor}} = k_{\text{GAF}} E_{\text{GAF}} + k_{\text{GCO}} E_{\text{GCO}} + k_{\text{GAC}} E_{\text{GAC}} + k_{\text{OLEO}} E_{\text{OLEO}} \quad (1)$$

Onde:

Q – Vazão

k – Coeficiente do respectivo combustível

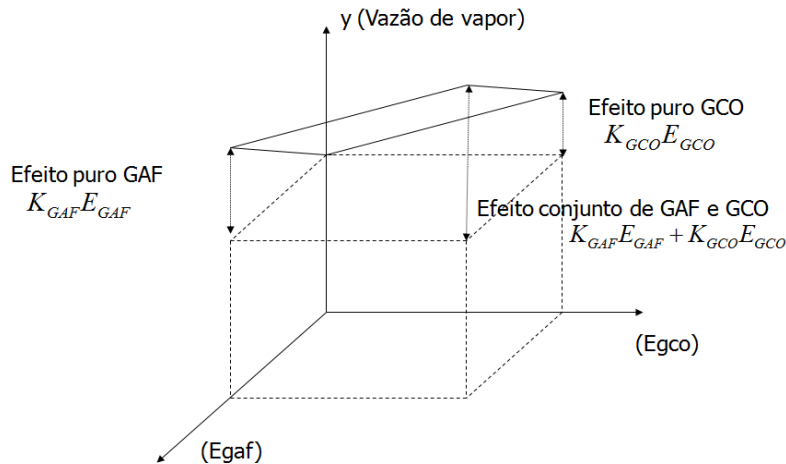
E – Energia enviada para caldeira pelo combustível

Para a energia enviada pelo combustível, como por exemplo, o GAF, tem-se então:

$$E_{\text{GAF}} = Q_{\text{GAF}} \text{PCI}_{\text{GAF}} \quad (2)$$

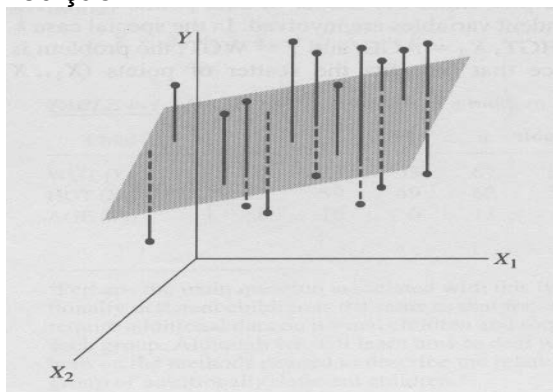
Onde: PCI – Poder calorífico inferior

Para efeito de facilidade de representação, será considerada uma caldeira que esteja queimando 2 combustíveis simultaneamente. Neste caso, pode-se considerar o modelo mostrado na figura 3, onde a equação pode ser representada por um plano.



**Figura 3.** Representação gráfica da equação de consumo para 2 combustíveis.

Espera-se, portanto, que os dados históricos coletados pelo sistema PIMS da central termoeletrica tenham um comportamento semelhante ao mostrado na figura 4. Ou seja, os dados devem se aproximar da equação do plano teórico, apresentando, no entanto, certo grau de dispersão gerado por interferências externas ao processo e por ruídos no sistema de medição.



**Figura 4.** Comportamento esperado dos dados históricos coletados.

De posse destes dados, deseja-se descobrir os coeficientes  $k_{comb}$ , que definem o plano da equação de geração de vapor. Para isto, será utilizado o recurso da regressão linear múltipla implementado no Microsoft Excel e a facilidade de integração do mesmo com a base de dados do sistema PIMS Exaquantum.

### 2.2.2 Determinação e acompanhamento dos coeficientes de cada combustível

Para identificar a influência isolada de cada combustível, são necessárias 3 etapas:

- Leitura dos dados de processo e armazenamento em banco de dados - esta etapa deve ser executada de forma automática pela instrumentação de campo, SDCD e sistema PIMS. Para tal tornou-se necessário a parametrização dos sistemas existentes para que fizessem a coleta dos dados na resolução e frequência desejadas.
- Recuperação dos dados em planilha Excel, análise de regressão linear múltipla e armazenamento dos coeficientes obtidos – esta etapa também

deve ser executada de forma automática por uma planilha elaborada em Microsoft Excel, utilizando funções nativas do Microsoft Excel, funções próprias do suplemento Exaquantum e programação em VBS (Visual Basic Script). Os coeficientes obtidos são armazenados em uma planilha específica para tal.

- Tratamento e análise do histórico dos coeficientes armazenados – nesta etapa são criadas tabelas e gráficos de acompanhamento que permitam aos técnicos de processo a identificação de problemas existentes ou potenciais.

### 2.2.3 Ferramentas em Microsoft Excel.

Foi então elaborada uma planilha para identificar as variações de desempenho individual de cada combustível em cada caldeira, a qual deve ser atualizada diariamente, coletando os dados do dia anterior para a produção de vapor, consumo de gases e poder calorífico inferior coletados com o intervalo de 1 minuto. A partir destes dados é feita a regressão linear multivariável para a equação (1) e são obtidos os coeficientes da mesma para o respectivo dia. Este procedimento deve ser repetido diariamente para o acompanhamento histórico da evolução dos coeficientes.

A figura 5 mostra a aba de coleta de dados da planilha elaborada para o levantamento, mostrando os coeficientes da caldeira 1 em uma determinada data.

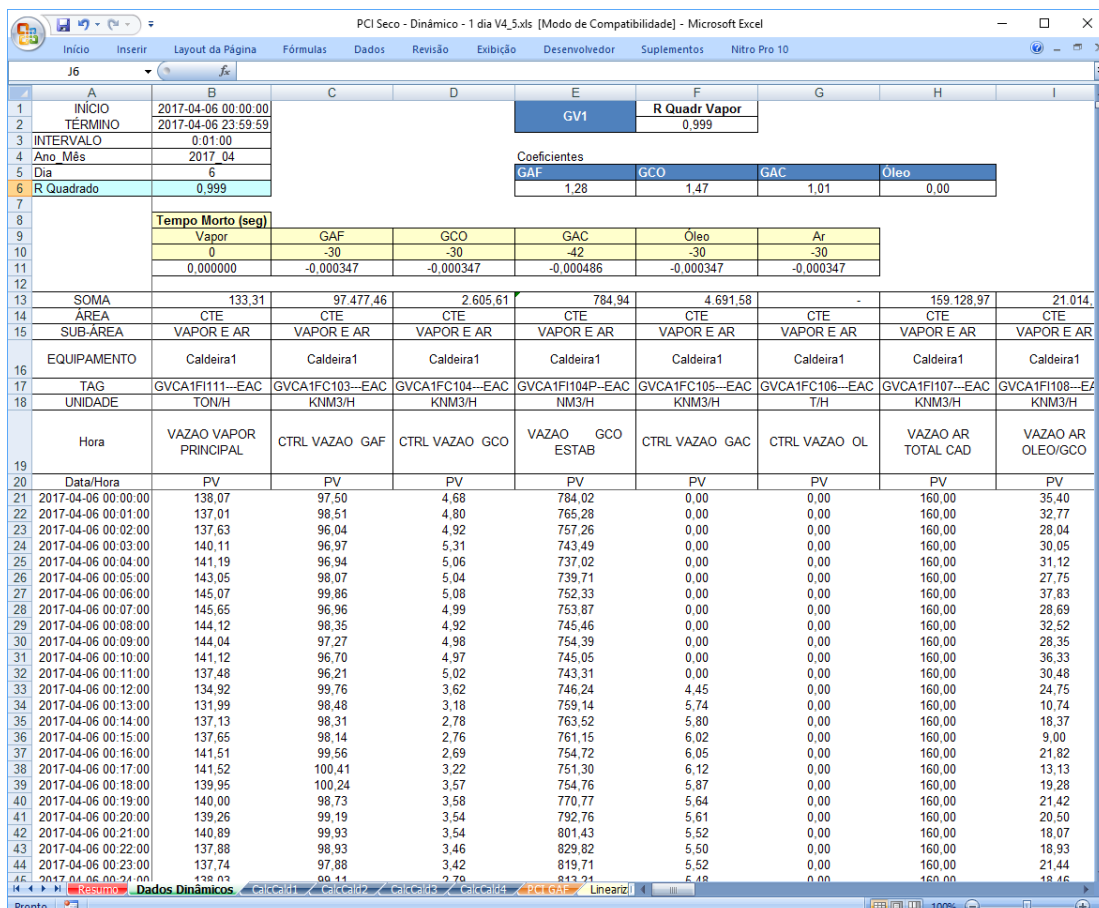


Figura 5. Regressão linear múltipla com dados históricos de um dia.

## 2.3 Metodologia para orientação em tempo real

Essa metodologia tem como objetivo orientar os operadores de caldeiras, via ferramenta online, visando a priorização dos combustíveis para as caldeiras onde apresentem melhor desempenho. Normalmente diferenças de rendimento de um combustível entre as caldeiras são indicativos de necessidades de limpeza ou manutenção dos equipamentos. No entanto, quase sempre estas intervenções dependem de paradas operacionais para serem executadas e para tanto é necessário aguardar programação específica, a qual pode demorar dias ou até meses para acontecer.

Portanto, é necessário que sejam previstas ações mitigatórias para atenuar os efeitos das diferenças de performance entre os combustíveis nas caldeiras. Uma ação mitigatória a ser tomada é a priorização da utilização dos combustíveis nas caldeiras onde apresentem melhor desempenho.

Para facilitar o acompanhamento desta atividade de priorização dos combustíveis foi criada uma tela de acompanhamento em tempo real, com atualização a cada 10 segundos, da distribuição dos combustíveis conforme a ordem de prioridade otimizada.

A figura 6 mostra a tela que foi desenvolvida para exibição em uma TV de 46 polegadas e visa orientar operadores na priorização da utilização dos gases, direcionando-os preferencialmente para onde seu aproveitamento energético seja melhor. No quadrante superior esquerdo, há um quadro onde é exibido o controle de priorização dos combustíveis.

Neste quadro, onde a distribuição foi temporária e propositalmente alterada para fins didáticos, pode-se acompanhar como os combustíveis estão alocados nas caldeiras e se esta alocação atende ao critério de priorizá-los nas caldeiras onde apresentem melhor desempenho. Para entender-se melhor a utilização desta tela, na parte superior, onde é acompanhada a distribuição do GAF, tem-se:

- Na primeira linha os consumos específicos do combustível em cada uma das caldeiras, baseado na média móvel dos últimos 10 dias.
- Na segunda linha estão os valores atuais de vazão de GAF em cada uma das caldeiras.
- Na terceira linha é mostrada a prioridade recomendada da distribuição dos combustíveis, utilizando-se como referência os valores da primeira linha.
- Na quarta linha, é mostrada a ordem de distribuição atual, conforme a vazão mostrada na segunda linha e sinalizado com cores o nível de atendimento à priorização recomendada. O nível de atendimento às orientações é sinalizado em uma escala que vai do verde (atendendo totalmente) ao vermelho (não atendendo totalmente).



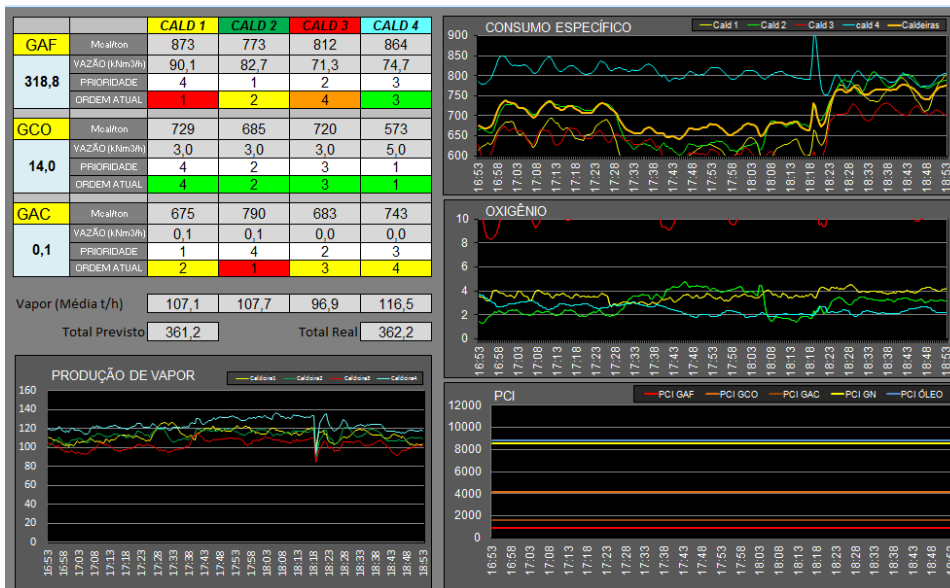


Figura 6. Tela de acompanhamento do consumo específico das caldeiras

Com este recurso de sinalização por cores é possível aos operadores, e também aos gestores, perceber rapidamente se a distribuição de combustíveis está adequada e atuar na correção ou solicitar aos responsáveis para que o façam.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliação das oportunidades de ganho potencial oriundas da distribuição otimizada de combustíveis foi elaborada uma planilha utilizando os recursos do Microsoft Excel Solver. Na Erro! Fonte de referência não encontrada. é parametrizada uma situação real e mostrado o cálculo do consumo específico com a distribuição igual dos combustíveis. Na figura 8 é mostrado o consumo específico para a mesma situação real após a otimização dos combustíveis.

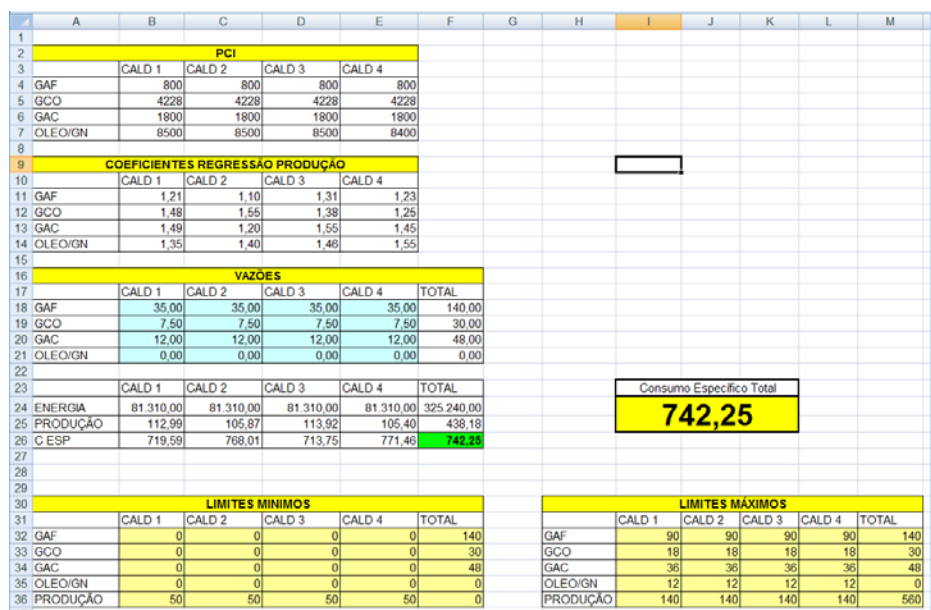


Figura 7. Simulação do consumo específico com distribuição igual de combustíveis



## 4 CONCLUSÃO

Os trabalhos realizados permitiram o desenvolvimento de uma metodologia para identificar diariamente as variações de desempenho que um determinado combustível apresenta em cada uma das caldeiras de uma Central Termoelétrica, sem que para isto fosse necessária a alteração da rotina operacional para realização de manobras específicas. Desta forma, foi possível a identificação de novos KPIs para a operação e gestão de caldeiras multicomcombustíveis, e foram também desenvolvidas ferramentas, para o acompanhamento e utilização dos referidos indicadores.

Como ponto positivo, deve-se ressaltar a utilização do Microsoft EXCEL, software amplamente difundido no meio empresarial e acadêmico, o que facilita a utilização e manutenção por parte de engenheiros e técnicos de operação.

Com a identificação do desempenho individual de cada combustível, tornou-se possível priorizar a utilização dos combustíveis nas caldeiras onde apresentem o melhor desempenho, com a consequente redução no consumo específico total da planta.

Pelo potencial demonstrado nesse trabalho, estas ferramentas deveriam ser parte integrante dos sistemas de controle de centrais termoelétricas e caldeiras multicomcombustível.

## REFERÊNCIAS

- 1 Bazzo, Edson. 1995. *Geração de Vapor*. 2nd ed. Vol. 1. Florianópolis: Ed. da UFSC.
- 2 Fang, Qingyan, Amir A B Musa, Yan Wei, Zixue Luo, and Huaichun Zhou. 2012. "Numerical Simulation of Multifuel Combustion in a 200 MW Tangentially Fired Utility Boiler." In *Energy and Fuels*, 26:313–23. doi:10.1021/ef201149p.
- 3 Pera, Hildo. 1990. *Geradores de Vapor: Um Compêndio Sobre a Conversão de Energia Com Vistas À Preservação Da Ecologia*. 2nd ed. São Paulo: Ed. Fama