

# MODELAGEM MATEMÁTICA DE OTIMIZAÇÃO APLICADA ÀS OPERAÇÕES DE CALDEIRAS INDUSTRIAIS

**Cleber Damião Rocco**

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar – Departamento de Engenharia de Produção  
Rod. Washington Luís – Km 235, São Carlos, SP – CEP: 13565-905  
E-mail: cleberrocco@yahoo.com.br

**Reinaldo Morabito**

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar – Departamento de Engenharia de Produção  
Rod. Washington Luís – Km 235, São Carlos, SP – CEP: 13565-905  
E-mail: morabito@ufscar.br

## RESUMO

Este trabalho propõe um modelo de programação inteira mista para apoiar as decisões de gerenciamento das operações em múltiplas caldeiras industriais. O modelo determina quais caldeiras devem ser acionadas para produzir vapor, assim como quais delas devem permanecer ligadas ou serem desligadas, uma vez que o custo de partida (*start-up*) é mais custoso do que o custo de aquecimento (*warm-up*). O modelo também determina o *mix* dos combustíveis queimados em cada caldeira e faz o gerenciamento da quantidade do estoque de combustíveis na fábrica de acordo com o nível de segurança escolhido. Os resultados da aplicação do modelo em um estudo de caso indicaram a economia total de aproximadamente 9% em comparação à operação real. O modelo foi implementado na linguagem de modelagem GAMS e resolvido com o CPLEX. Na literatura relacionada são poucos os trabalhos que abordaram as operações em caldeiras industriais.

**PALAVRAS-CHAVE:** caldeira industrial, programação linear inteira mista, GAMS/CPLEX. Área de classificação principal: (IND – PO).

## ABSTRACT

This work proposes a mixed integer programming model to support management decisions in an operation of multiple industrial boilers. The model determines which boilers must be turned-on to produce steam, as well as which must be turned-off, once the start-up cost is more expensive than warm-up cost. The model also determines the fuel mix burned in each boiler and it manages the fuel inventory in the plant according to the chosen safety level. The results from the employment of the model in a study case indicated a total economy of nearly 9% in comparison of the real operation system. The model was implemented in GAMS modeling language and solved with CPLEX. There are few works in the related literature which approached the operations in industrial boilers.

**KEYWORDS:** industrial boiler, mixed integer programming, GAMS/CPLEX. Main area: (IND – PO).

## 1. Introdução

As agroindústrias são grandes consumidoras de vapor em seus processos de transformação de matérias-primas em produtos acabados e também em diferentes atividades de rotina: concentração de sucos e polpas, cozimento dos alimentos e da celulose, esterilização e pasteurização, limpeza de equipamentos etc. No Brasil, o vapor industrial geralmente é produzido por caldeiras à eletricidade, a óleo BPF, ou a biomassas. As caldeiras a biomassas são as mais utilizadas e consomem diversos tipos de insumos, entre os mais comuns estão o bagaço de cana-de-açúcar, o cavaco de madeira, a lenha e a palha de arroz. Os responsáveis pelas operações em caldeiras industriais frequentemente utilizam planilhas eletrônicas do tipo Excel para registrar o consumo e acompanhar o nível dos estoques dos combustíveis. Os pacotes computacionais em geral são utilizados somente para controle e monitoramento do volume e da pressão do vapor gerados, de maneira a atender adequadamente à demanda de vapor da fábrica, não importando os custos incorridos.

Em fábricas onde existem mais de uma caldeira para a geração de vapor, os momentos de acionamento e de desligamento dos equipamentos são determinados basicamente pela lógica da possibilidade do aumento ou redução na demanda de vapor. Caso os responsáveis das linhas de produção na fábrica informem aos operadores das caldeiras que haverá uma maior necessidade de vapor em determinada semana, ou em determinado dia específico, os operadores colocam caldeiras suplementares em funcionamento e as desligam logo quando não as forem mais necessárias. A maneira empírica de acionamento e desligamento das caldeiras deixa margem para que o sistema opere de maneira não otimizada e incorra em gastos desnecessários, uma vez que existem custos associados à partida, ao tempo e à maneira de funcionamento dos equipamentos.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo matemático de otimização que representasse as operações e as principais decisões que acontecem no funcionamento de múltiplas caldeiras industriais. A Figura 1 apresenta um esquema do ambiente das decisões e as principais questões que são apoiadas pelo modelo proposto. Em face à ausência de protocolos ou ferramentas que proponham respostas às perguntas mencionadas na Figura 1, o modelo proposto mostra-se relevante e capaz de orientar as decisões nas operações em caldeiras industriais.

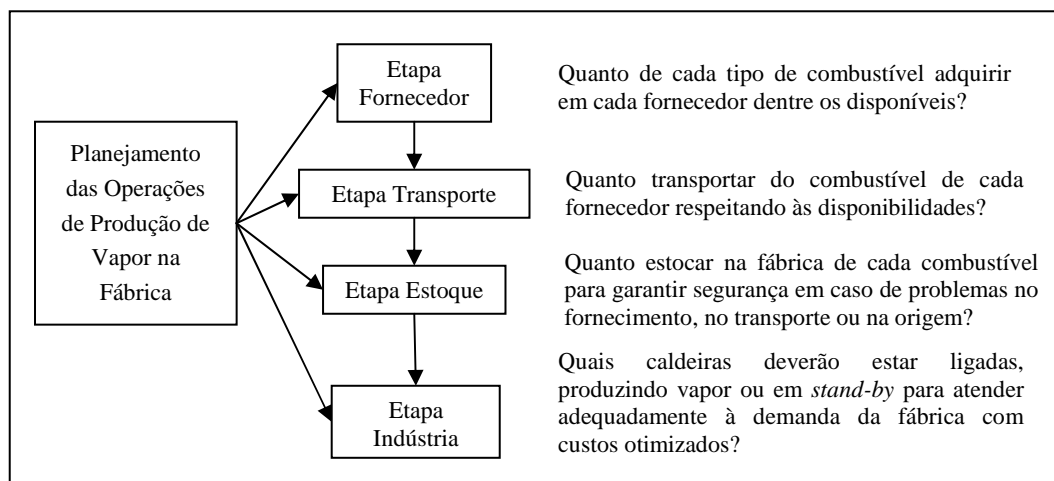


Figura 1. Etapas e principais decisões que são apoiadas pelo modelo.

## 2. Aplicações da Pesquisa Operacional em caldeiras industriais, energia e outros

A aplicação de ferramentas da Pesquisa Operacional e de áreas correlatas (engenharias de sistemas e computação, por exemplo) em assuntos envolvendo caldeiras industriais é bastante recente e tem contribuído na melhoria das operações, proporcionando economias expressivas. Um dos

trabalhos pioneiros na literatura consultada foi de Saha *et al.* (1998), no qual os autores desenvolveram e treinaram uma rede neural multicamadas para o controle do funcionamento de caldeiras de grande capacidade em uma indústria química de Bangladesh. Bastante próximo da abordagem de redes neurais estão os trabalhos que empregam a lógica *fuzzy* (LF) nas mesmas questões de pesquisa. Prokhorenkov e Sovlukov (2002) e Santoso *et al.* (2005) desenvolveram modelos baseados em LF para o controle de variáveis de regulação instantânea (injeção de ar, combustível, emissão de gases etc.) em caldeiras industriais. Mortensen *et al.* (1998) propuseram um modelo de simulação dinâmica baseado em sistemas de equações não-lineares para controlar o carregamento de combustíveis em caldeiras mais antigas para otimizar a produção de energia elétrica.

A modelagem matemática de otimização utilizando de técnicas de programação linear e não-linear ainda é uma abordagem recente nas pesquisas envolvendo caldeiras industriais, geração e fornecimento de energia, uso de fontes alternativas de energia, políticas energéticas etc. Guldman e Wang (1999) desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista (*Mixed Integer Programming - MIP*), e outro em menor instância não-linear, para auxiliar na decisão de planejamento da distribuição de gás em diversos setores nos Estados Unidos. Nagel (2000) construiu um modelo MIP no qual considerou a estrutura completa de geração, fornecimento e consumo energético em uma comunidade alemã. Gustafsson (2000) desenvolveu um modelo MIP para a otimização da estratégia de suprimento energético em prédios na Suécia. Bojić e Dragičević (2002) usaram um modelo MIP para selecionar as fontes de energia para uma fábrica considerando a produção interna e a compra no mercado. No artigo de Bojić e Dragičević (2002) é encontrada uma revisão com doze trabalhos que aplicaram MIP em problemas de energia em diversos segmentos industriais e também não-industriais. Bojić e Dragičević (2006) desenvolveram um modelo linear para otimizar a eficiência na operação de caldeiras industriais para atingir o menor custo total na produção de vapor considerando todo o ciclo de vida do equipamento.

O momento de partida (*start-up*) de caldeiras industriais é um dos mais importantes, custosos e demorados em todo o funcionamento do sistema. O trabalho de Krüger *et al.* (2004) apresenta uma modelagem do *start-up* usando equações não-lineares e as resolve por meio de Programação Quadrática Sequencial. Os autores descrevem ganhos consideráveis no emprego do modelo proposto. O modelo matemático para gerenciamento das operações de produção de vapor proposto no presente artigo considera o *start-up* das caldeiras, bem como os períodos de aquecimento (*warm-up*) com mínima produção de vapor.

Os trabalhos que discutem o *mix* dos combustíveis queimados em caldeiras ainda são poucos na literatura. Kaylen (2005) realizou um estudo econômico do custo de diferentes combustíveis para caldeiras em um complexo industrial químico em Louisiana, Estados Unidos. Dunn e Du (2009) propuseram um algoritmo que minimiza o custo de produção de vapor de acordo com a taxa de alimentação das caldeiras para diferentes combustíveis. O modelo matemático do presente artigo oferece também como resposta o *mix* dos combustíveis queimados nas caldeiras e a escolha baseia-se em critérios econômicos de melhor relação entre o preço do combustível e sua conversão em vapor.

### 3. Modelagem do problema

Neste trabalho as operações e o funcionamento de caldeiras industriais foram modelados utilizando-se o referencial teórico dos problemas de dimensionamento de lotes de produção com *setup* contínuo, não dependente da sequência de produção. Mais informações sobre o assunto podem ser encontradas, por exemplo, na revisão de Drexl e Kimms (1997). Apresentam-se a seguir as notações genéricas utilizadas para representar o modelo matemático proposto:

#### Índices:

- $i$ : indica o fornecedor do combustível (origem):  $\{i = 1, 2, \dots, I\}$ ;
- $j$ : indica a caldeira no sistema:  $\{j = 1, 2, \dots, J\}$ ;
- $k$ : indica o tipo de combustível:  $\{k = 1, 2, \dots, K\}$ ;

- $t$ : informa o macro-período do horizonte de planejamento (semanas):  $\{t = 1, 2, \dots, T\}$ ;
- $n$ : informa o sub-período do macro-período (dias):  $\{n = 1, 2, \dots, N\}$ .

#### Parâmetros:

- $p_{ikt}$ : preço no fornecedor  $i$  do combustível  $k$  no período  $t$ ;
- $h_k$ : custo de estocagem do combustível  $k$  por período;
- $cs_j$ : custo de acionamento (*start-up*) da caldeira  $j$ ;
- $cw_j$ : custo de aquecimento (*warm-up*) da caldeira  $j$ ;
- $m_j$ : porcentagem mínima da capacidade máxima para *start-up* da caldeira  $j$ ;
- $a_{jk}$ : parâmetro que determina se a caldeira  $j$  pode receber o combustível  $k$ ;
- $e_{jn}$ : parâmetro que indica se a caldeira  $j$  está disponível no sub-período  $n$ ;
- $o_{ik}$ : oferta total do combustível  $k$  no fornecedor  $i$ ;
- $av_{ikt}$ : disponibilidade na oferta do combustível  $k$  no fornecedor  $i$  no período  $t$ ;
- $ce_k$ : capacidade na fábrica para estocagem do combustível  $k$ ;
- $v_{jkn}$ : fator de conversão do combustível  $k$  em quantidade de vapor na caldeira  $j$  no sub-período  $n$ ;
- $bc_j$ : capacidade total de produção de vapor da caldeira  $j$ ;
- $lc_j$ : perda de capacidade de produção de vapor da caldeira  $j$ ;
- $\beta$ : coeficiente de segurança na produção de vapor.

#### Variáveis de decisão:

- $TA_{ijkn}$ : quantidade do combustível  $k$  adquirida no fornecedor  $i$  destinado a caldeira  $j$  no sub-período  $n$ ;
- $T_{ikt}$ : quantidade do combustível  $k$  transportada do fornecedor  $i$  no período  $t$ ;
- $IS_{jkn}$ : estoque de segurança do combustível  $k$  para a caldeira  $j$  no sub-período  $n$ ;
- $I_{kt}$ : quantidade do combustível  $k$  em estoque na fábrica no período  $t$ ;
- $Q_{ijkn}$ : quantidade do combustível  $k$  proveniente do fornecedor  $i$  e consumido na caldeira  $j$  no sub-período  $n$ ;
- $S_{jn}$ : variável de decisão do *start-up* – assume valores no par binário 0-1. Quando  $S_{jn} = 1$ , ocorre o acionamento da caldeira  $j$  no sub-período  $n$ , uma vez que no sub-período anterior a caldeira estava desligada;
- $W_{jn}$ : variável de decisão do *warm-up* – assume valores no par binário 0-1. Quando  $W_{jn} = 1$  a caldeira está ligada e aquecida, ou seja, preparada para produzir vapor imediatamente. Quando  $W_{jn} = 0$  a caldeira está totalmente desligada e necessitará fazer *start-up* para produzir vapor.

#### Função objetivo:

A equação (1) representa a função objetivo do modelo.

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_k \sum_t p_{ikt} T_{ikt} + \sum_k \sum_t h_k I_{kt} + \sum_j \sum_n cs_j S_{jn} + \sum_j \sum_n cw_j W_{jn} \quad (1)$$

A função objetivo minimiza a somatória das quatro parcelas que compõem os principais custos envolvidos no sistema. A primeira parcela diz respeito à aquisição total dos combustíveis para a geração de vapor, a segunda corresponde ao custo de estocagem dos combustíveis na fábrica, a terceira versa sobre o custo de acionamento (*start-up*) das caldeiras, e finalmente a quarta parcela contabiliza os custos de aquecimento (*warm-up*) das caldeiras.

Restrições:

$$e_{jn} a_{jk} IS_{jkn} = e_{j(n-1)} a_{jk} IS_{jk(n-1)} - \sum_i e_{jn} a_{jk} Q_{ijkn} + \sum_i e_{jn} a_{jk} TA_{ijkn} \quad \text{para } \forall j, k, n \quad (2)$$

$$I_{kt} \geq \sum_j \sum_n^{N(t)} e_{jn} a_{jk} IS_{jkn} \quad \text{para } \forall k, t \quad (3)$$

$$T_{ikt} = \sum_j \sum_n^{N(t)} e_{jn} a_{jk} TA_{ijkn} \quad \text{para } \forall i, k, t \quad (4)$$

$$I_{kt} = I_{k(t-1)} - \sum_i \sum_j \sum_n^{N(t)} e_{jn} a_{jk} Q_{ijkn} + \sum_i T_{ikt} \quad \text{para } \forall k, t \quad (5)$$

$$\sum_t T_{ikt} \leq o_{ik} \quad \text{para } \forall i, k \quad (6)$$

$$T_{ikt} \leq av_{ikt} \quad \text{para } \forall i, k, t \quad (7)$$

$$I_{kt} \leq ce_k \quad \text{para } \forall k, t \quad (8)$$

$$\sum_j \sum_k \sum_n^{N(t)} v_{jkn} e_{jn} a_{jk} IS_{jkn} \geq \beta \cdot \sum_n^{N(t)} d_n \quad \text{para } \forall t \quad (9)$$

$$\sum_k v_{jkn} e_{jn} a_{jk} IS_{jkn} \leq (bc_j W_{jn} - lc_j S_{jn}) e_{jn} \quad \text{para } \forall j, n \quad (10)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k v_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{ijkn} \geq d_n \quad \text{para } \forall n \quad (11)$$

$$\sum_i \sum_k v_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{ijkn} \geq bc_j m_j e_{jn} W_{jn} \quad \text{para } \forall j, n \quad (12)$$

$$\sum_i \sum_k v_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{ijkn} \leq (bc_j W_{jn} - lc_j S_{jn}) e_{jn} \quad \text{para } \forall j, n \quad (13)$$

$$S_{jn} \geq W_{jn} e_{jn} - W_{j,(n-1)} e_{j,(n-1)} \quad \text{para } \forall j, n \quad (14)$$

$$S_{jn} \leq W_{jn} \quad \text{para } \forall j, n \quad (15)$$

$$S_{jn}, W_{jn} \in \{0,1\}; \quad Q_{ijkn} \geq 0; \quad TA_{ijkn} \geq 0; \quad T_{ikt} \geq 0; \quad IS_{jkn} \geq 0; \quad I_{kt} \geq 0. \quad (16)$$

A primeira restrição apresentada [equação (2)] refere-se ao balanceamento dos estoques de segurança dos combustíveis ( $IS_{jkn}$ ) para todas as caldeiras  $j$ , combustíveis  $k$  e sub-períodos  $n$ . Para cada combustível  $k$ , o estoque do período atual é igual ao estoque do período anterior adicionado à quantidade de combustível adquirido pela fábrica ( $TA_{ijkn}$ ) e subtraído a quantidade de combustível queimado nas caldeiras ( $Q_{ijkn}$ ) em determinado período de tempo. A equação (3) faz o equacionamento dos estoques de segurança de cada caldeira com o estoque total agregado para cada

período  $t$ , pois na prática, não faz sentido separar o estoque normal e o de segurança, pois são o mesmo estoque, e o gerenciamento faz sentido no período  $t$ , e não no sub-período  $n$ . A equação (4) faz a agregação das quantidades adquiridas dedicadas a cada caldeira na variável do total transportado de combustível por período e origem. A equação (5) cuida do balanceamento de estoque total de cada combustível  $k$  entre os períodos  $t$ . A restrição (6) limita a somatória do total transportado em todos os períodos no parâmetro de oferta total nas origens. A restrição (7) limita a quantidade transportada em cada período de acordo com a disponibilidade temporal do combustível na origem. A restrição (8) impõe limite no nível do estoque de combustível na fábrica por restrições de infra-estrutura física disponível para armazenagem. A restrição (9) é responsável por calcular qual a quantidade de estoque de segurança requerido em cada período de acordo com a demanda da fábrica, isto por meio da multiplicação do coeficiente Beta ( $\beta$ ) do nível de segurança na somatória do vapor requerido entre os sub-períodos de determinado período. A restrição (10) limita a capacidade das caldeiras no cálculo da produção de vapor com o estoque de segurança. A restrição (11) é responsável pelo atendimento da demanda de vapor da fábrica em todos os sub-períodos. As inequações (12) e (13) são responsáveis pelos limites mínimos e máximos da produção de vapor em cada caldeira em cada sub-período  $n$ . As restrições (14) e (15) dizem respeito ao controle do *start-up* e *warm-up* das caldeiras. A restrição (15), apesar de ser redundante com a restrição (14) foi testada com o propósito de fortalecer a relação entre as variáveis de *start-up* e *warm-up*, pois a primeira assume sempre valor menor ou, no máximo, igual à segunda. Em (16) estão as restrições do domínio das variáveis de decisão do modelo.

As equações de (17) a (20) são parâmetros computados após a solução do problema e contabilizam os principais resultados do modelo. A equação (17) informa qual a produção de vapor de cada caldeira  $j$  em cada sub-período  $n$ . A equação (18) agrega as origens  $i$  dos combustíveis para cada caldeira  $j$  em cada sub-período  $n$ . A equação (19) agrega, além da origem  $i$ , os sub-períodos  $n$  para informar qual o total do combustível  $k$  consumido em cada caldeira  $j$  no período  $t$ . A equação (20) contabiliza o custo total somente de aquisição dos combustíveis, pois este valor é importante para a contabilidade da empresa estimar o orçamento anual destinado à compra destes para a operação das caldeiras.

$$VP_{jn} = \sum_i \sum_k v_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{ijkn}^* \quad \text{para } \forall j, n \quad (17)$$

$$e_{jn} a_{jk} Q_{jkn}^1 = \sum_i e_{jn} a_{jk} Q_{ijkn}^* \quad \text{para } \forall j, k, n \quad (18)$$

$$a_{jk} Q_{jkt}^2 = \sum_i \sum_n^{N(t)} e_{jn} a_{jk} Q_{ijkn}^* \quad \text{para } \forall j, k, t \quad (19)$$

$$V1 = \sum_{ikt} p_{ikt} T_{ikt}^* \quad (20)$$

Em relação ao número de variáveis e restrições do modelo. Se o problema possui  $I$  fornecedores dos combustíveis,  $K$  número de tipos de combustíveis,  $J$  caldeiras no sistema,  $T$  períodos e  $N$  sub-períodos, o modelo – sem incluir a restrição (15) e as equações de (17) a (20) – possui:  $JN(2IK + K + 2) + KT(I+1) + I$  variáveis, das quais  $2JN$  são inteiras, e o número de restrições é dado por  $IK(2T+1) + JN(K+4) + T(3K+1) + N$ . No experimento computacional apresentado a seguir, baseado em uma situação real, o sistema é constituído por:  $I = 5$ ,  $J = 4$ ,  $K = 5$ ,  $T = 50$ ,  $n = 350$ , na qual o modelo resultou em 16.275 restrições e 81.301 variáveis, das quais 2.800 são binárias.



## 4. Estudo de caso e resultados computacionais

Uma fábrica de alimentos de grande porte localizada na cidade de Goiânia (GO) participou desta pesquisa e permitiu que o modelo desenvolvido neste trabalho fosse aplicado nas operações de suas caldeiras industriais com o propósito de validar e proceder com ajustes de modelagem. Na fábrica são produzidos principalmente produtos à base de tomate, e o consumo médio de vapor oscila em torno de 900 toneladas diárias. Contudo, durante o período da safra agrícola do tomate industrial (de julho a novembro), a demanda de vapor aumenta consideravelmente e atinge picos diários de 2.200 toneladas. A fábrica conta com quatro caldeiras para o atendimento da demanda total de vapor. Cada caldeira possui características particulares de funcionamento e consomem diferentes combustíveis.

Para o presente estudo de caso foram utilizados os dados do ano de 2007 com o horizonte de planejamento de cinquenta semanas, compondo 350 dias de operação. Um computador pessoal com processador Intel Pentium M 1,73 GHz com 1 GB RAM e sistema operacional Windows XP Service Pack 3 foi utilizado. O modelo foi implementado na linguagem do software *General Algebraic Modeling System* (GAMS) (BROOKE *et al.*, 1992) e resolvido com o solver CPLEX 10. O tempo computacional requerido na instância do estudo de caso oscilou em torno de 600 segundos, entretanto, com os dados da oferta dos combustíveis e de sua disponibilidade em cada período mais ajustados para a demanda, o tempo de processamento computacional para se obter a solução ótima ultrapassou 1.800 segundos em alguns experimentos na configuração de *hardware* descrita. Para a resolução do estudo de caso apresentado neste artigo optou-se por não alterar as configurações padrão do CPLEX, entretanto em instâncias maiores e mais complexas que foram resolvidas em unidades com maior capacidade de processamento, a divisão das tarefas em múltiplos núcleos resultou em menor tempo computacional em comparação com a situação padrão do CPLEX.

A aplicação do modelo com os dados reais de demanda de vapor mostrou que os resultados obtidos são melhores do que aqueles que foram praticados na realidade. Em relação à composição da matriz dos combustíveis, tanto a operação real quanto os resultados do modelo dão preferência para o consumo de bagaço de cana frente aos demais combustíveis, entretanto este resultado é decorrente da melhor relação do preço do combustível com o poder de conversão em vapor. Neste estudo de caso, a relação preço do combustível sobre o poder de conversão de vapor ficou nos seguintes valores: bagaço de cana (BAG): 18,75; cavaco de madeira (CAV): 20,29; lenha (LEN): 21,67; palha de arroz (ARR): 22,50; óleo BPF (OLE): 46,15. A Tabela 1 apresenta a proporção dos combustíveis consumidos na operação real e os resultados obtidos pelo modelo.

Tabela 1. Proporção dos combustíveis consumidos na operação real e resultado do modelo.

	BAG	LEN	CAV	ARR	OLE
Real	63,75 %	17,29 %	18,21 %	0,59 %	0,16 %
Modelo	80,61 %	6,90 %	12,40 %	0,10 %	0,00 %

A comparação da operação real com os resultados do modelo para a matriz dos combustíveis consumidos mostra que os ganhos financeiros alcançados ficaram em 2,9%, com a nova proporção sugerida (Tabela 2). Este resultado mostra que, de certa forma, a empresa aproxima-se do *mix* de combustível proposto pelo modelo.

A análise dos níveis de estoque de combustível proposto pelo modelo indica a redução de aproximadamente 130% da quantidade frente ao que a fábrica normalmente manteve para garantir algum nível de segurança no abastecimento. O custo total de estocagem dos combustíveis no horizonte de planejamento foi reduzido em 20,7%. Para preservar as informações da empresa, os valores da Tabela 2 e Tabela 3 foram distorcidos guardando entre si a relação de proporcionalidade.

Tabela 2. Resultados financeiros reais e do modelo para o consumo total dos combustíveis.

(u.m.)*	BAG (\$)	LEN (\$)	CAV (\$)	ARR (\$)	OLE (\$)	Total (\$)
Real	3.453.699	811.590	1.556.906	63.900	117.000	6.003.095
Modelo	4.419.000	327.600	1.072.100	10.800	0,0	5.829.500
Diferença (%)	+ 27,9	- 59,6	- 31,1	- 83,1	- 100,0	- 2,9

\* u.m.: unidades monetárias.

A Tabela 3 compara o custo total de *start-up* e *warm-up* do modelo com os dados reais. A nova configuração de diferentes momentos de *start-up* foi capaz de gerar um resultado 57% mais econômico do que a operação real, e em relação à escolha do *warm-up* a economia foi de 33,6%. Vale destacar que na operação real, os operadores das caldeiras mantêm aquecidos os equipamentos na expectativa de aumento de produção, entretanto quando isto não ocorre, novos custos são adicionados ao sistema de maneira desnecessária.

O resultado final do modelo neste estudo de caso ofereceu a economia total de 4,71% no consumo dos combustíveis e operações de *start-up* e *warm-up*. Neste valor não estão incluídos a possível economia gerada pela redução dos níveis de estoque, entretanto incluindo a parcela do custo de estocagem a economia total passa para 8,78%, considerando-se todo o horizonte de planejamento.

Tabela 3. Resultados financeiros reais e do modelo para o custo total de *start-up* e *warm-up*.

(u.m.)*	Custo total de <i>start-up</i>			Custo total de <i>warm-up</i>		
	Real (\$)	Modelo (\$)	Diferença (%)	Real (\$)	Modelo (\$)	Diferença (%)
Caldeira 1	7.200	3.000	- 58,3	78.800	83.200	5,6
Caldeira 2	6.720	5.040	- 25,0	101.460	99.940	- 1,5
Caldeira 3	5.600	6.800	21,4	81.300	27.300	- 66,4
Caldeira 4	15.000	0	- 100,0	55.200	0	- 100,0
Total	34.520	14.840	- 57,0	316.760	210.440	- 33,6

\* u.m.: unidades monetárias.

O total da produção real de vapor nas quatro caldeiras da fábrica foi de 303.135 toneladas, e o modelo propõe a produção de 303.721 toneladas, ou seja, 586 toneladas de vapor excedente. Apesar deste resultado, o modelo ofereceu um ganho financeiro de 4,71% no consumo de combustível e nas operações de *setup*, mostrando que sua aplicação é melhor em termos de custo total. A Tabela 4 apresenta a produção de vapor na operação real e os resultados propostos pelo modelo.

Tabela 4. Produção de vapor na operação real e proposto pelo modelo.

(toneladas)	Caldeira 1	Caldeira 2	Caldeira 3	Caldeira 4	Total
Real	114.189	148.950	37.458	2.538	303.135
Modelo	135.459	154.445	13.817	0	303.721
Diferença (%)	+ 18,6	+ 3,7	- 63,1	- 100,0	+ 0,19

## 5. Considerações finais

O modelo aqui apresentado pode ser visto como uma extensão do modelo em Rocco e Morabito (2009), em que novas restrições foram incluídas para deixá-lo mais adequado à realidade da empresa estudada. O modelo de Rocco e Morabito (2009) para controle das operações em caldeiras industriais ajusta a preferência no acionamento dos equipamentos de acordo com a demanda de vapor, oferta total dos combustíveis e o custo de *start-up*. As limitações na disponibilidade temporal dos combustíveis nos fornecedores, restrições de estoque e a combinação das variáveis de *start-up* e



*warm-up* foram fatores que, uma vez incluídos, também alteraram a preferência no acionamento das caldeiras.

Algumas limitações podem ser apontadas no modelo deste trabalho, assim como foram feitas em Rocco e Morabito (2009). Não são consideradas as restrições de proporção na mistura dos combustíveis para melhorar combustão. Por exemplo: dados empíricos indicam que a mistura de 1:8 de palha de arroz com bagaço de cana melhora a queima dos combustíveis e aumenta o rendimento na produção de vapor. Por outro lado, o consumo de palha de arroz não deve exceder 10% no vapor gerado diariamente por causar desgaste precoce nas partes internas da caldeira, decorrente do alto teor de sílica nesta biomassa, assim como pela formação de grande quantidade de cinzas.

Na operação real é comum que o fornecimento de vapor seja feito por duas ou mais caldeiras simultaneamente, isto ocorre decorrente da preocupação em garantir certo nível de segurança contra as eventuais falhas nos equipamentos no momento de produção de vapor. O modelo proposto frequentemente esgota a capacidade de uma caldeira para então produzir vapor com outro equipamento. Uma sofisticação seria a realização de uma modelagem que contemple a obrigatoriedade do funcionamento simultâneo das caldeiras e um possível balanceamento na distribuição da produção de vapor entre os equipamentos.

Cabe ressaltar que poucos trabalhos sobre modelagem das operações em caldeiras industriais foram feitos e ainda existe um grande espaço para pesquisa no assunto. Os resultados aqui apresentados ainda são preliminares, e as extensões deste trabalho para outras situações permanecem na nossa agenda de pesquisa.

Os pesquisadores agradecem à empresa Unilever Bestfoods pelo fornecimento das informações para a pesquisa assim como aos revisores por suas úteis sugestões.

## Referências bibliográficas

- Bojić, M. e Dragičević.** MILP optimization of energy supply by using a boiler, a condensing turbine and a heat pump. *Energy Conversion and Management*, v.43, p.591-608, 2002.
- Bojić, M. e Dragičević.** Optimization of steam boiler design. *Proceedings IMechE*, vol.220, Part A: J. Power and Energy, 2006, doi: 10.1243/09576509JPE203.
- Brooke, A., Kendrick, D. e Meeraus, A.** GAMS: a user's guide (release 2.25). San Francisco: The Scientific Press, 1992.
- Drexel, A. e Kimms, A.** Lot sizing and scheduling – survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, v.99, n.2, p.221-235, jun. 1997.
- Dunn, A.C. e Du, Y.Y.** Optimal load allocation of multiple fuel boilers. *ISA Transactions*, v.48, p.190-195, 2009.
- Guldmann, J.M. e Wang, F.** Optimizing the natural gas supply mix of local distribution utilities. *European Journal of Operational Research* v.112, p.598-612, 1999.
- Gustafsson, S.** Optimisation and simulation of building energy system. *Applied Thermal Engineering*. v.20, p.1731-1741, 2000.
- Kaylen, M.S.** An economic analysis of using alternative fuels in a mass burn boiler. *Bioresource Technology*, v.96, p.1943-1949, 2005.
- Krüger, K., Franke, R. e Rode, M.** Optimization of boiler start-up using a nonlinear boiler model and hard constraints. *Energy*, v.29, p.2239-2251, 2004.
- Mortensen, J.H., Moelbak, T., Andersen, P. E Pedersen, T.S.** Optimization of boiler control to improve the load-following capability of power-plant units. *Control Engineering Practice*, v.6, p.1531-1539, 1998.
- Nagel, J.** Determination of an economic energy supply structure based on biomass using a mixed-integer linear optimisation model. *Ecological Engineering*, v.16, p.91-102, 2000.
- Prokhorenkov, A.M., Sovlukov, A.S.** Fuzzy models in control systems of boiler aggregate technological process. *Computer Standards & Interfaces*, v.24, p.151-159, 2002.
- Rocco, C.D. e Morabito, R.** Um modelo de otimização para o gerenciamento de insumos na operação de caldeiras industriais. XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2009.

**Saha, P.K., Shoib, M. e Kamruzzaman, J.** Development of a neural network based integrated control system of 120 ton/h capacity boiler. Computers & Electrical Engineering, v.24, p.423-440, 1998.

**Santoso, M.E.H., Yul Y.N. e Farida, I.M.** Boiler performance optimization using fuzzy logic controller. In 16th IFAC World Congress, Prague, 2005, < <http://www.ifac.cz/>>.