



Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais

An optimization model for the operations of steam production in industrial boilers

Cleber Damião Rocco¹
Reinaldo Morabito¹

Resumo: Apresenta-se neste trabalho um modelo de programação linear inteira mista para apoiar algumas das principais decisões na operação de produção de vapor em caldeiras industriais. O modelo contempla as decisões de gerenciamento dos combustíveis: compra nos fornecedores, transporte para a fábrica e níveis dos estoques, assim como determina o modo de funcionamento das caldeiras: momentos de acionamento (*start-up*), regime de aquecimento (*warm-up*) e desligamento dos equipamentos (*shutdown*), e em quais deles haverá produção de vapor. Os ajustes e a validação do modelo ocorreram por meio de um estudo de caso realizado em uma indústria de alimentos de grande porte. Diante dos bons resultados obtidos com a aplicação do modelo e da ausência de protocolos ou ferramentas de otimização para apoiar as decisões no sistema estudado, o modelo proposto apresenta-se como uma alternativa viável para apoiar algumas das principais decisões no sistema de produção de vapor em caldeiras industriais.

Palavras-chave: Programação de caldeiras. Produção de vapor. Indústria de alimentos. Programação linear inteira mista. Programação da produção.

Abstract: *In this study, a mixed integer linear programming model is presented to support some of the key decisions in the steam production system with industrial boilers. The model approaches the fuel management decisions (fuel replenishment and its inventory control), boiler operational decisions (start-up, warm-up, and shutdown operations), and which boiler should produce steam. The model adjustments and its validation were carried out through a case study in a large food industry. In face of the good outcomes achieved in applying the model and the lack of optimization tools to support the decisions in this system, the proposed model is a suitable alternative to support some of the key decisions in the system of steam production with multiple industrial boilers.*

Keywords: *Boiler scheduling. Steam production. Food industry. Mixed integer programming. Production scheduling.*

1 Introdução

As agroindústrias, em geral, são grandes consumidoras de vapor d'água saturado em seus processos de transformação de matérias-primas em produtos industrializados. Entre os principais processos demandantes de vapor estão a concentração e pasteurização de sucos e polpas, cozimento dos alimentos e da celulose, limpeza de equipamentos etc. No Brasil, o vapor industrial geralmente é produzido por caldeiras que funcionam com óleo, carvão, eletricidade ou biomassas. As caldeiras movidas a biomassas são as mais utilizadas e consomem diversos tipos de materiais vegetais, entre os mais comuns estão o bagaço de cana-de-açúcar, o cavaco de madeira, a lenha e a palha de arroz.

O gerenciamento das operações de produção de vapor nas indústrias é normalmente realizado por ferramentas bastante simples, e são poucas as empresas que possuem sistemas informatizados para o controle

dos combustíveis consumidos nas caldeiras, sendo esse realizado, geralmente, em planilhas eletrônicas do tipo *Microsoft Excel*[®]. A operação conta somente com pacotes computacionais para o monitoramento do volume e da pressão de vapor gerados pelas caldeiras, de maneira a atender à demanda de vapor com segurança, não levando em consideração os custos incorridos.

Em fábricas onde existem mais de uma caldeira para a geração de vapor, os momentos de acionamento (*start-up*), os regimes de aquecimento (*warm-up*) e de desligamentos dos equipamentos (*shutdown*) são determinados pela lógica da possibilidade do aumento ou redução na demanda de vapor. Caso os responsáveis pelas linhas consumidoras de vapor na fábrica informem aos operadores das caldeiras que haverá necessidade de uma quantidade maior de vapor em determinada

¹ Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Rod. Washington Luís, Km 235, CEP 13565-905, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: cleberrocco@yahoo.com.br; morabito@ufscar.br

semana, ou em determinado dia, os operadores se preparam para colocar caldeiras suplementares em funcionamento e as desligam assim que não forem mais necessárias. Outra maneira de perceber o aumento da demanda de vapor é pelo monitoramento da vazão instantânea e da pressão da linha de fornecimento, pois uma vez que a demanda começa a aumentar, a pressão na linha diminui, e somente retorna ao nível normal quando a vazão é restabelecida ao nível adequado de atendimento.

O gerenciamento empírico das operações de produção de vapor, e com base na experiência de pessoas, deixa margem para que ocorram decisões que aumentem desnecessariamente os custos no sistema; uma vez que esses estão relacionados a cada decisão de *start-up* e *warm-up* das caldeiras, ao tempo de funcionamento dos equipamentos, à proporção das misturas entre combustíveis consumidos, custos com estoques etc. Este artigo apresenta um modelo matemático de otimização para apoiar algumas das principais decisões que são tomadas no sistema de produção de vapor, utilizando uma ou múltiplas caldeiras industriais. A Figura 1 apresenta um esquema com as etapas das decisões e as principais questões que são apoiadas pelo modelo proposto.

O artigo está organizado da seguinte maneira: na Seção 2, fazemos uma breve revisão da literatura sobre os trabalhos da área de pesquisa operacional que abordaram problemas envolvendo caldeiras industriais e energia. Na Seção 3, especificamos qual o referencial teórico utilizado para modelar o sistema estudado e apresentamos o modelo matemático desenvolvido na pesquisa. Na Seção 4, discutimos restrições adicionais que usualmente aparecem na prática para aplicação do modelo da seção anterior. Na Seção 5, explicamos como são calculados alguns parâmetros utilizados no modelo. Na Seção 6, apresentamos um estudo de caso que serviu para ajustes e validação do modelo. Concluímos com a Seção 7 tecendo as considerações

finais quanto aos benefícios e limitações do trabalho, e discutimos perspectivas de pesquisa sobre o tema.

2 Aplicações de técnicas de pesquisa operacional em caldeiras industriais e energia

As caldeiras industriais são os equipamentos responsáveis pela queima dos combustíveis e a geração de energia térmica, que eleva a temperatura da água e a transforma em vapor. De acordo com o Conselho dos Proprietários de Caldeiras Industriais dos Estados Unidos (*Council of Industrial Boiler Owners – CIBO*), a eficiência das caldeiras está atrelada a quatro características: i) ao tipo de combustível queimado, ii) ao sistema de combustão, iii) ao *design* de construção do equipamento e iv) ao sistema operacional de controle de vapor.

Existem basicamente dois tipos de caldeiras industriais: caldeiras flamotubulares (*fire-tube*) e aquatubulares (*water-tube*). As caldeiras tipo *water-tube* são utilizadas para produção de vapor sob alta pressão, sendo o equipamento mais comum nas indústrias atuais. Existem diversas variações na construção desse tipo de caldeira; mais detalhes sobre caldeiras industriais e produção de vapor podem ser encontrados em CIBO (COUNCIL..., 1997).

As aplicações de técnicas e ferramentas da pesquisa operacional e áreas correlacionadas em assuntos envolvendo caldeiras industriais são recentes e têm contribuído para a economia e melhoria nos sistemas de produção de vapor. Um dos trabalhos pioneiros na literatura consultada foi Saha, Shoib e Kamruzzaman (1998), no qual os autores desenvolveram e treinaram uma rede neural multicamadas para apoiar decisões no funcionamento de caldeiras de grande capacidade em uma indústria química de Bangladesh. Bastante próximos da abordagem de redes neurais estão os trabalhos que empregam a lógica *fuzzy* (LF) no mesmo tema de pesquisa. Prokhorenkov e Sovlukov (2002) e

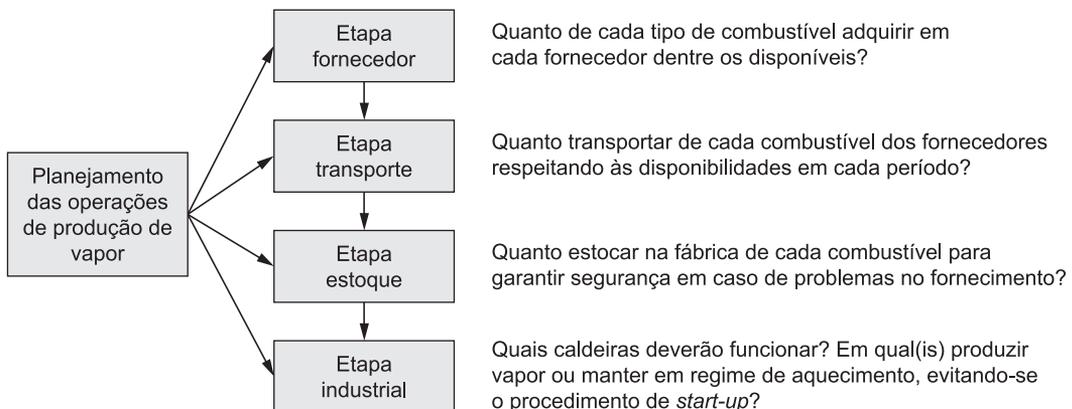


Figura 1. Esquema das etapas e decisões que são apoiadas pelo modelo.

Santoso, Nazaruddin e Muchtadi (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, com base em sistemas de equações não-lineares, para controlar as operações de caldeiras conectadas em usinas geradoras de eletricidade na Dinamarca.

A modelagem matemática de otimização, com o emprego 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. Guldmann e Wang (1999) desenvolveram um modelo de programação linear inteira mista (*Mixed Integer Programming* – MIP) e outro não-linear, para auxiliar na decisão de planejamento na distribuição de gás em diversos setores nos Estados Unidos. Nagel (2000) construiu um modelo para apoiar decisões de fornecimento e consumo energético em uma comunidade alemã. Gustafsson (2000) desenvolveu uma modelagem de otimização para o 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; nesse artigo são listados doze trabalhos, entre os anos de 1980 e 2000, que aplicaram modelos MIP em problemas de energia em diversos setores industriais e também não industriais. Mais tarde, Bojić e Dragičević (2006) desenvolveram um modelo linear para otimizar a geração de vapor industrial 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, Franke e Rode (2004) apresenta uma modelagem do *start-up* usando equações não-lineares e as resolve por meio de programação quadrática sequencial; os autores descreveram ganhos consideráveis no emprego do modelo. 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, EUA. 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 tipos de combustíveis.

A revisão na literatura mostrou que existe algum esforço de pesquisa para melhorar o gerenciamento das operações de produção de vapor em caldeiras industriais com o emprego de diversas abordagens técnicas (ROMEO; GARETA, 2006; RUSINOWSKI;

STANEK, 2007; BUJAK, 2008, 2009). O presente artigo traz um modelo para apoiar decisões nas operações de produção de vapor em caldeiras industriais, com o objetivo de otimizar e minimizar os custos financeiros no sistema. Modelos de otimização aplicados ao sequenciamento e ao dimensionamento de lotes de produção foram tomados como ponto de partida para modelar o sistema estudado, e com base na revisão na literatura, constatou-se que os trabalhos anteriores não empregaram essa abordagem para tratar o assunto.

3 Modelagem do sistema

Neste trabalho, a modelagem do sistema de produção de vapor em caldeiras industriais tomou como ponto de partida os modelos de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção com restrições de capacidade (*Capacitated Lot-sizing and Scheduling Problem* – CLSP e *General Lot-sizing and Scheduling Problem* – GLSP) (DREXL; KIMMS, 1997; FLEISCHMANN; MEYER, 1997; KARIMI; GHOMI; WILSON, 2003; JANS; DEGRAEVE, 2008). Apesar da analogia entre o modelo aqui apresentado e os encontrados na literatura de CLSP e GLSP, algumas diferenças são admitidas, as quais são discutidas em Rocco (2011). A notação adotada para escrever o modelo matemático é apresentada a seguir:

Índices:

- i : fornecedor do combustível ($i = 1, 2, 3, \dots, I$);
- j : caldeira no sistema ($j = 1, 2, 3, \dots, J$);
- k : tipo de combustível ($k = 1, 2, 3, \dots, K$);
- t : macro-período (ou período) do horizonte de análise (e.g. semanas) ($t = 1, 2, 3, \dots, T$);
- n : subperíodo de tamanho fixo do macro-período (e.g. dias) ($n = 1, 2, 3, \dots, N$);
- $l(t)$: primeiro subperíodo do período t (i.e. $l(1) = 1, l(2) = 8, l(3) = 15$);
- $u(t)$: último subperíodo do período t (i.e. $u(1) = 7, l(2) = 14, l(3) = 21$).

Parâmetros:

- p_{ik} : preço do combustível k no fornecedor i no período t ;
- h_k : custo unitário de estocagem do combustível k por período;
- cs_j : custo de acionamento (*start-up*) da caldeira j (custo com combustíveis e água para acionamento);
- cw_j : custo de aquecimento (*warm-up*) da caldeira j (custo com combustível e água para 24 horas de aquecimento);
- m_j : fração mínima da capacidade da caldeira j para realizar o *start-up*;

- a_{jk} : indica se a caldeira j pode consumir o combustível k ;
- e_{jn} : indica se a caldeira j está disponível para operação no subperíodo n , em função do plano de manutenção preventiva;
- o_{ikt} : oferta do combustível k no fornecedor i no período t ;
- ri_k : carregamento mínimo do combustível k nos fornecedores;
- rm_{ik} : quantidade máxima no fornecedor i para o carregamento do combustível k ;
- ra_k : quantidade máxima do combustível k que a fábrica pode receber em cada subperíodo (limitações na recepção da fábrica);
- ce_k : capacidade máxima para estocagem na fábrica do combustível k ;
- vi_{jkn} : fator de conversão de quantidade de combustível k em quantidade de vapor gerado na caldeira j no subperíodo n (considera a eficiência no funcionamento de cada caldeira j);
- vh_{kt} : fator de conversão de quantidade de combustível k em quantidade vapor no período t (utilizado no cálculo do estoque de segurança);
- d_n : demanda de vapor da fábrica no subperíodo n ;
- bc_j : capacidade de produção de vapor da caldeira j no subperíodo;
- lc_j : perda de capacidade de produção de vapor na caldeira j devido ao procedimento de *start-up*;
- β : coeficiente relacionado ao nível de estoque de segurança dos combustíveis no período.

Variáveis de decisão:

- T_{ikn} : quantidade do combustível k adquirida no fornecedor i e transportada para a fábrica no subperíodo n ;
- I_{kt} : quantidade do combustível k armazenada na fábrica no período t ;
- Q_{jkn} : quantidade do combustível k consumida na caldeira j no subperíodo n ;
- M_{ikt} : quantidade do combustível k não utilizada da oferta o_{ikt} no período t do fornecedor i ;
- L_{ikn} : variável binária que assume valor 1 quando existe carregamento do combustível k no fornecedor i no subperíodo n . Caso contrário, a variável assume valor igual a 0;
- S_{jn} : variável binária de decisão do *start-up*. Quando $S_{jn} = 1$, ocorre o acionamento da caldeira j no subperíodo n , uma vez que no subperíodo anterior a caldeira estava desligada. Caso $S_{jn} = 0$, a caldeira não faz *start-up* no subperíodo n , seja porque já está acionada, ou mesmo por permanecer desligada;

- W_{jn} : variável de decisão do *warm-up* – assume valores binários 0 ou 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 o procedimento de *start-up*.

Quatro parâmetros são calculados após o processamento do modelo e indicam resultados de interpretação prática para os envolvidos na operação. O parâmetro VP_{jn} mostra quanto vapor foi produzido em cada caldeira j no subperíodo n (dia). O parâmetro Q_{jkt} calcula o total de combustível k consumido pela caldeira j no período t (semana). O parâmetro T_{ikt} contabiliza quanto do combustível k do fornecedor i foi transportado no período t . E o parâmetro VM_k calcula o montante financeiro despendido na aquisição de cada combustível k . Esse último resultado é bastante importante para a equipe de compras da empresa estimar o orçamento anual destinado à aquisição dos combustíveis para o ano seguinte. A Figura 2 apresenta uma ilustração esquemática da modelagem do sistema de produção de vapor industrial com suas etapas de decisões, variáveis e parâmetros calculados pós-processamento.

Função objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \left(p_{ikt} \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \right) \\ & + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T h_k I_{kt} + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N cs_j S_{jn} + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N cw_j W_{jn} \end{aligned} \tag{1}$$

A função do objetivo (Equação 1) minimiza a somatória das quatro parcelas que compõem os principais custos no sistema: custos de aquisição dos combustíveis nos fornecedores (compra e transporte) $\left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \left(p_{ikt} \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \right) \right)$, custos de estocagem dos combustíveis na fábrica (custo de oportunidade na imobilização de capital) $\left(\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T h_k I_{kt} \right)$, custos de *start-up* das caldeiras (inclui: gastos com combustível, água, limpezas etc.) $\left(\sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N cs_j S_{jn} \right)$ e custos adicionais com combustível queimado durante o regime de aquecimento dos equipamentos $\left(\sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N cw_j W_{jn} \right)$.

Restrições:

$$\begin{aligned} I_{kt} = & I_{k(t-1)} - \sum_{j=1}^J \sum_{n=l(t)}^{u(t)} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} + \\ & \sum_{i=1}^I \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \text{ para } \forall k, t \end{aligned} \tag{2}$$

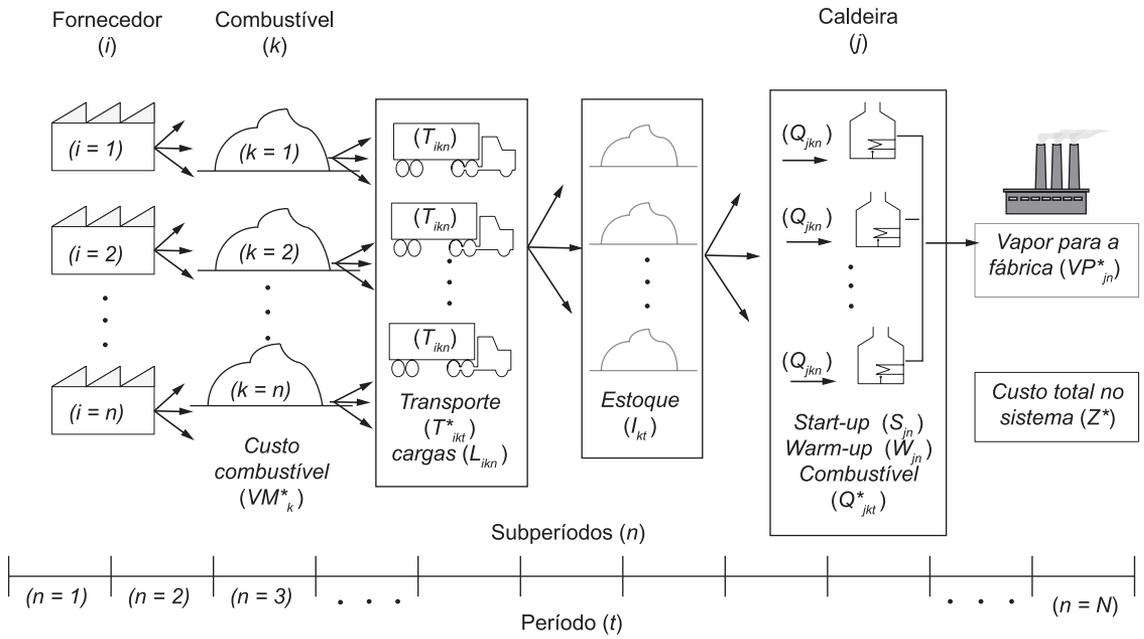


Figura 2. Ilustração esquemática da modelagem do sistema de produção de vapor.

$$\sum_{k=1}^K v h_{kt} I_{kt} \geq \beta \cdot \sum_{n=l(t)}^{u(t)} d_n \text{ para } \forall t \quad (3)$$

$$S_{jn}, W_{jn}, I_{ikn} \in \{0, 1\}; \\ Q_{jkn} \geq 0; M_{ikt} \geq 0; T_{ikn} \geq 0; I_{kt} \geq 0. \quad (13)$$

$$I_{kt} \leq c e_k \text{ para } \forall k, t \quad (4)$$

Parâmetros pós-processamento:

$$M_{ikt} = o_{ikt} + M_{ik(t-1)} - \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \text{ para } \forall i, k, t \quad (5)$$

$$VP_{jn} = \sum_{k=1}^K v i_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn}^* \text{ para } \forall j, n \quad (14)$$

$$T_{ikn} \geq r i_k L_{ikn} \text{ para } \forall i, k, n \quad (6)$$

$$Q_{jkt} = \sum_{n=l(t)}^{u(t)} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn}^* \text{ para } \forall j, k, t \quad (15)$$

$$T_{ikn} \leq r m_{ik} L_{ikn} \text{ para } \forall i, k, n \quad (7)$$

$$T_{ikt} = \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn}^* \text{ para } \forall k, t \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^I T_{ikn} \leq r a_k \text{ para } \forall k, n \quad (8)$$

$$VM_k = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \left(p_{ikt} \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn}^* \right) \text{ para } \forall k \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K v i_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \geq d_n \text{ para } \forall n \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K v i_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \geq b c_j m_j e_{jn} W_{jn} \text{ para } \forall j, n \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K v i_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \leq (b c_j W_{jn} - l c_j S_{jn}) e_{jn} \text{ para } \forall j, n \quad (11)$$

$$S_{jn} \geq W_{jn} e_{jn} - W_{j(n-1)} e_{j(n-1)} \text{ para } \forall j, n \quad (12)$$

As Restrições (2) fazem o balanceamento dos estoques dos combustíveis na fábrica. A variável Q_{jkn} retira do estoque o montante queimado nas caldeiras e a variável T_{ikn} abastece o estoque com a aquisição de combustíveis proveniente dos fornecedores. A fábrica mantém estoques dos combustíveis com o propósito de reduzir o risco da falta de suprimento e eventualmente aproveitar oportunidades de mercado com a aquisição antecipada. O critério para o cálculo do estoque mínimo é assegurar que toda a sua quantidade convertida em vapor deve ser suficiente para atender a uma parcela da demanda no período t [Restrições (3)]. O parâmetro β exprime a fração

da demanda de vapor no período t que deverá ser atendida, e normalmente assume o valor da fração 3/7 (três dias de segurança em sete dias da semana). Ao manter estoques dos combustíveis na fábrica, devem ser respeitados os limites dos espaços físicos disponíveis para o armazenamento [Restrições (4)]. As Equações (5) fazem o balanço da oferta total de cada combustível k entre os períodos t .

A empresa (do estudo de caso) possui contratos com os fornecedores dos combustíveis das caldeiras definindo o montante anual e as quantidades mensais aproximadas que poderão ser retiradas. A variável M_{ikt} faz o balanceamento da quantidade de combustível entre períodos t , carregando o combustível que sobrou do período anterior e disponibilizando-o no período subsequente, apesar disso poder gerar elevadas disponibilidades futuras, as restrições de carregamento limitam as Equações (5). As Restrições (6) e (7) impõem os tamanhos mínimos e máximos dos carregamentos de cada combustível k nos fornecedores. Em cada subperíodo (dia), a fábrica possui um limite máximo para recepção das cargas de cada combustível k proveniente de todos os fornecedores, condição imposta pelas Restrições (8).

As Restrições (9) versam sobre o atendimento da demanda de vapor para todos os subperíodos do horizonte de tempo considerado. As caldeiras industriais são equipamentos de grande capacidade, que não funcionam adequadamente com pequenas produções de vapor, exigindo que se utilize uma parcela mínima da capacidade máxima toda vez que ligada, situação modelada nas Restrições (10). Em cada subperíodo, as caldeiras possuem uma capacidade máxima de produção de vapor [Restrições (11)]. No lado direito (*right hand side - RHS*) das Restrições (11) há uma combinação lógica em relação à capacidade das caldeiras de acordo com os momentos de acionamento e aquecimento. Uma vez que a caldeira j não está disponível para operação no subperíodo n , ou seja, $e_{jn} = 0$, toda a parte direita da inequação é anulada e não existe produção de vapor na caldeira j no subperíodo n . Caso contrário, podem existir duas combinações de capacidade para a caldeira, de acordo com seu estado no subperíodo anterior. Se a caldeira está desligada no subperíodo anterior ($W_{j(n-1)} = 0$) e faz seu acionamento no subperíodo n , as variáveis de *start-up* (S_{jn}) e *warm-up* (W_{jn}) assumirão valor igual a 1 no subperíodo n , e a capacidade total da caldeira j neste subperíodo n é dada pela diferença entre as parcelas ($bc_j \cdot W_{jn}$) e ($lc_j \cdot S_{jn}$). Caso a caldeira venha aquecida do subperíodo anterior ($W_{j(n-1)} = 1$) e permaneça aquecida no subperíodo n ($W_{jn} = 1$), não será necessária uma nova partida do equipamento no subperíodo n , ($S_{jn} = 0$), e a capacidade total da caldeira j é dada somente pela parcela ($bc_j \cdot W_{jn}$). As Restrições (12) dizem respeito ao controle das variáveis de *start-up* e *warm-up* das caldeiras. O conjunto das

Restrições (13) estabelece o domínio das variáveis de decisão do modelo. As Equações (14) a (17) executam cálculos de parâmetros de interesse após a solução do modelo, fornecendo respostas de interpretação prática para os envolvidos no sistema. Em relação ao número de variáveis e restrições do modelo, se o sistema é constituído de I fornecedores, K tipos de combustíveis, J caldeiras, T períodos e N subperíodos, o modelo representado pelas Expressões (1) a (13) possui $K[T(I+2)+N(2I+1)]+T+N(3J+1)$ restrições do modelo e $K[T(I+1)+N(2I+J)]+2JN+I$ variáveis, das quais $N(IK+2J)$ são binárias.

4 Restrições adicionais para operação de algumas caldeiras industriais

O modelo da Seção 3 representa de forma satisfatória as principais decisões que são tomadas em sistemas típicos de produção de vapor em caldeiras industriais. Entretanto, algumas particularidades foram identificadas no estudo de caso apresentado na Seção 6, as quais foram questionadas em outras empresas e se mostraram comuns em alguns sistemas que utilizam caldeiras movidas a biomassas. As particularidades foram modeladas por meio de restrições, aqui chamadas de “restrições de mistura” ou “restrições de proporção”, que tornam a solução do modelo mais realista, refletindo a prática das operações nas caldeiras.

Entre as biomassas frequentemente utilizadas como combustíveis em caldeiras, o bagaço de cana-de-açúcar é aquela de consumo majoritário, e a umidade em suas fibras possui influência direta na qualidade da combustão. Na medida em que o teor de umidade no bagaço aumenta, ocorre a redução na eficiência da combustão, com menor fornecimento de calor para aquecimento da água, e conseqüentemente menos vapor é gerado por quantidade de bagaço queimado. Em indústrias que consomem o bagaço de cana como combustível, aceita-se como umidade padrão na fibra o teor de 55% de água em relação ao seu peso total e, nessa condição, empiricamente, estima-se que 1 tonelada de bagaço pode gerar aproximadamente 2,2 toneladas de vapor.

Para reduzir os problemas na qualidade da combustão do bagaço úmido, normalmente a operação das caldeiras adiciona quantidades de palha de arroz e/ou cavaco de madeira, biomassas com umidade padrão menor, em comparação aos 55% do bagaço, perfazendo uma mistura que, na prática, percebeu-se que melhora a qualidade da combustão do bagaço de cana úmido sem prejudicar a combustão das outras biomassas. Porém as quantias são limitadas dentro de faixas de mínimo e máximo. Na prática, estabeleceu-se que a soma da quantidade de palha de arroz (ARR) e cavaco (CAV), em massa, deve ser no mínimo 5%

da quantia de bagaço de cana (BAG) queimado em determinada caldeira em um subperíodo (dia). O fator λ estabelece a fração mínima para a mistura, que pode ser alterada de acordo com as características do sistema [Restrições (18)].

O limite máximo [Restrições (19)] é estabelecido de maneira semelhante às Restrições (18), porém com sinal de menor ou igual na inequação e o fator agora passa a ser expresso por μ . No estudo de caso, o fator μ assumiu 10%, valor geralmente adotado pela operação real. As restrições de mistura da palha de arroz e cavaco de madeira com o bagaço úmido [Restrições (18), (19)] somente são acionadas quando a umidade do bagaço no período t estiver acima de 58% e, conseqüentemente, o fator de conversão do bagaço em vapor ($vh_{BAG,t}$) for menor do que o valor ϕ (estimado em 2,076 por meio da Equação (23) apresentada na Seção 5).

$$e_{jn}a_{j,ARR}Q_{j,ARR,n} + e_{jn}a_{j,CAV}Q_{j,CAV,n} \geq \lambda \left(e_{jn}a_{j,BAG}Q_{j,BAG,n} \right) \text{ para } \forall j, n \quad (18)$$

$$e_{jn}a_{j,ARR}Q_{j,ARR,n} + e_{jn}a_{j,CAV}Q_{j,CAV,n} \leq \mu \left(e_{jn}a_{j,BAG}Q_{j,BAG,n} \right) \text{ para } \forall j, n \quad (19)$$

A razão para existir um limite máximo para a queima de palha de arroz é decorrente de essa biomassa ser abrasiva durante a combustão, por conter elevado teor de sílica em sua composição e, desse modo, causar danos nas partes internas das caldeiras com o frequente consumo. Além disso, a produção de cinzas, resíduo da combustão, é bem maior ao da queima de outras biomassas, requerendo maiores cuidados operacionais e trabalhos extras de limpeza para a boa conservação dos equipamentos. As Restrições (20) estabelecem o limite máximo para a queima da palha de arroz em dia normal de operação. O parâmetro ω estabelece a proporção de arroz consumido em relação à soma de todos os outros combustíveis em cada subperíodo. Na prática, o valor máximo de 10% é adotado para ω .

$$e_{jn}a_{j,ARR}Q_{j,ARR,n} \leq \omega \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq ARR}}^K e_{jn}a_{j,k}Q_{jkn} \right) \text{ para } \forall j, n \quad (20)$$

Em caldeiras que consomem exclusivamente lenha, um procedimento não obrigatório, mas frequente para melhorar a eficiência na combustão, ainda não medida com precisão, mas percebida na prática como vantajosa, é colocar para cada três partes de lenha o equivalente a uma parte de bagaço de cana. As Restrições (21) estabelecem a proporção de

lenha (LEN) com o bagaço de cana (BAG), a qual pode ser modificada com a alteração do parâmetro ρ .

$$Q_{j,LEN,n} \geq \rho Q_{j,BAG,n} \text{ para } \forall j, n \quad (21)$$

O último conjunto de restrições de “mistura ou proporção” diz respeito à proporção entre o bagaço de cana e a palha de arroz no estoque. Na prática, a operação costuma manter em estoque cinco vezes mais bagaço do que palha de arroz, pois não seria viável se houvesse disponível somente palha de arroz, visto que esse combustível é um adjuvante na mistura com o bagaço, quando esse se encontra com elevada umidade. As Restrições (22) encarregam-se dessa proporção nos estoques, visto que, na sua ausência e com preços vantajosos da palha de arroz em comparação ao bagaço, o modelo tenderia a realizar estoques somente do primeiro, o que não é permitido na prática. O parâmetro θ assume o valor cinco para realizar a proporção descrita na restrição.

$$I_{BAG,t} \geq \theta I_{ARR,t} \text{ para } \forall t \quad (22)$$

Os experimentos computacionais mostraram que a inclusão das Restrições (18) a (22) não causaram impactos significativos nos tempos de processamento do modelo. No entanto, as respostas do *mix* dos combustíveis consumidos ficaram mais próximas da realidade praticada pela empresa do estudo de caso, conforme discutido na Seção 6. O tamanho do modelo com a inclusão das “restrições de mistura” passa a ter $K[IT+2(T+IN)+N]+2T+N(7J+1)$ restrições e $K[T(I+1)+N(2I+J)+2JN+1]$ variáveis, das quais $N(IK+2J)$ são binárias. Para mais detalhes sobre a modelagem descrita na Seção 3 e as particularidades do ambiente da aplicação do modelo descrito nesta seção, o leitor pode consultar Rocco (2011).

5 Parâmetros de conversão de combustível em quantidade de vapor

O modelo apresentado nas Seções 3,4 utiliza vários parâmetros coletados da situação real e que não possuem cálculos relacionados, tais como: custos operacionais, preços dos combustíveis, capacidade das caldeiras, a perda de capacidade devido ao *start-up*, dias de disponibilidade dos equipamentos em função do plano de manutenção, quais combustíveis são queimados em cada caldeira etc. Entretanto, o parâmetro responsável por converter a quantidade de combustível em quantidade de vapor foi uma medida empírica obtida na operação real no estudo de caso e, caso não houvesse oportunidade de medi-la, os cálculos teóricos envolvidos para estimação desses parâmetros seriam extensos e envolveriam balanço de massa e energia, de acordo com Kaltschmitt, Hartmann e Hofbauer (2001).

A energia gerada na combustão de biomassas pode ser expressa por meio do coeficiente do poder calorífico do material. Em Dermibas (1997) e Quirino et al. (2005) são encontrados estudos do poder calorífico de diversos tipos de biomassas. Uma compilação com informações de trinta diferentes biomassas é encontrada em Nordin (1994); nesse trabalho, o bagaço de cana não consta entre as biomassas estudadas. No modelo proposto, os parâmetros vi_{jkn} e vh_{kt} são as medidas estimadas experimentalmente para o estudo de caso da pesquisa e que seriam correspondentes aos valores de poder calorífico das biomassas consideradas. De maneira simplificada, os parâmetros vi_{jkn} e vh_{kt} devem ser entendidos como as quantidades de vapor geradas a partir da queima de determinada quantidade de combustível sem a mistura com outro. Por exemplo, quando se queima uma tonelada de óleo BPF, produzem-se cerca de 13 t de vapor industrial com pressão de saída na caldeira de aproximadamente 10 kgf.cm⁻². Apresentam-se na Tabela 1 os valores dessa conversão medidos experimentalmente para os quatro combustíveis utilizados nas caldeiras industriais do estudo de caso da Seção 6, e que não possuem cálculos relacionados à umidade.

O bagaço de cana é a biomassa na qual o valor do fator de conversão está atrelado ao teor de umidade presente na fibra. Quanto mais úmida a fibra estiver, menor é a eficiência na queima da biomassa e, conseqüentemente, menor quantidade de vapor será produzida por quantidade de bagaço queimado. A empresa do estudo de caso realiza periodicamente análises dos teores de umidade no bagaço de cana recebidos e os correlaciona com o as quantidades de vapor produzido, e por meio dessas informações, foi possível estimar uma equação, por regressão linear, [Equação (23)] que fornece valores de conversão da queima do bagaço em vapor compreendidos no intervalo de umidade (u) – em porcentagem: $52 \leq u \leq 63,2$. Para teores de umidade abaixo de 52%, a estimativa assume valor fixo de 2,365, e acima da umidade 63,5%, a estimativa assume o valor de 1,811. O fator de conversão $vh_{BAG,t}$ não leva em consideração a eficiência da caldeira na queima do bagaço úmido, somente a umidade nos diferentes períodos t . Porém, essa limitação foi contornada por meio do parâmetro $vi_{j,BAG,n}$ derivado da multiplicação do parâmetro $vh_{BAG,t}$ pelo coeficiente $\eta_{j,\mu}$, que corresponde à eficiência

de geração de vapor de cada caldeira j em faixas de umidade do bagaço em cada período t .

$$vh_{BAG,t} = 4,8716 - 0,0482.u_t \text{ para } \forall t \quad (23)$$

No estudo de caso da Seção 6 a umidade do bagaço oscilou nas semanas do ano (períodos t), com expressivas diferenças entre os períodos chuvosos e secos. Nos meses mais chuvosos, a umidade da fibra aumenta significativamente, visto que o armazenamento do bagaço nas usinas é feito a céu aberto; já nos meses com poucas chuvas, a umidade da fibra diminui consideravelmente. Mais informações sobre os dados e cálculos desta seção estão disponíveis em Rocco (2011).

6 Estudo de caso e resultados computacionais

Uma fábrica de alimentos de grande porte localizada na cidade de Goiânia (GO) participou da pesquisa e permitiu que o modelo desenvolvido fosse comparado com sua operação real, e dessa maneira, procederam-se os ajustes e posterior validação do modelo. As informações do ano de 2009 serviram de referência para a comparação com os resultados obtidos na aplicação do modelo no horizonte de tempo de 50 semanas, perfazendo 350 dias.

As expressões matemáticas do modelo foram implementadas na sintaxe algébrica do *software* de otimização *General Algebraic Modelling System* (GAMS) versão 22.6, e resolvido com o *solver* CPLEX 11. Um computador com processador Pentium Intel® I7 (com a liberação de quatro núcleos de processamento), 2,8 GHz, 8 GB de memória RAM resolveu o modelo [Expressões (1) a (22)] aproximadamente 15 segundos até encontrar a solução ótima. O tamanho do modelo na situação do estudo de caso, com $I = 6, J = 4, K = 5, T = 50$ e $N = 350$, após o pré-processamento, e eliminação de elementos matriciais nulos, foi de 32.878 restrições, 30.939 variáveis, das quais 13.300 binárias. A ordem de grandeza do número de iterações foi de aproximadamente 60.000 nos experimentos realizados para instâncias nas quais o conjunto de dados era semelhante ao estudo de caso apresentado.

A empresa possui uma operação de produção/consumo de vapor de grande escala, a qual está atrelada à safra do tomate para processamento industrial, principal matéria-prima dos produtos industrializados da unidade. No decorrer de um ano, a demanda de vapor é altamente sazonal e caracterizada por dois períodos distintos: alta demanda de vapor de junho a outubro, durante a safra do tomate, e baixa demanda de vapor na entressafra, de novembro a maio. A Figura 3 mostra o perfil da produção/demanda de vapor da fábrica nos anos de 2008 e 2009.

Tabela 1. Parâmetros de conversão de quantidade de combustível em quantidade de vapor (vi_{jkn} e vh_{kt}) (em t).

Cavaco de madeira (CAV)	Lenha (LEN)	Palha de arroz (ARR)	Óleo BPF (OLE)
3,5	1,8	4,0	13,0

Fonte: Rocco (2011).

Para atender à demanda de vapor da fábrica, existem quatro caldeiras (CBC, ZAN, MEP e ATA) que podem funcionar isoladamente ou em conjunto. Cada caldeira possui características próprias (capacidade máxima de operação, produção mínima de vapor para funcionamento adequado, frequência de paradas para manutenção etc.), e foram construídas para consumirem diferentes tipos de combustíveis, com o propósito de ampliar as opções na matriz energética da operação. As caldeiras CBC e ZAN consomem biomassas, tais como: bagaço de cana, cavaco de madeira e palha de arroz. A caldeira MEP funciona com lenha e permite pequena mistura com bagaço de cana; e a caldeira ATA é movida exclusivamente com óleo BPF.

As produções totais de vapor na operação real e resultado do modelo ficaram muito próximas,

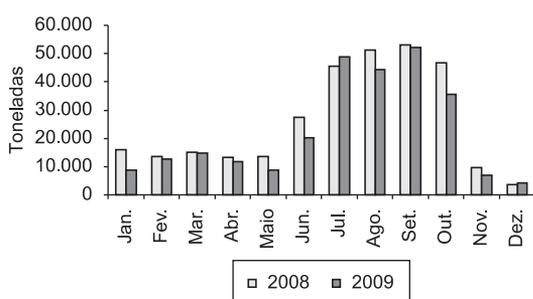


Figura 3. Perfil da produção/demanda de vapor da fábrica em 2008 e 2009. Fonte: dados da pesquisa.

considerando todo o horizonte de análise. Contudo, o modelo explora mais a capacidade total isolada de cada equipamento e somente aciona caldeiras suplementares quando a demanda de vapor no subperíodo não é atendida pelo equipamento preferencialmente acionado. Esse padrão de funcionamento difere da operação real, que costuma atender à demanda de vapor com a produção proveniente de mais de uma caldeira simultaneamente. A Tabela 2 apresenta o perfil de funcionamento das caldeiras na operação real e os resultados do modelo.

A Figura 4 apresenta a produção de vapor na caldeira CBC. Nos primeiros noventa subperíodos, a caldeira esteve parada para manutenção programada e não produziu vapor. Durante a safra do tomate, o modelo explora ao máximo a capacidade desse equipamento, diferentemente da operação real, que opera próximo da capacidade máxima, mas raramente a atinge. O patamar de mínima produção de vapor para o adequado funcionamento da caldeira (aproximadamente 200 t) fica evidente no gráfico, e ocorre em períodos anteriores e adjacentes àqueles em que a produção de vapor é elevada. E nessa situação, observa-se que são necessárias as produções totais das caldeiras CBC e ZAN, sendo vantajoso manter a caldeira CBC em regime de *warm-up* a desligá-la completamente. A verificação no calendário civil de 2009 permite afirmar que os subperíodos de mínima produção de vapor ocorrem aos finais de semana,

Tabela 2. Perfil do funcionamento das caldeiras na operação real e resultados do modelo.

		CBC	ZAN	MEP	ATA	Total
Produção de vapor	Real (t)	105.594	124.453	36.735	2.047	268.829
	Modelo (t)	83.775	165.399	19.762	0	268.936
	Diferença absoluta (t)	-21.819	+40.946	-16.973	-2.047	+107
	Diferença relativa (%)	-20,66	+32,90	-46,20	-100,00	+0,04
Dias em operação	Real	193	242	249	84	329
	Modelo	145	275	97	0	333
Número de <i>start-up</i>	Real	7	10	13	18	48
	Modelo	12	10	20	0	42
<i>Warm-up</i> sem produção vapor	Real	11	23	26	23	83
	Modelo	17	16	15	0	48

Fonte: resultados da pesquisa.

particularmente aos domingos, em que a caldeira permanece em regime de *warm-up*.

A Figura 5 apresenta a configuração de produção de vapor da caldeira ZAN. Nos primeiros noventa e últimos cinquenta subperíodos do horizonte de análise, houve algumas semelhanças entre a operação real e os resultados do modelo. Esses períodos correspondem aos dias em que a produção de vapor na operação real deixa de ser dividida entre as caldeiras ZAN e MEP e passa a ser produzida somente pela primeira. No período de safra agrícola do tomate (160° ao 280° subperíodo), a caldeira ZAN é preferencialmente acionada e o modelo explora totalmente a sua capacidade diária, para então acionar o segundo equipamento preferencial (caldeira CBC), e assim sucessivamente. Percebe-se também no gráfico o período de parada para manutenção realizado do 105° ao 156° subperíodos.

A caldeira MEP teve significativa modificação no perfil de seu funcionamento entre a operação real e o resultado do modelo (Figura 6). Na operação real a caldeira MEP é acionada com frequência, produzindo quantidades de vapor inferiores a 300 t, para completar as demandas diárias que são majoritariamente atendidas pelas caldeiras CBC e ZAN. Por exemplo, em um dia de demanda de 600 t, a operação real normalmente produziria 400 t com uma das caldeiras CBC ou ZAN e complementar a produção com 200 t provenientes da MEP, ou seja, duas caldeiras ligadas para o atendimento da demanda de 600 t. Entretanto, o modelo não toma tal decisão e opta por acionar preferencialmente uma única caldeira que produza vapor até esgotar a sua capacidade e somente ligar um segundo equipamento quando ainda resta parte da demanda não atendida pela primeira caldeira. O modelo sugere a utilização da caldeira MEP em situações diversas; desde o atendimento das demandas que são inferiores a 100 t diárias, até mesmo para situações de atendimento de altas demandas, ou seja, acima de 350 t de vapor por dia. Nota-se que período de parada programada da caldeira MEP ocorreu do 120° ao 170° subperíodo, pouco antes do início da safra do tomate.

O gráfico do perfil de produção de vapor da caldeira ATA na operação real e no modelo é bastante distinto, uma vez que o modelo não aciona em nenhum subperíodo essa caldeira. A Figura 7 apresenta como foi o funcionamento da caldeira ATA na operação real no ano de referência (2009). As modificações nos perfis de funcionamento das caldeiras alteraram consideravelmente os custos do sistema. A Tabela 3 apresenta as variações nos custos de funcionamento das caldeiras, considerando todos os momentos de *start-up* e *warm-up* em todo o horizonte de análise. Na hipótese da retirada da caldeira ATA do sistema, a economia gerada nos custos de acionamento e aquecimento somados atingiria 19,4%, passando de \$ 280.080 para

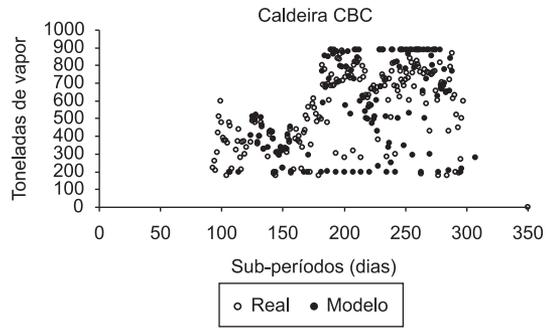


Figura 4. Perfil da produção de vapor da caldeira CBC na operação real e resultados do modelo.

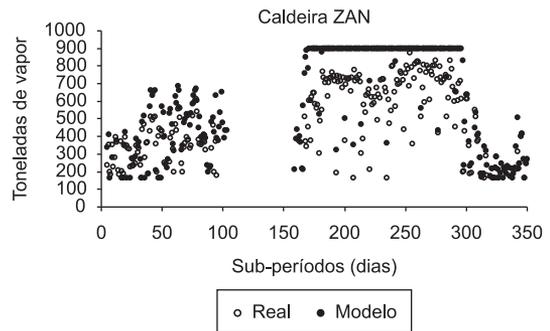


Figura 5. Perfil da produção de vapor na caldeira ZAN na operação real e resultados do modelo.

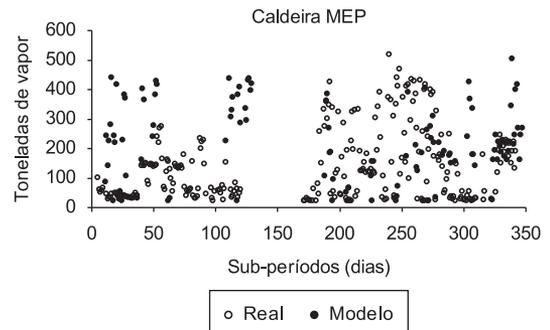


Figura 6. Perfil de produção de vapor na caldeira MEP na operação real e resultados do modelo.

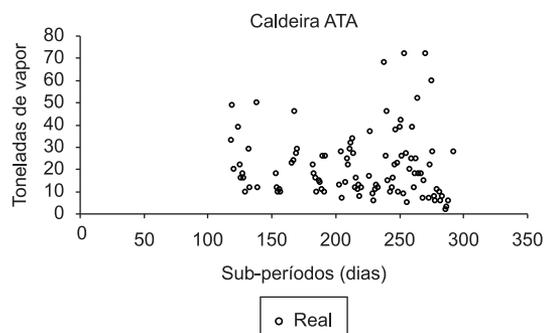


Figura 7. Perfil de produção de vapor na caldeira ATA na operação real.

Tabela 3. Custos de *warm-up* e *start-up* da operação real e resultados do modelo.

		CBC	ZAN	MEP	ATA	Total
<i>Start-up</i>	Real (\$)	4.200	6.000	6.240	27.000	43.400
	Modelo (\$)	7.200	6.000	9.600	0	22.800
	Variação (%)	+71,4	0,0	+53,8	-100,0	-47,5
<i>Warm-up*</i>	Real (\$)	77.200	96.800	89.640	87.360	351.000
	Modelo (\$)	58.000	110.000	34.920	0	202.920
	Variação (%)	-24,9	+13,6	-61,0	-100,0	-42,2
Total	Real (\$)	81.400	102.800	95.880	114.360	394.440
	Modelo (\$)	65.200	116.000	44.520	0	225.720
	Variação (%)	-19,9	+12,8	-53,6	-100,0	-42,8

*contabiliza todos os aquecimentos (com e sem geração de vapor). Fonte: resultados da pesquisa.

\$ 225.720 unidades monetárias. Os valores monetários apresentados foram distorcidos – guardando entre si as relações de proporcionalidade – para preservar as informações da empresa colaboradora da pesquisa.

A matriz dos combustíveis consumidos na operação real e os resultados do modelo foi ligeiramente modificada. O bagaço de cana aumentou sua participação, e mostrou ser a biomassa com a melhor relação custo-benefício na geração de vapor. A palha de arroz e a lenha tiveram suas quantidades reduzidas, enquanto que o cavaco de madeira e o óleo não foram sugeridos pelo modelo. O estoque médio foi significativamente reduzido e, percentualmente, teve a maior participação na redução dos custos na função objetivo. Os resultados na matriz dos combustíveis consumidos e nível médio dos estoques são apresentados na Tabela 4.

No critério estritamente econômico, representado pela função objetivo, o modelo gerou uma economia total de aproximadamente 14% na situação do estudo de caso (Tabela 5). As maiores economias foram observadas para a redução dos níveis de estoque dos combustíveis; contudo, essa economia está sujeita a premissas e critérios adotados que são passíveis de reformulação. Economias significativas foram obtidas pela diferente configuração no funcionamento dos equipamentos em relação aos momentos de *start-up* e *warm-up*, assim como diferenças na escolha das caldeiras geradoras de vapor. A economia no custo dos combustíveis consumidos ficou em aproximadamente 10%, indicando que a operação, de certo modo, escolhe de maneira razoavelmente adequada a composição do *mix* de combustíveis na matriz energética consumida; no entanto, ainda existe grande potencial de melhoria nesse critério.

Os níveis de economia alcançados pelo modelo foram considerados significativos pelos responsáveis da operação, e a solução proposta parece ser viável na prática. Porém, a questão dos riscos envolvendo o uso da capacidade total dos equipamentos, ao invés de produzir vapor com várias caldeiras simultaneamente,

não deve ser desconsiderado no estudo da aplicação do modelo em situações reais. A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados econômicos da operação real e da aplicação do modelo.

A característica de o modelo tender a operar uma caldeira, e somente ligar um segundo equipamento quando a demanda de vapor no subperíodo não for atendida totalmente pelo primeiro, faz com que os resultados do modelo e os praticados na realidade não sejam exatamente os mesmos, salvo em alguns subperíodos. Uma possível melhoria na modelagem seria balancear a geração de vapor entre as caldeiras, mas procurando evitar a imposição numérica de proporções no funcionamento entre os equipamentos.

A operação real aciona com frequência a caldeira ATA com o propósito de garantir algum nível de segurança no caso das outras caldeiras falharem em momentos de alta demanda de vapor. No entanto, essa é uma estratégia de alto custo para o sistema e que deve ser cuidadosamente repensada. Uma análise de risco, contemplando as probabilidades da ocorrência de eventos que façam com que a caldeira ATA seja solicitada, e a incorporação disso na modelagem do problema, possivelmente, traria respostas interessantes, e até mesmo talvez fizesse com que a caldeira ATA fosse acionada, por segurança, mesmo em situações com baixas produções de vapor.

No modelo, a variável L_{ikn} sendo binária faz com que os carregamentos possam ser fracionados entre os limites de mínimo e máximo estabelecidos pelos parâmetros (ri_k e rm_{ik}). No entanto, a imposição de uma quantidade exata para o carregamento T_{ikn} , transformando a binária L_{ikn} em uma variável inteira para indicar o número de carregamentos fechados, identificado pela quantidade ri_k , fez com que o modelo se tornasse intratável computacionalmente. Mesmo após 24 horas de processamento não houve o encontro de uma solução factível para o problema com 350 subperíodos. Em outro experimento com 7 períodos, perfazendo 49 subperíodos, a solução ótima foi encontrada após aproximadamente 8 horas

Tabela 4. Matriz dos combustíveis e estoque médio da operação real e resultados do modelo.

	Consumo de combustível			Estoque médio		
	Real (t ou m ³)	Modelo	Variação (%)	Real (t ou m ³)	Modelo	Variação (%)
BAG	96.637	111.137	+15,0	2.906	1.061	-63,5
ARR	1.865	753	-59,6	42	37	-11,9
LEN	11.150	10.049	-9,9	226	6,2	-97,3
CAV	2.771	0	-100,0	168	0	-100,0
OLE	226	0	-100,0	49	0	-100,0

Fonte: resultados da pesquisa.

Tabela 5. Resultados econômicos da operação real e da aplicação do modelo no sistema de produção de vapor.

	Operação real (\$)	Modelo (\$)	Diferença absoluta (\$)	Diferença relativa (%)
Combustível consumido	6.105.205	5.455.090	-650.115	-10,6
Acionamento (<i>start-up</i>)	43.440	22.800	-20.640	-47,5
Aquecimento (<i>warm-up</i>)	351.000	202.920	-148.080	-42,2
Custo de estocagem	168.741	50.618	-118.123	-70,0
Total	6.668.386	5.731.428	-936.958	-14,0

Fonte: resultados da pesquisa.

de processamento (com o mesmo *hardware* citado anteriormente), e a solução final foi pouco penalizada em comparação com o mesmo exemplo, relaxando-se a variável L_{ikn} para binária.

Os resultados obtidos de diversos experimentos computacionais, com soluções ótimas comprovadas pelo CPLEX, sempre se mostraram melhores em relação ao custo variável total do sistema, representado na função objetivo do modelo, em comparação com os obtidos pela operação real. Outros experimentos computacionais realizados no estudo de caso são encontrados em Rocco (2011).

7 Considerações finais

Os resultados da aplicação do modelo no estudo de caso foram considerados satisfatórios pelos gestores da operação na empresa e, diante da ausência de protocolos ou ferramentas que auxiliem na tomada de decisão no sistema estudado, o presente trabalho apresenta-se como uma alternativa viável na gestão das operações de produção de vapor em caldeiras industriais. Sugere-se a aplicação do modelo para apoiar principalmente decisões táticas e operacionais (médio e curto prazos), por exemplo, com horizonte rolante de tempo de 1 mês, considerando as decisões da gestão dos combustíveis na semana e as operações de ligar e desligar as caldeiras em cada dia. O estudo de caso apresentado neste artigo, com o longo horizonte de análise de 350 subperíodos, teve como propósito efetuar um estudo mais abrangente dos resultados.

Como citado anteriormente, o modelo explora totalmente a capacidade limite de uma caldeira antes

de ligar outro equipamento, enquanto que na operação real isso normalmente não acontece. Um estudo que mostrasse que existem diferenças na eficiência e na segurança do funcionamento das caldeiras na medida em que se aproxima da capacidade máxima de geração de vapor poderia indicar caminhos para que houvesse um balanço na distribuição da produção de vapor entre os equipamentos, evitando-se assim a imposição numérica para tal tarefa.

A possibilidade de considerar a incerteza nos parâmetros com técnicas de otimização robusta e utilizar os modelos de referência no tema, tais como: Soyster (1973), Bertsimas e Sim (2003, 2004), e Bertsimas e Thiele (2006), parece ser bastante plausível. Alguns exemplos nessa linha de pesquisa são os trabalhos de Paiva e Morabito (2011) e Munhoz e Morabito (2012), que estenderam modelos determinísticos para outros de programação estocástica e otimização robusta aplicados em outros problemas agroindustriais. Citam-se como os parâmetros mais relevantes para a incorporação da incerteza no presente trabalho: a oferta e disponibilidade de combustíveis, a umidade do bagaço de cana e a demanda de vapor pela fábrica.

Esta pesquisa aconteceu em uma empresa típica do setor de alimentos, a qual demanda grande quantidade de vapor em seus processos. Acredita-se que a aplicação deste trabalho também possa ser realizada em outros segmentos industriais, que produzam e consumam vapor, procedendo-se com adaptações e ajustes no modelo. Extensões mais abrangentes deste estudo permanecem na agenda de pesquisa dos autores.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos engenheiros Rogério Rangel e André Angola, da empresa de Goiânia colaboradora com este trabalho. Esta pesquisa teve suportes financeiros da CAPES e do CNPq. Os autores também agradecem aos dois avaliadores do artigo pelas valiosas sugestões de revisão.

Referências

- BERTSIMAS, D.; SIM, M. The price of robustness. **Operations Research**, v. 52, n. 1, p. 35-53, 2004. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.1030.0065>
- BERTSIMAS, D.; SIM, M. Robust discrete optimization and network flows. **Mathematical Programming Series B**, v. 98, n. 1-3, p. 49-71, 2003. <http://dx.doi.org/10.1007/s10107-003-0396-4>
- BERTSIMAS, D.; THIELE, A. A robust optimization approach to inventory theory. **Operations Research**, v. 54, n. 1, p. 150-168, 2006. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.1050.0238>
- BOJIĆ, M.; DRAGIČEVIĆ, S. 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00028-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00028-0)
- BOJIĆ, M.; DRAGIČEVIĆ, S. Optimization of steam boiler design. **Proceedings IMechE, part A: Journal Power and Energy**, v. 220, n. 6, p. 629-634, 2006. <http://dx.doi.org/10.1243/09576509JPE203>
- BUJAK, J. Mathematical modelling of a steam boiler room to research thermal efficiency. **Energy**, v. 33, p. 1779-1787, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2008.08.004>
- BUJAK, J. Optimal control of energy losses in multi-boiler steam systems. **Energy**, v. 34, p. 1260-1270, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.05.005>
- COUNCIL OF INDUSTRIAL BOILERS OWNERS - CIBO. **Energy efficiency handbook**. Edited by Ronald A. Zeitz. Burke: CIBO 1997. 64 p.
- DERMIBAS, A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. **Fuel**, v. 76, n. 5, p. 431-434, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)85520-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(97)85520-2)
- DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling - survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, v. 99, n. 2, p. 221-235, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00030-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00030-1)
- DUNN, A. C.; DU, Y. Y. Optimal load allocation of multiple fuel boilers. **ISA Transactions**, v. 48, p. 190-195, 2009. PMID:19046585. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2008.10.009>
- FLEISCHMANN, B.; MEYER, H. The general lotsizing and scheduling problem. **OR Spektrum**, v. 19, p. 11-21, 1997. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01539800>
- GUSTAFSSON, S. Optimisation and simulation of building energy system. **Applied Thermal Engineering**, v. 20, p. 1731-1741, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00004-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00004-1)
- GULDMANN, J. M.; WANG, F. Optimizing the natural gas supply mix of local distribution utilities. **European Journal of Operational Research**, v. 112, p. 598-612, 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00415-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00415-3)
- JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Modeling industrial lot sizing problems: a review. **International Journal of Production Research**, v. 46, n. 6, p. 1619-1643, 2008. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540600902262>
- KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. **Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren**. Springer, 2001. 770 p.
- KARIMI, B.; GHOMI, S. M. T. F.; WILSON, J. T. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **OMEGA - The International Journal of Management Science**, v. 31, n. 5, p. 365-378, 2003.
- KAYLEN, M. S. An economic analysis of using alternative fuels in a mass burn boiler. **Bioresource Technology**, v. 96, p. 1943-1949, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2005.01.024>
- KRÜGER, K.; FRANKE, R.; RODE, M. Optimization of boiler start-up using a nonlinear boiler model and hard constraints. **Energy**, v. 29, p. 2239-2251, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.022>
- MORTENSEN, J. H. et al. Optimization of boiler control to improve the load-following capability of power-plant units. **Control Engineering Practice**, v. 6, n. 12, p. 1531-1539, 1998. [http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0661\(98\)00114-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0661(98)00114-2)
- MUNHOZ, J. R.; MORABITO, R. Uma abordagem de otimização robusta no planejamento agregado de produção na indústria cítrica. **Produção**, aceito para publicação em 2012.
- 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00057-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00057-4)
- NORDIN, A. Chemical Elemental characteristics of biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 6, n. 5, p. 339-347, 1994. [http://dx.doi.org/10.1016/0961-9534\(94\)E0031-M](http://dx.doi.org/10.1016/0961-9534(94)E0031-M)
- PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. Programação estocástica robusta aplicada ao planejamento agregado de safra em usinas cooperadas do setor sucroenergético. **Gestão e Produção**, v.18, n. 4, p. 719-738, 2011.
- 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5489\(02\)00012-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5489(02)00012-0)
- QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106, 2005.
- ROCCO, C. D. **Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais: um estudo de caso na indústria de alimentos**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.
- ROMEO, L. M.; GARETA, R. Neural network for evaluating boiler behaviour. **Applied Thermal Engineering**,

- v. 26, p. 1530-1536, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.12.006>
- RUSINOWSKI, H.; STANEK, W. Neural modelling of steam boilers. **Energy Conversion and Management**, v. 48, p. 2802-2809, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.12.006>
- SAHA, P. K.; SHOIB, M.; 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7906\(98\)00020-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7906(98)00020-2)
- SANTOSO, M. E. H.; NAZARUDDIN, Y. Y.; MUCHTADI, I. F. Boiler performance optimization using fuzzy logic controller. In: IFAC WORLD CONGRESS, 16., 2005, Prague. **Proceedings...**Prague: IFAC, 2005.
- SOYSTER, A. L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. **Operational Research**, v. 21, p. 1154-1157, 1973. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.21.5.1154>