

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SAO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

CLEBER DAMIÃO ROCCO

**UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA AS OPERAÇÕES DE
PRODUÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRAS INDUSTRIAIS: UM
ESTUDO DE CASO NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS**

São Carlos

2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SAO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

CLEBER DAMIÃO ROCCO

**UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA AS OPERAÇÕES DE
PRODUÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRAS INDUSTRIAIS: UM
ESTUDO DE CASO NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS**

**Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia de
Produção como parte dos requisitos
para a obtenção do título de mestre em
Engenharia de Produção.**

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Morabito.

São Carlos

2011

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

R671mo

Rocco, Cleber Damião.

Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais : um estudo de caso na indústria de alimentos / Cleber Damião Rocco. -- São Carlos : UFSCar, 2011.
99 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.


1. Programação da produção. 2. Planejamento da produção. 3. Programação linear. 4. Caldeira a vapor. 5. Alimentos - indústria. 6. Otimização. I. Título.

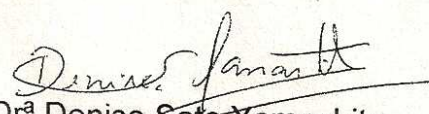
CDD: 658.53 (20^a)


FOLHA DE APROVAÇÃO

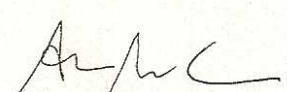
Aluno(a): Cleber Damião Rocco

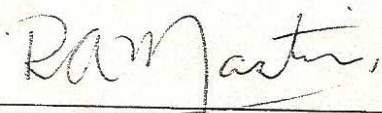
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 11/02/2011 PELA
COMISSÃO JULGADORA:


Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto
Orientador(a) PPGEp/UFSCar

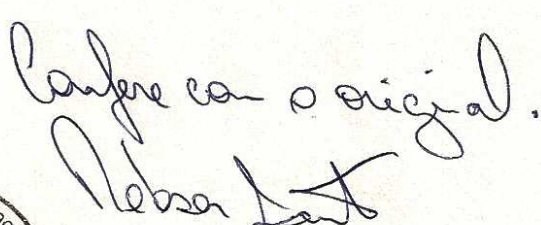

Prof^a Dr^a Denise Sato Yamashita


Prof. Dr. Jose Vicente Caixeta Filho
ESALQ/USP


Prof. Dr. Alysso Machado Costa
ICMC/USP


Prof. Dr. Roberto Antonio Martins
Coordenador do PPGEp




Robson Lopes dos Santos
Assistente Administrativo

21/02/2011

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos avô e avó paternos, João Rocco (in memoriam) e Amélia Tuono Rocco, pelo carinho e apoio durante toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as graças concedidas em vida: boa saúde, apoio de pessoas e boas oportunidades, que me encham de esperança de ter um futuro cada vez melhor.

Ao meu orientador Reinaldo Morabito, pela amizade e dedicação em discutir os assuntos do meu trabalho de uma maneira sóbria para conter minha ansiedade. Foi com ele com quem eu aprendi a expressão: “*Fazer as coisas em “baby steps”*”.

Aos funcionários da Unilever de Goiânia, que participaram de alguma forma deste trabalho, em particular aos engenheiros Rogério Rangel e André Angola, os quais permitiram que eu utilizasse a fábrica da empresa como objeto de estudo.

A minha querida avó Amélia, que em todos os momentos acredita em meu sucesso e me incentiva, com suas sábias e carinhosas palavras, continuar meus estudos. Aos meus pais, especialmente meu pai Adilson, um exemplo para mim de homem trabalhador e honesto. A todos os demais familiares também agradeço, em especial a minha irmã Vanessa e tia Neusa, que torcem muito por meu sucesso.

Ao casal de amigos Augusto Gameiro e Mariana Perozzi, que participam da minha vida de modo alegre e, também profissional, desde minha saída da graduação. Ao professor Augusto Gameiro, que foi o primeiro e mais forte incentivador para que eu continuasse meus estudos na pós-graduação.

Ao casal de amigos Leandro Martins e Miriam Santos, pela sincera amizade de mais de dez anos, e por me receberem sempre bem em sua casa em São Carlos.

Aos colegas de república em São Carlos, Cassiano Isler e Amilcar Querubini, pela agradável convivência durante o mestrado. Também aos colegas da república Na-t-lha, de Piracicaba, que mesmo à distância, participam e se alegram, até hoje, das grandes e pequenas conquistas dos seus membros.

À amiga Fernanda do Passo Ramalho, pela agradável companhia e apoio no final do mestrado.

Agradeço aos funcionários do departamento de Engenharia de Produção da UFSCar (DEP), especialmente ao Robson e à Raquel, pela sempre gentileza e solicitude. Também aos professores do mesmo departamento, em especial ao professor Roberto Martins, pelo empenho em auxiliar os estudantes de pós-graduação do departamento, e à professora Vitória Pureza, por suas palavras de motivação para que eu prossiga meus estudos em pesquisa operacional.

Aos colegas do grupo de Modelagem e Pesquisa Operacional do DEP, pela ajuda com modelagem e pelos bons momentos de horas-felizes que tivemos.

Ao professor José Vicente Caixeta-Filho, da Esalq/USP, por ter sido meu orientador durante a graduação, e me apresentar o vasto e maravilhoso mundo da pesquisa operacional.

A Natural Comunicação e posteriormente à CAPES, que em momento distintos, permitiram que eu gozasse de uma bolsa de estudos para minha dedicação ao mestrado.

À querida e inesquecível Tata, por seu incondicional apoio e carinho, também por sua presença permanente em minha vida.

Muito obrigado e um forte abraço a todos vocês!

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e aplicar um modelo matemático de otimização para apoiar algumas das principais decisões na operação de produção de vapor em múltiplas caldeiras industriais. Em indústrias de alimentos, essas decisões, em geral, são tomadas com base na experiência dos envolvidos e não com ferramentas de auxílio à tomada de decisão apoiadas pela pesquisa operacional. O modelo proposto contempla as decisões de aquisições de combustíveis dos fornecedores, o transporte para fábrica e o gerenciamento dos estoques dos combustíveis adquiridos no sistema. O modelo também determina os momentos de acionamento e desligamento das caldeiras, bem como em quais delas haverá produção de vapor. Uma linguagem de modelagem algébrica foi utilizada para implementar computacionalmente o modelo, que foi resolvido por meio de um *software* de otimização. Os ajustes e a validação do modelo ocorreram por meio de um estudo de caso realizado em uma indústria de alimentos de grande porte localizada em Goiânia (GO). Nos experimentos realizados com os dados fornecidos pela empresa, os resultados obtidos com o modelo apresentaram melhores desempenhos econômicos do que aqueles praticados pela operação real. Diante dos bons resultados alcançados na aplicação do modelo em situações reais e da ausência de protocolos ou ferramentas para apoiar as decisões no sistema estudado, o modelo proposto apresenta-se como uma alternativa viável para apoiar algumas das principais decisões na operação de produção de vapor em caldeiras industriais.

Palavras-chave: programação de caldeiras industriais, produção de vapor, indústria de alimentos, programação linear inteira mista, programação da produção.

ABSTRACT

The aim of this work was to develop and apply a mathematical optimization model to support some key decisions in the steam production operation system with multiple industrial boilers. In the food industry, key decisions into this system are, normally, taken based on people experience, not through decision support tools based on operations research. The proposed model approaches the fuel replenishment decisions, fuel transportation and fuel inventory management. The model also determines the start-up and shutdown moments for each boiler, as well as, which of them will produce steam. An algebraic modeling language was used to implement computationally the model, which was solved by an optimization software. The adjustments and model validation were performed through a case study carried out in a large scale food industry localized in Goiania (GO). In computational experiments conducted with company's data, the results obtained by the model showed better economic performance than those from the company. In face of the good outcomes obtained by applying the model and the lack of protocols or decision tools for the studied system, this model presents itself as a feasible alternative to be considered to support some key-decisions in the steam production system with industrial boilers.

Keywords: *industrial boiler scheduling, steam production, food industry, mixed integer linear programming, production scheduling.*

SUMÁRIO

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	II
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABELAS.....	VII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Objetivos e justificativa.....	2
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Organização do trabalho	7
2 AMBIENTE DO PROBLEMA E REFERENCIAL TEÓRICO.....	8
2.1 O vapor na indústria	8
2.2 Biomassas como fonte de energia.....	10
2.3 Introdução sobre caldeiras industriais	13
2.4 As operações de funcionamento em caldeiras industriais.....	16
2.5 Referencial teórico - modelagem matemática para problemas de produção.....	17
2.6 Modelos de dimensionamento de lotes.....	19
2.6.1 Modelo de dimensionamento de lotes não capacitado	21
2.6.2 Modelo de dimensionamento de lotes capacitado.....	21
2.7 Modelos integrados de dimensionamento e sequenciamento de lotes.....	23
2.7.1 Modelo discreto de dimensionamento de lotes	23
2.7.2 Modelo de dimensionamento e sequenciamento de lotes com <i>setup</i> contínuo	24
2.7.3 Modelo geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes	26
2.8 Pesquisa operacional aplicada em problemas envolvendo caldeiras industriais	28
3 MODELAGEM DO PROBLEMA.....	33
3.1 O modelo matemático proposto	33
3.2 Restrições adicionais do modelo para operação em algumas caldeiras industriais.....	45
3.2.1 Parâmetros de conversão de combustível em quantidade de vapor	47

4	ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS.....	50
4.1	Apresentação da empresa do estudo de caso.....	50
4.2	Características do sistema de geração de vapor da fábrica.....	51
4.3	Fonte de dados para alimentar os modelos no estudo de caso.....	56
4.4	Operação praticada pela empresa sem o uso de ferramentas de decisão.....	59
4.5	Resultados do modelo com os dados de referência.....	64
4.6	Discussão dos resultados.....	65
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
5.1	Perspectivas de pesquisa futura.....	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	Apêndice A – Exemplo ilustrativo da implementação do modelo no GAMS.....	88
	Apêndice B – Resultados do modelo no caso do exemplo ilustrativo.....	93
	Anexo A – Dados da demanda de vapor no ano de referência (2009).....	97
	Anexo B – Equações matemáticas do modelo proposto.....	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema das etapas das decisões e as principais questões contempladas nesta dissertação.....	3
Figura 1.2. Processo de modelagem (Fonte: Arenales <i>et al.</i> , 2007)	4
Figura 1.3. Etapas do método de pesquisa empregado nesta dissertação (Fonte: adaptada de Law e Kelton, 1991)	6
Figura 2.1. Esquema dos diferentes processos de produção de energia por meio de biomassas (Fonte: adaptada de Staiss e Pereira, 2001; Lora e Andrade, 2009).....	12
Figura 2.2. Evolução da matriz energética no setor industrial brasileiro de 1975 a 2006 (Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2007)	13
Figura 2.3. Caldeira industrial tipo <i>fire-tube</i> (Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos, 2004).....	14
Figura 2.4. Caldeira industrial tipo <i>water-tube</i> (Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos, 2004)	14
Figura 2.5. Desenho esquemático de uma caldeira tipo <i>water-tube</i>	15
Figura 2.6. Definição de período e sub-período no modelo GLSP.....	26
Figura 3.1. Ilustração esquemática da modelagem do sistema de produção de vapor com suas etapas e variáveis	37
Figura 4.1. Produção de alimentos industrializados e geração de vapor em 2008 na fábrica de Goiânia (Fonte: dados da pesquisa)	51
Figura 4.2. Produção/demanda de vapor da fábrica em 2008 e 2009 (Fonte: dados da pesquisa)	52
Figura 4.3. Umidade média do bagaço de cana no decorrer de um ano (Fonte: dados da pesquisa)	58
Figura 4.4. Produção de vapor na caldeira CBC em 2009 (Fonte: dados da pesquisa).....	60
Figura 4.5. Produção de vapor na caldeira Zanini em 2009 (Fonte: dados da pesquisa).....	61
Figura 4.6. Produção de vapor na caldeira Meppan em 2009 (Fonte: dados da pesquisa)..	62
Figura 4.7. Produção de vapor na caldeira ATA em 2009 (Fonte: dados da pesquisa).....	63
Figura 4.8. Produção de vapor na operação real e resultado do modelo para a caldeira CBC (Fonte: dados da pesquisa).....	67
Figura 4.9. Produção de vapor na operação real e resultado pelo modelo para a caldeira ZAN (Fonte: dados da pesquisa).....	68
Figura 4.10. Produção de vapor na operação real e resultado do modelo para a caldeira MEP (Fonte: dados da pesquisa).....	69

Figura 4.11. Estoque da empresa e resultado do modelo para o bagaço de cana (Fonte: dados da pesquisa)	71
Figura 4.12. Estoque da empresa e resultado do modelo para o arroz (Fonte: dados da pesquisa)	72
Figura 4.13. Estoque da empresa e resultado do modelo para a lenha (Fonte: dados da pesquisa)	73
Figura 4.14. Estoque da empresa e resultado do modelo para o cavaco de madeira (Fonte: dados da pesquisa)	74
Figura 4.15. Estoque da empresa e resultado do modelo para o óleo BPF (Fonte: dados da pesquisa)	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Resultados parciais do trabalho de Dunn e Du (2009).....	32
Tabela 3.1. Combinações possíveis para as variáveis da restrição de <i>setup</i> das caldeiras ..	43
Tabela 3.2. Parâmetros de conversão de quantidade de combustível em quantidade de vapor (v_{ijkn} e vh_{kt}) (em toneladas).....	48
Tabela 3.3. Dados empíricos da queima de uma tonelada de bagaço de cana na geração de vapor industrial de acordo com a umidade da fibra.....	49
Tabela 4.1. Fabricantes das caldeiras, ano de construção e os tipos de combustíveis consumidos em cada uma delas na fábrica de Goiânia.....	53
Tabela 4.2. Capacidades de produção de vapor das caldeiras da fábrica de Goiânia	54
Tabela 4.3. Características do acionamento e aquecimento das caldeiras da fábrica	55
Tabela 4.4. Período de paradas programadas para manutenção das caldeiras em 2008 e 2009.....	56
Tabela 4.5. Informações de custo e capacidade das caldeiras da fábrica.....	56
Tabela 4.6. Informações dos fornecedores de combustíveis – oferta total, número de fornecedores, tamanho da carga, disponibilidades periódicas	57
Tabela 4.7. Informações sobre os combustíveis disponíveis em 2009: preços médios, custo de estocagem, capacidade do estoque e recepção na fábrica	57
Tabela 4.8. Resultado da empresa na produção de vapor em 2009	59
Tabela 4.9. Custos totais para empresa na geração de vapor em 2009	64
Tabela 4.10. Resultados do modelo para a operação de produção de vapor em 2009.....	64
Tabela 4.11. Resultados do modelo para os custos da operação em 2009.....	65
Tabela 4.12. Comparação entre a operação real e os resultados do modelo – Produção de vapor em cada caldeira.....	66
Tabela 4.13. Comparação entre os resultados da empresa e do modelo para os custos de acionamento (<i>start-up</i>).....	69
Tabela 4.14. Comparação entre os resultados da empresa e do modelo para os custos de aquecimento (<i>warm-up</i>)	70
Tabela 4.15. Comparação entre os resultados da empresa e do modelo para a matriz dos combustíveis consumidos	70
Tabela 4.16. Intervalo de variação dos preços dos combustíveis para que não ocorra variação no valor final da função objetivo.....	71
Tabela 4.17. Resultados financeiros da empresa e resultados do modelo: custos de estocagem, consumo dos combustíveis, acionamento e aquecimento das caldeiras	75
Tabela 4.18. Resultados do experimento com a fixação de variáveis do modelo	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

As agroindústrias, em geral, são grandes consumidoras de vapor em seus processos de transformação de matérias-primas em produtos industrializados, como, por exemplo: na concentração de sucos e polpas, no cozimento dos alimentos e da celulose, na esterilização, pasteurização e limpeza de equipamentos etc. No Brasil, o vapor industrial nas agroindústrias geralmente é produzido por caldeiras que funcionam com eletricidade, óleo combustível (óleo BPF) ou biomassas. As caldeiras alimentadas com biomassas são as mais utilizadas e consomem diversos tipos de combustíveis, entre os mais comuns estão o bagaço de cana-de-açúcar, o cavaco de madeira, a lenha e a palha de arroz.

A visita a algumas indústrias de processamento de alimentos para a realização desta pesquisa permitiu inferir que as atividades no funcionamento e gerenciamento de caldeiras industriais são realizadas por sistemas e ferramentas bastante simples. Ainda hoje são poucas as empresas que possuem sistemas informatizados para o controle dos combustíveis consumidos nas caldeiras, sendo o controle realizado por meio da anotação em caderno e cálculos, utilizando calculadoras digitais ou planilhas eletrônicas.

Os responsáveis pelas operações em caldeiras industriais, freqüentemente, utilizam planilhas eletrônicas do tipo *Microsoft Excel*[®] para registrar o consumo total dos combustíveis, e somente utilizam pacotes computacionais para controle do volume e da pressão do vapor gerados, de maneira a atender adequadamente a demanda de vapor da fábrica, não levando em consideração os custos incorridos nestas operações de forma mais explícita.

Em fábricas onde existem mais de uma caldeira para a geração de vapor, os momentos de acionamento e de desligamento dos equipamentos são determinados pela lógica da possibilidade do aumento ou redução na demanda de vapor. Caso os responsáveis pelas linhas de produção na fábrica informem aos operadores das caldeiras que a mesma necessitará de uma quantidade maior de vapor em uma determinada semana, ou em determinado dia específico, os operadores colocam caldeiras suplementares em funcionamento e as desligam quando não são mais necessárias.

A maneira empírica e com base na experiência dos operadores para coordenar o acionamento e desligamento das caldeiras, assim como para determinar a mistura dos combustíveis queimados, faz com que o sistema passe a operar de maneira não

otimizada, e resulte em maiores gastos, uma vez que existem custos associados à partida, ao tempo de funcionamento dos equipamentos, ao tipo de mistura dos combustíveis consumidos, e a outros critérios, como o custo de estocagem dos combustíveis.

1.2 Objetivos e justificativa

O tema desta pesquisa foi motivado pelo trabalho de conclusão de curso do autor durante o estágio final da graduação realizado na empresa Unilever Bestfoods em Goiânia. Uma documentação do estudo realizado neste estágio (não publicada) pode ser obtida com o autor.

No presente estudo, o objetivo foi desenvolver e aplicar um modelo matemático de otimização para apoiar as principais decisões nas operações de funcionamento em caldeiras industriais (decisões de acionamento e desligamento das caldeiras, consumo de combustíveis, gerenciamento dos estoques dos combustíveis etc.). O modelo foi implementado em um pacote computacional para resolução de problemas de otimização de maneira a fornecer os resultados do funcionamento ótimo para cada configuração do sistema proposto. O modelo desenvolvido fornece respostas a diversas perguntas dentro da operação e produção de vapor em caldeiras industriais, sendo as principais:

- Quais caldeiras devem estar desligadas ou ligadas, e produzindo vapor em cada período do horizonte de planejamento?
- Quais caldeiras devem estar preparadas, ou seja, somente aquecidas para produzir vapor rapidamente frente à previsão de aumento na demanda?
- Quais combustíveis devem ser queimados em cada caldeira, em cada período, para atender à demanda de vapor da fábrica?
- De quais fornecedores e o quanto de combustível deve ser adquirido pela operação?
- Como deve ser o gerenciamento dos combustíveis em relação ao transporte e aos estoques na fábrica?

Em face à ausência de um protocolo ou ferramenta que proponha respostas às perguntas anteriores, o modelo desenvolvido nesta dissertação mostra-se relevante e capaz de orientar as operações em caldeiras industriais. Convém salientar que não se tem conhecimento de outros estudos na literatura com o enfoque deste presente trabalho. A

Figura 1.1 ilustra de forma esquemática as etapas de decisões e as principais questões contempladas neste trabalho.

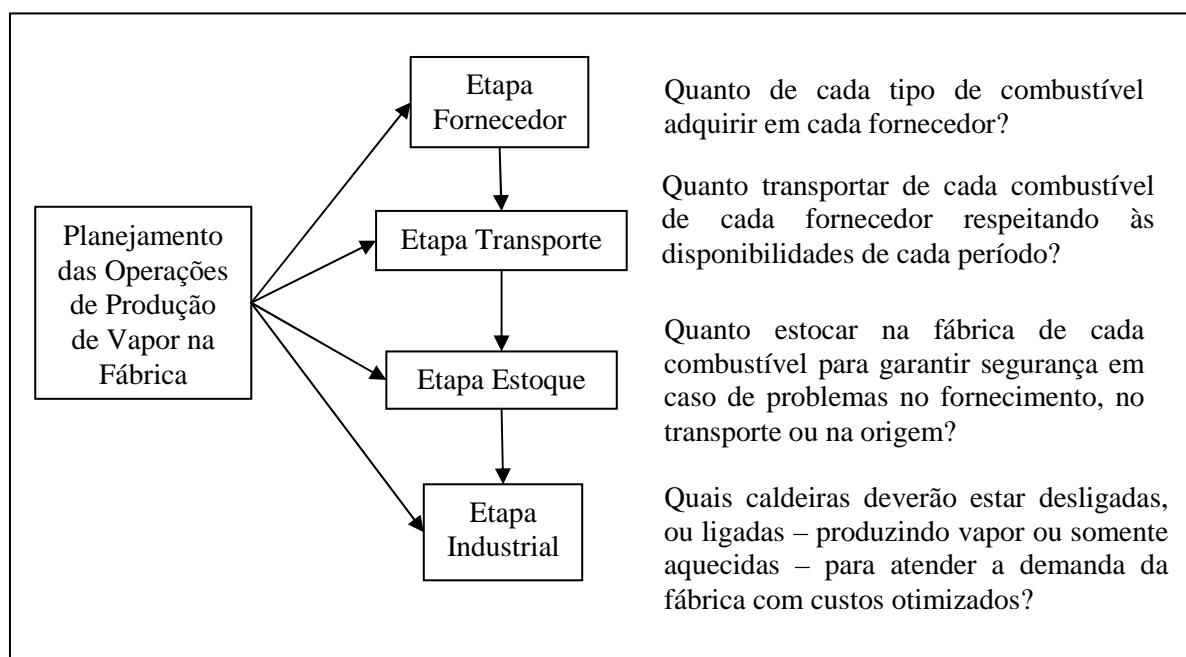


Figura 1.1. Esquema das etapas das decisões e as principais questões contempladas nesta dissertação

1.3 Metodologia

Um modelo pode ser definido como uma representação de uma situação ou realidade. Este deve ser suficientemente detalhado para captar elementos essenciais representativos do sistema real, e também deve ser suficientemente simplificado para ser tratável por métodos de análise e resolução conhecidos (MORABITO & PUREZA, 2010).

A elaboração de um modelo passa pelo entendimento e abstração da realidade e segue algumas etapas do processo de modelagem. Em Arenales *et al.* (2007) é encontrada a Figura 1.2, que ilustra um processo simplificado de modelagem que aborda um problema real com ferramentas de modelagem matemática. Outros diagramas de processos de modelagem e pesquisa em gestão de produção e operações podem ser encontrados em Ackoff e Sasieni (1968) e Mitroff *et al.* (1974).

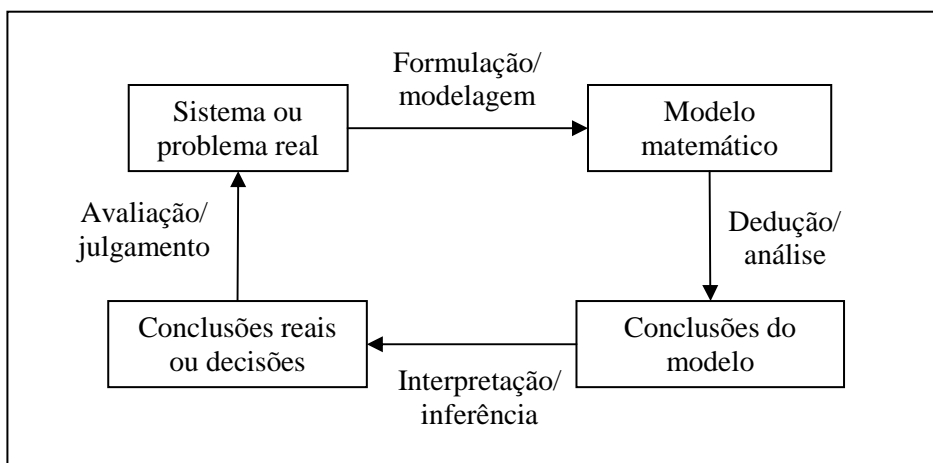


Figura 1.2. Processo de modelagem (Fonte: Arenales *et al.*, 2007)

De acordo com a classificação dos métodos de pesquisa aplicados em gestão de operações propostos em Bertrand e Fransoo (2002) e discutidos em Morabito e Pureza (2010), o presente trabalho se enquadra como uma pesquisa quantitativa com aplicação de modelagem empírico-normativa (ou empírico-prescritiva), ou seja, aquela em que a elaboração de modelos serve essencialmente para apoiar decisões para o desenvolvimento de políticas, estratégias, e ações que melhorem a situação corrente da realidade modelada. A teoria e as técnicas de programação matemática e o uso de *softwares* específicos para resolução de problemas de otimização são as principais ferramentas empregadas neste trabalho.

As etapas do método de pesquisa propostas em diversos trabalhos, como, por exemplo, em Law e Kelton (1991), são aquelas que foram adotadas neste trabalho. São elas:

- **Conceitualização:** consiste no entendimento e interpretação da realidade e a sua tradução em um modelo conceitual. Nesta etapa, procedeu-se a visita a algumas fábricas de alimentos que possuem caldeiras para a produção de vapor destinado aos processos industriais. Foram levantadas informações do funcionamento do sistema e definido na forma esquemática o problema de pesquisa.
- **Coleta de dados:** consiste no levantamento de dados e informações referentes para as variáveis que compõem o modelo. Foram pesquisadas as informações em relatórios e nos bancos de dados da empresa que foi escolhida como estudo de caso.

- Modelagem: consiste no relacionamento das variáveis que compõem o sistema por meio de equações matemáticas. Esta etapa foi implementada na linguagem de modelagem do *software* GAMS¹.
- Experimento: é o processo de colocar em funcionamento o modelo desenvolvido e obter respostas para as decisões que se pretende apoiar. Os experimentos foram realizados utilizando-se *software* específico de resolução de problemas de otimização;
- Validação: é a etapa em que se verifica se o modelo proposto representa satisfatoriamente a realidade estudada. Nesta etapa, um estudo de caso foi conduzido com uma empresa que permitiu comparar a sua situação real e os resultados do modelo proposto.
- Documentação e *feedback*: consiste na análise dos resultados da etapa de validação com o propósito de evidenciar as coerências ou discrepâncias, de modo a realizar ajustes e correção de eventuais desvios de modelagem. A documentação final desta pesquisa consistiu na elaboração desta dissertação de mestrado.

A Figura 1.3 apresenta as etapas do método de pesquisa quantitativa em modelagem proposta por Law e Kelton (1991). Uma característica importante neste método é a interconexão entre as etapas, pois uma vez avançado o trabalho existe a possibilidade de retornar às etapas anteriores para revisão e ajustes, o que permite que o modelo seja continuamente melhorado.

¹ GAMS – sigla da linguagem de modelagem algébrica e também nome do pacote computacional de otimização - General Algebraic Modeling System.

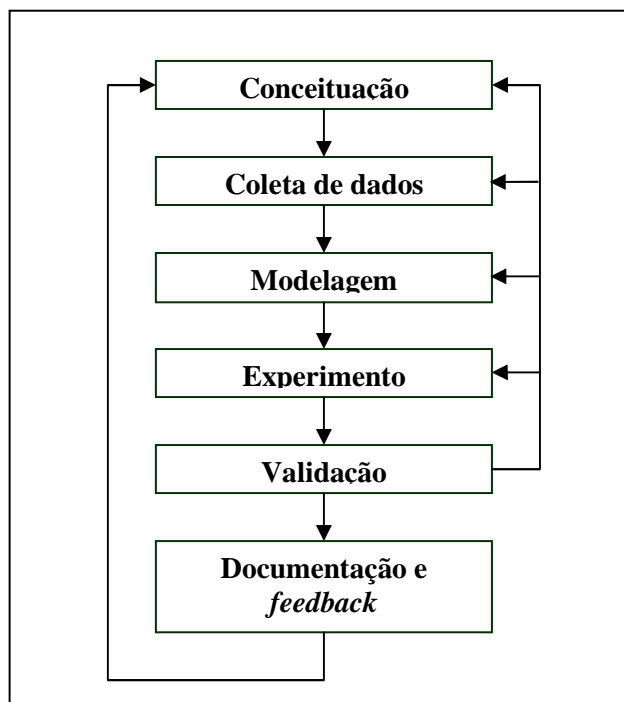


Figura 1.3. Etapas do método de pesquisa empregado nesta dissertação (Fonte: adaptada de Law e Kelton, 1991)

A validacão de um modelo em pesquisa operacional é uma importante etapa de análise. Tanto modelos preditivos quanto prescritivos devem ser validados, e o processo de validacão é um importante exercício para melhoria do modelo.

O propósito da validacão é verificar se o modelo serve para representar a realidade modelada em seus aspectos essenciais. Para os modelos preditivos, a validacão envolve essencialmente a comparacão do modelo com os resultados acontecidos na situacão real e verificar o quanto o modelo se aproximou da realidade. Para modelos prescritivos, a validacão envolve a comparacão das sugestões do modelo com as decisões que seriam tomadas na situacão real sem o apoio de modelos.

De acordo com McCarl e Spreen (1997), a validacão de modelos de otimizacão é um processo fundamentalmente subjetivo. Modeladores escolhem suas comparacões de acordo com o sistema, e julgam se o modelo é válido ou necessita de ajustes. De acordo com esses autores, na validacão de modelos de otimizacão existem essencialmente duas abordagens que devem ser utilizadas: a validacão do constructo do modelo e a validacão dos resultados do modelo. Uma discussão aprofundada sobre validacão de modelos de programacão matemática para otimizacão pode ser encontrada em McCarl e Spreen (1997), capítulo XVIII.

1.4 Organização do trabalho

Esta dissertação de mestrado está organizada em cinco capítulos e suas páginas de citações bibliográfica, apêndices e anexos. O presente capítulo (*Introdução*) apresenta o problema de pesquisa e seus objetivos, e também os argumentos que justificam a importância deste trabalho.

O Capítulo 2 (*Ambiente do problema e referencial teórico*) está dividido em duas partes. A primeira descreve o ambiente do problema de pesquisa, apresentando o funcionamento típico de um sistema de produção de vapor em caldeiras industriais, trazendo também informações da importância das biomassas como fonte de energia. A segunda parte traz uma breve revisão na literatura de pesquisa operacional, especificamente dos modelos matemáticos de otimização aplicados a problemas de produção que embasaram a modelagem do sistema estudado.

O Capítulo 3 (*Modelagem do problema*) descreve em detalhes o modelo matemático proposto para gerenciamento das operações de produção de vapor em caldeiras industriais. O modelo geral, suas particularidades de restrições e cálculos de parâmetros são explicados neste capítulo.

No Capítulo 4 (*Estudo de caso em uma indústria de alimentos*) é apresentada a empresa que colaborou com esta pesquisa, onde foi realizado o estudo de caso com a aplicação do modelo desenvolvido. Nesse capítulo, também são trazidos os resultados da operação real de produção de vapor sem o uso de ferramentas de otimização para apoiar as decisões do sistema, e discutem-se os resultados da aplicação do modelo com o uso dos dados da operação real.

No Capítulo 5 (*Considerações finais*) tecem-se os comentários finais dos resultados da pesquisa, e apontam-se algumas perspectivas visualizadas para investigação futura no assunto abordado desta dissertação.

2 AMBIENTE DO PROBLEMA E REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O vapor na indústria

A palavra *vapor* é aqui entendida como a fração gasosa da matéria. O vapor de aquecimento utilizado nas indústrias, particularmente de alimentos, normalmente é vapor d'água saturado, e constitui-se uma das principais formas de energia na transformação das matérias-primas em produtos industrializados.

Poucas informações sobre a importância do vapor industrial são encontradas publicamente. No *website* do *International Energy Agency*² e também em Little (2000)³ *apud* Dunn e Du (2009), alguns dados sobre o assunto são mencionados. Essas fontes afirmam que somente o setor industrial dos Estados Unidos consome 26,5 quads⁴ de energia anualmente, dos quais 45% são direcionados à geração de vapor. Se considerarmos o setor não-industrial, o total de energia utilizada é da ordem de 9 quads anualmente na produção de vapor, o que representa 10% de toda energia consumida nos Estados Unidos. Com os preços da energia excedendo os US\$ 5 por mil BTU, os EUA consomem aproximadamente US\$ 45 bilhões por ano em vapor.

O consumo de combustível para a geração de vapor nas indústrias dos EUA chega a US\$ 28,38 bilhões anuais, enquanto que em todo o setor não industrial o consumo anual é de US\$ 15,63 bilhões. Apesar desses números, as pesquisas em otimização econômica têm se concentrado unicamente no setor doméstico e particularmente na geração e alocação de energia elétrica (DUNN & DU, 2009).

A produção de vapor acontece por meio da evaporação da água em caldeiras, nas quais são queimados diversos tipos de combustíveis para geração de calor para que a água aumente sua temperatura até ultrapassar seu ponto de ebulição e, deste modo, passe para seu estado gasoso saturado, ou seja, estado de vapor. Uma vez produzido, o vapor é conduzido por meio de tubulações para o interior das fábricas, onde é consumido.

Poucos estudos foram realizados sobre os valores, os custos e as possíveis estratégias de economia na produção de vapor. Na cronologia dos trabalhos sobre o

² United State Department of Energy, Energy Information Administration, www.eia.doe.gov.

³ Little AD. Overview of energy flow for industries in standard industrial classifications 20-39, Reference 71563, December 4, 2000. Materiais citados em Dunn e Du (2009).

⁴ 1 quad = 10¹⁵ BTUs (BTU = British Thermal Unit. 1 BTU = 1,06 quilo-joule (kJ)).

assunto, um dos estudos pioneiros encontrados na revisão bibliográfica foi de Le-van (1882) chamado “Poder Econômico do Vapor” (*Economical Steam Power*), que discutiu aspectos econômicos e técnicos da produção de vapor em caldeiras industriais nos Estados Unidos no século XIX.

O fator mais importante associado à análise dos aspectos econômicos na produção de vapor está relacionado ao tipo de combustível queimado nas caldeiras. A razão do valor dos combustíveis consumidos nas caldeiras pela quantidade de vapor produzido fornece uma importante medida do valor do vapor. Entre os principais combustíveis consumidos para a geração de vapor estão: a energia elétrica, os derivados de petróleo e as biomassas. Todas as três alternativas são amplamente utilizadas e seu grau de adoção está atrelado à disponibilidade e ao custo de aquisição dos combustíveis no contexto regional onde ocorre a demanda de vapor.

Algumas empresas do oeste da França foram contatadas e questionadas sobre quais combustíveis eram consumidos em suas caldeiras industriais. Em resposta às perguntas, os responsáveis das empresas disseram que os combustíveis consumidos eram principalmente carvão mineral, gás de petróleo e eletricidade, isto decorrente unicamente da disponibilidade destes nas regiões onde as fábricas estão localizadas (região *Pays de La Loire*). Os responsáveis pelas operações afirmaram que não utilizam biomassas vegetais unicamente pela falta de oferta em suas regiões⁵.

Por outro lado, o consumo de biomassas na produção de energia e vapor vem crescendo muito no Brasil, principalmente em decorrência do aumento na oferta desta matéria-prima como combustível e elevação nos preços da energia elétrica e dos derivados de petróleo. Com exceção das siderúrgicas que utilizam, quase que exclusivamente, carvão coque em suas caldeiras geradoras de vapor, majoritariamente os outros segmentos industriais preferem o consumo de biomassas aos outros combustíveis disponíveis.

A avaliação da viabilidade econômica do uso da biomassa como combustível é recente e tem despertado o interesse de pesquisadores. Lima *et al.* (2006) realizaram um estudo bastante abrangente da viabilidade técnica e econômica da utilização de biomassas como fonte energética alternativa em fornos industriais. No estudo, a competitividade entre as biomassas está intimamente atrelada aos custos associados ao transporte do fornecedor da biomassa para o local de demanda.

⁵ O autor da dissertação possui contatos com empresas agroindustriais na França decorrente do período de intercâmbio realizado durante o curso de graduação.

A queima de biomassas, especialmente de bagaço de cana, tem ganhado espaço na co-geração de energia elétrica produzida como parte integrante no portfólio de produtos em usinas de cana-de-açúcar, juntamente com o açúcar e o álcool. Em Paiva (2006) e Paiva e Morabito (2009), foram relatados que, no portfólio de produtos de uma usina de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas, a energia elétrica não estava incluída como um dos produtos de venda. Na continuação de suas pesquisas, notou-se que a queima das biomassas nas caldeiras para a geração de energia elétrica, que passou a ser vendida na linha de transmissão, tornou-se economicamente atrativa. E assim, a energia elétrica passou a figurar como um dos principais itens de produção e geração de receita nas usinas sucroalcooleiras (PAIVA, 2009).

2.2 Biomassas como fonte de energia

O aproveitamento das biomassas como fonte de energia depende diretamente da sua oferta e das tecnologias empregadas nesta transformação, pois o seu conteúdo energético é relativamente pouco “denso” e exige coleta e transporte. É necessário que se obtenha uma quantidade mínima de biomassa para que os custos de coleta e transporte não comprometam o retorno econômico da transformação da biomassa em energia.

Define-se como poder calorífico das biomassas, a quantidade de energia, na forma de calor, liberada na combustão de uma unidade de massa, após deduzir as perdas com a evaporação da água contida na estrutura da matéria (JARA⁶ (1989) *apud* QUIRINO *et al.*, 2005). O poder calorífico é a unidade em que se quantifica o conteúdo energético das biomassas. A composição química das biomassas é bastante variada e influi diretamente nas características do calor, fumaça e cinzas geradas na combustão. As características das biomassas como combustíveis foram revisadas por Bushnell *et al.* (1989). Nordin (1994) fez uma compilação de informações referentes a trinta diferentes biomassas, dentre as quais quinze foram selecionadas de acordo com semelhanças na sua composição e as suas diferenças foram evidenciadas. No trabalho de Nordin (1994), o bagaço de cana não figurou entre as biomassas estudadas.

Dermibas (1997) conduziu uma pesquisa na qual se obteve o calor específico de biomassas selecionadas de modo experimental e as comparou com alguns

⁶ JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, n.1797).

modelos estimadores. As diferenças entre os valores estimados e obtidos experimentalmente foram em média 2,2%. Em Barroso *et al.* (2003), os autores afirmaram que a importância do bagaço de cana como biomassa energética é recente. De acordo com o trabalho, havia alguns anos se queimava o bagaço de cana como um resíduo sólido qualquer.

Entretanto, com o aumento no preço do petróleo, gás natural e eletricidade, particularmente após a crise energética ocorrida em alguns países na década de 70, uma atenção especial começou a ser dada às fontes energéticas alternativas, e conseqüentemente o conceito do bagaço mudou de resíduo para “biomassa combustível.”

A tendência atual é o uso do bagaço da cana como combustível especialmente para a co-geração de energia elétrica e vapor, contribuindo significativamente como fonte de energia em um país. Em Cuba, por exemplo, o bagaço de cana, como fonte de energia, representa 30% do total da energia consumida no país. De maneira geral, o bagaço de cana tem se tornado a principal biomassa energética disponível, sendo que seu poder calorífico pode variar de 6.500 a 9.150 kJ/kg (BARROSO *et al.*, 2003). Em alguns países, como o Brasil e a Austrália, a cana-de-açúcar tem sido a principal cultura energética plantada com o objetivo de produzir combustível líquido (etanol) e o bagaço da cana, resíduo do processamento da planta, tornou-se a mais importante biomassa para produção de energia.

Do ponto de vista ambiental, a combustão das biomassas não gera maior quantidade de gás carbônico do que aquela sequestrada para o crescimento e desenvolvimento dos vegetais (REINHARDT⁷ (1997) *apud* STAISS & PEREIRA, 2001). A queima de uma tonelada de madeira seca deixa de lançar no ambiente 1.600 quilogramas de gás carbônico em comparação à queima da mesma quantidade de petróleo (STAISS & PEREIRA, 2001).

Existem várias vias de produção de combustíveis e energia a partir das biomassas. A forma mais econômica do aproveitamento das biomassas é a combustão do material sem qualquer tipo de processamento; contudo, existem processos físicos e químicos que podem melhorar a qualidade da biomassa quanto à na conversão energética, permanência de queima e outros atributos relacionados à energia. Em contrapartida, o processamento da biomassa aumenta o custo deste combustível e, conseqüentemente, o custo da geração de energia (STAISS & PEREIRA, 2001). A Figura 2.1 apresenta um

⁷ REINHARDT, G. Umweltverträglichkeit. Institut für Energie und Umweltforschung. Heidelberg, 1997.

esquema, adaptado de Staiss e Pereira (2001) e Lora e Andrade (2009), dos diferentes processos de produção de energia por meio das biomassas.

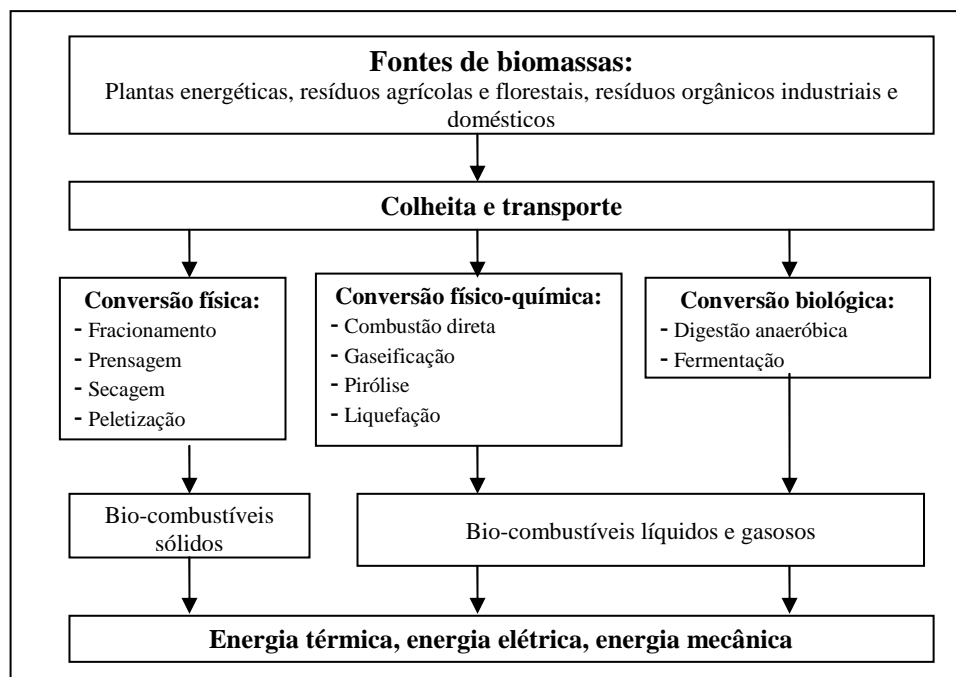


Figura 2.1. Esquema dos diferentes processos de produção de energia por meio de biomassas (Fonte: adaptada de Staiss e Pereira, 2001; Lora e Andrade, 2009)

As biomassas ocupam lugar de destaque na matriz energética brasileira. Em 2006, o petróleo e seus derivados compuseram 37,7% da oferta interna de energia no Brasil, seguido das biomassas, com 30,2% de participação. No mundo, os dados disponíveis de 2005 mostram que as biomassas participaram de 10,5% na matriz energética, atrás do petróleo e seus derivados (35%), carvão mineral (25,3%) e gás natural (20,7%) (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

Em relação aos setores consumidores de biomassas no Brasil, a indústria é responsável por 54% do consumo total. Em particular, a indústria de alimentos e bebidas participa com 29,5% do total consumido, seguida da indústria de papel e celulose, com 9,6%. Cabe destacar que, nas indústrias de alimentos e celulose, o principal propósito da queima da biomassa é a geração de energia térmica na forma de vapor. Os outros setores que participam também de forma expressiva no consumo de biomassas no Brasil são o residencial e o de transportes (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

No setor industrial, o bagaço de cana é a principal biomassa utilizada. Na Figura 2.2 é possível observar a evolução da participação dos principais combustíveis na matriz energética do setor industrial brasileiro. Percebe-se que a participação das biomassas, representada pela cana-de-açúcar, possui significativa expressão e tendência de crescimento desde o ano 2002.

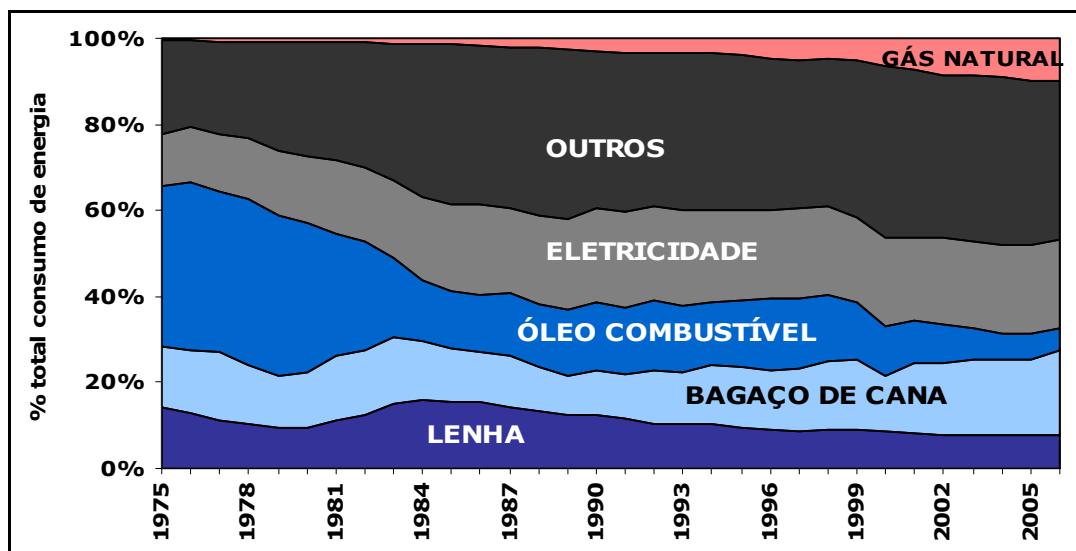


Figura 2.2. Evolução da matriz energética no setor industrial brasileiro de 1975 a 2006 (Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2007)

2.3 Introdução sobre caldeiras industriais

As caldeiras industriais são os equipamentos responsáveis pela queima dos combustíveis e pela consequente geração de energia térmica, que eleva a temperatura da água e a transforma em vapor. De acordo com informações do Conselho dos Proprietários de Caldeiras Industriais dos Estados Unidos (*Council of Industrial Boiler Owners*⁸), existem quatro características que determinam o funcionamento e a eficiência das caldeiras industriais:

- tipo de combustível;
- sistema de combustão;
- *design* de construção do equipamento;
- sistema operacional de controle de vapor.

Existem basicamente dois tipos de caldeiras industriais que se diferenciam quanto ao conteúdo do material que circula no interior do sistema de tubos do equipamento. A caldeira tipo *fire-tube* – tradução para o português: “flamotubulares” – (Figura 2.3) é aquela em que os gases da combustão passam pelo interior de um sistema de tubos imerso em um tanque de água que será evaporada, produzindo o vapor. Esse tipo de caldeira foi característico das locomotivas. Já na caldeira do tipo *water-tube* – tradução para o português: “aquatubulares” – (Figura 2.4), é a água para evaporação que permanece

⁸ Endereço na internet: www.cibo.org/

circulando no interior de um sistema de tubos que está exposto aos gases provenientes da combustão. As caldeiras *water-tube* são utilizadas para produção de vapor sob alta pressão e foram utilizadas em navios antes da adoção de turbinas.

Atualmente, as caldeiras *water-tube* são as mais comuns nas indústrias, e existem diversas variações na construção deste tipo de caldeira. Mais informações sobre tipos de caldeira e geração de vapor podem ser encontrados em Bazzo (1992) e Stultz e Kitto (1992). Para melhor entendimento das principais partes constituintes de uma caldeira industrial e seus equipamentos anexos, a Figura 2.5 apresenta na forma de ilustração uma caldeira industrial do tipo *water-tube*.

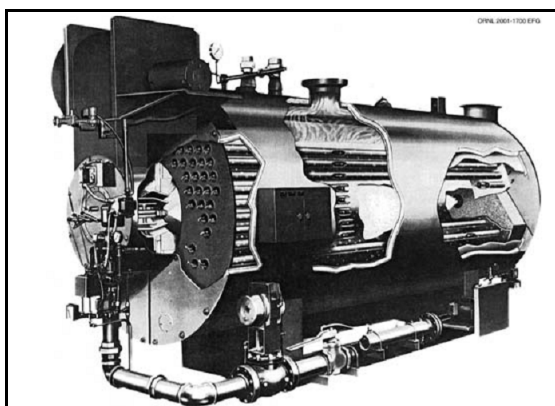


Figura 2.3. Caldeira industrial tipo *fire-tube*
(Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos, 2004)

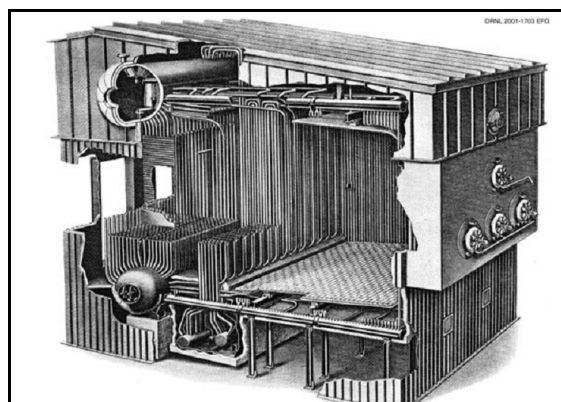


Figura 2.4. Caldeira industrial tipo *water-tube*
(Fonte: Departamento de Energia dos Estados Unidos, 2004)

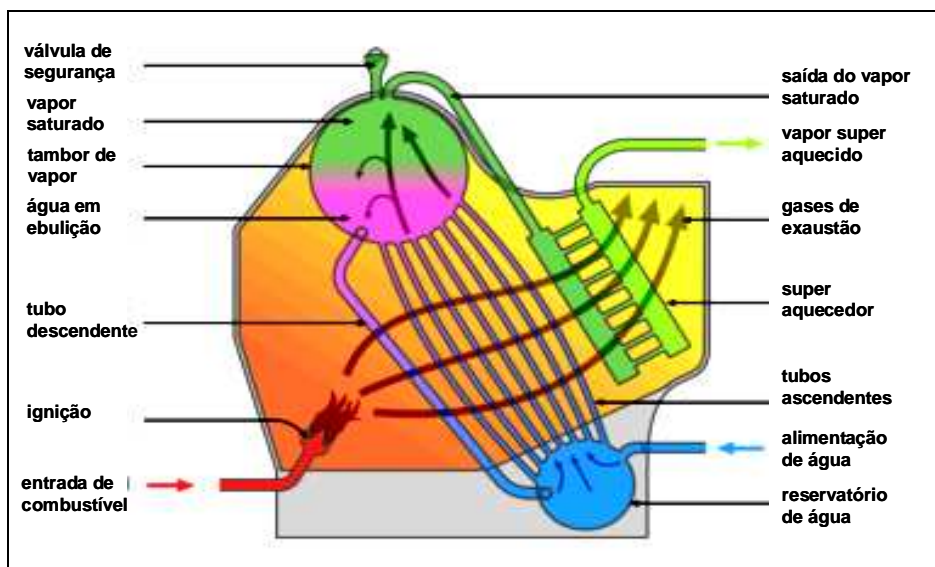


Figura 2.5. Desenho esquemático de uma caldeira tipo *water-tube*

Os combustíveis utilizados nas caldeiras industriais são o principal componente responsável na participação dos custos de geração de energia, e conseqüentemente, no custo de produção de vapor. Poucos trabalhos na literatura concernente realizaram análises econômicas da queima de diferentes combustíveis em caldeiras, ou mesmo testes para quantificar a eficiência energética dos combustíveis. Recentemente, alguns artigos sobre o assunto foram publicados (Kaylen, 2005), entretanto, ainda permanece uma enorme lacuna de informações sobre esses assuntos.

O trabalho de Dias *et al.* (2004) testou quatro diferentes tipos de *pellets*⁹ de biomassa em caldeiras domésticas e avaliou as seguintes variáveis: taxa de consumo dos combustíveis, calor gerado e composição dos gases produzidos. Kaylen (2005) publicou um estudo de viabilidade econômica do uso de combustíveis alternativos (culturas energéticas, resíduos agrícolas e urbanos) em comparação com carvão, para um complexo industrial químico nos Estados Unidos. Daho *et al.* (2009) realizaram uma pesquisa que avaliou as características da combustão para diferentes misturas de óleo doméstico e óleo refinado de algodão em caldeiras domésticas.

Dunn e Du (2009) apresentaram em seu trabalho um método de alocação de diferentes combustíveis em múltiplas caldeiras industriais. Na literatura pesquisada não foram encontrados outros trabalhos que tratavam especificamente desse tema. Apesar da pesquisa de Dunn e Du (2009) ser aquela que mais se aproxima do assunto desta

⁹ Pequeno aglomerado sólido, com maior densidade em comparação às suas matérias-primas, obtida por meio de processamento industrial.

dissertação, a abordagem utilizada e o objetivo, em ambos os trabalhos, são bastante distintos e possibilita poucos paralelos. O trabalho de Dunn e Du (2009) é discutido com mais detalhes na Seção 2.8.

2.4 As operações de funcionamento em caldeiras industriais

Nesta seção, apresentam-se sucintamente as principais operações e decisões que são tomadas no funcionamento de caldeiras industriais. Uma vez que se decide produzir vapor com uma caldeira, a sua fornalha, ou câmara de combustão, deve ser alimentada com combustíveis, por exemplo: bagaço de cana, palha de arroz, cavaco de madeira, carvão, óleo BPF etc. A alimentação dos combustíveis sólidos normalmente acontece por meio de esteiras automáticas, que levam o combustível do meio exterior para o interior da fornalha. A combustão dos combustíveis é realizada através de um sistema de ignição tipo lança-chamas, cuja intensidade do fogo pode ser regulada, com o controle da alimentação do combustível e oxigênio.

A massa dos combustíveis sólidos vai gradativamente entrando em combustão até que toda a quantidade esteja em chamas, gerando gases quentes que aquecem o exterior do sistema de tubulações e balões reservatórios que contêm água circulante, que será evaporada, produzindo o vapor (descrição para caldeiras tipo aquatubulares). O vapor d'água saturado ainda passa por um conjunto de serpentinas, onde é superaquecido antes de entrar na tubulação de alimentação para a fábrica.

Os níveis de água no interior do conjunto de tubos e balões são constantemente monitorados e a alimentação com água aquecida acontece automaticamente. A água de alimentação é pré-aquecida no equipamento chamado “economizador”, que aproveita gases residuais quentes da combustão, e elevam a temperatura da água de captação até aproximadamente 90° Celsius, permitindo que a água dentro do sistema de tubos e balões não tenha sua temperatura reduzida.

A demanda de vapor da fábrica é monitorada por um sistema computadorizado, que verifica a vazão requerida e a pressão na linha de alimentação de vapor. Quando a vazão de demanda aumenta, a pressão na linha diminui. A geração de vapor deve aumentar para que a vazão seja atendida adequadamente e a pressão na linha retome ao seu nível normal. Quando a geração (ou seja, a caldeira) não consegue responder ao aumento na demanda de vapor, outro equipamento é colocado em funcionamento para complementar a sua produção. Na prática, os operadores das caldeiras acionam outro

equipamento quando a demanda de vapor atinge aproximadamente 65% da capacidade de produção horária da primeira caldeira.

Uma vez que a demanda de vapor da fábrica é diminuída, a caldeira suplementar reduz sua produção de vapor e avalia-se qual decisão tomar: deixar a referida caldeira aquecida em regime de espera (*warm-up*), aguardando um eventual aumento na demanda de vapor e permitindo sua rápida reativação, ou desligá-la completamente. Esta decisão é tomada de maneira empírica, com base na comunicação entre a fábrica (consumidora de vapor) e a operação das caldeiras (geradora de vapor).

A diferença entre manter uma caldeira aquecida em regime de *warm-up* e desligá-la completamente é bastante significativa em termos de custo e tempo para atendimento da demanda de vapor. A caldeira completamente desligada demora aproximadamente 12 horas para atingir o regime normal de operação e gasta-se com combustível o equivalente a 24 horas de aquecimento em regime de *warm-up* somente nesse período. Por outro lado, ao deixar-se a caldeira aquecida, gasta-se uma determinada quantidade de combustível, mas o atendimento de uma demanda imprevista acontece quase imediatamente.

A combustão deixa como resíduo as cinzas que devem ser retiradas da fornalha da caldeira. Um sistema de grelhas separa as cinzas em compartimentos apropriados, do material ainda não queimado. A periodicidade de remoção das cinzas depende do tipo de caldeira e da frequência e intensidade de uso do equipamento.

O tipo de combustível consumido e os níveis de estoque são decididos pelos envolvidos na operação e monitorados em planilhas eletrônicas do tipo *Excel*[®]. Escolhe-se sempre o combustível com menor relação entre o custo de aquisição e conversão em vapor (adotando-se os valores apresentados na Tabela 3.2); e os níveis de estoque devem garantir a segurança na produção de vapor para, no mínimo, algum certo número de dias de demanda (por exemplo, sete dias). As operações no funcionamento de caldeiras industriais não apresentam elevada complexidade. Entretanto, a falta de ferramentas para apoiar um grande número de decisões, relativamente simples, faz com que a tomada de decisão seja embasada na experiência dos envolvidos, e impeça a exploração de oportunidades não facilmente observadas.

2.5 Referencial teórico - modelagem matemática para problemas de produção

A modelagem utilizando-se de programação matemática tem sido uma das abordagens da pesquisa operacional mais utilizadas para abordar problemas em gestão de

produção e operações. Os problemas de planejamento e controle da produção podem ser classificados em níveis que estão relacionados ao horizonte de tempo no qual as decisões são tomadas. Slack *et al.* (2002) apresentam uma pirâmide das decisões gerenciais em três níveis: estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo).

Em Thomas & Macclain (1993), Shapiro (1993) e Slack *et al.* (2002) são encontrados as decisões do planejamento e controle da produção (PCP) dentro de diferentes escalas de tempo no horizonte de planejamento. As decisões de longo prazo dizem respeito à infra-estrutura e a localização onde as operações devem acontecer.

As decisões de médio prazo estão preocupadas em definir o tamanho da produção em determinado período de tempo, quais são os níveis de estoque e a quantidade dos recursos necessários para que a produção possa acontecer. E no curto prazo, as decisões do PCP preocupam-se com o monitoramento das atividades, para que as mesmas ocorram da maneira mais próxima daquilo que foi planejado dentro da escala de tempo de semanas, dias, turnos etc.

De forma geral, a gerência da produção está preocupada com questões de quanto e quando produzir determinados produtos dentro de um horizonte de tempo estabelecido, e como alocar de maneira ótima os recursos de produção, que normalmente são escassos. Na literatura de gerência da produção e pesquisa operacional são encontrados diversos modelos matemáticos que abordam problemas de planejamento e controle da produção (JOHNSON & MONTGOMERY, 1974; HAX & CANDEA, 1984; WINSTON, 1991; WILLIAMS, 1993; NAHMIAS, 1995).

Nos curto ou médio prazos, a questão de quanto e quando produzir pode ser tratada como um problema de dimensionamento de lotes de produção (*Lot Sizing Problem* – LSP), enquanto que, estritamente no curto prazo, estas questões são tratadas pela programação e sequenciamento da produção (*Scheduling Problems* – SP). Na literatura são encontrados alguns trabalhos que tratam exclusivamente de problemas de dimensionamento de lotes (LSP), como os de Kuik *et al.* (1994) e Brahim *et al.* (2006). Outros trabalhos abordam somente os problemas de sequenciamento da produção (SP), como em Pinedo (2005) e Cheng *et al.* (2004).

Na literatura, apesar da existente separação entre as famílias de modelos LSP e SP, há muitos aspectos correlacionados entre elas que tornam difícil a adaptação isolada desses modelos em situações reais. Em muitos ambientes produtivos, a combinação de modelos de dimensionamento de lotes (LSP) e decisões de sequenciamento da produção (SP) se faz necessária, e torna-se integrante de uma mesma análise (DREXL & KIMMS, 1997).

Uma classificação usual nos modelos matemáticos que adereçam a programação da produção diz respeito ao número de máquinas sequenciadas (mono-máquina e multi-máquinas), a limitação da capacidade do sistema (modelos capacitados ou não capacitados), e também em relação ao tempos/custos de preparação das máquinas (*setup*). Como será discutido no Capítulo 4, pode-se abstrair a problemática desta dissertação inserida nos problemas de dimensionamento e sequenciamento da produção de lotes de vapor em múltiplas máquinas paralelas (as máquinas são as caldeiras industriais), com custos de preparação (custos de *setup*) associados ao acionamento dos equipamentos, não dependentes da sequência.

2.6 Modelos de dimensionamento de lotes

O problema de quanto produzir de cada produto em cada período é a definição mais simples do problema de dimensionamento de lotes de produção (*Lot Sizing Problem* – LSP). O problema de dimensionamento de lotes e suas extensões tem origem nos clássicos modelos *Economic Order Quantity* (EOQ). Uma vez que os modelos EOQ são problemas não capacitados, de um único item (produto), um único estágio de produção, nos quais assumem-se que a demanda não varia no horizonte de tempo infinito (demanda estacionária). Esses modelos são de fácil resolução e assim encontra-se facilmente uma solução ótima (DREXL & KIMMS, 1997; KARIMI *et al.*, 2003).

As extensões mais realistas do modelo EOQ permitiram o surgimento de uma família de modelos para o problema de *Economic Lot Scheduling Problem* (ELSP). Para esta nova família, o problema continua sendo determinar o lote de produção; entretanto, o sistema agora passa a ter limite de capacidade, em que existem custos de preparação das máquinas (*setup*), apesar destes serem independentes da sequência, e são múltiplos itens (produtos) que competem pelos recursos de produção. Nessa família de modelos, o horizonte de tempo ainda não é finito e assume-se que as taxas de produção e demanda são constantes. As variações existentes entre os modelos da família EOQ e a família ELSP fazem com que a resolução deste último aumente muito em complexidade. Os modelos ELSP para solução ótima são classificados como NP-hard¹⁰, e por isso, os

¹⁰ Classificação de problemas em teoria de complexidade computacional (*NP-Completeness theory*). Mais informações em: Algorithms, Robert Sedgewick, Addison-Wesley Publishing Company, 552p. 1983.

métodos heurísticos têm se disseminado mais rapidamente esta área (DOBSON, 1987; ZIPKIN, 1991; GALLEGO & JONEJA, 1994).

Os modelos de dimensionamento de lotes, normalmente, são classificados quanto ao número de itens para os quais são aplicados. Em Brahim *et al.* (2006) é encontrada uma revisão dos trabalhos de LS para um único item (*Single Item Lot Sizing Scheduling Problem – SILSP*). Também quanto à capacidade do sistema os modelos são classificados, isto independentemente de se a demanda variar (demanda dinâmica) ou permanecer constante em todo horizonte de planejamento (demanda estacionária). Em Bitran e Yanasse (1982) e em Trigeiro *et al.* (1989) são discutidos especificamente os modelos de dimensionamento de lotes capacitados. Alguns modelos não capacitados foram discutidos por Wolsey (1989). Para revisões na literatura de dimensionamento de lotes, têm-se, por exemplo, os trabalhos de Kuik *et al.* (1994), Karimi *et al.* (2003), Brahim *et al.* (2006) e Jans e Degraeve (2008).

Apresentam-se a seguir as notações que foram adotadas exclusivamente nas equações matemáticas dos modelos revisados para esta dissertação.

Parâmetros:

T	número de períodos no horizonte de tempo;
J	número de itens (produtos);
N	número total de sub-períodos;
F_t	primeiro sub-período do período t ;
L_t	último sub-período do período t ;
V_n	conjunto dos sub-períodos n ;
a_t	custo de <i>setup</i> no período t (caso do modelo monoproduto: 2.6.1);
a_j	custo de <i>setup</i> do produto j (caso dos modelos multiprodutos)
f_j	custo de <i>start-up</i> do produto j ;
c_j	custo de produção do produto j ;
h_t	custo de manter uma unidade de produto em estoque no período t ;
h_j	custo de manter uma unidade em estoque do produto j ;
d_t	demanda no período t ;
k_t	capacidade de produção no período t ;
p_j	capacidade requerida para produção de uma unidade do produto j ;

Variáveis:

I_t	quantidade do produto em estoque no período t ;
Q_t	quantidade produzida do produto no período t ;

- S_t variável binária que indica se ocorreu um *setup* ($S_t = 1$) ou não ($S_t = 0$), para o início da produção no período t ;
- W_t variável binária que indica se a máquina está preparada ($W_t = 1$) ou não ($W_t = 0$) no período t .

2.6.1 Modelo de dimensionamento de lotes não capacitado

Hax e Candea (1984) apresentam uma formulação do modelo de dimensionamento de lotes não capacitado (*Uncapacited Lot Sizing Problem – ULSP*). Na modelagem apresentada a seguir, a função objetivo (2.1) minimiza os custos *setup* e estocagem dos produtos nos períodos no horizonte de planejamento.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T (a_t S_t + h_t I_t) \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$I_t = I_{t-1} + Q_t - d_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.2)$$

$$Q_t \leq M \cdot S_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.3)$$

$$Q_t; I_t \geq 0 \quad t = 1, \dots, T \quad (2.4)$$

$$S_t \in \{0, 1\} \quad t = 1, \dots, T \quad (2.5)$$

O conjunto de restrições representadas pela equação (2.2) garante o atendimento da demanda e o balanceamento dos estoques entre os períodos. As restrições (2.3) permitem que a produção aconteça com o recurso disponível, onde M é um número suficientemente grande para não limitar em capacidade o modelo, ao mesmo tempo em que é incidido o custo de preparação da máquina somente quando ocorre a produção de algum item no período. As restrições em (2.4) são de não negatividade para as quantidades produzidas e para os estoques. As restrições em (2.5) assumem os valores binários zero e um (0 e 1) para a variável de *setup* (S_t). O ULSP pode ser resolvido de maneira exata pelo algoritmo de Wagner-Whitin, no entanto, outros algoritmos com menor complexidade computacional foram propostos, como por exemplo: Federgruen e Tzur (1991), Wagelmans *et al.* (1992) e Aggarwal e Park (1993).

2.6.2 Modelo de dimensionamento de lotes capacitado

O modelo de dimensionamento de lotes capacitado (*Capacited Lot Sizing Problem – CLSP*) é uma extensão do modelo ULSP no qual se adicionam as restrições de capacidade e as variáveis e parâmetros ganham um índice adicional para tornar o modelo

multi-produto. O modelo das equações (2.6) a (2.10) representa o clássico CLSP encontrado na revisão de Drexl e Kimms (1997).

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (a_j S_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (2.6)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j(t-1)} + Q_{jt} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T \quad (2.7)$$

$$p_j Q_{jt} \leq k_t S_{jt} \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T \quad (2.8)$$

$$\sum_{j=1}^J p_j Q_{jt} \leq k_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.9)$$

$$I_{jt}; Q_{jt} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T \quad (2.10)$$

$$S_{jt} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T \quad (2.11)$$

A função objetivo (2.6) também é de minimização dos custos de *setup* e estoque de todos os produtos j em todos os períodos t . A equação (2.7) realiza o balanceamento dos estoques entre períodos e a restrição (2.8) garante que a produção de determinado produto j somente acontecerá se, naquele período, a máquina estiver preparada para a produção do item especificado. A restrição (2.9) é aquela que torna o modelo capacitado. Os domínios das variáveis de estoque e quantidades produzidas são definidos nas equações (2.10), enquanto que o domínio da variável de *setup* é definido em (2.11).

Os modelos CLSP são classificados como *large bucket*, isto significa que diversos produtos podem ser produzidos no mesmo período, ao contrário de modelos nos quais somente um produto é produzido e que são classificados como *small bucket* (EPPEN & MARTIN, 1987). Florian *et al.* (1980) e Bitran e Yanasse (1982) demonstraram que a resolução ótima do CLSP é um problema da classe NP-hard.

A abordagem do CLSP permite muitas aplicações nos sistemas industriais, uma vez que já incorpora razoável grau de adequação à realidade, por considerar limites para capacidade de produção no sistema, horizonte de tempo multi-período e multi-produtos. Entretanto, as decisões de programação não estão integradas ao CLSP. Na prática, a maneira mais comum de abordar problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção (*scheduling*) é resolver primeiramente o CLSP e, depois disso, resolver o SP separadamente (DREXL & KIMMS, 1997). Alguns autores propuseram métodos exatos para o CLSP (BARANY *et al.*, 1984; EPPEN & MARTIN, 1987; CHEN & THIZY, 1990; ARMENTANO *et al.*, 1999). Entretanto, muitos outros propuseram métodos heurísticos (CATTRYSSSE & MAES, 1990; DIABY *et al.*, 1992; KIRKA & KÖKTEN, 1994; HINDI, 1996; TOLEDO & ARMENTANO, 2006).

2.7 Modelos integrados de dimensionamento e sequenciamento de lotes

Assim como na literatura são encontradas revisões dedicadas ao LSP, os autores também se preocuparam em publicar revisões específicas para o problema de *scheduling*, por exemplo: Brucker (1995) e Blazewicz *et al.* (1996). A abordagem do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção em uma única formulação é descrita, por exemplo, nos trabalhos de Fleischmann (1990), Dauzère-Péres e Lasserre (1994), Drexl e Haase (1995) e Fleischmann e Meyer (1997).

Os modelos integrados de dimensionamento e sequenciamento de lotes fazem uso de uma família de restrições que permite controlar a ocorrência de *setup*, permitindo a permanência da máquina preparada para a produção de lotes sequenciais, sem que aconteçam novas preparações de máquina entre lotes de mesmo item.

O início de um novo lote de produção implica um custo de acionamento do equipamento, mas este pode permanecer ligado por diversos períodos consecutivos de maneira que não ocorra um novo *setup*. Os custos de acionamento do equipamento (*start-up*) e da manutenção em regime de espera (*warm-up*) por diversos períodos devem ser incluídos na função objetivo por meio de variáveis binárias, associadas aos respectivos custos.

As formulações apresentadas a seguir correspondem aos modelos integrados de dimensionamento e sequenciamento de lotes, de um único estágio (*single-level*) e capacitados. Estas formulações estão apresentadas na revisão de Drexl e Kimms (1997).

2.7.1 Modelo discreto de dimensionamento de lotes

A primeira formulação [equações (2.12) a (2.18)] adereça à produção de lotes discretos (*Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem* – DLSP), no qual somente um item é produzido por período (*small bucket problem*). Esta modelagem assume que a produção acontece com a utilização de toda a capacidade ou não ocorre. Por este motivo, o modelo é conhecido como “tudo ou nada” (*all-or-nothing production*).

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (a_j S_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (2.12)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j(t-1)} + Q_{jt} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, T \quad (2.13)$$

$$p_j Q_{jt} = k_t W_{jt} \quad j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, T \quad (2.14)$$

$$\sum_{j=1}^J W_{jt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (2.15)$$

$$S_{jt} \geq W_{jt} - W_{j(t-1)} \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T \quad (2.16)$$

$$W_{jt} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T \quad (2.17)$$

$$I_{jt}; Q_{jt}; S_{jt} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T \quad (2.18)$$

A função objetivo dos modelos CLSP (2.6) e DLSP (2.12) possui o mesmo propósito: minimização dos custos de *setup* e estocagem dos produtos. As equações (2.13) fazem o balanceamento dos estoques entre os períodos, e as equações (2.14) são responsáveis pela característica de produção “tudo ou nada” do modelo DLSP. As restrições (2.15) garantem que no máximo um tipo de produto será produzido por período. O começo de um novo lote de produção é controlado pelas inequações (2.16). As restrições (2.17) e (2.18) definem os domínios das variáveis de decisão.

A resolução do DLSP pode ser obtida em tempo polinomial, apesar de ser considerado um problema na classe NP-hard (DREXL E KIMMS, 1997). As considerações de complexidade foram discutidas por Salomon *et al.* (1991). Se os tempos de *setup* ou múltiplas máquinas paralelas forem considerados, o DLSP passa a ser enquadrado na classe dos problemas NP-complete. Para revisões sobre DLSP, veja, por exemplo: Fleischmann (1994), Fleischmann e Meyer (1997) e Salomon *et al.* (1997).

2.7.2 Modelo de dimensionamento e seqüenciamento de lotes com *setup* contínuo

A restrição de “tudo ou nada”, característica do DLSP, pode ser relaxada alterando-se a restrição (2.14), permitindo que a produção seja menor do que a capacidade total do período. A nova restrição passa a ser a inequação (2.19). O novo modelo resultante desta alteração é conhecido como modelo de dimensionamento e sequenciamento de lotes com *setup* contínuo – *Continuous Setup Lot Sizing Problem* (CSLP).

$$p_j Q_{jt} \leq k_t W_{jt} \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T \quad (2.19)$$

Em um primeiro olhar, as diferenças entre o DLSP e o CSLP parecem ser muito pequenas; entretanto, o mais importante aspecto diz respeito à ocorrência de *setup*. O DLSP impõe um único *setup* somente quando os lotes forem produzidos em períodos consecutivos sem a parada da máquina. Caso exista um período ocioso entre os períodos de produção, a retomada da fabricação do lote imporá um novo *setup*. Já o CSLP permite que os lotes do mesmo item, quando produzidos sequencialmente entre os períodos, mesmo que haja período ocioso, tenham somente um *setup* inicial (*start-up*) e não diversas preparações

em cada um dos períodos de produção consecutivos, mesmo que haja períodos ociosos. A discussão sobre as diferenças no *setup* do DLSP e CSLP é encontrada na revisão de Drexl e Kimms (1997). Apesar desse avanço no controle do *setup*, os modelos DLSP e CSLP ainda conservam a característica de serem modelos *small bucket*.

O modelo CSLP original mantém a mesma função objetivo dos modelos CLSP e DLSP (minimização dos custos de *setup* e estoque). Em Karimi *et al.* (2003), à função objetivo original do CLSP é acrescido o custo produção dos itens. Realizando-se uma alteração na função objetivo original do CLSP, separando-se os custos de *setup* em dois componentes: *setup* inicial de produção (*start-up*) e custos associados à permanência da máquina acionada, mas sem produção de itens (*warm-up*), obtém-se uma nova função objetivo particularmente importante para a contabilização da ocorrência de *setup*.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (a_j S_{jt} + f_j W_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (2.20)$$

A expressão (2.20) minimiza os custos de preparação das máquinas para início da produção (*start-up*) ($a_j S_{jt}$), e permanência das máquinas preparadas sem necessariamente estar produzindo itens (*warm-up*) ($f_j W_{jt}$), assim como os custos de estocagem dos itens produzidos ($h_j I_{jt}$), em todos os períodos t do horizonte de planejamento.

De acordo com Drexl e Kimms (1997), a comparação do DLSP e CSLP tem atraído pouco interesse de pesquisa. Alguns autores publicaram discussões sobre o assunto: Bitran e Matsuo (1986) e Karmarkar *et al.* (1987). Uma ligeira variação do CSLP é permitir que um segundo item seja produzido no mesmo período (*large bucket*) quando não ocorre a utilização total da capacidade, ou seja, se há capacidade remanescente da produção do primeiro item. Esta variação dá origem aos modelos do problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes proporcional (*Proportional Lot sizing and Scheduling Problem – PLSP*). Semelhante ao CSLP, os períodos sem produção entre dois lotes de um mesmo item não incorrem em *setup* adicional no início da próxima produção no PLSP. Variações do PLSP são encontradas em Drexl e Haase (1995). Um aprofundamento do CSLP que considera custos e tempos de *start-up*, e também a troca de itens, pode ser encontrado em Wolsey (1997). A extensão do PLSP para multi-estágios foi realizada por Kimms (1997).

As restrições do modelo CSLP e a função objetivo (2.20) são particularmente importantes nesta dissertação, uma vez que o conceito de produção com um único *setup* inicial (*setup* contínuo) é o que melhor representa o funcionamento das caldeiras industriais. Muitas vezes é economicamente vantajoso “pagar” um único *setup* no início da produção de vapor (*start-up*), e deixar a caldeira ligada (aquecida e sem produção

de vapor) por diversos períodos de modo que se pague, em cada período, somente o custo de permanecer ligada (*warm-up*) até que um novo lote de vapor seja produzido.

2.7.3 Modelo geral de dimensionamento e seqüenciamento de lotes

O modelo geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção (*General Lot Sizing and Scheduling Problem – GLSP*) pode ser compreendido como uma generalização dos modelos DLSP e PLSP, de modo que a modelagem do GLSP permite contornar a crítica dos modelos *small bucket* por meio da divisão dos períodos do horizonte de planejamento em partes (sub-períodos), em que a produção de “um único” item é permitida e, portanto, é possível produzir mais de um único item em um período se nele houver sub-períodos.

Fleischmann e Meyer (1997) discutiram o modelo GLSP no qual o horizonte de planejamento é composto pelos períodos (macro-períodos) que são sub-divididos em períodos menores (sub-períodos ou micro-períodos), e nesses últimos, somente um item (produto) pode ser produzido por vez. O lote de produção é definido por meio dos sub-períodos n pertencentes aos conjuntos S_n , que, por sua vez, fazem parte do período T .

Na divisão dos períodos em sub-períodos, a variável de decisão que contabiliza a produção passa a ser Q_{jn} , ao invés de Q_{jt} . A soma de todos os lotes Q_{jn} , nos sub-períodos n pertencentes ao período t integram a quantidade do período. Neste contexto, o tamanho do sub-período também é uma variável de decisão.

O número total de sub-períodos é definido pelo conjunto N . Como os sub-períodos variam de 1 até N , o conjunto V_n indica quais sub-períodos pertencem a cada período t . Portanto $N = \sum_{n=1}^N |V_n|$, no qual $|V_n|$ é o número de sub-períodos em cada período t (V_n é definido pelo usuário). A Figura 2.6 apresenta esquematicamente a definição dos períodos e sub-períodos para o exemplo $N = 10$, $N_1 = 4$, $N_2 = 2$, $N_3 = 3$, $N_4 = 1$, $S_1 = \{1,2,3,4\}$, $S_2 = \{5,6\}$, $S_3 = \{7,8,9\}$, e $S_4 = \{10\}$.

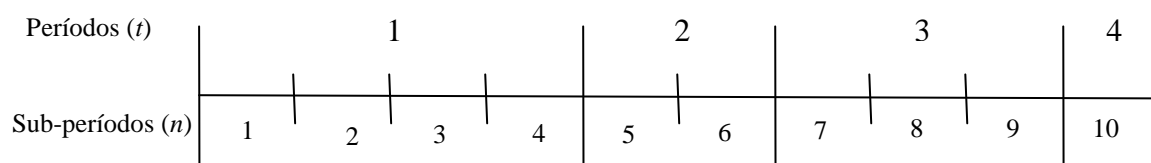


Figura 2.6. Definição de período e sub-período no modelo GLSP

O controle do primeiro e do último sub-período de cada período é feito por equações de contadores, de modo que a primeira posição do período t é denotada por $F_t = 1 + \sum_{\tau=1}^{t-1} N_\tau$, e a última posição por $L_t = F_t + N_t - 1$. O modelo abaixo [equações (2.21) a (2.29)] traz a formulação GLSP apresentada na revisão de Drexel e Kimms (1997).

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N a_j S_{jn} + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} \quad (2.21)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j(t-1)} + \sum_{n=F_t}^{L_t} Q_{jn} - d_{jt} \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T \quad (2.22)$$

$$p_j Q_{jn} \leq k_t W_{jn} \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T ; \\ n = F_t, \dots, L_t \quad (2.23)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{n=F_t}^{L_t} p_j Q_{jn} \leq k_t \quad t = 1, \dots, T \quad (2.24)$$

$$\sum_{j=1}^J W_{jn} \leq 1 \quad n = 1, \dots, N \quad (2.25)$$

$$S_{jn} \geq W_{jn} - W_{j(n-1)} \quad j = 1, \dots, J ; n = 1, \dots, N \quad (2.26)$$

$$W_{jn} \in \{0, 1\} \quad j = 1, \dots, J ; n = 1, \dots, N \quad (2.27)$$

$$I_{jt} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J ; t = 1, \dots, T \quad (2.28)$$

$$Q_{jn}; S_{jn} \geq 0 \quad j = 1, \dots, J ; n = 1, \dots, N \quad (2.29)$$

A função objetivo [equação (2.21)] minimiza os custos de *setup* e estocagem dos produtos. A restrição (2.22) faz o balanceamento de materiais entre períodos. Vale destacar que a produção do período t é a soma da produção em cada sub-período n . A restrição (2.23) garante que se o produto for produzido, a máquina deve estar preparada para tal produto. A capacidade do sistema é incorporada via restrição (2.24). A restrição (2.25) limita a produção a somente um item por sub-período. A posição onde o *setup* deve ocorrer é determinada pela inequação (2.26). As restrições (2.27), (2.28) e (2.29) referem-se aos domínios das variáveis de decisão do modelo.

Uma importante discussão encontrada em Fleischmann e Meyer (1997) diz respeito aos casos nos quais os custos de *setup* não satisfazem a desigualdade triangular, e também às propriedades de complexidade na aplicação do modelo GLSP. A extensão do modelo GLSP para múltiplas máquinas paralelas foi realizada por Meyer (2002).

A aplicação de modelos de planejamento da produção, em particular GLSP, em casos reais no Brasil tem alguns exemplos na literatura. Caixeta-Filho *et al.* (2002) elaboraram um modelo para o planejamento agregado da produção de flores de lírios

levando em conta a sazonalidade da demanda. Araújo *et al.* (2004, 2008) modelaram a produção de ligas metálicas em fornos metalúrgicos considerando o custo e o tempo de *setup* dependente da sequência. Luche e Morabito (2005) e Luche *et al.* (2009) propuseram formulações que integram modelos de seleção de processo e modelos de dimensionamento de lotes para a indústria de grãos eletrofundidos.

Em Toso e Morabito (2005) e Toso *et al.* (2009) pode ser encontrado um caso de combinação do modelo GLSP com o modelo de dimensionamento de lotes capacitado com tempos de *setup* não dependentes da sequência, apresentado em Hax e Candea (1984). O trabalho foi aplicado em uma indústria de ração no interior do estado de São Paulo. A modelagem consiste em utilizar as restrições do GLSP [equações (2.22) a (2.29)] com uma função objetivo que minimiza o custo de produção, o custo de estocagem, e os custos da força de trabalho e horas-extras utilizadas na produção. O problema da desigualdade triangular, discutido em Fleischmann e Meyer (1997), aparece na situação real do estudo de caso em Toso e Morabito (2005) e Toso *et al.* (2009).

Ferreira *et al.* (2009, 2010) desenvolveram formulações utilizando o modelo GLSP para problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes em fábricas de bebida. As formulações contemplaram múltiplos estágios de produção e custos e tempos de *setup* de múltiplas máquinas.

A modelagem matemática do sistema de produção de vapor em múltiplas caldeiras industriais teve como ponto de partida os modelos de dimensionamento de lotes capacitados que integram decisões de *scheduling*. Contudo, o modelo elaborado não se encaixa completamente em uma classe dos modelos clássicos da literatura, como por exemplo: ULSP, CLSP, DLSP, CSLP, PLSP e GLSP. Pode-se afirmar que o modelo desenvolvido possui semelhanças com os modelos da literatura no que diz respeito à construção de algumas restrições e componentes da função objetivo. Mais informações da modelagem do problema das caldeiras são apresentadas no Capítulo 3.

2.8 Pesquisa operacional aplicada em problemas envolvendo caldeiras industriais

A aplicação de ferramentas da pesquisa operacional e de áreas correlatas (engenharias de sistemas, matemática aplicada, computação, por exemplo) em assuntos envolvendo caldeiras industriais é bastante recente, e tem contribuído na melhoria dessas 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. O trabalho aborda o controle de algumas variáveis da alimentação de caldeiras, tais como: fluxo de ar comburente, fluxo de gases da combustão e fluxo da água para os tambores de aquecimento.

Outros trabalhos na mesma linha de Saha *et al.* (1998), e bem mais recentes, são encontrados em Romeo e Gareta (2006) e Rusinowski e Stanek (2007). Nesses trabalhos, os autores também usaram a abordagem de redes neurais para prever o comportamento de diversas variáveis em caldeiras industriais, inclusive o comportamento de acúmulo de resíduos e escórias nos equipamentos. Bastante próximo desses trabalhos, nos quais a abordagem utilizada foi baseada em redes neurais, estão aqueles em que os autores utilizaram o conceito de lógica *fuzzy* para tratar das mesmas questões de pesquisa. Prokhorenkov e Sovlukov (2002) e Santoso *et al.* (2005) desenvolveram modelos baseados em lógica *fuzzy* para o controle das principais variáveis de regulação instantânea (injeção de ar, combustível, emissão de gases etc.) em caldeiras industriais. Apesar do trabalho de Prokhorenkov e Sovlukov (2002) mencionar que a característica do vapor produzido em caldeiras depende da mistura dos combustíveis queimados, a pesquisa não contemplou esta questão em particular.

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 e a produção de energia elétrica. O trabalho consistiu em otimizar a produção de energia elétrica em caldeiras mais antigas por meio do aumento, até determinados níveis, no consumo de combustíveis. Barroso *et al.* (2003), com base nas recomendações dos manuais ASME e GOST¹¹ para operações em caldeiras industriais, propuseram um método analítico para investigar a eficiência energética da queima do bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras em usinas de cana em Cuba. O trabalho não aplica métodos específicos de otimização; entretanto, as análises forneceram informações sobre como aumentar a eficiência das caldeiras que queimam bagaço de cana.

A modelagem matemática de otimização utilizando-se de técnicas de programação linear e não-linear é uma abordagem relativamente 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 Linear Programming* – MILP ou somente MIP), e outro não-linear (*Non Linear Programming* – NLP) para auxiliar

¹¹ ASME CODE and STANDARDS PTC 4.1. Performance test code steam generating units, USA, 1972.

na decisão de planejamento da distribuição de gás combustível em setores da comunidade: comercial, doméstico, industrial e público, nos Estados Unidos. A função objetivo dos modelos minimiza os custos do suprimento de gás e os custos associados às restrições de mercado.

Nagel (2000) construiu um modelo MIP no qual se considerou a estrutura completa de geração, fornecimento e consumo energético em uma comunidade alemã. O modelo levou em conta informações de mercado e particularidades da comunidade em estudo. A função objetivo minimiza os custos de geração de energia elétrica e térmica, os custos ambientais com a utilização de biomassas, os investimentos em infraestrutura de geração de energia entre outros.

Gustafsson (2000) desenvolveu um modelo MIP para a otimização da estratégia de suprimento energético em prédios na Suécia. O modelo determina como deve ser o funcionamento de caldeiras a óleo em conjunto com bombas de aquecimento a eletricidade de maneira a obter a maior economia no atendimento da demanda energética. O trabalho também faz uma análise de sensibilidade para as soluções sub-ótimas do problema.

Bojić e Dragičević (2002) usaram um modelo MIP para selecionar as fontes de energia para uma fábrica considerando a produção própria e a compra no mercado. O modelo oferece como resultado o *mix* energético da indústria em diferentes momentos utilizando caldeiras, turbinas de condensador e bombas de aquecimento. No artigo é encontrada uma revisão com doze trabalhos que aplicaram MIP em problemas de energia em diversos segmentos industriais e também não-industriais.

Chinese e Meneguetti (2005), diante de um problema de planejamento dos recursos energéticos em um distrito industrial no nordeste da Itália, desenvolveram um modelo MIP para a maximização dos benefícios da produção industrial, enquanto outro modelo linear (LP) realizava a minimização no balanço das emissões de gases de efeito estufa considerando a substituição dos combustíveis fósseis. No artigo, os autores mencionam que uma extensiva revisão sobre a utilização de modelos de otimização aplicados em planejamento energético pode ser encontrada nos trabalhos de Henning (1999)¹² e da Agência Internacional de Energia (IEA, 2000)¹³. Trabalho na mesma linha de Chinese e Meneguetti (2005) foi o de Li *et al.* (2006).

¹² Henning D. Optimization of local and national energy systems: development and use of the MODEST model. Linköping Studies in Science and Technology Dissertations. N° 559, Linköping; 1999.

Bojić e Dragičević (2006) desenvolveram um modelo de programação linear (LP) para otimizar a eficiência na operação de caldeiras industriais considerando todo o ciclo de vida do equipamento. O objetivo da otimização foi atingir o menor custo total para a produção de vapor e oferecer, como resultado, o tamanho ideal das caldeiras, assim como de suas partes constituintes, levando-se em conta diferentes tipos de combustíveis.

A preocupação com a eficiência térmica em caldeiras industriais motivou Bujak (2008 e 2009) a desenvolver modelagens para otimizar as perdas de energia que acontecem de acordo com a maneira de funcionamento dos equipamentos. No primeiro trabalho as equações da modelagem foram resolvidas analiticamente, e no segundo, o método Simplex foi aplicado na resolução do modelo linear proposto.

O momento de partida (*start-up*) no funcionamento de caldeiras industriais é um dos mais importantes, custosos e demorados em toda a operação, como discutido na Seção 2.4. O trabalho de Krüger *et al.* (2004) modela o *start-up* usando equações não-lineares e as resolve por meio de programação quadrática sequencial (*Sequential Quadratic Programming* – SQP). Os autores descrevem ganhos consideráveis com o emprego do modelo. O modelo desta dissertação também considerou o momento de *start-up* das caldeiras e o assunto é discutido em detalhes no Capítulo 3.

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. Daho *et al.* (2009) estudaram as características da mistura de óleo doméstico com óleo refinado de algodão, em diferentes proporções, na combustão de caldeiras domésticas não modificadas; este trabalho não aplicou métodos de otimização, restringindo-se a quantificações das variáveis da combustão, particularmente emissão de gases.

Como citado na Seção 2.3, o trabalho de Dunn e Du (2009) é aquele em que a problemática de pesquisa mais se aproxima desta dissertação; entretanto, existem diferenças acentuadas nas abordagens e nos resultados finais entre os dois trabalhos. Dunn e Du (2009) propuseram um algoritmo constituído basicamente de duas famílias de restrições e uma função objetivo, a qual minimizava o custo de produção de vapor de acordo com a taxa de alimentação das caldeiras para diferentes combustíveis. O modelo

¹³ IEA. Energy Conservation in Building and Community Systems Program. Annex 33, Advanced Local Energy Planning (ALEP) – a Guidebook; October 2000.

não fornece a mistura dos combustíveis nas caldeiras para se obter o *mix* economicamente ótimo. Os resultados indicam as taxas de alimentação de um único combustível para uma determinada caldeira otimizando o nível de carregamento do sistema, aproveitando-se do rendimento tecnológico do equipamento. O algoritmo não otimiza o consumo de um conjunto de combustíveis disponíveis e consumidos simultaneamente. O procedimento de uma caldeira é estendido para múltiplas caldeiras funcionando conjuntamente.

Na Tabela 2.1 é reproduzida parte dos resultados de um dos experimentos em Dunn e Du (2009). Observa-se que o objetivo final é alocar o carregamento das cinco caldeiras utilizando um combustível por vez, de maneira a atender à demanda de vapor e gerar o menor custo deste vapor através do aproveitamento da eficiência tecnológica das caldeiras, e não por meio do *mix* dos combustíveis.

Tabela 2.1. Resultados parciais do trabalho de Dunn e Du (2009)

Caldeiras	Operação original		Operação otimizada		Diferença relativa	
	Carreg.* (t/h)	Custo (\$/h)	Carreg. (t/h)	Custo (\$/h)	Carreg.	Custo
PW-B101	108	1.762,1	123,64	1.768,1	14,5%	0,34%
PW-B102	110	1.696,5	119,67	1.717,2	8,8%	1,22%
PW-B103	117	2.099,2	137,46	2.100,2	17,5%	0,05%
PW-B104	125	2.010,3	102,77	1.894,3	-17,8%	-5,77%
PW-B105	127	2.179,6	103,45	2.098,4	-18,5%	-3,73%
Total	587	9.747,8	587,00	9.578,2	0,0%	-1,74%

* Carreg. = carregamento, ou taxa de consumo de combustível na caldeira.

Fonte: adaptada de Dunn e Du (2009)

Um dos apelos do trabalho de Dunn e Du (2009) é a facilidade de implementação do algoritmo em linguagens de programação, tais como: Fortran[®], C, C++, e Matlab[®], por exemplo. Segundo os autores, os ganhos no custo total da operação chegaram a até 3% com a aplicação do modelo.

3 MODELAGEM DO PROBLEMA

3.1 O modelo matemático proposto

Neste capítulo é apresentado o modelo de otimização proposto para representar as principais decisões na gestão de um sistema de produção de vapor em múltiplas caldeiras industriais. Como mencionado anteriormente, a modelagem matemática do sistema de produção de vapor teve como ponto de partida os modelos clássicos de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção. No entanto, cabe ressaltar que existem algumas diferenças entre os modelos da literatura e o modelo proposto.

Os modelos clássicos de dimensionamento de lotes utilizam os recursos renováveis (capacidades das máquinas) para produzir lotes de produtos que podem ser estocados entre os períodos no horizonte de planejamento. No modelo proposto, não há possibilidade de estocar o produto final (vapor), e as equações de balanço de materiais passam a gerenciar os insumos da produção (combustíveis), e não os produtos finais, como nos modelos clássicos.

Dentre os modelos da literatura, o GLSP contorna a limitação dos modelos *small buckets* por meio da divisão dos macro-períodos em sub-períodos, de maneira que diferentes itens possam ser produzidos em um macro-período. A demanda do GLSP é conhecida nos períodos, que são fixos, enquanto que o modelo determina o tamanho dos sub-períodos, que são variáveis de decisão determinados pelo tamanho dos lotes produzidos.

No modelo para as caldeiras industriais, a demanda do único item (vapor) é conhecida em cada sub-período, e as decisões são tomadas tanto no sub-período quanto no macro-período, fazendo com que uma modelagem semelhante ao GLSP seja empregada de modo conveniente para relacionar os macro e sub-períodos do problema. Apesar disso, no modelo proposto, o tamanho dos macro-períodos e sub-períodos é fixo, e fixado *à priori*, não constituindo uma decisão do modelo.

A função objetivo elaborada para o modelo das caldeiras difere-se das descritas nos modelos clássicos, uma vez que o custo de estocagem da primeira refere-se aos insumos da produção (combustíveis), enquanto que, na segunda, refere-se aos itens produzidos. O custo de *setup* das máquinas (caldeiras) é separado em *setup* inicial (*start-up*) e *setup* contínuo (*warm-up*) dos equipamentos, diferentemente dos modelos clássicos, em que os custos de *setup* não são separados. Também é incluído o custo de aquisição dos

insumos de produção na função objetivo, parcela semelhante ao custo de produção considerada na função objetivo do modelo CLSP em Karimi *et al.* (2003).

Durante a modelagem do problema, as discussões com os potenciais usuários do modelo indicaram que a principal vantagem estaria no apoio de decisões táticas e operacionais (médio e curto prazos), por exemplo: no horizonte de planejamento de um mês, considerando as decisões da gestão dos combustíveis na semana e a operações de ligar e desligar as caldeiras em cada dia. A aplicação do modelo no horizonte de 50 períodos (semanas), do estudo de caso no Capítulo 4, teve como propósito uma análise mais abrangente dos resultados em diversas situações de produção de vapor.

Neste momento, apresenta-se a notação adotada para escrever as expressões matemáticas. Em seguida, na forma de figura, ilustra-se o relacionamento das variáveis em cada etapa do sistema em estudo (Figura 3.1). Posteriormente, apresenta-se a formulação do problema com explicações para cada expressão do modelo.

Índices do modelo:

- i : identifica o fornecedor do combustível ($i = 1, 2, 3, \dots, I$)
- j : indica a caldeira no sistema ($j = 1, 2, 3, \dots, J$);
- k : identifica o tipo de combustível ($k = 1, 2, 3, \dots, K$);
- t : informa o macro-período (ou somente período) do horizonte de planejamento (p.ex.: semanas) ($t = 1, 2, 3, \dots, T$);
- n : informa o sub-período do macro-período (p.ex.: dias) ($n = 1, 2, 3, \dots, N$).

No horizonte de planejamento, o relacionamento do período com o sub-período é definido *à priori* no modelo. Os tamanhos de cada período e sub-período são fixos e a quantidade de sub-períodos está compreendida dentro de limites definidos pela primeira posição do sub-período, $l(t)$, e a última posição do sub-período, $u(t)$. Por exemplo: para $t = 2$, podemos ter: $l(2) = 8$, e $u(2) = 14$, portanto os sub-períodos $n = 8, 9, 10, 11, 12, 13$ e 14 compõem exclusivamente o período $t = 2$. Conforme mencionado anteriormente, o relacionamento dos macro-períodos e sub-períodos do modelo proposto é semelhante ao relacionamento no GLSP, contudo no primeiro, é fixado o tamanho dos sub-períodos, enquanto no segundo, essa é uma decisão do modelo.

Parâmetros do modelo:

- p_{ikt} : preço no fornecedor i do combustível k no período t ;
- h_k : custo unitário 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 da caldeira j para adequado *start-up*;
- a_{jk} : parâmetro que indica se a caldeira j pode receber o combustível k ;
- e_{jn} : parâmetro que indica se a caldeira j está disponível para operação, em função do plano de manutenção, no sub-período n ;
- o_{ikt} : oferta do combustível k no fornecedor i no período t ;
- ri_k : lote mínimo de carregamento do combustível k nos fornecedores;
- rm_{ik} : lote máximo de carregamento do combustível k no fornecedor i ;
- ra_k : quantidade máxima do combustível k que a fábrica pode receber em cada sub-período (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 sub-período n (este parâmetro considera a eficiência de cada caldeira j);
- vh_{kt} : fator de conversão de quantidade de combustível k em quantidade de vapor no período t (este parâmetro é utilizado no cálculo do estoque de segurança);
- d_n : demanda de vapor da fábrica no sub-período n ;
- bc_j : capacidade total de produção de vapor da caldeira j no sub-período;
- lc_j : perda de capacidade de produção de vapor na caldeira j devido ao *start-up*;
- β : coeficiente relacionado ao nível de estoque de segurança dos combustíveis.

Variáveis de decisão do modelo:

- T_{ikn} : quantidade do combustível k adquirida no fornecedor i e transportada para a fábrica no sub-período n ;
- I_{kt} : quantidade em estoque na fábrica do combustível k no período t ;
- Q_{jkn} : quantidade do combustível k consumido na caldeira j no sub-período 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 sub-período 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 sub-período n , uma vez que no sub-período anterior a caldeira estava desligada. Caso $S_{jn} = 0$, a caldeira não faz *start-up* no sub-período 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 *start-up*.

Alguns parâmetros são calculados após o processamento do modelo e indicam resultados de interpretação bastante prática para os envolvidos na operação.

Parâmetros pós-solução do modelo:

- VP_{jn} : parâmetro que contabiliza a produção de vapor da caldeira j no sub-período n ;
- Q_{jkt} : parâmetro que indica a quantidade de combustível k queimado na caldeira j no período t ;
- T_{ikt} : quantidade do combustível k transportado do fornecedor i no período t ;
- VM_k : parâmetro que indica o valor monetário gasto com a aquisição do combustível k em todo horizonte de planejamento.

A Figura 3.1 apresenta um desenho esquemático da modelagem do sistema de produção de vapor e a localização das variáveis de decisão e dos parâmetros calculados pós-solução do problema. Os parâmetros calculados pós-solução estão identificados com um asterisco.

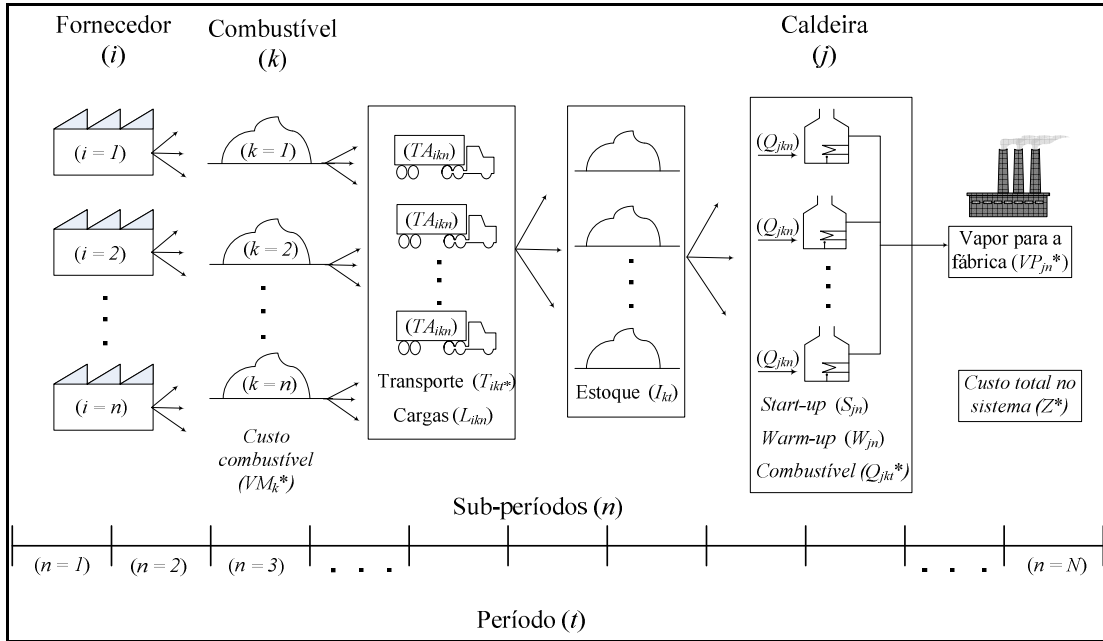


Figura 3.1. Ilustração esquemática da modelagem do sistema de produção de vapor com suas etapas e variáveis

Equações do modelo:

A equação (3.1) representa a função objetivo do modelo proposto. Esta função minimiza a somatória das quatro parcelas que são os principais custos envolvidos no sistema de produção de vapor.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \left(p_{ikt} \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \right) + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T h_k I_{kt} + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N cs_j S_{jn} + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N cw_j W_{jn} \quad (3.1)$$

A primeira parcela da função objetivo $\left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \left(p_{ikt} \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \right) \right)$ diz respeito ao custo total de aquisição dos combustíveis, que são queimados nas caldeiras e reabastecem o estoque na fábrica. Isto para todos os fornecedores i , para todos os combustíveis k e em todos os períodos de tempo t . A somatória em todos esses índices da variável de decisão T_{ikn} multiplicada pelo parâmetro p_{ikt} fornece o montante financeiro gasto com a aquisição dos combustíveis.

A segunda parcela da função objetivo $\left(\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T h_k I_{kt} \right)$ versa sobre o custo de estocagem dos combustíveis na fábrica. A variável I_{kt} determina o tamanho do estoque de cada combustível k em cada período t , e a sua multiplicação pelo custo de estocagem do combustível k (h_k) contabiliza o custo total para esta parcela em todos os períodos do horizonte de planejamento para todos os combustíveis estocados.

A terceira parcela da função objetivo $\left(\sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N cs_j S_{jn} \right)$ contabiliza o custo de acionamento (*start-up*) de todas as caldeiras j no sistema em todos os sub-períodos n do horizonte de planejamento. A variável de decisão S_{jn} assume o valor 1 quando ocorre a partida da caldeira j no sub-período n , uma vez que no sub-período anterior ($n-1$) a caldeira não estava ligada. Caso contrário, a variável assume o valor 0, seja porque a caldeira já está acionada ou mesmo por permanecer desligada. A somatória em todos os sub-períodos n e para todas as caldeiras j da multiplicação da variável S_{jn} pelo custo de *start-up* de cada caldeira j (cs_j) contabiliza o valor financeiro de todos os acionamentos das caldeiras no horizonte de planejamento.

Uma vez que a caldeira é acionada, o equipamento pode permanecer ligado por diversos sub-períodos somente em aquecimento e com a mínima produção de vapor. Nessa condição, não ocorre o custo de *start-up* em sub-períodos consecutivos; entretanto, o custo de aquecimento mínimo (*warm-up*) é incorrido em todos os dias de funcionamento da caldeira e, contabilizado na quarta parcela da função objetivo $\left(\sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^T cw_j W_{jn} \right)$ por meio da multiplicação do parâmetro custo de *warm-up* (cw_j) e da variável de decisão de quando ocorre o aquecimento (W_{jn}) de cada caldeira j .

A primeira restrição apresentada [equação (3.2)] faz o balanceamento dos estoques dos combustíveis na fábrica. O estoque do combustível k no período atual (I_{kt}) é igual ao estoque do mesmo combustível k no período anterior ($I_{k(t-1)}$), subtraído do total consumido do combustível k em todas as caldeiras j e em todos os sub-períodos n de determinado período t $\left(\sum_{j=1}^J \sum_{n=l(t)}^{u(t)} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \right)$, adicionado à quantidade transportada de todas

as origens fornecedoras do combustível k no determinado período t $\left(\sum_{i=1}^I \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \right)$. No

modelo, a quantidade do estoque inicial (I_{k0}) é definida como zero, porém, este parâmetro pode ser alterado de acordo com informações do sistema. Convém mencionar que a variável Q_{jkn} está multiplicada pelos parâmetros e_{jn} e a_{jk} . O primeiro parâmetro informa se a caldeira j está disponível para operação no sub-período n , em decorrência do plano de manutenção, e o segundo parâmetro informa se a caldeira j pode receber o combustível k .

$$I_{kt} = I_{k(t-1)} - \sum_{j=1}^J \sum_{n=l(t)}^{u(t)} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} + \sum_{i=1}^I \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \quad \text{para } \forall k, t \quad (3.2)$$

Ainda na restrição (3.2), a análise da possível incoerência na queima dos combustíveis no sub-período n , pela variável Q_{jkn} , ocorrer antes do abastecimento dos combustíveis no sub-período n por meio da variável T_{ikn} foi realizada em todos os experimentos computacionais. Tal incoerência não foi observada. Uma restrição havia sido elaborada para contornar tal situação de incoerência, caso fosse observada:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{n=l(t)}^n Q_{jkn} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{n=l(t)}^n T_{ikn} + I_{k(t-1)} \quad \forall k, t, n .$$

No entanto, a restrição não foi utilizada em função de aumentar consideravelmente o número de restrições do modelo.

Os estoques na fábrica para cada combustível k não devem exceder os limites do espaço físico disponível para armazenamento. Tal situação está modelada na restrição (3.3).

$$I_{kt} \leq ce_k \quad \text{para } \forall k, t \quad (3.3)$$

O principal motivo da fábrica manter estoques de combustíveis é para reduzir o risco da falta imediata de suprimento para as caldeiras. Um critério adotado para o cálculo do estoque de segurança é assegurar que toda a quantidade de combustível, em estoque, se convertida em vapor, deve ser suficiente para atender a uma parcela da demanda de vapor da fábrica de um período t , definida pelo usuário do sistema. A equação (3.4) expressa tal condição, e o parâmetro β exprime a fração da demanda de vapor do período t que deverá ser atendida. O parâmetro β normalmente assume o valor 0,4285, resultado da fração $3/7$ (três dias de segurança em sete dias da semana); ou seja, é necessário que o estoque de segurança atenda a esta fração da somatória da quantidade de vapor demandada no período t . Na equação (3.4) é apresentado o parâmetro vh_{kt} responsável pela conversão da quantidade de combustível em quantidade de vapor. Os parâmetros de conversão de quantidade de combustível em quantidade de vapor (vi_{jkn} e vh_{kt}) possuem particularidades em seus cálculos, os quais são explicados detalhadamente na Seção 3.2.1.

$$\sum_{k=1}^K vh_{kt} I_{kt} \geq \beta \cdot \sum_{n=l(t)}^{u(t)} d_n \quad \text{para } \forall t \quad (3.4)$$

Ainda na restrição (3.4), pensou-se na alternativa de substituir o parâmetro β por um cálculo que indicasse a necessidade do estoque de combustíveis para atender à demanda de vapor dos próximos três ou quatro dias consecutivos. No entanto, essa alternativa provocou um comportamento bastante oscilatório na curva de estoque, devido às grandes diferenças na demanda de vapor entre os dias, particularmente entre os finais de semana para as segundas-feiras. O uso da alternativa da substituição do parâmetro β

provocou o distanciamento dos resultados do modelo em relação à curva do comportamento real dos estoques, e assim a alternativa foi abandonada.

A restrição (3.5) versa sobre o balanço da oferta total de cada combustível k entre os períodos t em todo horizonte de planejamento. A empresa possui contratos anuais com os fornecedores de combustíveis definindo o montante total anual e quantidades mensais aproximadas que poderão ser retiradas. Por exemplo, uma usina fornecedora de bagaço de cana fecha um contrato de venda de 100.000 toneladas anuais, as quais podem ser retiradas, no máximo, 10.000 toneladas mensais. Dessa maneira, o parâmetro o_{ikt} é uma estimativa mensal para cada origem i de quanto combustível k , fechado em contrato, pode ser retirado em cada período t . A variável M_{ikt} faz o balanceamento da quantidade de combustível entre períodos, carregando o combustível que sobrou do período anterior e o disponibilizando no período subsequente. O parâmetro inicial M_{ik0} assume valor igual a zero no modelo.

$$M_{ikt} = o_{ikt} + M_{ik(t-1)} - \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \quad \text{para } \forall i, k, t \quad (3.5)$$

Existe a possibilidade de reescrever a restrição (3.5) de modo a eliminar a variável M_{ikt} ; no entanto, essa nova forma é mais complicada em sua expressão algébrica e também na implementação computacional. Preferiu-se a expressão apresentada em (3.5) pela simplicidade no entendimento da função da equação.

O transporte de combustível dos fornecedores necessita de uma restrição que imponha o limite mínimo do tamanho do carregamento de cada combustível k , para evitar o transporte de pequenas cargas, como, por exemplo, um carregamento de uma tonelada. Isto é o que acontece no modelo com a ausência da restrição (3.6). O parâmetro ri_k estabelece o tamanho mínimo da carga para cada combustível k , e a variável binária L_{ikn} ativa tal restrição, indicando quando há uma carga do combustível k do fornecedor i no sub-período n . O tamanho mínimo da carga, normalmente, é de trinta toneladas para as biomassas, ou seja, a carga de pelo menos de um caminhão articulado de cinco eixos, e de vinte e sete toneladas para o transporte de óleo BPF, ou seja, de pelo menos um caminhão articulado tipo tanque de cinco eixos.

A imposição de uma quantidade exata para o carregamento, transformando a variável L_{ikn} em uma variável inteira para indicar o número de carregamentos fechados identificado pela quantidade ri_k , fez com que o modelo ficasse intratável do ponto de vista computacional. Mesmo após 24 horas de processamento, não houve sinalização do encontro de uma solução viável para o problema com 350 sub-períodos. Em outro experimento, com 7 períodos, perfazendo 49 sub-períodos, a solução ótima foi encontrada

após aproximadamente 8 horas de processamento em computador Pentium I7. Neste simples experimento foram necessários praticamente 6 G de memória para armazenamento da árvore de decisão do algoritmo *branch and cut*.

$$T_{ikn} \geq r_i L_{ikn} \quad \text{para } \forall i, k, n \quad (3.6)$$

Nos fornecedores, também existe um limite máximo para envio do combustível para a fábrica em cada sub-período. Por exemplo: a consulta às usinas de cana fornecedoras de bagaço mostrou que a capacidade máxima de carregamento é de aproximadamente 900 toneladas diárias, ou seja, aproximadamente 30 caminhões articulados (caminhão tipo carreta), com carga de 30 toneladas cada um. A restrição (3.7) estabelece a quantidade máxima do carregamento de cada combustível k nos sub-períodos proveniente de cada fornecedor i .

$$T_{ikn} \leq r_{m_{ik}} L_{ikn} \quad \text{para } \forall i, k, n \quad (3.7)$$

Da mesma forma que a restrição (3.6) estabelece o tamanho mínimo do carregamento de cada combustível e a restrição (3.7) o seu tamanho máximo em todos os sub-períodos, a fábrica possui um limite máximo para a recepção das cargas de cada combustível k proveniente da soma de todos os fornecedores em um sub-período n . A restrição (3.8) é responsável por modelar esse limite máximo na capacidade de recepção dos combustíveis na fábrica, que é determinado pelo parâmetro (ra_k). No estudo de caso apresentado no Capítulo 4, a fábrica consegue receber até 1.200 toneladas de bagaço de cana por sub-período (dia), mas consegue receber somente 300 toneladas de cavaco de madeira ou lenha, e 60 toneladas de óleo BPF em cada sub-período.

$$\sum_{i=1}^I T_{ikn} \leq ra_k \quad \text{para } \forall k, n \quad (3.8)$$

A equação (3.9) é responsável pelo atendimento da demanda de vapor em todos os sub-períodos n do horizonte de planejamento. Para cada sub-período n , a soma do vapor gerado pelo funcionamento de todas as caldeiras j com a queima de todos os combustíveis k deve ser maior ou igual à demanda de vapor no sub-período n . O parâmetro vi_{jkn} faz a conversão de quantidade de combustível em quantidade de vapor para cada um dos tipos de combustíveis em cada uma das caldeiras, e o parâmetro a_{jk} indica se a caldeira j pode queimar o combustível k . O parâmetro e_{jn} indica se a caldeira j está disponível ou não para operação no sub-período n , isto devido aos dias de parada dos equipamentos para manutenção programada.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K v_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \geq d_n \quad \text{para } \forall n \quad (3.9)$$

As caldeiras industriais são equipamentos de grande capacidade que não funcionam adequadamente com pequenas produções de vapor. Existe normalmente uma parcela mínima da capacidade máxima que deve ser utilizada para a adequada operação. A equação (3.10) representa a restrição de produção mínima de vapor uma vez que a caldeira é acionada. Nela é apresentado o parâmetro m_j , responsável por indicar a percentagem mínima da capacidade para funcionamento adequado de cada caldeira j . A produção mínima ocorrerá somente se a caldeira j estiver aquecida, ou seja, se a variável $W_{jn} = 1$; caso contrário, a caldeira terá que realizar o *start-up* juntamente com o *warm-up*.

$$\sum_{k=1}^K v_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \geq bc_j m_j e_{jn} W_{jn} \quad \text{para } \forall j, n \quad (3.10)$$

Em cada sub-período n , as caldeiras possuem um limite máximo na capacidade de produção de vapor que foi modelado na equação (3.11). No lado direito da inequação (3.11), a capacidade da caldeira está atrelada ao período de acionamento. Se a caldeira j não estiver disponível para operação no sub-período n , ou seja, o parâmetro $e_{jn} = 0$, toda a parte direita da inequação é nula e não existe produção de vapor na caldeira especificada no sub-período especificado. Caso contrário, podem existir duas combinações de capacidade para as caldeiras de acordo com seu estado derivado do sub-período anterior.

Na caldeira que está desligada no sub-período anterior ($W_{j(n-1)} = 0$), e cujo acionamento é feito no sub-período subsequente ($W_{jn} = 1$), as variáveis de *start-up* (S_{jn}) e *warm-up* (W_{jn}) assumirão valor igual a 1, e a capacidade total da caldeira j no período n é dada pela diferença entre as parcelas ($bc_j W_{jn}$) e ($lc_j S_{jn}$). A primeira parcela (bc_j) fornece a capacidade total da caldeira j e a segunda parcela (lc_j) desconta, em capacidade de produção de vapor, o tempo decorrente do *start-up* da caldeira j . Caso a caldeira venha aquecida de um sub-período anterior ($W_{j(n-1)} = 1$) e permaneça aquecida no sub-período n ($W_{jn} = 1$), não será necessária uma nova partida do equipamento no sub-período n ($S_{jn} = 0$), e nesse caso, a capacidade total da caldeira j é dada somente pela parcela ($bc_j W_{jn}$).

$$\sum_{k=1}^K v_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \leq (bc_j W_{jn} - lc_j S_{jn}) e_{jn} \quad \text{para } \forall j, n \quad (3.11)$$

A restrição (3.12) diz respeito ao controle do *start-up* e *warm-up* das caldeiras. Uma vez respeitada a multiplicação da variável de *warm-up* pelo parâmetro que indica se a caldeira está disponível ou não para a produção de vapor no sub-período (e_{jn}), a variável de *start-up* assume sempre valor igual ou maior que a diferença entre as variáveis

de *warm-up* do sub-período atual e do sub-período anterior. Ou seja, a variável de *start-up* somente assumirá valor um ($S_{jn} = 1$), quando a variável de *warm-up* do período anterior assumir valor zero ($W_{j(n-1)} = 0$), e a variável de *warm-up* do período atual assumir valor um ($W_{jn} = 1$); caso contrário, a variável de *start-up* permanece com o valor zero ($S_{jn} = 0$), para as outras combinações entre a variável de *warm-up* de sub-períodos consecutivos. Na implementação do modelo, os parâmetros iniciais W_{j0} e e_{j0} , para o primeiro período ($t = 1$), assumiram valor igual a zero no modelo.

$$S_{jn} \geq W_{jn}e_{jn} - W_{j(n-1)}e_{j(n-1)} \quad \text{para } \forall j,n \quad (3.12)$$

A Tabela 3.1 ilustra as possíveis combinações de valores que podem ocorrer na restrição (3.12).

Tabela 3.1. Combinações possíveis para as variáveis da restrição de *setup* das caldeiras

S_{jn}	\geq	W_{jn}	$- W_{j(n-1)}$	Ocorre <i>start-up</i> ?
0		0	- 0	Não
0		1	- 1	Não
0		0	- 1	Não
1		1	- 0	Sim

Em (3.13) estão apresentadas as restrições dos domínios das variáveis do modelo. As variáveis de *start-up* (S_{jn}), *warm-up* (W_{jn}) e carregamento (L_{ikn}) são binárias, e as demais assumem valores reais positivos.

$$S_{jn}, W_{jn}, L_{ikn} \in \{0,1\}; \quad Q_{jkn} \geq 0; \quad M_{ikt} \geq 0; \quad T_{ikn} \geq 0; \quad I_{kt} \geq 0. \quad (3.13)$$

A restrição (3.14), apresentada a seguir, apesar de ser redundante com a restrição (3.12), foi testada com o propósito de fortalecer a relação entre as variáveis de *start-up* e *warm-up*. Em todos os experimentos computacionais realizados, a solução final do problema foi a mesma. Na resolução do modelo usando o *solver* CPLEX 11, a inclusão da restrição (3.14) fez aumentar ligeiramente o tempo de processamento computacional e o número de iterações necessárias para atingir a solução ótima. Assim, na aplicação do modelo no estudo de caso do Capítulo 4, a restrição (3.14) não foi incluída.

$$S_{jn} \leq W_{jn} \quad \text{para } \forall j,n \quad (3.14)$$

As equações de (3.1) a (3.13) pertencem ao modelo proposto para representar coerentemente o funcionamento de um sistema de produção de vapor em caldeiras industriais. As três equações seguintes [(3.15) a (3.18)] fazem cálculos de parâmetros de interesse após a solução do modelo, com respostas de interpretação prática importantes para os operadores e outros responsáveis pelo sistema de produção de vapor.

O parâmetro VP_{jn} da equação (3.15) contabiliza a produção de vapor da caldeira j no sub-período n , em que Q_{jkn}^* denota o valor ótimo da variável Q_{jkn} . Desta forma é possível saber qual caldeira funcionou e o quanto de vapor ela produziu em cada sub-período.

$$VP_{jn} = \sum_{k=1}^K v_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn}^* \quad \text{para } \forall j,n \quad (3.15)$$

O parâmetro Q_{jkt} da equação (3.16) agrega os sub-períodos n de cada período t para informar quanto de cada tipo de combustível k foi consumido em cada caldeira j durante todo um período (semana).

$$Q_{jkt} = \sum_{n=l(t)}^{u(t)} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn}^* \quad \text{para } \forall j,k,t \quad (3.16)$$

O parâmetro T_{ikt} agrega o transporte dos sub-períodos em períodos para cada fornecedor i e combustível k (T_{ikn}^* denota o valor ótimo da variável T_{ikn}). Com o cálculo deste parâmetro, os operadores obtêm uma idéia do total retirado do combustível k no fornecedor i em cada semana [equação (3.17)].

$$T_{ikt} = \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn}^* \quad \text{para } \forall j,k,t \quad (3.17)$$

O parâmetro VM_k da equação (3.18) apresenta o resultado monetário do custo de cada combustível k em todo o horizonte de planejamento. A ordem de grandeza desse valor é particularmente importante no planejamento do orçamento anual destinado à compra dos combustíveis para a operação de caldeiras industriais.

$$VM_k = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \left(p_{ikt} \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn}^* \right) \quad \text{para } \forall k \quad (3.18)$$

Em relação ao número de variáveis e restrições do modelo, se o sistema de produção de vapor é constituído de I fornecedores, K tipos de combustíveis, J caldeiras industriais, T períodos e N sub-períodos, o modelo representado pelas equações (3.1) a (3.13) possui $K[T(I+2)+N(2I+1)]+T+N(3J+1)$ restrições e $K[T(I+1)+N(2I+J)]+2JN+I$ variáveis, das quais $N(IK+2J)$ são binárias. Para o exemplo computacional apresentado no Apêndice A, com $I = 6$ fornecedores, $J = 4$ caldeiras, $K = 5$ combustíveis, $T = 5$ períodos, e $N = 35$ sub-períodos, o modelo resultou em 2.935 restrições e 3.256 variáveis, das quais 1.330 são binárias; o tempo de processamento em computador de 1,7 Gigahertz e 1 GB de memória RAM foi de 0,656 segundos. Apesar desse exemplo convergir rapidamente para a solução ótima, em instâncias maiores, com N superior a 200 sub-períodos e dados de oferta

dos combustíveis e suas disponibilidades periódicas razoavelmente limitadas, o tempo de processamento para encontrar a solução ótima ultrapassou 120 minutos em alguns experimentos na mesma plataforma de *hardware*.

3.2 Restrições adicionais do modelo para operação em algumas caldeiras industriais

O modelo proposto na Seção 3.1 representa as principais decisões que são usualmente tomadas em sistemas típicos de produção de vapor em caldeiras industriais. No entanto, algumas particularidades foram identificadas no estudo de caso apresentado no Capítulo 4, e se mostraram comuns em alguns sistemas que utilizam caldeiras a biomassas para a geração de vapor em outras indústrias. As particularidades foram modeladas por meio de restrições, aqui chamadas de “restrições de mistura” ou “restrições de proporção”.

O bagaço de cana-de-açúcar é a biomassa de consumo majoritário como combustível para a geração de vapor, e a umidade de suas fibras possui influência na qualidade da combustão, alterando o valor dos parâmetros de conversão de quantidade de combustível em quantidade de vapor (vi_{jkn} e vh_{kt}). Em indústrias que consomem o bagaço de cana como combustível, aceitam-se como umidade padrão da fibra o teor de 55% de água em relação ao seu peso total e, nesta condição, empiricamente, estimaram-se que uma tonelada de bagaço pode gerar aproximadamente 2,2 toneladas de vapor.

Para reduzir os problemas da qualidade da combustão, normalmente os operadores das caldeiras industriais adicionam quantidades de palha de arroz e cavaco de madeira, biomassas com umidade padrão menor em comparação aos 55% do bagaço, perfazendo uma mistura que, na prática, percebeu-se que mantém a qualidade da combustão do bagaço de cana sem prejudicar a combustão das outras biomassas. Estas quantidades são limitadas dentro de faixas de mínimo e máximo permitido para a mistura.

Estabeleceu-se empiricamente que a somatória da quantidade de palha de arroz (mencionada nas equações de mistura como “ARR”) e cavaco (“CAV”), em massa, deve ser no mínimo 5% da quantidade de bagaço de cana (“BAG”) queimado em determinada caldeira em um sub-período (dia). O fator de multiplicação expresso por λ é o responsável por estabelecer a porcentagem mínima para a mistura, que pode ser alterada de acordo com o sistema. A equação (3.19) modela a situação descrita neste parágrafo. As restrições de mistura de palha de arroz e cavaco de madeira com o bagaço úmido [equações (3.19) e (3.20)] somente são ativadas quando a umidade do bagaço está acima de 57% e, conseqüentemente, o fator de conversão de combustível em vapor ($vh_{BAG,t}$) é menor do que o valor ϕ , estimado em 2,173 por meio da equação (3.24).

$$e_{jn} a_{j,ARR} Q_{j,ARR,n} + e_{jn} a_{j,CAV} Q_{j,CAV,n} \geq \lambda (e_{jn} a_{j,BAG} Q_{j,BAG,n}) \text{ para } \forall j,n; \quad (3.19)$$

para $vi_{j,BAG,n} \leq \phi$, tal que $vi_{j,BAG,n}$ é função da umidade u_t

O limite máximo é estabelecido com um equacionamento semelhante à restrição (3.19), mas com o sinal de menor ou igual na inequação e o fator multiplicativo passa a ser expresso por μ . A equação (3.20) modela o limite máximo da mistura dos combustíveis. Na prática da operação do estudo de caso apresentado nesta dissertação, o parâmetro μ assumiu valor 10%.

$$e_{jn} a_{j,ARR} Q_{j,ARR,n} + e_{jn} a_{j,CAV} Q_{j,CAV,n} \leq \mu (e_{jn} a_{j,BAG} Q_{j,BAG,n}) \text{ para } \forall j,n; \quad (3.20)$$

para $vi_{j,BAG,n} \leq \phi$, tal que $vi_{j,BAG,n}$ é função da umidade u_t

A principal razão para existir um limite máximo para a queima de palha de arroz é decorrente do fato dessa biomassa ser abrasiva durante a combustão, por conter elevada quantidade de sílica em sua composição estrutural e, deste modo, causar danos nas paredes internas das caldeiras com o consumo frequente. Além disso, a produção de cinzas como resíduo da combustão de palha de arroz é bem superior à queima de outras biomassas e requer maiores cuidados operacionais e trabalhos extras de limpeza para a boa conservação dos equipamentos. Nesse contexto, a restrição (3.20) é pertinente quanto à mistura dos combustíveis na situação em que o bagaço se encontra úmido, assim como a restrição (3.21) é pertinente quanto a estabelecer o limite máximo para a queima de palha de arroz em um dia normal de operação, diante da disponibilidade do uso somente deste combustível. O parâmetro ω é o fator de multiplicação que estabelece a proporção de arroz consumido em relação à soma de todos os outros combustíveis em cada sub-período. Empiricamente, o valor de ω foi estipulado em 10% pelos operadores do estudo de caso apresentado nesta dissertação.

$$e_{jn} a_{j,ARR} Q_{j,ARR,n} \leq \omega \left(\sum_{k=1}^K e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \right) \text{ para } \forall j,n \quad (3.21)$$

Em caldeiras que consomem exclusivamente lenha, uma prática frequente para melhorar a eficiência da combustão, ainda não medida experimentalmente, mas percebida na prática, é colocar para cada três partes de lenha o equivalente a uma parte de bagaço de cana. A restrição (3.22) é responsável por estabelecer esta proporção de lenha (mencionado na equação como “LEN”) com o bagaço de cana (mencionado na equação como “BAG”). Isso para todos os sub-períodos n e caldeira j que utilizar a lenha como combustível. O parâmetro ρ é o fator multiplicativo que estabelece a proporção de lenha e bagaço de cana.

$$Q_{j,LEN,n} \geq \rho \cdot Q_{j,BAG,n} \quad \text{para } \forall j,n \quad (3.22)$$

A última restrição da categoria “restrições de mistura”, ou “restrição de proporção entre combustíveis” diz respeito à proporção no estoque entre o bagaço de cana e a palha de arroz. Na prática real, a operação mantém em estoque cinco vezes mais quantidade de bagaço de cana em relação à quantidade armazenada de palha de arroz, pois não seria viável para a operação se houvesse disponível somente palha de arroz como combustível, visto que esse é primordialmente um adjuvante no caso do bagaço de cana estar com elevada umidade. Ou seja, a restrição (3.23) encarrega-se desta proporção no estoque, visto que a sua ausência no modelo, e com preços vantajosos da palha de arroz em comparação ao bagaço, o modelo faz estoque somente de palha de arroz, o que não é permitido na prática. O fator expresso pelo parâmetro θ assume o valor cinco para realizar a proporção descrita nesta equação.

$$I_{BAG,t} \geq \theta \cdot I_{ARR,t} \quad \text{para } \forall t \quad (3.23)$$

As inclusões dessas “restrições de proporção” [equações (3.19) a (3.23)] causaram pouco impacto no tempo computacional para processamento do modelo; entretanto, as mudanças nas soluções para o *mix* dos combustíveis consumidos na operação ficaram mais realistas, quando comparados com a prática da empresa estudada.

3.2.1 Parâmetros de conversão de combustível em quantidade de vapor

O modelo proposto utiliza vários parâmetros diretamente coletados da situação prática e que não possuem cálculos associados. São exemplos desses parâmetros: os custos operacionais, os preços dos combustíveis, a capacidade de operação das caldeiras, a perda de capacidade devido ao *start-up*, os dias de disponibilidade para operação dos equipamentos, quais combustíveis podem ser 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 *et al.* (2001).

Os parâmetros de conversão de quantidade de combustível em quantidade de vapor (vi_{jkn} e vh_{kt}) devem ser entendidos como a quantidade de vapor em toneladas gerada a partir da queima de uma tonelada de determinado combustível sem a mistura com outro. Por exemplo, quando se queima uma tonelada de óleo BPF, produzem-se aproximadamente 13 toneladas de vapor industrial. Apresentam-se os valores dos parâmetros vi_{jkn} e vh_{kt} para

os quatro combustíveis utilizados nas caldeiras industriais do estudo de caso e que não possuem cálculos associados derivados de características relacionadas à umidade, a saber: o cavaco de madeira, a lenha, a palha de arroz, e o óleo BPF (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Parâmetros de conversão de quantidade de combustível em quantidade de vapor (vi_{jkn} e vh_{kt}) (em toneladas)

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

Fonte: dados da pesquisa

O bagaço de cana é a biomassa combustível na qual os valores dos fatores de conversão vi_{jkn} e vj_{kt} estão atrelados ao teor de umidade na fibra, pois quanto mais úmida a fibra estiver, menor a eficiência da conversão em vapor, e, conseqüentemente, menor quantidade de vapor é produzida por quantidade de bagaço queimado.

Com a coleta de dados diários da umidade do bagaço de cana de caminhões que chegaram à fábrica nos anos de 2008 e 2009, perfazendo aproximadamente 600 informações, foi possível estimar equações, por meio de regressão linear, que pudessem fornecer o valor dos parâmetros vi_{jkn} e vh_{kt} , de acordo com o teor de umidade no bagaço. Os dados de umidade foram tratados com médias e foram retirados do conjunto os valores discrepantes (*outliers*), de modo que resultasse uma média para cada semana no horizonte de cinquenta semanas em um ano (50 períodos). As médias de umidade de cada semana foram correlacionadas com os valores da produção de vapor com a queima exclusivamente do bagaço, cuja umidade média na semana havia sido determinada em laboratório.

A equação (3.24) fornece uma estimativa do fator de conversão da queima de bagaço de cana em vapor de acordo com a umidade presente na fibra compreendida no intervalo $52,5 \leq u_t \leq 64,0$ em cada período t . Para teores de umidade abaixo do valor 52,5%, os parâmetros vi_{jkn} e vh_{kt} assumem o valor fixo de 2,416, e acima da umidade 64%, os parâmetros vi_{jkn} e vh_{kt} assumem o valor de 1,795. Os coeficientes estatísticos da regressão foram: R-quadrado (R^2) de 0,9242 e erro-padrão de 0,05213. A Tabela 3.3 apresenta os dados já tratados que foram utilizados para estimar a equação (3.24), utilizando os 50 períodos mencionados acima.

O fator de conversão $vh_{BAG,t}$ não leva em consideração a eficiência desenvolvida por cada caldeira j na queima do bagaço úmido. Já o fator $vi_{j,BAG,t}$ contorna essa limitação por meio da multiplicação por um coeficiente η_{jt} , que corresponde à eficiência de cada caldeira j em faixas de umidade do bagaço, em cada período t . A

equação (3.24) considera uma caldeira com alta eficiência na combustão da fibra em resposta a sua umidade.

$$vh_{BAG,t} = 5,251 - 0,054u_t \text{ para } \forall t \quad (3.24)$$

Duas outras equações para os valores de $vh_{BAG,t}$ foram estimadas usando somente o segundo e terceiro quartil dos dados. Essas equações fornecem valores ligeiramente menores para o fator $vh_{BAG,t}$ em comparação com aqueles fornecidos pela expressão (3.24). Possivelmente estas equações estimadas com dados selecionados possam ser mais adequadas para caldeiras com menor eficiência de queima de bagaço de cana úmido ($vh_{BAG,t} = 4,983 - 0,005u_t$ e $vh_{BAG,t} = 4,8716 - 0,0482u_t$).

Tabela 3.3. Dados empíricos da queima de uma tonelada de bagaço de cana na geração de vapor industrial de acordo com a umidade da fibra

Período (T)	Teor de umidade u_t (%)	Conversão em vapor (toneladas)	Período (T)	Teor de umidade u_t (%)	Conversão em vapor (toneladas)
1	64,90	1,80	26	57,70	2,16
2	65,70	1,79	27	56,43	2,27
3	65,00	1,78	28	54,23	2,26
4	63,80	1,82	29	55,30	2,31
5	63,20	1,84	30	54,19	2,29
6	63,70	1,79	31	53,55	2,31
7	63,40	1,81	32	55,00	2,30
8	61,50	1,91	33	54,51	2,31
9	60,40	1,96	34	54,80	2,32
10	61,20	1,92	35	53,30	2,39
11	60,00	1,98	36	54,07	2,34
12	58,40	2,01	37	55,31	2,33
13	59,40	2,02	38	54,41	2,36
14	60,33	1,97	39	53,65	2,32
15	59,35	2,01	40	53,62	2,30
16	59,90	1,96	41	56,40	2,32
17	58,30	2,07	42	55,70	2,38
18	58,94	2,04	43	57,90	2,28
19	58,24	2,07	44	57,03	2,18
20	59,30	2,02	45	59,60	1,99
21	58,76	2,04	46	60,90	1,93
22	57,10	2,13	47	61,20	1,97
23	58,06	2,08	48	60,23	1,98
24	57,16	2,12	49	59,65	1,99
25	57,70	2,11	50	59,80	1,97

Fonte: dados da pesquisa

4 ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

4.1 Apresentação da empresa do estudo de caso

A empresa anglo-holandesa Unilever Bestfoods, unidade de Goiânia (GO), participou desta pesquisa e forneceu as informações necessárias para a realização do trabalho. A Unilever é a segunda maior empresa de bens de consumo do mundo, ficando atrás apenas da multinacional americana Procter & Gamble. No Brasil, a empresa possui doze plantas industriais e é líder em dez categorias de produtos dentre as dezessete de que participa no mercado. Entre os produtos mais conhecidos da Unilever estão: categoria alimentos: a maionese Hellmann's, os produtos a base de tomate da marca Arisco (p.ex.: Pomarola, Tarantela), a bebida a base de soja Ades, os sorvetes Kibon e os temperos Knorr; categoria cuidados pessoais: creme dental Close-up, sabonetes e xampus Dove e Lux, desodorantes Rexona e Axe; categoria limpeza: sabão em pó Omo, Surf e Brilhante, amaciante de roupas Comfort e alvejante Clif. Todos os produtos citados são marcas registradas da empresa¹⁴.

A fábrica de Goiânia é a maior planta de produção de alimentos da empresa no mundo, sendo responsável pela produção de produtos a base de tomate, maioneses, temperos e geléias. Em um ano típico, a produção total de alimentos oscila em torno de 280 mil toneladas de produtos industrializados. O processamento de tomate industrial para a produção de polpa, molhos e *catchup* destaca-se na fábrica em comparação às demais atividades de beneficiamento de alimentos. A transformação de tomate industrial em seus produtos mobiliza aproximadamente 80% de todo recurso disponível (humano, energético e temporal) da fábrica durante o período de safra agrícola, que vai normalmente da segunda quinzena de junho até a primeira quinzena de novembro. Mesmo durante os outros meses do ano, praticamente 50% dos recursos da fábrica permanecem alocados em atividades relacionadas com o tomate industrial.

Em uma safra típica, a fábrica processa aproximadamente 370 mil toneladas de tomate *in natura*, que são transformadas em aproximadamente 115 mil toneladas de produtos industrializados a base de tomate. No ano de 2008, para a produção de 350 mil toneladas de alimentos industrializados, a fábrica utilizou uma quantidade de vapor de 310

¹⁴ Informações disponíveis no site da empresa: www.unilever.com.br (acesso em 06/04/2010).

mil toneladas. A Figura 4.1 apresenta a produção mensal de alimentos e de vapor do ano de 2008, um ano atípico, no qual houve uma safra recorde de tomate industrial (420 mil toneladas). Percebe-se que a produção de vapor não é igualmente distribuída entre os meses do ano.

Para o ano de 2009, o qual foi um ano típico de safra de tomate (360 mil toneladas), as informações da safra já haviam sido concluídas até o primeiro semestre de 2010, quando ocorreu a consulta dos dados. Entretanto, as informações de produção de alimentos de outros setores (maioneses, geléias e sucos) ainda não haviam sido finalizadas para realizar a comparação da quantidade de alimentos produzidos com a quantidade de vapor utilizada em um ano típico.

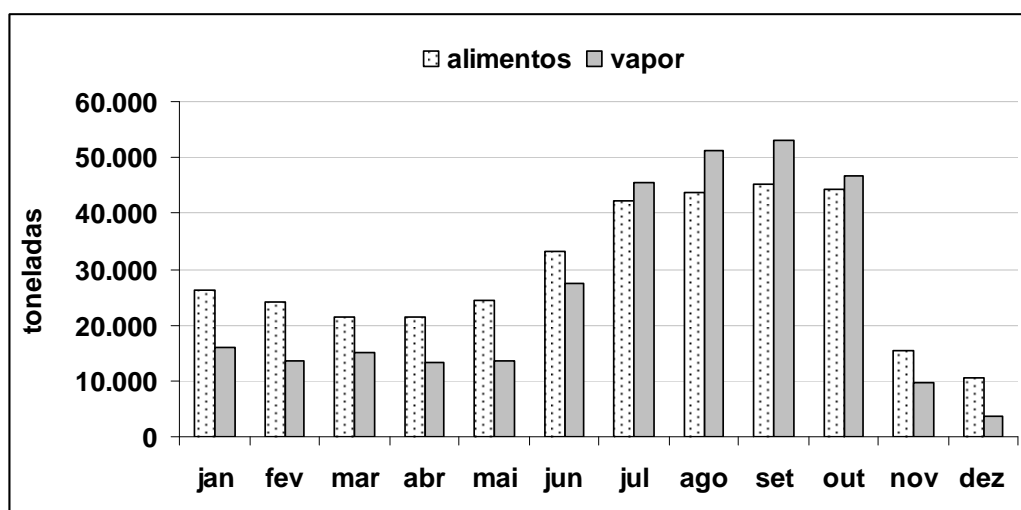


Figura 4.1. Produção de alimentos industrializados e geração de vapor em 2008 na fábrica de Goiânia (Fonte: dados da pesquisa)

A fábrica de Goiânia conta com quatro caldeiras que operam em um sistema integrado e, desta maneira, suprem toda a necessidade de vapor para a industrialização dos alimentos. Na seção seguinte é apresentado o sistema de geração vapor da empresa.

4.2 Características do sistema de geração de vapor da fábrica

A produção/demanda de vapor na fábrica de Goiânia é sazonal durante o ano e está atrelada à safra agrícola do tomate industrial. Dentro de uma semana, a sazonalidade se configura por conta da redução na demanda de vapor aos sábados e domingos, fora do período de safra agrícola.

Em uma semana típica, fora do período de safra, a fábrica requer quantidades que oscilam em torno da média de 470 toneladas de vapor de segunda-feira à

sexta-feira, e durante os finais de semana a quantidade diminui para aproximadamente 350 toneladas no sábado, e 250 toneladas no domingo. Apesar de esses números mostrarem o padrão médio da produção/demanda de vapor no sistema, em alguns dias, particularmente aos domingos, a produção de vapor pode ser eventualmente nula, por motivos de manutenção ou limpeza das caldeiras ou das linhas de produção, essa última que são as demandantes de vapor.

A produção de vapor na fábrica da Unilever de Goiânia é de grande porte, e para se ter uma idéia da grandeza dos números da operação, a consulta a outros segmentos industriais de processamento de alimentos, também de grande porte, permitiu inferir que o total de vapor necessário durante o pico da safra de tomate é cerca de duas vezes maior do que ocorre no pico da safra das indústrias processadoras de suco de laranja, e aproximadamente da mesma ordem de grandeza do que acontece no pico da safra de cana-de-açúcar de usinas de grande capacidade de moagem. Porém, a consulta a uma mineradora que também produz e consome vapor mostrou que as quantidades demandadas em uma fábrica de alimentos são pequenas quando comparadas a esse setor¹⁵.

Para ilustrar como foram os perfis da demanda de vapor da fábrica de Goiânia, apresentam-se na Figura 4.2 as quantidades mensais da produção de vapor no ano de 2008 (ano com grande safra agrícola) e também no ano de 2009 (ano com safra agrícola típica). O total da produção de vapor em 2008 foi de 308.587 toneladas e em 2009, de 268.829 toneladas.

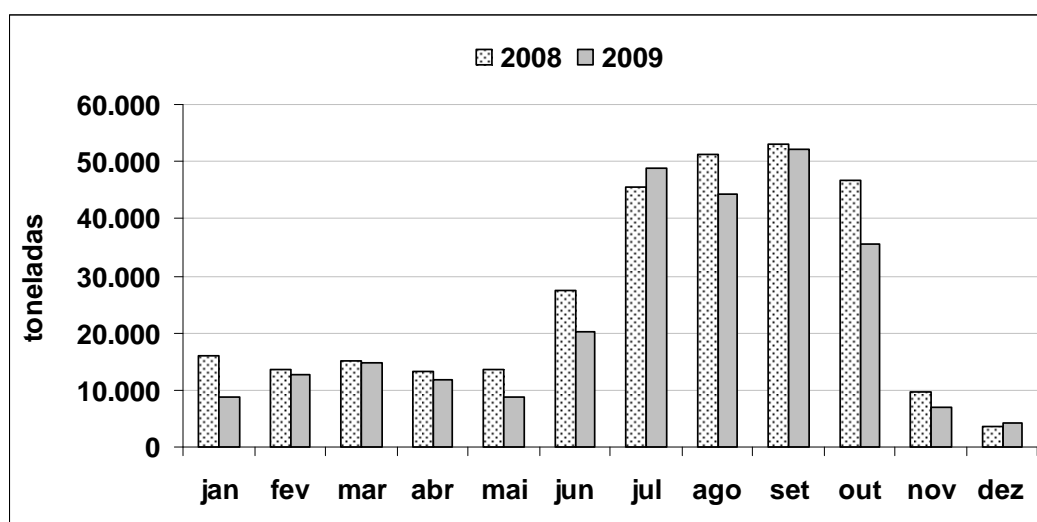


Figura 4.2. Produção/demanda de vapor da fábrica em 2008 e 2009 (Fonte: dados da pesquisa)

¹⁵ As empresas consultadas foram: Citrovita (SP), Usina Santa Clotilde (AL) e Mineradora Votorantim Metais (GO).

Para atender à demanda total de vapor da fábrica, existem quatro caldeiras de grande capacidade, que podem funcionar isoladamente ou em conjunto. As quatro caldeiras foram construídas por fabricantes diferentes e em períodos distintos durante a expansão da fábrica. A escolha das caldeiras foi feita tendo como objetivo configurar um sistema flexível, no qual não houvesse dependência de um único combustível para a geração de vapor. Dessa maneira, a operação buscaria sempre consumir os combustíveis que estivessem com melhor relação custo-benefício no momento da demanda.

Para facilitar a identificação das caldeiras sem incorrer na repetição frequente de seus nomes, preferiu-se denominá-las por meio de siglas, as quais normalmente os operadores das caldeiras utilizam em seu cotidiano. Também por comodidade na redação do texto, preferiu-se abreviar os tipos de combustíveis por siglas, assim como empregado em seções anteriores: são elas: BAG (bagaço de cana), CAV (cavaco de madeira), ARR (palha de arroz), RSA (resíduo animal: ossos e gordura), LOD (lodo de tratamento de efluentes orgânicos), LEN (lenha) e OLE (óleo BPF). A Tabela 4.1 apresenta informações dos fabricantes e tipos de combustíveis consumidos nas caldeiras da fábrica de Goiânia.

Tabela 4.1. Fabricantes das caldeiras, ano de construção e os tipos de combustíveis consumidos em cada uma delas na fábrica de Goiânia

Caldeira	Fabricante	Combustível consumido	Ano de construção
CBC	CBC Indústria Pesada S.A. (Grupo Mitsubishi – Japão)	BAG, CAV, ARR*, RSA*, LOD*	1984
ZAN	Zanini (atual Sermatec – Brasil)	BAG, CAV, ARR*, RSA*, LOD*	1987
MEP	Meppan (a fábrica não existe mais – Brasil)	LEN, BAG*	1994
ATA	ATA – Aalborg Industries S.A. (Dinamarca)	OLE	1996

* consumo permitido com restrições específicas.

Fonte: dados da pesquisa

A fábrica possui três caldeiras que consomem bagaço de cana como combustível. A caldeira CBC (sigla: CBC) não queima adequadamente o bagaço úmido, enquanto a caldeira Zanini (ZAN) consegue desenvolver eficiência diferenciada na queima do bagaço, conforme a seguinte faixa de umidade da fibra: para umidade menor ou igual a 55%, a caldeira desenvolve sua eficiência normal; para umidade maior do que 55% e menor do que 60%, a eficiência é 8% maior; para umidade compreendida de 60% a 70%, a eficiência é 10% maior que a faixa normal; para umidade do bagaço acima de 70%, a eficiência da caldeira ZAN é 12% acima do nível normal em comparação com as outras

caldeiras. A caldeira Meppam (MEP) praticamente não altera sua eficiência com a queima de bagaço seco ou úmido.

Na Tabela 4.2 são apresentadas as capacidades nominais e operacionais de produção de vapor das caldeiras da fábrica de Goiânia. As caldeiras CBC, ZAN e ATA podem funcionar continuamente durante 24 horas sem qualquer interrupção. No entanto, no caso da caldeira MEP, quando esta é operada com altas produções durante um período de 24 horas, é necessário fazer um intervalo de uma hora para remoção de cinzas em suas partes interiores. Portanto, a caldeira MEP está disponível 23 horas para o funcionamento nos dias de alta geração de vapor.

Tabela 4.2. Capacidades de produção de vapor das caldeiras da fábrica de Goiânia

Caldeira	Capacidade nominal do fabricante (t/h)	Capacidade operacional máxima (t/h)	Tempo disponível para operação em 24h	Capacidade operacional máxima (t/dia)
CBC	45	37	24	~ 890
ZAN	42	38	24	~ 910
MEP	15	20	23	~ 460
ATA	30	30	24	~ 720

Fonte: dados da pesquisa

As caldeiras da fábrica são equipamentos de alta capacidade de funcionamento e não operam adequadamente com baixa geração de vapor, conforme mencionado antes. Existe uma quantidade mínima de vapor que deve ser produzida para que a caldeira permaneça com funcionamento estável. Outra característica das caldeiras industriais é o gradual aquecimento no momento de partida (*start-up*), quando a caldeira encontra-se totalmente fria, resultado do desligamento total do equipamento. O tempo de *start-up* é variável entre caldeiras e depende da capacidade de produção de vapor e de características tecnológicas de construção do equipamento.

Uma vez que a caldeira é ligada e totalmente aquecida, ou seja, preparada para responder rapidamente a qualquer demanda de vapor, há a opção da mesma ser colocada em regime de prontidão (*warm-up*), ou seja, não se produz vapor para as linhas da fábrica, mas mantém-se a caldeira aquecida com o consumo mínimo de combustível para que se evite o procedimento de *start-up* e seja rápida a geração de vapor diante da eventual solicitação. O consumo de combustível para o *start-up* é maior do que o consumo para o *warm-up*. O período posterior ao *start-up*, uma vez que a caldeira esteja aquecida, é conhecido como regime estacionário ou regime de equilíbrio (*steady-state*) de funcionamento da caldeira. A Tabela 4.3 apresenta as características do momento de partida (*start-up*) e do aquecimento (*warm-up*) das caldeiras da fábrica de Goiânia.

Tabela 4.3. Características do acionamento e aquecimento das caldeiras da fábrica

Caldeira	Duração do <i>start-up</i> (horas)	Produção mínima de vapor para <i>start-up</i> (t)	Parcela da capacidade máxima para <i>start-up</i> (%)	Consumo de combustível para <i>start-up</i>	Consumo de combustível para 24 h de <i>warm-up</i>
CBC	12	198	22	15 t BAG	10 t BAG
ZAN	12	162	18	15 t BAG	10 t BAG
MEP	10	23	5	8 m ³ LEN	6 m ³ LEN
ATA	8	0	0	1,2 t OLE	0,8 t OLE

Fonte: dados da pesquisa

As caldeiras são equipamentos que necessitam de manutenção periódica para garantir o bom funcionamento e segurança do sistema. As principais partes constituintes que necessitam ser inspecionadas são: o sistema de alimentação de combustível (esteiras), as grelhas separadoras de cinzas, o sistema de exaustão e filtros de gases, os ventiladores alimentadores de ar e as tubulações de passagem da água e seus tanques reservatórios. Também as paredes internas metálicas e cerâmicas da fornalha são inspecionadas para verificar o nível de dano por abrasão decorrente da queima de combustíveis com alto teor de sílica, como por exemplo, a palha de arroz.

Antes do período da safra do tomate, as quatro caldeiras da fábrica devem passar por manutenção e estarem prontas para operar com segurança. As caldeiras CBC e ZAN necessitam de aproximadamente 60 dias consecutivos de manutenção, a caldeira MEP, de aproximadamente 30 dias, e a caldeira ATA, de aproximadamente 15 dias. A equipe que gerencia a operação das caldeiras da fábrica de Goiânia segue a seguinte ordem para paradas programadas de manutenção: primeiramente a caldeira CBC, pelo motivo de que nos meses de janeiro a março a umidade do bagaço é mais elevada e a referida caldeira tem menor eficiência na queima de bagaço úmido em comparação à caldeira ZAN. A caldeira MEP é a terceira a entrar em manutenção, logo após a caldeira ZAN. A caldeira ATA pode ter sua manutenção realizada em praticamente qualquer período do ano, com exceção dos meses da safra do tomate.

Os períodos das paradas programadas para manutenção das caldeiras em 2008 e 2009 são apresentados na Tabela 4.4. Na aplicação do modelo, no estudo de caso, os períodos de paradas foram seguidos de acordo com as datas no ano de referência (2009) apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Período de paradas programadas para manutenção das caldeiras em 2008 e 2009

Caldeiras	2008	2009
CBC	02/01 a 14/03	02/01 a 02/04
ZAN	16/03 a 12/05	15/04 a 05/06
MEP	13/03 a 04/06	02/05 a 19/06
ATA	05/01 a 30/01	10/01 a 10/02

Fonte: dados da pesquisa

4.3 Fonte de dados para alimentar os modelos no estudo de caso

Por meio das pesquisas realizadas no sistema de informações gerenciais da empresa (Sistema SAP®) e de conversas com os operadores das caldeiras, foi possível obter os dados que alimentaram o modelo proposto para apoiar a gestão das operações em caldeiras industriais. Adotou-se o ano de 2009 (ano típico na produção/demanda de vapor) para a comparação dos resultados da operação real com os resultados do modelo. Os dados da demanda de vapor estão apresentados no Anexo A.

Nas tabelas apresentadas nesta seção estão as informações que alimentaram o modelo aplicado no estudo de caso. A Tabela 4.5 resume algumas informações de custo e capacidade das caldeiras da fábrica de Goiânia.

Tabela 4.5. Informações de custo e capacidade das caldeiras da fábrica

	CBC	ZAN	MEP	ATA
Custo do <i>start-up</i> (R\$)	600,00	600,00	480,00	1.500,00
Custo de 24 horas de <i>warm-up</i> (R\$)	400,00	400,00	360,00	1.040,00
Capacidade operacional máxima (t de vapor)	890	900	460	720
Mínimo da capacidade máxima para <i>start-up</i> (%)	22	18	5	0
Perda de capacidade devido ao <i>start-up</i> (t vapor)	445	450	220	240

Fonte: dados da pesquisa

A Tabela 4.6 reúne as informações referentes aos fornecedores de combustíveis que estiveram disponíveis para a operação de produção de vapor da fábrica de Goiânia no ano de 2009. Vale mencionar que essas informações referentes aos fornecedores de combustíveis variam todo ano, de acordo com os contratos fechados, e podem ocorrer mudanças significativas de um período para o outro, sendo difícil estabelecer padrões para as informações apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Informações dos fornecedores de combustíveis – oferta total, número de fornecedores, tamanho da carga, disponibilidades periódicas

Combustível	Oferta total (toneladas)	Número de fornecedores	Tamanho mínimo da carga (t)	Qte máxima de envio do fornecedor (t/dia)	Disponibilidade média por período (t/sem/fornecedor)
BAG	180.000	6	30	900	4.200
CAV	100.000	1	30	150	1.050
LEN	100.000	1	30	90	420
ARR	100.000	1	30	120	630
OLE	Ilimitada	1	27	270	1.890

Fonte: dados da pesquisa

A empresa não realiza cálculos financeiros do custo de armazenamento dos combustíveis. Um critério economicamente plausível seria considerar o custo de armazenamento como um valor relacionado ao custo de financiamento (juros) do estoque. Na execução do modelo, adotou-se a aplicação de uma taxa de 0,5% ao mês (a cada 4 períodos t do modelo) sobre o valor do combustível em estoque. Para valores elevados no custo de estocagem, a solução do modelo tende a queimar os combustíveis já adquiridos, gerando vapor excedente ao invés de estocá-lo, visto que o custo de geração de vapor oscila do mínimo de aproximadamente R\$ 20,45 por tonelada de vapor para o bagaço de cana (ou seja: R\$ 45,00/2,2 t vapor) até R\$ 100,00 por tonelada de vapor gerado a partir do óleo BPF.

Também foram realizados experimentos variando-se os custos de estocagem, e notou-se que praticamente não houve mudança na quantidade dos estoques, inferindo-se que o estoque é realizado com política de mínimo estoque, somente para garantir a mínima quantidade para atender ao coeficiente de segurança estipulado pela empresa. Os preços médios de compra dos combustíveis, os custos de estocagem estipulados para o problema e as capacidades de recepção e armazenamento dos combustíveis na fábrica são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Informações sobre os combustíveis disponíveis em 2009: preços médios, custo de estocagem, capacidade do estoque e recepção na fábrica

	Preço médio de compra (R\$/t ou m ³)	Custo de estocagem a taxa 0,5% a.m. (R\$/t ou m ³ /mês)	Capacidade do estoque na fábrica (t ou m ³)	Recepção máxima na fábrica (t ou m ³ /dia)
BAG	45,00	0,225	4.000	1.200
CAV	135,00	0,675	1.200	150
LEN	63,00	0,315	800	90
ARR	140,00	0,700	250	90
OLE	1.300,00	6,500	100.000	54

Fonte: dados da pesquisa

Como discutido na Seção 3.2.1, a umidade do bagaço de cana determina o valor do fator de conversão da quantidade da biomassa queimada em vapor. O tratamento dos dados brutos da umidade dos carregamentos de bagaço nos anos de 2008 e 2009 permitiu elaborar o gráfico da Figura 4.3, que mostra o perfil da umidade média semanal da fibra no decorrer de um ano. Percebe-se que nos primeiros meses do ano, a umidade está relativamente elevada, e cai gradualmente até atingir os menores valores entre os meses de junho a setembro, e a partir de outubro, volta a subir com as chuvas do início do verão. Vale lembrar que a fábrica está localizada na região centro-oeste brasileiro, caracterizado por invernos quentes e secos, e verões quentes e úmidos.

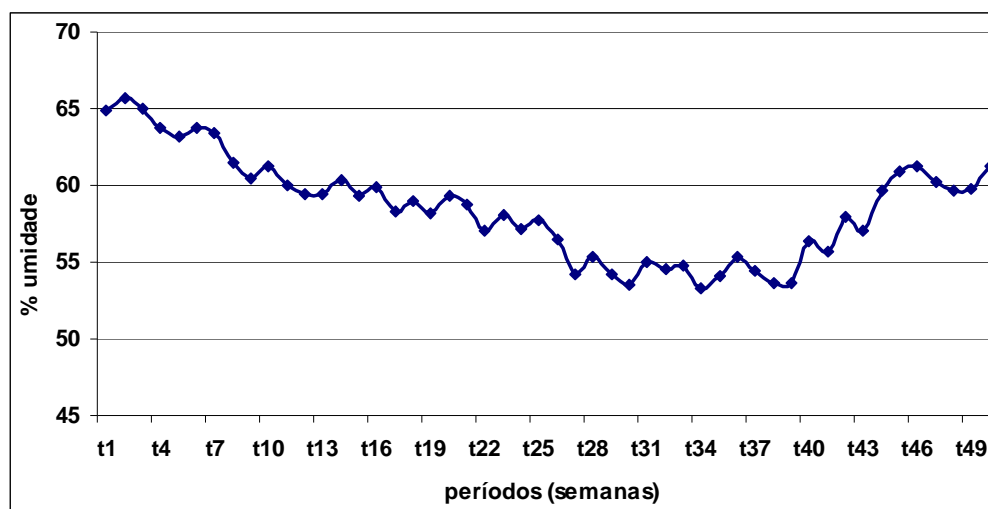


Figura 4.3. Umidade média do bagaço de cana no decorrer de um ano (Fonte: dados da pesquisa)

4.4 Operação praticada pela empresa sem o uso de ferramentas de decisão

Nesta seção são apresentados os resultados da operação real de produção de vapor sem o uso de ferramentas de otimização para apoiar as decisões do sistema. Os resultados reais serviram de referência para a comparação com aqueles produzidos pelo modelo proposto. Conforme mencionado, o ano de 2009 foi escolhido por ter sido um ano típico nas operações de produção de vapor na fábrica do estudo de caso. A Tabela 4.8 apresenta o resultado da configuração do funcionamento das caldeiras no ano de referência.

Tabela 4.8. Resultado da empresa na produção de vapor em 2009

	Produção de vapor (t)	Dias em funcionamento	Número de <i>start-up</i>	Nº de <i>warm-up</i> sem prod. vapor
CBC	105.594	193	7	11
ZAN	124.453	242	10	23
MEP	36.735	249	13	26
ATA	2.047	84	18	0
Total	268.829	329	48	60

Fonte: dados da pesquisa

Os quatro gráficos que são apresentados a seguir (da Figura 4.4 até a Figura 4.7) mostram como foi o perfil da produção de vapor em cada uma das caldeiras, no ano de referência. Na caldeira CBC (Figura 4.4) convém reparar no período da parada programada para manutenção nos noventa primeiros dias do ano. O motivo de se escolher parar primeiramente a caldeira CBC em relação à ZAN reside no fato de a primeira desenvolver baixa eficiência na queima do bagaço úmido em comparação com a segunda, e nos primeiros meses do ano, a umidade do bagaço está mais elevada do que dos outros meses. A caldeira CBC é acionada para elevadas produções de vapor, acima de 500 toneladas, e percebe-se também pelo gráfico que ela não produz quantidades de vapor inferiores a 200 toneladas por dia, pois se trata de uma caldeira instável ao funcionar com baixa taxa de utilização.

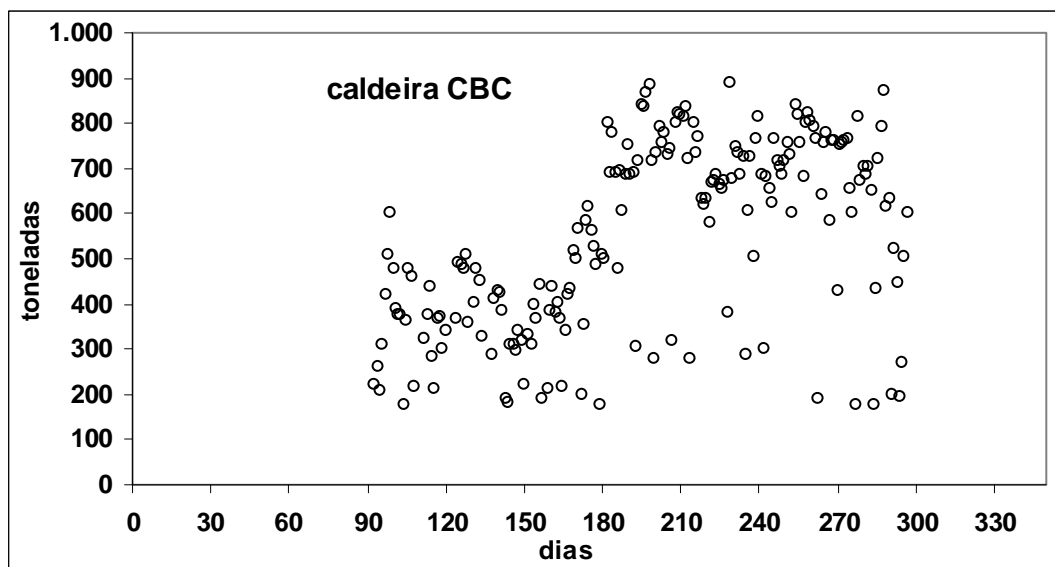


Figura 4.4. Produção de vapor na caldeira CBC em 2009 (Fonte: dados da pesquisa)

O gráfico da Figura 4.5 mostra o perfil da produção de vapor para a caldeira Zanini (ZAN). Nesta caldeira o período de manutenção programada esteve compreendido aproximadamente do 90º ao 160º dia do ano. Tal como a caldeira CBC, a caldeira ZAN é utilizada para grandes produções diárias de vapor, acima de 200 toneladas diárias. A grande diferença entre a caldeira ZAN e a CBC é que a primeira desenvolve melhor eficiência na queima do bagaço úmido, e seu funcionamento é preferível, devido à facilidade operacional em comparação com a caldeira CBC.

Na produção diária de aproximadamente 300 toneladas de vapor, a caldeira ZAN é preferível à caldeira MEP, isso devido à facilidade no carregamento de combustível na primeira, que é automatizado, em relação à segunda, que é manual. Percebe-se pelas Figura 4.5 e Figura 4.6 que nos primeiros 90 sub-períodos (dias), a caldeira ZAN foi acionada para produzir aproximadamente 400 toneladas de vapor por dia, enquanto a caldeira MEP estava acionada simultaneamente produzindo cerca de 50 toneladas. Essa estratégia consiste em deixar uma caldeira de *backup* em caso de falhas na produção de vapor pela caldeira preferencialmente acionada.

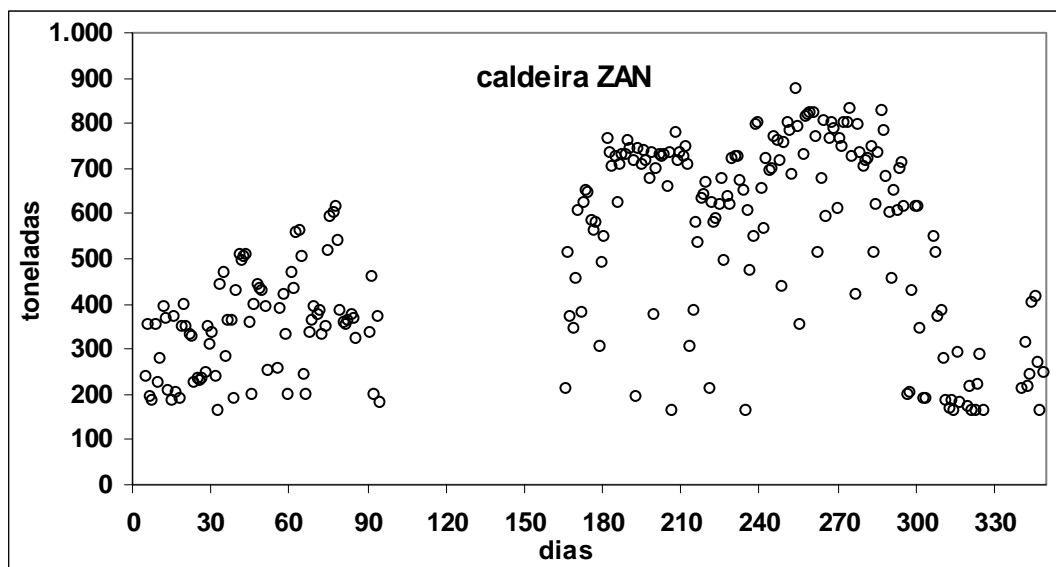


Figura 4.5. Produção de vapor na caldeira Zanini em 2009 (Fonte: dados da pesquisa)

O gráfico da Figura 4.6 traz o perfil da produção de vapor da caldeira Meppan (MEP). Essa caldeira queima lenha como combustível e possui capacidade máxima segura de produção de 460 toneladas de vapor diariamente; entretanto, no gráfico podem ser observados alguns pontos de produção acima da capacidade segura. Por exemplo, no 240º dia, a fábrica teve uma demanda total de 2.180 toneladas, e a caldeira MEP produziu 519 toneladas de vapor, bastante acima de sua capacidade limite de segurança. Nesse dia, a caldeira CBC produziu 814 toneladas, a caldeira ZAN produziu 801 toneladas, e a caldeira ATA 46 toneladas.

Apesar do fato de ser possível, na prática, a caldeira MEP ultrapassar a capacidade máxima de produção de vapor estabelecida pelo fabricante, este é um evento não desejável e evitado pela operação. A caldeira MEP é a caldeira escolhida para produções abaixo de 200 toneladas diárias e para ser *backup* das caldeiras CBC e ZAN nas elevadas produções de vapor. Aos finais de semana, quando a demanda de vapor da fábrica é baixa, a caldeira MEP é preferencialmente acionada. Em 2009, o período de manutenção da caldeira MEP esteve compreendido entre o 120º e o 170º dia.

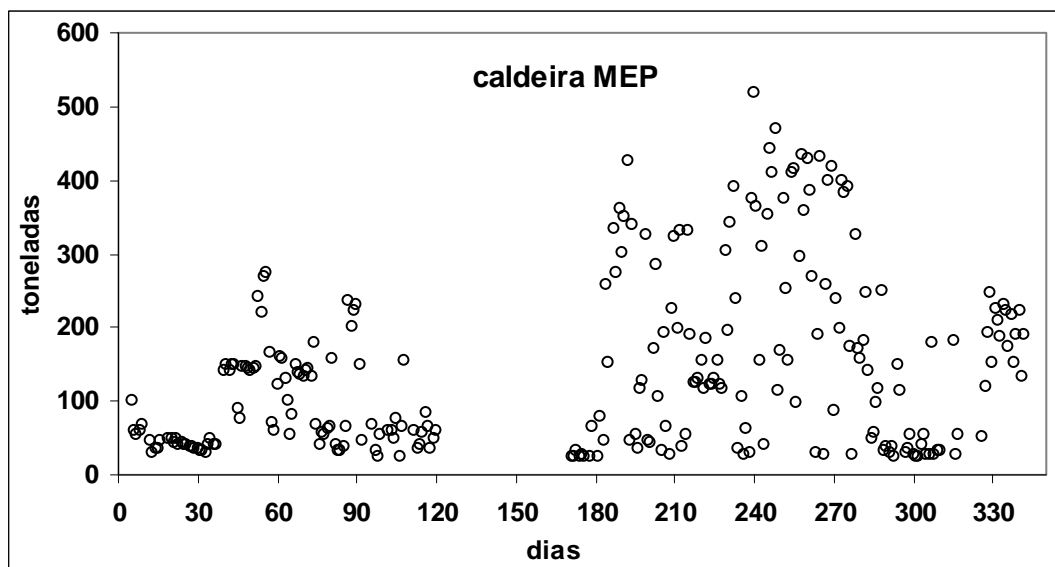


Figura 4.6. Produção de vapor na caldeira Meppan em 2009 (Fonte: dados da pesquisa)

O perfil da caldeira ATA, que utiliza óleo BPF como combustível, é apresentado na Figura 4.7. O funcionamento desta caldeira é motivo de discussões entre os encarregados diretos da operação e escalões gerenciais superiores, que também são responsáveis pelos custos na operação de produção de vapor. Para a gerência da operação, o acionamento da caldeira ATA é desnecessário, uma vez que a capacidade conjunta das outras três caldeiras é capaz de suprir a maior parte das grandes demandas diárias de vapor da fábrica, com exceção de alguns poucos dias nos quais é necessário o acionamento da referida caldeira.

A caldeira ATA é frequentemente ligada e mantida com baixas produções de vapor por motivos de segurança, frente à preocupação de que as outras caldeiras tenham problemas em momentos críticos de alta demanda de vapor pela fábrica. Nesses casos, a falta de vapor implicaria em grandes perdas de matéria-prima, tanto em espera para ser processada, quanto em trânsito de concentração nos evaporadores da fábrica.

De maneira geral, o funcionamento da caldeira ATA caracteriza-se por baixas produções de vapor e funcionamento concomitante às outras caldeiras em dias de elevada demanda de vapor pela fábrica. Essa estratégia é usada para aumentar a segurança no suprimento de vapor para a fábrica e manter custos baixos com esta caldeira. A empresa não aciona a caldeira ATA sem que ocorra produção de vapor, como o faz com as outras caldeiras, que podem ficar em regime de *warm-up*, sem produção de vapor para as linhas da fábrica.

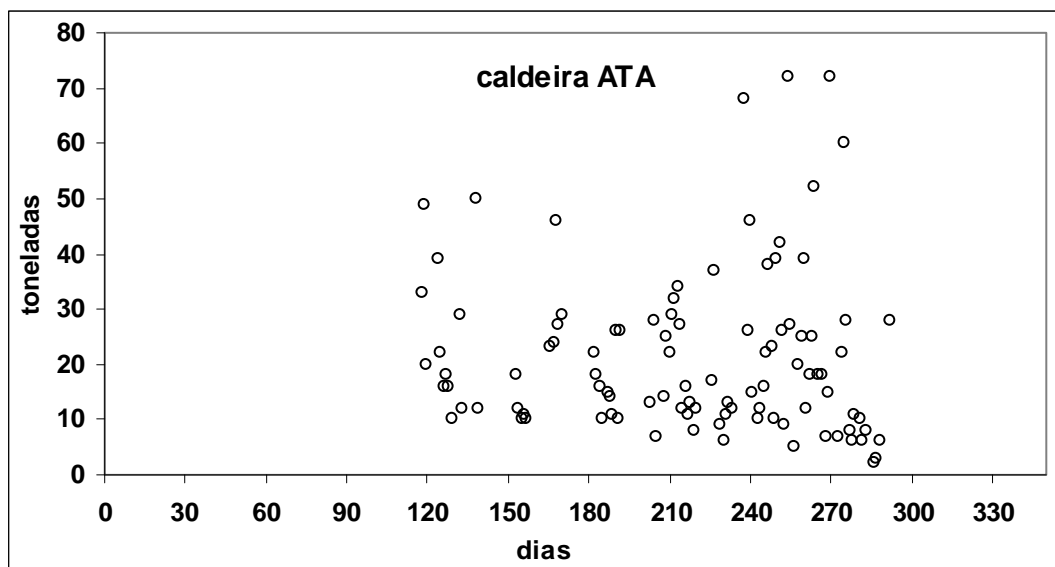


Figura 4.7. Produção de vapor na caldeira ATA em 2009 (Fonte: dados da pesquisa)

Em relação à matriz dos combustíveis consumidos no ano de referência. A empresa possui somente informações do total de cada tipo de combustível consumido no ano. Dessa maneira, não foi possível saber exatamente quanto de bagaço, cavaco e arroz foram consumidos especificamente nas caldeiras CBC e ZAN. O consumo total de bagaço de cana foi de 99.414 toneladas, de cavaco de madeira: 2.771 toneladas, de palha de arroz: 1.865 toneladas, de lenha: 11.150 toneladas, e óleo BPF: 226 toneladas.

Em relação ao nível dos estoques de combustíveis na fábrica, no ano de referência, a análise dos dados permitiu concluir que a média do estoque de bagaço de cana foi de 2.930 toneladas, de cavaco de madeira: 169 toneladas, de palha de arroz: 45 toneladas, de lenha: 230 toneladas, e óleo BPF: 50 toneladas. Na Seção 4.6 são apresentados os gráficos comparativos para o perfil dos estoques para cada combustível utilizado na operação real e nos resultados do modelo.

A estimativa dos custos da operação de produção de vapor, sem incluir o custo de estocagem dos combustíveis na fábrica, é apresentada na Tabela 4.9. O custo total da produção de vapor (custo dos combustíveis somado ao custo do acionamento das caldeiras), sem contabilizar o custo de estocagem, foi de R\$ 6.499.645 para o horizonte de planejamento de 350 dias. Na seção seguinte, apresenta-se a aplicação do modelo proposto utilizando-se os dados do ano de referência, e discutem-se os resultados obtidos.

Tabela 4.9. Custos totais para empresa na geração de vapor em 2009

	Custo total de <i>start-up</i> (R\$)	Custo total de <i>warm-up</i> (R\$)	Custo total dos combustíveis consumidos nas caldeiras (R\$)	
CBC	4.200	77.200	BAG	4.473.630
ZAN	6.000	96.800	ARR	261.240
MEP	6.240	89.640	LEN	702.450
ATA	27.000	87.360	CAV	374.085
			OLE	293.800
Total	43.440	351.000	Total	6.105.205

Fonte: dados da pesquisa

4.5 Resultados do modelo com os dados de referência

A aplicação do modelo de otimização, utilizando os dados de demanda de vapor (Anexo A) e as informações da oferta e preços dos combustíveis disponíveis no ano de referência (Tabela 4.6 e Tabela 4.7) forneceu uma nova configuração para o funcionamento do sistema. Nesta nova configuração, economias expressivas nos custos de consumo dos combustíveis e acionamento dos equipamentos foram obtidas em comparação com o realizado na operação real, ao longo do horizonte de planejamento de 50 períodos. O resumo da configuração do acionamento das caldeiras proposto pelo modelo é apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Resultados do modelo para a operação de produção de vapor em 2009

	Produção de vapor (t)	Dias em funcionamento	Número de <i>start-up</i>	Nº de <i>warm-up</i> sem prod. vapor
CBC	91.976	166	13	21
ZAN	171.943	289	5	6
MEP	4.940	31	17	3
ATA	0	0	0	0
Total	268.859	330	35	30

Fonte: dados da pesquisa

A função objetivo resultou em R\$ 5.673.734,61, dos quais R\$ 5.410.996,20 (95,63%) foram gastos exclusivamente com a aquisição dos combustíveis. Os custos de acionamento (*start-up* e *warm-up*) de todas as caldeiras somaram R\$ 212.120, e o custo de estocagem dos combustíveis, considerando a aplicação da taxa de juros de 0,5% ao mês sobre o valor em estoque, ficou em R\$ 50.618,41. A Tabela 4.11 apresenta o resultado financeiro do sistema no estudo de caso.

Tabela 4.11. Resultados do modelo para os custos da operação em 2009

	Custo total de <i>start-up</i> (R\$)	Custo total de <i>warm-up</i> (R\$)	Custo total dos combustíveis consumidos nas caldeiras (R\$)	
CBC	7.800	66.400	BAG	5.146.814
ZAN	3.000	115.600	ARR	124.030
MEP	8.160	11.160	LEN	120.962
ATA	0	0	CAV	0
			OLE	0
Total	18.960	193.160	Total	5.391.807

Fonte: dados da pesquisa

A diferença de valor entre o custo de aquisição dos combustíveis dos fornecedores (R\$ 5.410.996,20) e o custo do total dos combustíveis consumidos nas caldeiras (R\$ 5.391.807,42) forneceu o valor dos combustíveis comprados e que terminaram em estoque no fim do último período do horizonte de planejamento (R\$ 19.188,78).

O nível de estoque médio dos cinquenta períodos ficou em 972,17 toneladas para o bagaço de cana, com o pico de 2.382 toneladas no 37º período (2ª semana do mês de setembro). O estoque médio da palha de arroz foi de 46,6 toneladas, com o pico de 122,5 toneladas no 7º período (3ª semana de fevereiro). A lenha foi estocada somente em dois períodos, pois toda a quantidade de lenha transportada era imediatamente consumida. O estoque de lenha no 36º período foi de 2,36 toneladas, e no 37º período foi de 4,28 toneladas.

O tempo computacional requerido pelo modelo para encontrar uma solução ótima na situação do estudo de caso foi de 11,75 segundos, utilizando-se um processador Intel Pentium® I7 (com a liberação dos 8 núcleos de processamento), 2,8 GHz com 8 GB memória RAM. O pré-processamento do modelo, com a eliminação das variáveis nulas, apresentou 32.878 restrições e 30.940 variáveis, das quais 13.300 são binárias. A ordem de grandeza é de aproximadamente 60.000 para número de iterações nos experimentos realizados para esta instância de dados. Na seção seguinte, discutem-se os resultados do modelo em comparação com os da operação real.

4.6 Discussão dos resultados

A primeira comparação entre a operação real e os resultados do modelo diz respeito à quantidade de vapor produzida em cada uma das caldeiras do sistema (Tabela 4.12). O modelo produz praticamente a mesma quantidade total de vapor que a operação real, considerando todo o horizonte de planejamento. Porém, o modelo explora mais as

capacidades individuais de cada caldeira e coloca equipamentos adicionais em funcionamento somente quando a demanda de vapor no sub-período ultrapassa a capacidade de geração de vapor da caldeira preferencialmente acionada neste sub-período. Por meio das Figuras 4.8 a 4.10, é possível um melhor entendimento do mecanismo de acionamento das caldeiras resultado do modelo.

Tabela 4.12. Comparação entre a operação real e os resultados do modelo – Produção de vapor em cada caldeira

	Operação real (toneladas)	Resultado do modelo (t)	Diferença absoluta (t)	Diferença percentual (%)
	(A)	(B)	(B-A)	$((B/A)-1).100$
CBC	105.594	91.976	- 13.618	- 12,89
ZAN	124.453	171.943	+ 47.490	+ 38,15
MEP	36.735	4.940	- 31.795	- 86,55
ATA	2.047	0	- 2.047	-
Total	268.829	268.859	30	0,0113

Fonte: dados da pesquisa

O gráfico da Figura 4.8 apresenta o perfil da produção de vapor na caldeira CBC realizado na operação real e o resultado do modelo. Vale a pena destacar o aproveitamento máximo da capacidade do equipamento durante vários sub-períodos da safra do tomate, e o patamar inferior de produção mínima de vapor (aproximadamente 200 toneladas) para o adequado funcionamento da caldeira no regime de *warm-up*.

A mínima produção de vapor aconteceu justamente em períodos anteriores e adjacentes àqueles em que a produção de vapor é elevada, e que são necessários as produções totais das caldeiras ZAN e CBC. Nesses casos, é vantajoso manter a caldeira CBC em regime de *warm-up* ao invés de desligá-la completamente. A verificação no calendário civil no ano de 2009, para os sub-períodos em que ocorreram a mínima produção de vapor, mostrou que são os dias de finais de semana, particularmente aos domingos, em que a caldeira permanece em regime de *warm-up*.

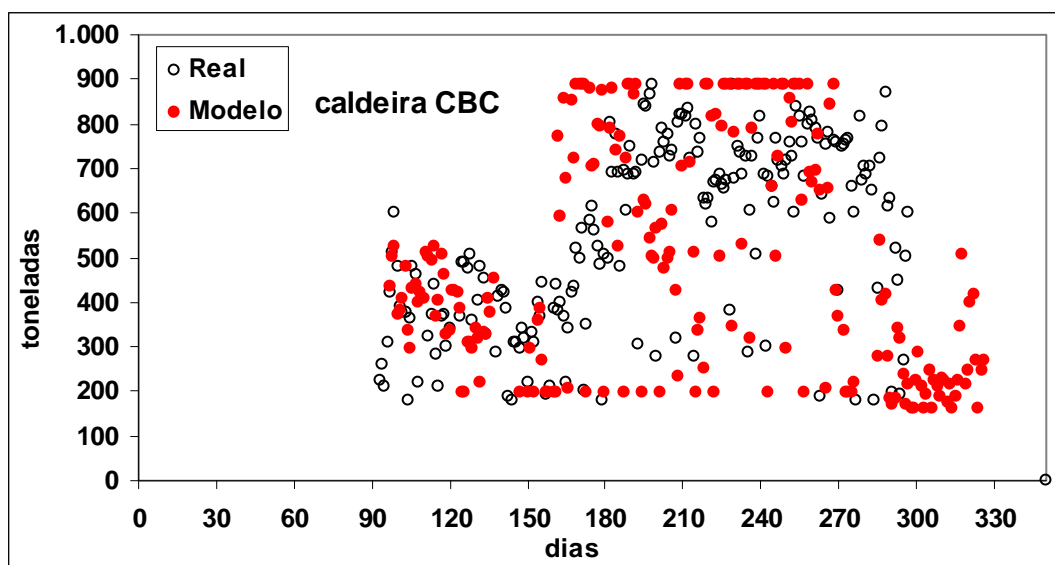


Figura 4.8. Produção de vapor na operação real e resultado do modelo para a caldeira CBC (Fonte: dados da pesquisa)

O próximo gráfico (Figura 4.9) apresenta a configuração de produção de vapor na caldeira Zanini (ZAN) realizada na operação real e sugerida pelo modelo. Nos primeiros noventa e últimos cinquenta sub-períodos (dias) do horizonte de planejamento, houve algumas coincidências entre a operação real e os resultados do modelo. Esse período de coincidências é constituído de dias em que a produção de vapor na operação real deixa de ser dividida entre as caldeiras ZAN e MEP, e passa a ser produzido somente pela primeira.

No período de safra agrícola do tomate (160° ao 280° dia), a caldeira ZAN é a preferencialmente acionada em relação às outras, e o modelo explora totalmente a capacidade diária dessa caldeira, para então acionar o segundo equipamento preferencial (caldeira CBC). E assim sucessivamente. Percebe-se também no gráfico a imposição do período de parada para manutenção realizado do 105° ao 156° sub-período.

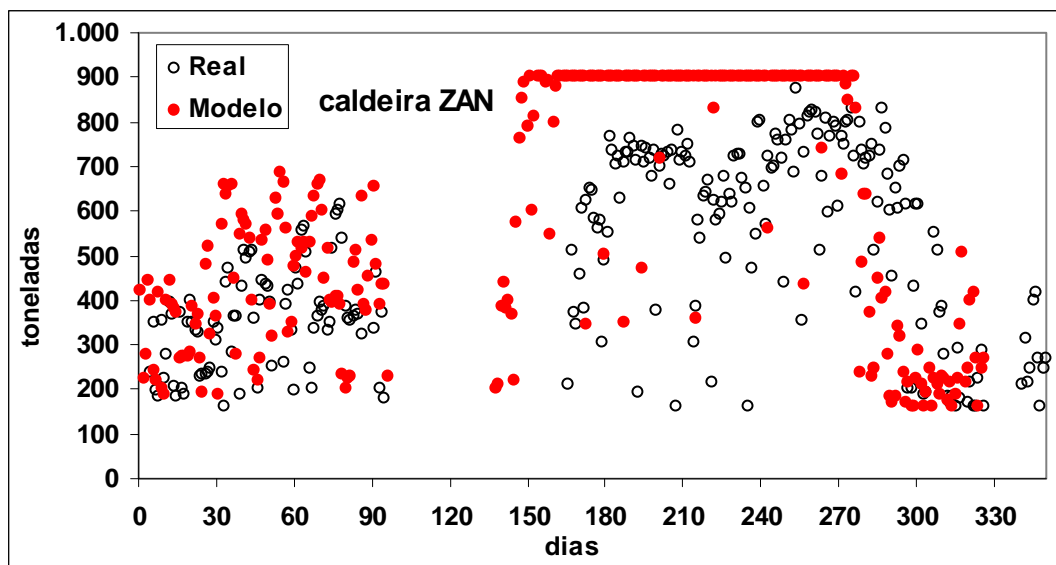


Figura 4.9. Produção de vapor na operação real e resultado pelo modelo para a caldeira ZAN (Fonte: dados da pesquisa)

O terceiro gráfico comparativo da operação real com o resultado do modelo (Figura 4.10) mostra a produção de vapor na caldeira Meppan (MEP). Essa caldeira teve grande modificação no perfil de seu funcionamento real em relação ao resultado do modelo.

Na operação real, a caldeira MEP é frequentemente utilizada na produção de quantidades inferiores a 100 toneladas de vapor para complementar a produção de uma demanda diária majoritariamente atendida pelas caldeiras CBC e ZAN. Por exemplo: em um dia no qual a demanda de vapor é de 600 toneladas, a operação real normalmente produziria 500 toneladas com uma das caldeiras CBC ou ZAN, e completaria a produção com 100 toneladas provenientes da MEP, ou seja, duas caldeiras ligadas para o atendimento de uma demanda diária de 600 toneladas. Entretanto, o modelo não faz tal decisão, e opta por acionar preferencialmente uma única caldeira de grande capacidade e produzir vapor até esgotar sua capacidade, para então colocar um segundo equipamento em funcionamento, para completar a possível demanda não atendida pela primeira caldeira.

Em outros experimentos computacionais, percebeu-se que a caldeira MEP é acionada preferencialmente para o atendimento de demandas diárias inferiores a 200 toneladas, uma vez que as caldeiras CBC e ZAN possuem restrições de quantidade mínima de geração de vapor para o adequado funcionamento. A caldeira ATA poderia atender a pequenas demandas de vapor (inferiores a 200 toneladas diárias), mas o modelo não a escolhe porque o seu custo de acionamento é muito maior em comparação ao custo de *start-up* da caldeira MEP.

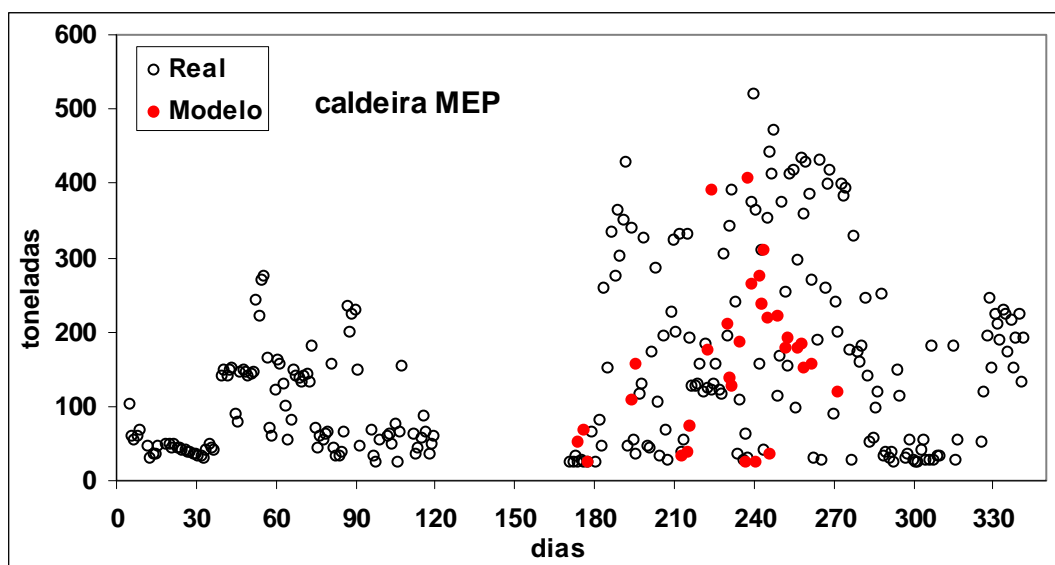


Figura 4.10. Produção de vapor na operação real e resultado do modelo para a caldeira MEP (Fonte: dados da pesquisa)

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 essa caldeira em nenhum sub-período. A Figura 4.7 mostra o funcionamento da caldeira ATA na operação real. Em relação aos custos exclusivamente de acionamento (*start-up*) de todas as caldeiras no sistema, a Tabela 4.13 apresenta a comparação entre a operação real e os resultados do modelo.

A redução no total dos acionamentos das caldeiras foi de 56,35%, passando de R\$ 43.440 para R\$ 18.960. Se considerarmos hipoteticamente a exclusão da caldeira ATA no sistema, o custo real de acionamento na operação fica em R\$ 16.440, contra o resultado do modelo em R\$ 18.960, ou seja, aumento de 15,33%. Apesar disso, os custos de aquecimento, que são apresentados a seguir, foram substancialmente reduzidos, compensando este ligeiro aumento. Esse resultado indica o quanto seria importante uma avaliação mais cuidadosa do funcionamento da caldeira ATA.

Tabela 4.13. Comparação entre os resultados da empresa e do modelo para os custos de acionamento (*start-up*)

	Operação real (R\$)	Resultado do modelo (R\$)	Diferença absoluta (R\$)	Diferença percentual (%)
	(A)	(B)	(B-A)	$((B/A)-1).100)$
CBC	4.200	7.800	+ 3.600	+ 85,7
ZAN	6.000	3.000	- 3.000	- 50,0
MEP	6.240	8.160	+ 1.920	+ 30,8
ATA	27.000	0	- 27.000	-
Total	43.440	18.960	- 24.480	- 56,4

Fonte: dados da pesquisa

Os custos para manter as caldeiras aquecidas também foram reduzidos nos resultados do modelo. A operação real gastou R\$ 351.000 no aquecimento de suas quatro caldeiras, enquanto que no modelo, o custo ficou em R\$ 193.160, ou seja, houve uma redução de 44,96%. A hipotética exclusão da caldeira ATA no sistema faz com que o custo do aquecimento passe para R\$ 263.640 na operação real, e apesar disso, o custo de aquecimento das três caldeiras proposto pelo modelo fica 26,73% inferior em comparação ao realizado pela empresa. A Tabela 4.14 apresenta os custos totais de *warm-up* para cada caldeira em todo o horizonte de planejamento.

Tabela 4.14. Comparação entre os resultados da empresa e do modelo para os custos de aquecimento (*warm-up*)

	Operação real (R\$)	Resultado do modelo (R\$)	Diferença absoluta (R\$)	Diferença percentual (%)
	(A)	(B)	(B-A)	$((B/A)-1).100$
CBC	77.200	66.400	- 10.800	- 13,9
ZAN	96.800	115.600	+ 18.800	+ 19,4
MEP	89.640	11.160	- 78.480	- 87,5
ATA	87.360	0	- 87.360	-
Total	351.000	193.160	- 157.840	- 44,9

Fonte: dados da pesquisa

A matriz de combustíveis consumidos na operação real também mostra algumas diferenças em relação àquela sugerida pelo modelo (Tabela 4.15). Na referida tabela é possível observar que tanto a operação real quanto o modelo utilizam o bagaço de cana como primeira opção dentre os combustíveis disponíveis. A lenha é o segundo combustível mais queimado e alimenta exclusivamente a caldeira MEP, a qual é a terceira opção na ordem de preferência no acionamento dos equipamentos. Essa é ligada, no modelo, somente quando as caldeiras ZAN e CBC não conseguem, juntas, atender a toda a demanda de vapor no sub-período.

Tabela 4.15. Comparação entre os resultados da empresa e do modelo para a matriz dos combustíveis consumidos

	Operação real (t ou m ³)	Participação percentual (%)	Modelo (t ou m ³)	Participação percentual (%)
BAG	96.637	84,3	114.373	97,3
ARR	1.865	3,0	885	1,4
LEN	11.150	8,0	1.920	1,3
CAV	2.771	3,8	0	0
OLE	226	0,9	0	0

Fonte: dados da pesquisa

A análise de sensibilidade dos preços dos combustíveis, na função objetivo, mostrou o intervalo de variação dos valores em que o resultado financeiro final do modelo

não sofre alterações, para os parâmetros especificados particularmente neste estudo de caso. A Tabela 4.16 apresenta tais resultados. Essa é uma análise relevante quando o objetivo é avaliar a competitividade, em termos de preço, entre os combustíveis.

Tabela 4.16. Intervalo de variação dos preços dos combustíveis para que não ocorra variação no valor final da função objetivo

	Preço atual (R\$/quantidade)	Preço mínimo (R\$/quantidade)	Preço máximo (R\$/quantidade)
BAG	45,00	43,20	45,00
CAV	135,00	99,81	Infinito
LEN	63,00	62,40	64,20
ARR	140,00	111,19	140,00
OLE	1.300,00	282,01	Infinito

Fonte: dados da pesquisa

Em relação à quantidade dos estoques dos combustíveis na fábrica, as Figuras 4.11 a 4.15 mostram como foi o perfil para cada um deles em todo o horizonte de planejamento na operação real e os resultados do modelo. Para o bagaço de cana, a operação real manteve, em média, uma quantidade de 2.906 toneladas, enquanto o modelo mantém 972 toneladas, ou seja, redução de 66,55%. Vale a pena destacar as semelhanças no perfil das curvas de estoque de bagaço da operação real e do modelo entre o 25º ao 43º período do horizonte de planejamento, quando existe a necessidade de se aumentar o estoque de combustível na fábrica para garantir os níveis de segurança no fornecimento.

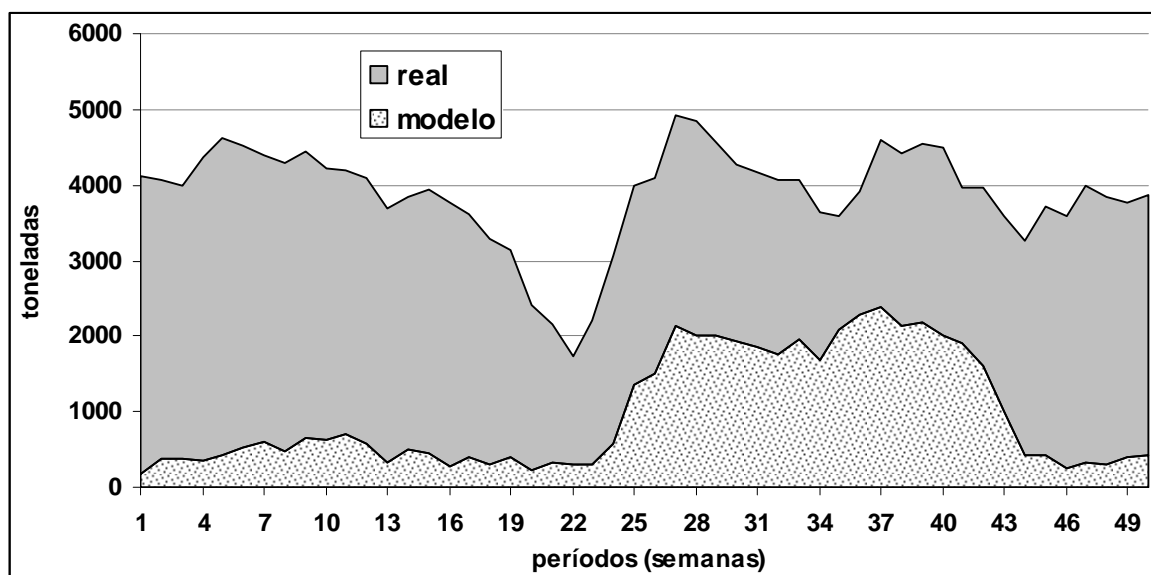


Figura 4.11. Estoque da empresa e resultado do modelo para o bagaço de cana (Fonte: dados da pesquisa)

A palha de arroz foi o terceiro combustível mais consumido no resultado do modelo e seu consumo ocorre principalmente nos períodos em que o bagaço de cana

encontra-se com umidade elevada. O gráfico da Figura 4.12 mostra o perfil do estoque de arroz na operação real e o resultado do modelo. De forma geral, percebe-se que o modelo faz um maior estoque de arroz do que a operação real, e os movimentos das curvas do estoque real e do modelo seguem o mesmo padrão nos treze primeiros períodos do horizonte de planejamento. O modelo também mantém alguma quantidade em estoque (14,8 toneladas) até o 42º período, para então consumi-la.

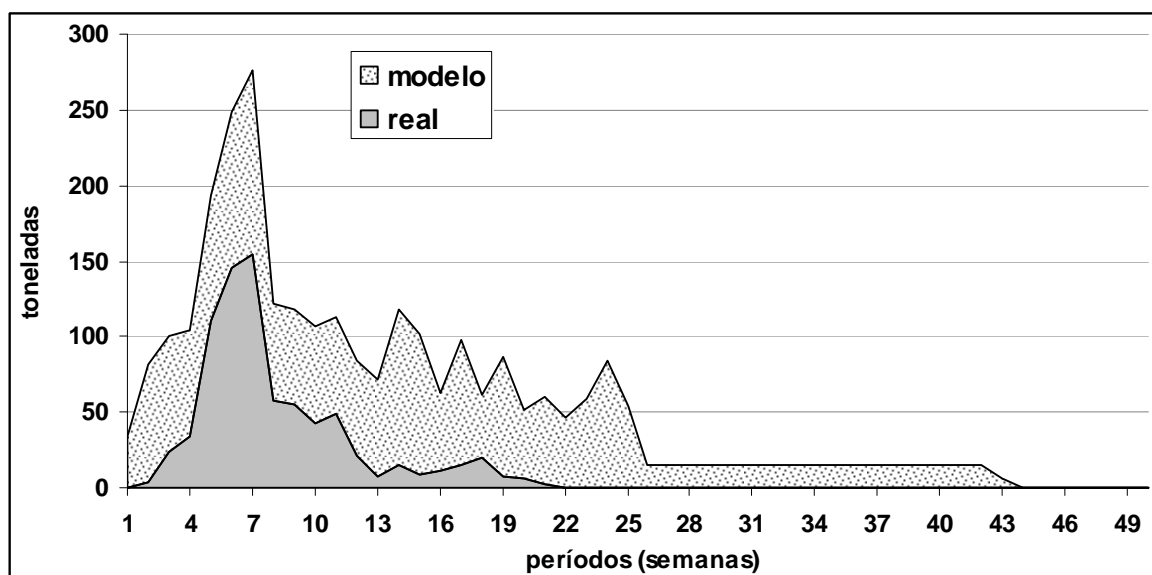


Figura 4.12. Estoque da empresa e resultado do modelo para o arroz (Fonte: dados da pesquisa)

A caldeira MEP, que queima exclusivamente lenha, é frequentemente acionada na operação real para pequenas produções de vapor, complementando a produção das caldeiras ZAN e CBC. A operação real costuma manter em estoque quantidades significativas desse combustível, e o seu perfil dos estoques nos cinquenta períodos (semanas) do horizonte de planejamento é apresentado na Figura 4.13.

O modelo faz estoques de lenha somente no 33º período (3,36 toneladas) e no 34º período (4,28 toneladas). O montante de 1.920 toneladas de lenha consumido pela caldeira MEP, no resultado do modelo, ocorreu com o abastecimento frequente e na medida da necessidade, evitando o dispêndio com estoques. Ou seja, *grosso modo*, o abastecimento de lenha no sistema, conforme sugerido pelo modelo, ocorre de maneira *just in time*.

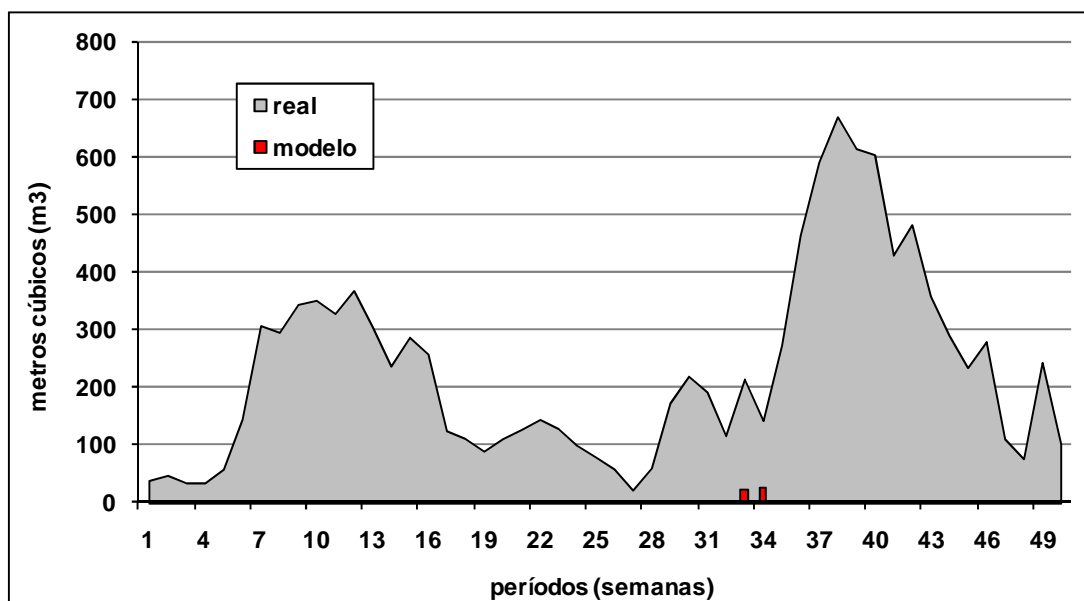


Figura 4.13. Estoque da empresa e resultado do modelo para a lenha (Fonte: dados da pesquisa)

O cavaco de madeira não foi consumido ou estocado na operação sugerida pelo modelo; entretanto, na operação real este combustível participa com 8% na matriz de consumo e seus estoques na fábrica não são desprezíveis. A Figura 4.14 apresenta o perfil do estoque de cavaco de madeira na fábrica durante o ano de referência e o proposto pelo modelo.

Os operadores das caldeiras declararam que o perfil de estoque do cavaco em 2009 não é o padrão praticado, pois normalmente a estratégia é manter quantidades aproximadas de 200 a 300 toneladas em estoque durante todos os meses do ano. Em 2009 foi realizado um grande estoque de cavaco com o receio de que houvesse falta de bagaço de cana durante o período de maior demanda (safra do tomate). Apesar de os contratos com os fornecedores de bagaço de cana estarem fechados, esses são frequentemente descumpridos por parte dos agentes do setor.

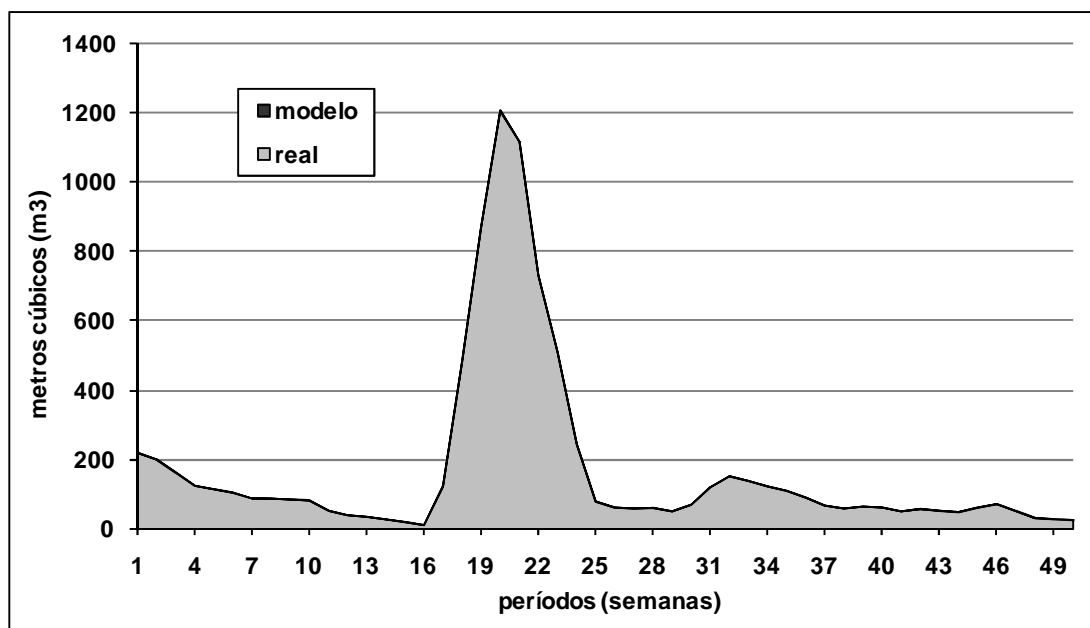


Figura 4.14. Estoque da empresa e resultado do modelo para o cavaco de madeira (Fonte: dados da pesquisa)

O óleo BPF também foi um combustível que não foi consumido ou estocado na operação sugerida pelo modelo. Entretanto, na operação real no ano de referência, o óleo teve participação de aproximadamente 1% na matriz de consumo, perfazendo 226 toneladas. A operação real normalmente mantém um estoque mínimo de 40 toneladas de óleo, e o seu consumo e reabastecimento ocorrem quase que exclusivamente durante a safra do tomate (25° período ao 46° período).

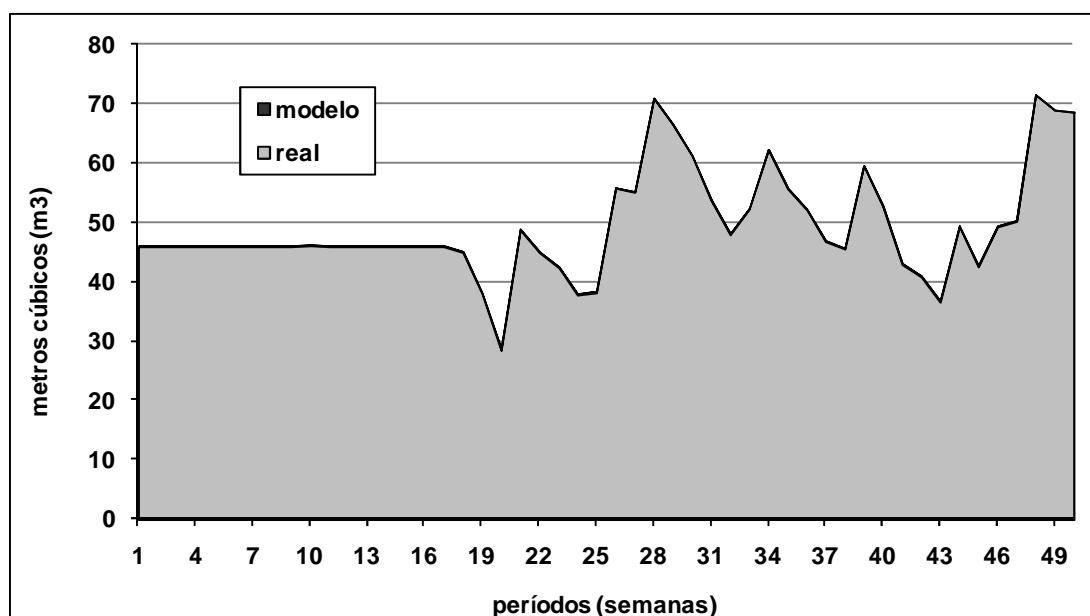


Figura 4.15. Estoque da empresa e resultado do modelo para o óleo BPF (Fonte: dados da pesquisa)

Os resultados econômicos da aplicação do modelo na situação do estudo de caso são resumidos na Tabela 4.17. A nova configuração de funcionamento do sistema de produção de vapor proposta pelo modelo gerou uma economia total de 19,94%. Ou seja, reduziu-se de R\$ 7.036.811 da operação real para o montante de R\$ 5.645.545, resultado do modelo.

Essa economia foi considerada significativa pelos responsáveis da operação, e a solução proposta pelo modelo parece ser viável na prática. Porém, foi formulada a questão da necessidade de um estudo sobre os riscos envolvidos em explorarem-se isoladamente as capacidades de cada uma das caldeiras, ao invés de se produzir vapor com vários equipamentos simultaneamente.

Tabela 4.17. Resultados financeiros da empresa e resultados do modelo: custos de estocagem, consumo dos combustíveis, acionamento e aquecimento das caldeiras

	Operação real (R\$)	Resultado do modelo (R\$)	Diferença absoluta (R\$)	Diferença percentual (%)
	(A)	(B)	(B-A)	$((B/A)-1).100)$
Combustível consumido	6.473.630	5.391.807	- 1.081.822	- 16,7
Acionamento (<i>start-up</i>)	43.440	18.960	- 24.480	- 56,3
Aquecimento (<i>warm-up</i>)	351.000	193.160	- 157.840	- 44,9
Custo de estocagem	168.741	50.618	- 118.122	- 70,0
Total	7.036.811	5.654.545	- 1.382.265	- 19,6

Fonte: dados da pesquisa

Os resultados da pesquisa até o momento são satisfatórios, contudo, cabe apontar algumas limitações que não foram abordadas neste trabalho, e talvez mereçam maior investimento em pesquisa.

A característica do modelo de acionar exclusivamente uma caldeira preferencial, e somente acionar um segundo equipamento quando a demanda de vapor no sub-período não for atendida totalmente pela primeira caldeira, faz com que os resultados do modelo e os praticados na realidade não sejam os mesmos na forma de acionamento dos equipamentos, salvo em alguns sub-períodos.

Uma possível melhoria na modelagem seria procurar balancear a geração de vapor em duas ou mais caldeiras em funcionamento simultâneo. Contudo, surge a questão de como fazer isso de maneira a não impor numericamente proporções de funcionamento entre os equipamentos, e permitir que o modelo decida o balanceamento utilizando-se múltiplas caldeiras. Um estudo que mostrasse que existem diferenças na eficiência e na segurança dos equipamentos na medida em que eles se aproximam da capacidade máxima de geração de vapor, poderia indicar caminhos para resolver esse problema.

Outra limitação do modelo diz respeito ao acionamento da caldeira ATA. A operação real aciona essa caldeira com baixa produção de vapor em muitos dias durante a safra do tomate. A principal razão não é atender à demanda de vapor da fábrica, mas garantir algum nível de segurança no caso de as caldeiras CBC, ZAN e MEP falharem em uma situação de alta demanda de vapor. E nessa situação, a caldeira ATA pode rapidamente atender à produção de vapor.

Um estudo de análise de risco contemplando probabilidades da ocorrência dos eventos que façam com que a caldeira ATA seja solicitada, e a incorporação dessa análise na modelagem do problema, possivelmente, tornaria as soluções do modelo mais realistas, do ponto de vista do nível de segurança, fazendo com que a caldeira ATA seja acionada, por segurança, mesmo sem produção de vapor para as linhas da fábrica.

Um experimento adicional foi feito fixando-se as variáveis de acionamento das caldeiras (S_{jn} e W_{jn}) de modo igual ao realizado pela operação real no ano de referência e, observaram-se resultados interessantes. O resultado do modelo nessa situação é parecido com aquele em que as variáveis estão livres, com a exceção de que o modelo realiza produção mínima de vapor nos momentos em que houve imposição do funcionamento das caldeiras e, conseqüentemente, o custo do sistema se elevou. A Tabela 4.18 mostra alguns dos resultados dos modelos com as variáveis de *start-up* e *warm-up* livres e fixadas *a priori*.

Tabela 4.18. Resultados do experimento com a fixação de variáveis do modelo

Produção de vapor do dia 283 (toneladas)			
	Operação real	Modelo com variáveis S_{jn} e W_{jn} livres	Modelo com variáveis S_{jn} e W_{jn} fixadas
CBC	652	681	658
ZAN	738	900	900
MEP	181	0	23
ATA	10	0	0
Vapor no dia 283 (t)	1.581	1.581	1.581
Vapor total* (t)	268.829	268.859	268.973
Combustíveis consumidos (t ou m ³)			
	Operação real	Modelo com variáveis S_{jn} e W_{jn} livres	Modelo com variáveis S_{jn} e W_{jn} fixadas
BAG	96.637	114.373	112.154
ARR	1.865	885	1.077
LEN	11.150	1.920	901
CAV	2.771	0	0
OLE	226	0	101
Custo total do sistema (R\$)	7.036.811	5.654.545	6.087.006

* quantidade de vapor total em todo horizonte de planejamento.

Fonte: dados da pesquisa

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa apresentada neste trabalho teve o objetivo de elaborar um modelo matemático de otimização para apoiar algumas importantes decisões na operação de produção de vapor com múltiplas caldeiras industriais. O modelo proposto teve como base o referencial teórico dos problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção. Utilizou-se uma formulação de programação linear inteira mista para escrever o modelo matemático.

Como mencionado anteriormente, sugere-se a aplicação do modelo para apoiar decisões no curto e médio prazo, apesar da possibilidade da visualização de decisões de planejamento estratégico, tais como a quantidade total de combustível a ser consumido em todo o horizonte de planejamento.

O estudo de caso ocorreu em uma empresa típica do setor de alimentos, o qual exige grande quantidade de vapor em seus processos. Acredita-se que os resultados deste trabalho também possam ser aplicados em outros segmentos industriais, que produzam e consumam vapor, procedendo-se com adaptações e ajustes no modelo. Diante da ausência de ferramentas, com base em pesquisa operacional, para apoiar as decisões no sistema estudado, a presente abordagem de modelagem configura-se como uma alternativa a ser considerada.

5.1 Perspectivas de pesquisa futura

Possivelmente as extensões mais significativas desta pesquisa sejam transformar os parâmetros demanda de vapor (d_n) e plano de manutenção das caldeiras (e_{jn}) em variáveis de decisão, e também considerar a incerteza nos parâmetros com a modelagem baseada em técnicas de otimização robusta. Alguns exemplos nessa linha de pesquisa – aplicação de modelos de otimização robusta – são os trabalhos de Paiva (2009) e Munhoz (2009), que aplicaram essa categoria de modelos em outros problemas agroindustriais.

A extensão de transformar a demanda de vapor (d_n) em variável de decisão é bastante plausível, uma vez que o parâmetro está atrelado ao planejamento dos produtos industriais, que demandam vapor em seu processo de transformação. Ou seja, a demanda de vapor é determinada pelo portfólio de produtos industrializados que a empresa decide produzir. Então, se o modelo contemplar o planejamento da produção industrial, o sistema de produção de vapor estará posicionado em um nível hierárquico abaixo e será resultado

do primeiro nível de decisão. A transformação do parâmetro do plano de manutenção (e_{jn}) passa pelo mesmo processo de transformação que o parâmetro (d_n), ou seja, a subordinação do plano de manutenção ao planejamento de produção industrial.

A extensão de considerar a incerteza no valor dos parâmetros que alimentam o modelo por meio de técnicas de otimização robusta pode ter como ponto de partida os modelos de referência de Soyster (1973), Bertsimas e Sim (2003 e 2004) e Bertsimas e Thiele (2006). Citam-se como os parâmetros mais relevantes para a incorporação da incerteza no presente problema: a oferta e disponibilidade de combustíveis, a umidade do bagaço de cana e a demanda de vapor pela fábrica.

Estudos que analisassem as estatísticas de quebras das caldeiras juntamente com a abordagem de otimização robusta poderiam contribuir para o desenvolvimento de um modelo que considerasse a possibilidade de falhas dos equipamentos. Possivelmente, nessa situação, o modelo acionaria caldeiras em alguns momentos, somente em regime de *warm-up*, para garantir algum nível de segurança ao sistema. Esse tipo de modelagem provavelmente traria resultados diferentes daqueles obtidos com o modelo determinístico.

Atualmente, a preocupação com as emissões de gás carbônico na atmosfera pelos sistemas produtivos tem motivado pesquisadores a realizarem desdobramentos de seus trabalhos, considerando aspectos ecológicos anteriormente deixados em segundo plano. Uma extensão interessante na pesquisa desta dissertação seria considerar um modelo multi-objetivo, no qual ao mesmo tempo em que se atendesse à demanda de vapor da fábrica, também se minimizasse a emissão de gás carbônico devido à queima dos combustíveis nas caldeiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKOFF, R.L. & SASIENI, M.W. **Fundamentals of operations research**. New York: Wiley, 1968.

AGGARWAL, A. & PARK, J.K. Improved algorithms for economic lot-size problem. **Operations Research**, v.41, n.3, p.549-571, 1993.

ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M. N. & CLARK, A. R. Lot sizing and furnace scheduling in small foundries. **Computers and Operations Research**, v.35, p.916-932, 2008.

ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M.N. & CLARK, A.R. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte. **Gestão & Produção**, v.11, n.2, p.165-176, 2004.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R. & YANASSE, H. **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2007.

ARMENTANO, V. A.; FRANÇA, P. M. & TOLEDO, F.M.B. A network flow model for capacitated lot sizing problem. **Omega (Oxford)**, v.27, n.2, p.275-284, 1999.

BARANY, I.; VAN ROY T. & WOLSEY L. Uncapacitated lot-sizing: the convex hull of solutions. **Mathematical Programming Study**, North Holland, v.22, p.32-43, 1984.

BARROSO, J.; BARRERAS, F.; AMAVEDA, H. & LOZANO, A. On the optimization of boiler efficiency using bagasse as fuel. **Fuel**, v.82, p.1451-1463, 2003.

BAZZO, E. Geração de vapor. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 1992.

BERTRAND, J.W.M. & FRANSOO, J.C. Modelling and simulations: operations management research methodologies using quantitative modelling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.2, p.241-264, 2002.

BERTSIMAS, D. & SIM, M. The price of robustness. **Operations Research**, v.52, n.1, p.35-53, 2004.

BERTSIMAS, D. & SIM, M. Robust discrete optimization and network flows. **Mathematical Programming Series B**. v.98, n.1-3, p.49-71, 2003

BERTSIMAS, D. & THIELE, A. A robust optimization approach to inventory theory. **Operations Research**, v.54, n.1, p.150-168, 2006.

BITRAN, G.R. & MATSUO, H. Approximation formulations for the single-product capacitated lot size problem. **Operations Research**, v.34, p.63-74, 1986.

BITRAN, G.R. & YANASSE, H.H. Computational complexity of the capacitated lot size problem. **Management Science**, v.28, p.1174-1186, 1982

BLAZEWICZ, J.; DOMSCHKE, W. & PESCH, E. The job shop scheduling problem: conventional and new solution techniques. **European Journal of Operational Research**, v.93, p.1-33, 1996.

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.

BOJIĆ, M. & DRAGIČEVIĆ, S. Optimization of steam boiler design. **Proceedings IMechE**, vol.220, Part A: J. Power and Energy, 2006, doi:10.1243/09576509JPE203.

BRAHIMI, N.; DAUZERE-PERES, S.; NAJID, N.M. & NORDLI, A. Single item lot sizing problems. **European Journal of Operational Research**, v.168, p.1-16, 2006.

BRUCKER, P. **Scheduling Algorithms**. Springer, Berlin, 1995.

BUJAK, J. Optimal control of energy losses in multi-boiler steam systems. **Energy**, v.34, p.1260-1270, 2009.

BUJAK, J. Mathematical modelling of a steam boiler room to research thermal efficiency. **Energy**, v.33, p.1779-1787, 2008.

BUSHNELL, D.J.; HALUZOK, C.; & DADKHAH-NIKOO A. In: (2nd ed.), Biomass fuel characterization: testing and evaluating the combustion characteristics of selected biomass fuels, **Bonneville Power Administration**, Corvallis, OR, 1989.

CATTRYSSE, D. & MAES, J. Set partitioning and column generation heuristics for capacitated dynamic lotsizing. **European Journal of Operational Research**, v.46, p.38-47, 1990.

CAIXETA-FILHO, J.V.; SWAAY NETO, J.M. & WAGEMAKER, A.P. Optimization of the production planning and trade of lily flowers. **Interfaces (Providence)**, INFORMS, v.32, n.1, p.35-46, 2002.

CHEN, W.H. & THIZY, J.M. Analysis of relaxations for multi-item capacitated lot-sizing problem. **Annals of Operations Research**, v.26, p.29-72, 1990.

CHENG, T.C.E.; DING, Q. & LIN, B.M.T. A concise survey of scheduling with time dependent processing time. **European Journal of Operational Research**, v.152, p.1-13, 2004.

CHINESE D. & MENEGHETTI, A. Optimisation models for decision support in the development of biomass-based industrial district-heating networks in Italy. **Applied Energy**, v.82, p.228-254, 2005.

DAHO, T.; VAITILINGOM, G. & SANOGO, O. Optimization of the combustion of blends of domestic fuel oil and cottonseed oil in a non-modified domestic boiler. **Fuel**, v.88, p.1261-1268, 2009.

DAUZERE-PERES, S. & LASSERE, J.B. Integration of lotsizing and scheduling decisions in a job-shop. **European Journal of Operational Research**, v.75, p.413-426, 1994.

DERMIBAS, A. Calculation of higher heating values of biomass fuels. **Fuel**, v.76, n.5, p.431-434, 1997.

DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS ESTADOS UNIDOS. Energy Efficiency and Renewable Energy. **Improving steam system performance: a sourcebook of industry**. 108p., October, 2004.

DIABY, M.; BAHL, H.C.; KARWAN, M.H. & ZIONTS, S. Capacitated lot-sizing and scheduling by Lagrangean relaxation. **European Journal of Operational Research**, v.59, p.444-458, 1992.

DIAS, J.; COSTA, M. & AZEVEDO, J.L.T. Test of a small domestic boiler using different pellets. **Biomass and Bioenergy**, v.26, p.531-539, 2004.

DOBSON, G. The economic lot scheduling problem: achieving feasibility using time varying lot sizes. **Operations Research**, v.35, p.764-771, 1987.

DREXL, A. & KIMMS, A. Lot sizing and scheduling – survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, v.99, n.2, p.221-235, 1997.

DREXL, A. & HAASE, K. Proportional lotsizing and scheduling. **International Journal of Production Economics**, v.40, p.73-87, 1995.

DUNN, A.C. & DU, Y.Y. Optimal load allocation of multiple fuel boilers. **ISA Transactions**, v.48, p.190-195, 2009.

EPPEN, G.D. & MARTIN, R.K. Solving multi-item capacitated lot-sizing problems using variable redefinition. **Operations Research**, v.35, p.832-848, 1987.

FEDERGRUEN, A. & TZUR, M.A. A simple forward algorithm to solve general dynamic lot sizing models with n periods in $O(n \log n)$ or $O(n)$ time. **Management Science**, v.37, n.8, p.909-925, 1991.

FERREIRA, D.; MORABITO, R. & RANGEL, S. Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot-scheduling models for small-scale soft drink plants. **Computers & Operations Research**, v.37, p.684-691, 2010.

FERREIRA, D.; MORABITO, R. & RANGEL, S. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v.196, p.697-706, 2009.

FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs. **European Journal of Operational Research**, v.75, p.395-404, 1994.

FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v.44, p.337-348, 1990.

FLEISCHMANN B. & MEYER H. The general lotsizing and scheduling problem. **OR Spektrum**, v.19, p.11-21, 1997.

FLORIAN, M.; LENSTRA, J.K. & RINNOOY KAN, A.H.G. Deterministic production planning: algorithms and complexity. **Management Science**, v.26, p.669-679, 1980.

GALLEGO, G. & JONEJA, D. Economic lot scheduling problem with raw material considerations. **Operational Research**, v.42, p.92-101, 1994.

GUSTAFSSON, S. Optimisation and simulation of building energy system. **Applied Thermal Engineering**, v.20, p.1731-1741, 2000.

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.

HAX, A. & CANDEA, D. **Production and inventory management**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J, 1984.

HINDI, K.S. Solving the CLSP by a Tabu Search Heuristic. **Journal of the Operational Research Society**, v.47, p.151-161, 1996.

JANS, R. & DEGRAEVE, Z. Modeling industrial lot sizing problems: a review. **International Journal of Production Research**, v.46, n.6, p.1619-1643, 2008.

JOHNSON, L.A. & MONTGOMERY, D.C. Operations research in production planning, scheduling and inventory control. New York: John Wiley & Sons, 1974.

KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. & HOFBAUER, H. **Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren**. 1st ed., 770 p., Springer, 2001.

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.

KARMARKAR, U.S.; KEKRE, S. & KEKRE, S. The dynamic lot-size problem with startup and reservation costs. **Operations Research**, v.35, n.3, p.389-398, 1987.

KAYLEN, M.S. An economic analysis of using alternative fuels in a mass burn boiler. **Bioresource Technology**, v.96, p.1943-1949, 2005.

KIMMS, A. Multi-level lot sizing and scheduling – methods for capacitated, dynamic, and deterministic models. **Physica**, Heidelberg, 1997.

KIRKA, O. & KOKTEN, M. A new heuristic approach for the multi-item dynamic lot sizing problem. **European Journal of Operational Research**, v.75, p.332-341, 1994.

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.

KUIK, R.; SALOMON, M. & WASSENHOVE, L. Batching Decisions: Structure and Models. **European Journal of Operational Research**, v.75, p.234-263, 1994.

LAW, A.M. & KELTON, W.D. **Simulation Modeling and Analysis**, 2^a Ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LE-VAN, W.B. Economical Steam Power. **Journal of Franklin Institute**, Dec., 1882.

LI, H.; NALIM, R. & HALDI, P.A. Thermal-economic optimization of a distributed multi-generation energy system – A case study of Beijing. **Applied Thermal Engineering**, v.26, p.709-719, 2006.

LIMA, L.M.; OLIVEIRA, A.M.K.; CARLETTI-FILHO, P.T.; FERRARI, R.C. & CAIXETA-FILHO, J.V. Avaliação da viabilidade técnica e econômica da utilização de biomassas como fonte energética alternativa em fornos industriais. **Revista de Economia e Agronegócio**, v.4, n.1, p.99- 119, 2006.

LORA, E.S. & ANDRADE, R.V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, p.777-778, 2009.

LUCHE, J. R. D.; MORABITO, R. & PUREZA, V. Combining process selection and lot sizing models for production scheduling of electrofused grains. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, v.26, p.421-443, 2009.

LUCHE, J. R. D. & MORABITO, R. Otimização na programação da produção de grãos eletrofundidos: Um estudo de caso. **Gestão & Produção**, v.12, n.1, p.135-149, 2005.

MCCARL, B.A.; MEERAUS, A.; EIJK, P.; DIRKSE, S. & STEACY, P. **McCarl GAMS User Guide**, version 22.9, 750 p., 2008.

MCCARL, B.A. & SPREEN, T.H. *Applied Mathematical Programming Using Algebraic System*, 567 p., 1997.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2007: ano base 2006**. 192 p., Rio de Janeiro, 2007, ISS 0101-6636.

MITROFF, I.; BETZ, F.; PONDY, L. & SAGASTI, F. On managing science in the systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon. **Interfaces**, v.4, n.3, p.46-58, 1974.

MORABITO, R. & PUREZA, Vitória. Modelagem e simulação. In: Paulo A. C. Miguel. (Org.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 1 ed., Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, v.1, p.165-194, 2010.

MORTENSEN, J.H.; MOELBAK, T.; ANDERSEN, P. & 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.

MUNHOZ, J.R. Otimização no planejamento agregado de produção em indústrias de processamento de suco concentrado congelado de laranja. São Carlos, 2009, 163 p. **Tese de Doutorado** (Doutorado em Engenharia de Produção) – DEP/UFSCar.

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.

NAHMIAS, S. **Production an Operations Analysis**. Irwin, Hoewood, IL, 1995.

NORDIN, A. Chemical Elemental characteristics of biomass fuels. **Biomass and Bioenergy**, v.6, n.5, p.339-347, 1994.

PAIVA, R.P.O. Um modelo baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. São Carlos, 2006. 184 p. **Dissertação de Mestrado** (Mestrado em Engenharia de Produção) – DEP/USFCar.

PAIVA, R.P.O. Modelagem do planejamento agregado da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético utilizando programação matemática e otimização robusta. São Carlos, 2009. 241 p. **Tese de Doutorado** (Doutorado em Engenharia de Produção) – DEP/USFCar.

PAIVA, R.P.O. & MORABITO, R. An optimization model for the aggregate production planning of a Brazilian sugar and ethanol milling company. **Annals of Operations Research**, v.169, n.1, p.117-130, 2009.

PINEDO, M. L. Planning and scheduling in manufacturing and services. New York: Springer, 2005.

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.

QUIRINO, W.F., *et al.* Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, n.89, p.100-106, 2005.

ROMEO, L.M. & GARETA, R. Neural network for evaluating boiler behaviour. **Applied Thermal Engineering**, v.26, p.1530-1536, 2006.

RUSINOWSKI, H. & STANEK, W. Neural modelling of steam boilers. **Energy Conversion and Management**, v.48, p.2802-2809, 2007.

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.

SALOMON, M.; KROON, L.G.; KUIK, R. & van WASSENHOVE, L.N. Some extensions of the discrete lotsizing and scheduling problem. **Management Science**, v.37, p.801-812, 1991.

SALOMON, M.; SOLOMON, M.M.; van WASSENHOVE, L.N.; DUMAS, Y.D. & DAUZERE-PERES, S. Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence dependent set-up costs and set-up times using the travelling salesman problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v.100, n.3, p.494-513, 1997.

SANTOSO, M.E.H.; NAZARUDDIN, Y.Y. & MUCHTADI, I.F. Boiler performance optimization using fuzzy logic controller. In **16th IFAC World Congress**, Prague, 2005, disponível em: <<http://www.ifac.cz/>>.

SHAPIRO, J.F. **Mathematical Programming Models and Methods for Production Planning and Scheduling**. Handbooks in Operational Research and Management Science, Graves, S.C. *et al.*, v.4, ed. Elsevier, p.371-443, 1993.

SLACK, N.; CHAMBER, S. & JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 2^a ed., Ailton Bonfim Brandão (trad.) São Paulo: Atlas, 2002.

SOYSTER, A.L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. **Operational Research**, v.21, p.1154-1157, 1973.

STAISS, C. & PEREIRA H. Biomassa: energia renovável na agricultura e no sector florestal. **Revista AGROS**, n.1, 2001.

STULTZ, S.C.; & KITTO, J.B. **Steam: its generation and use**. Babcock & Wilcox a McDermott Company, 40th edition, Barbeton, Ohio, USA, 1992.

THOMAS, L. J. & MCCLAIN, J.O. **An Overview of Production Planning**. Handbooks in Operational Research and Management Science, Graves, S.C. *et al.*, v.4, Elsevier, p.333-369, 1993.

TOLEDO, F.M.B. & ARMENTANO, V. A. A lagrangian-based heuristic for the capacitated lot sizing problem in parallel machines. **European Journal of Operational Research**, v.175, p.1070-1083, 2006.

TOSO, E.A.V.; MORABITO, R. & CLARK, A. R. Lot-Sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant. **Computers & Industrial Engineering**, v.57, p.813-821, 2009.

TOSO, E.A.V. & MORABITO, R. Otimização do dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção: Estudo de caso numa fábrica de rações. **Gestão & Produção**, v.12, n.2, p.203-217, 2005.

TRIGEIRO W.W.; THOMAS L.J. & MCCLAIN, J.O. Capacitated lot sizing with setup times. **Management Science**, v.35, n.3, p.353-366, 1989.

WAGELMANS, A.; van HOESEL, S. & KOLEN, A. Economic lotsizing: an $O(n \log n)$ algorithm that runs in linear time in the Wagner-Whitin case. **Operations Research**, v.40, p.145-156, 1992.

WAGNER, H.M. & WHITIN, T.M. Dynamic version of the economic lot size model. **Management Science**, v.5, n.1, p.89-96, 1958.

WILLIAMS, H.P. **Model Building in Mathematical Programming**. John Wiley & Sons, 3th ed., 1993.

WINSTON, W. **Operations Research: Applications and algorithms**. PWS-Kent, Boston, 1991.

WOLSEY, L.A. Uncapacitated lot-sizing problems with start-up costs. **Operations Research**, vol.37, n.5, p.741-747, 1989.

WOLSEY, L.A. MIP modelling of changeovers in production planning and scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, v.99, p.154-165, 1997.

ZIPKIN, P. Computing optimal lot sizes in the economic lot scheduling problem. **Operations Research**, v.39, p.56-63, 1991.

Apêndice A – Exemplo ilustrativo da implementação do modelo no GAMS

\$title Boiler Model - Dissertação de Mestrado de Cleber Rocco

```

sets
i suppliers / OR1, OR2, OR3, OR4, OR5, OR6 /
k fuels / BAG, CAV, ARR, LEN, OLE /
j boilers / CBC, ZAN, MEP, ATA /
t periods / t1*t5 /
n sub-periods / n1*n35 /
c(t,n) n belongs to N(t)
/
t1.(n1*n7)
t2.(n8*n14)
t3.(n15*n21)
t4.(n22*n28)
t5.(n29*n35) / ;

parameters
cs(j) start-up cost
/ CBC 600
  ZAN 600
  MEP 480
  ATA 1500 /

cw(j) warm-up cost
/ CBC 400
  ZAN 400
  MEP 360
  ATA 1040 /

bc(j) boilers daily capacity
/ CBC 890
  ZAN 900
  MEP 460
  ATA 720 /

lc(j) loss capacity due to start-up
/ CBC 445
  ZAN 450
  MEP 220
  ATA 240 /

m(j) minimum percentage of the full capacity for start-up
/ CBC .22
  ZAN .18
  MEP .05
  ATA .00 /

u(t) weekly bagasse umidity
/
t1 64.90
t2 65.70
t3 65.00
t4 63.80
t5 63.20 /

ce(k) fuel inventory capacity in the plant (ton)
/ BAG 4000
  CAV 1200
  ARR 250
  LEN 800
  OLE 100000 /

h(k) inventory cost for each fuel
/ BAG 0.25
  CAV 0.65
  ARR 0.70
  LEN 0.30
  OLE 6.50 /

ri(k) minimum fuel load
/ BAG 30
  CAV 30
  ARR 30
  LEN 30
  OLE 30 /

```

ra(k) maximum fuel daily reception
 / BAG 1500
 CAV 300
 ARR 300
 LEN 300
 OLE 300 /

rm(k) maximum fuel daily transportation from supplier
 / BAG 900
 CAV 900
 ARR 900
 LEN 900
 OLE 900 /

table a(j,k) which boiler is allowed to receive each fuel

	BAG	CAV	ARR	LEN	OLE
CBC	1	1	1	0	0
ZAN	1	1	1	0	0
MEP	1	0	0	1	0
ATA	0	0	0	0	1

 ;

table e(n,j) when each boiler is available to work

	CBC	ZAN	MEP	ATA
n1	0	1	1	0
n2	0	1	1	0
n3	0	1	1	0
n4	0	1	1	0
n5	0	1	1	0
n6	0	1	1	0
n7	0	1	1	0
n8	0	1	1	0
n9	0	1	1	0
n10	0	1	1	0
n11	0	1	1	0
n12	0	1	1	0
n13	0	1	1	0
n14	0	1	1	0
n15	0	1	1	0
n16	0	1	1	0
n17	0	1	1	0
n18	0	1	1	0
n19	0	1	1	0
n20	0	1	1	0
n21	0	1	1	0
n22	0	1	1	0
n23	0	1	1	0
n24	0	1	1	0
n25	0	1	1	0
n26	0	1	1	0
n27	0	1	1	0
n28	0	1	1	0
n29	0	1	1	0
n30	0	1	1	0
n31	0	1	1	0
n32	0	1	1	0
n33	0	1	1	0
n34	0	1	1	0
n35	0	1	1	0

 ;

table o(i,k,t) fuel availability over the weeks in each origin

	t1	t2	t3	t4	t5
OR1.BAG	500	500	500	500	500
OR2.BAG	500	500	500	500	500
OR3.BAG	500	500	500	500	500
OR4.BAG	500	500	500	500	500
OR5.BAG	500	500	500	500	500
OR6.CAV	500	500	500	500	500
OR6.ARR	500	500	500	500	500
OR6.LEN	500	500	500	500	500
OR6.OLE	500	500	500	500	500

 ;

table p(i,k,t) fuel price along the time

	t1	t2	t3	t4	t5
OR1.BAG	41.5	41.5	41.5	41.5	41.5
OR2.BAG	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2
OR3.BAG	35.2	35.2	35.2	35.2	35.2
OR4.BAG	39.7	39.7	39.7	39.7	39.7
OR5.BAG	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3
OR6.CAV	135	135	135	135	135
OR6.ARR	105	105	105	105	105

```

OR6.LEN    63.3   63.3   63.3   63.3   63.3
OR6.OLE    1300   1300   1300   1300   1300 ;

```

```

parameter contr(t) controle de estoque inicial
/
t1      1
t2      0
t3      0
t4      0
t5      0 / ;

```

```

table IN0(k,*) estoque inicial
      INinic
BAG   0
CAV   0
ARR   0
LEN   0
OLE   0 ;

```

```

parameter controf(t) controle de oferta inicial
/
t1      1
t2      0
t3      0
t4      0
t5      0 / ;

```

```

table o0(i,k,*) oferta inicial
      OInic
OR1.BAG 0000
OR2.BAG 0000
OR3.BAG 0000
OR4.BAG 0000
OR1.CAV 0000
OR2.ARR 0000
OR3.LEN 0000
OR4.OLE 0000 ;

```

```

parameters
d(n) daily steam demand
/
n1      0
n2      0
n3      0
n4      112
n5      291
n6      399
n7      477
n8      473
n9      400
n10     39
n11     412
n12     461
n13     462
n14     433
n15     427
n16     358
n17     15
n18     363
n19     325
n20     320
n21     325
n22     323
n23     303
n24     25
n25     309
n26     337
n27     361
n28     366
n29     359
n30     297
n31     26
n32     308
n33     406
n34     412
n35     445 / ;

```

```

parameter
pi(j,t) ;
pi('CBC',t) = 1.0 ;

```

```

pi('ZAN',t)$u(t) le 55) = 1.01 ;
pi('ZAN',t)$u(t) gt 55 and u(t) le 60) = 1.08 ;
pi('ZAN',t)$u(t) gt 60 and u(t) le 70) = 1.10 ;
pi('ZAN',t)$u(t) gt 70) = 1.12 ;
pi('MEP',t) = 1;
display pi;

parameter
vi(j,k,n);
loop((c(t,n),j)$u(t) > 52 and u(t) < 64 and a(j,'BAG') <> 0), vi(j,'BAG',n) =
(4.8716 -0.0482*u(t))*pi(j,t);
);
loop((c(t,n),j)$u(t) <= 52 and a(j,'BAG') <> 0), vi(j,'BAG',n) = 2.365 ;
);
loop((c(t,n),j)$u(t) >= 64 and a(j,'BAG') <> 0), vi(j,'BAG',n) = 1.786;
);
display vi;

loop(n,
vi(j,'LEN',n)$a(j,'LEN') = 1.8 ;
vi(j,'CAV',n)$a(j,'CAV') = 3.5 ;
vi(j,'ARR',n)$a(j,'ARR') = 4.0 ;
vi(j,'OLE',n)$a(j,'OLE') = 13.0 ;
);
display vi ;

parameters
vh(k,t);
loop(t,
vh('BAG',t) = (4.8716 -0.0482*u(t)) ;
vh('CAV',t) = 1.8 ;
vh('ARR',t) = 4.0 ;
vh('OLE',t) = 13.0 ;
);
display vh ;

variables
Z
Q(j,k,n)
IN(k,t)
TA(i,k,n)
S(n,j)
W(n,j)
L(i,n,k)
JN(i,k,t)
VP(n,j)
TR(i,k,t)
VP2(j)
VP3
QF(k)
SCOST(j)
WCOST(j)
VFUEL
VINVE
NSTARTUP(j)
NARMUP(j) ;

positive variables Q, IN, TA, VP, TR, VP2, QF, SCOST, WCOST, VFUEL, VINVE, JN,
NSTARTUP, NARMUP, VP3 ;
binary variables S, W, L ;

equations
totalcost
inventory
inventcapacity
inventsafety
supply
transplmin
transp2max
reception
demand
steam1min
steam2max
setup
steamtotal
steamtotal2
steamtotal3
fueltotal
transpweek
setuptotal

```



```

warmuptotal
totalVT
totalVH
boilerumidity1
boilerumidity2
bagacoMEP
ricelimit
riceinventory
numstartup
numwarmup ;

totalcost.. Z =e= sum((i,k,c(t,n)),p(i,k,t)*TA(i,k,n)) + sum((k,t),h(k)*IN(k,t)) +
sum((j,n),cs(j)*S(n,j)) + sum((j,n),cw(j)*W(n,j)) ;

inventory(k,t).. IN(k,t) =e= (IN0(k,"EInic")$contr(t) + IN(k,t-1)$ (contr(t) eq 0)) -
sum((j,c(t,n)),e(n,j)*a(j,k)*Q(j,k,n)) + sum((i,c(t,n)),TA(i,k,n)) ;

inventcapacity(k,t)..IN(k,t) =l= ce(k) ;

inventsafety(t)..sum(k,vh(k,t)*IN(k,t)) =g= 0.4285*sum(c(t,n),d(n)) ;

supply(i,k,t)..JN(i,k,t) =e= o(i,k,t) + (o0(i,k,"OInic")$controf(t) + JN(i,k,t-
1)$ (controf(t) eq 0)) - sum(c(t,n),TA(i,k,n)) ;

transp1min(i,k,n)..TA(i,k,n) =g= ri(k)*L(i,n,k) ;

transp2max(i,k,n)..TA(i,k,n) =l= rm(k)*L(i,n,k) ;

reception(k,n)..sum(i,TA(i,k,n)) =l= ra(k) ;

demand(n)..sum((j,k),vi(j,k,n)*e(n,j)*a(j,k)*Q(j,k,n)) =g= d(n) ;

steamlmin(j,n)..sum(k,vi(j,k,n)*e(n,j)*a(j,k)*Q(j,k,n)) =g= bc(j)*m(j)*e(n,j)*W(n,j)
;

steam2max(j,n)..sum(k,vi(j,k,n)*e(n,j)*a(j,k)*Q(j,k,n)) =l= (bc(j)*e(n,j)*W(n,j) -
lc(j)*e(n,j)*S(n,j)) ;

setup(n,j)..S(n,j) =g= W(n,j)*e(n,j) - W(n-1,j)*e(n-1,j) ;

boilerumidity1(j,n)$ (ord(j) le 2 and vi(j,"BAG",n) le 2.076)..
Q(j,"ARR",n)*e(n,j)*a(j,"ARR") + Q(j,"CAV",n)*e(n,j)*a(j,"CAV") =g=
0.05*Q(j,"BAG",n)*e(n,j)*a(j,"BAG") ;
boilerumidity2(j,n)$ (ord(j) le 2 and vi(j,"BAG",n) le 2.076)..
Q(j,"ARR",n)*e(n,j)*a(j,"ARR") + Q(j,"CAV",n)*e(n,j)*a(j,"CAV") =l=
0.1*Q(j,"BAG",n)*e(n,j)*a(j,"BAG") ;
bagacoMEP("MEP",n).. Q("MEP","LEN",n) =g= 3*Q("MEP","BAG",n) ;
ricelimit(j,n)$ (e(n,j) <> 0 and a(j,"ARR") eq 1).. Q(j,"ARR",n) =l=
0.1*sum((k),e(n,j)*a(j,k)*Q(j,k,n)) ;
riceinventory(t)$ (ord(t) <> 50)..IN('BAG',t) =g= 5*IN('ARR',t);

steamtotal(n,j)$ (e(n,j) <> 0).. VP(n,j) =e= sum(k,vi(j,k,n)*e(n,j)*a(j,k)*Q(j,k,n))
;
steamtotal2(j).. VP2(j) =e= sum((k,n),vi(j,k,n)*e(n,j)*a(j,k)*Q(j,k,n)) ;
steamtotal3..VP3 =e= sum((j,k,n),vi(j,k,n)*e(n,j)*a(j,k)*Q(j,k,n)) ;
fueltotal(k).. QF(k) =e= sum((j,n)$ (e(n,j) <> 0 and a(j,k) eq
1),e(n,j)*a(j,k)*Q(j,k,n));
transpweek(i,k,t).. TR(i,k,t) =e= sum(c(t,n),TA(i,k,n)) ;
setuptotal(j)..SCOST(j) =e= sum(n,cs(j)*S(n,j)) ;
warmuptotal(j)..WCOST(j) =e= sum(n,cw(j)*W(n,j)) ;
totalVT.. VFUEL =e= sum((i,k,t,c(t,n)),p(i,k,t)*TA(i,k,n)) ;
totalVH.. VINVE =e= sum((k,t),h(k)*IN(k,t)) ;
numstartup(j).. NSTARTUP(j) =e= sum(n,S(n,j)) ;
numwarmup(j).. NWARMUP(j) =e= sum(n,W(n,j)) ;

option limrow = 100 ;
option limcol = 0 ;
options OPTCR = 0.0, ITERLIM = 50000, RESLIM = 50000, DECIMALS = 2 ;
model boilerfinal /all/;
solve boilerfinal using MIP minimizing Z ;
display Q.1, IN.1, TA.1, S.1, W.1, L.1, Z.1, JN.1, VP.1 ;
display VP2.1, QF.1, TR.1, VFUEL.1, VINVE.1, SCOST.1, WCOST.1, VP3.1 ;
display NSTARTUP.1, NWARMUP.1 ;

```

Apêndice B – Resultados do modelo no caso do exemplo ilustrativo

GAMS Rev 149 x86/MS Windows 01/05/11 16:40:19 Page 6
 Boiler Model for Steam Production Operations - Dissertação de Mestrado de Cleber Rocco
 Solution Report SOLVE boilerfinal Using MIP From line 387

S O L V E S U M M A R Y

```

MODEL  boilerfinal          OBJECTIVE  Z
TYPE    MIP                 DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER  CPLEX              FROM LINE  387
  
```

```

**** SOLVER STATUS      1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS      1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE    256964.8837
  
```

```

RESOURCE USAGE, LIMIT    0.656    50000.000
ITERATION COUNT, LIMIT  355      50000
  
```

ILOG CPLEX Dec 24, 2007 WIN.CP.CP 22.6 035.037.041.vis For Cplex 11.0
 Cplex 11.0.0, GAMS Link 34
 Cplex licensed for 1 use of lp, qp, mip and barrier, with 4 parallel threads.

Proven optimal solution.

```

MIP Solution:      256964.883724    (236 iterations, 21 nodes)
Final Solve:      256964.883724    (119 iterations)
  
```

```

Best possible:    256964.883724
Absolute gap:     0.000000
Relative gap:     0.000000
  
```

389 VARIABLE Q.L

	n4	n5	n6	n7	n8	n9
ZAN.BAG	81.57	146.53	200.91	240.18	238.17	201.41
ZAN.ARR	4.08	7.33	10.05	12.01	11.91	10.07
+	n10	n11	n12	n13	n14	n15
ZAN.BAG		207.45	232.12	232.63	218.03	215.01
ZAN.ARR		10.37	11.61	11.63	10.90	10.75
MEP.BAG	5.43					
MEP.LEN	16.28					
+	n16	n17	n18	n19	n20	n21
ZAN.BAG	180.26		182.78	163.65	161.13	163.65
ZAN.ARR	9.01		9.14	8.18	8.06	8.18
MEP.BAG		3.20				
MEP.LEN		9.60				
+	n22	n23	n24	n25	n26	n27
ZAN.BAG	148.43	139.24		142.00	154.87	165.89
ZAN.ARR	7.42	6.96		7.10	7.74	8.29
MEP.BAG			3.47			
MEP.LEN			10.42			
+	n28	n29	n30	n31	n32	n33
ZAN.BAG	168.19	162.60	134.52		139.50	183.89
ZAN.ARR	8.41	8.13	6.73		6.97	9.19
MEP.BAG				3.60		
MEP.LEN				10.80		
+	n34	n35				
ZAN.BAG	186.60	201.55				
ZAN.ARR	9.33	10.08				

---- 389 VARIABLE IN.L

	t1	t2	t3	t4	t5
BAG	314.35	532.90	420.03	482.78	528.89
ARR		59.96	45.93		
LEN		30.82	21.22	10.80	

---- 389 VARIABLE TA.L

	n1	n6	n7	n8	n10	n12
OR1.BAG			383.54			153.78
OR3.BAG		500.00				
OR4.BAG	100.00				900.00	
OR6.ARR		33.46		126.45		
OR6.LEN					47.10	
+	n13	n15	n18	n19	n23	n24
OR3.BAG	500.00			456.80	484.84	
OR4.BAG			500.00			500.00
OR6.ARR		39.29				
+	n29	n31	n33			
OR3.BAG			558.36			
OR4.BAG	500.00					
OR6.ARR		50.43				

---- 389 VARIABLE S.L

	ZAN	MEP
n4	1.00	
n10		1.00
n11	1.00	
n17		1.00
n18	1.00	
n24		1.00
n25	1.00	
n31		1.00
n32	1.00	

---- 389 VARIABLE W.L

	ZAN	MEP
n4	1.00	
n5	1.00	
n6	1.00	
n7	1.00	
n8	1.00	
n9	1.00	
n10		1.00
n11	1.00	
n12	1.00	
n13	1.00	
n14	1.00	
n15	1.00	
n16	1.00	
n17		1.00
n18	1.00	
n19	1.00	
n20	1.00	
n21	1.00	
n22	1.00	
n23	1.00	
n24		1.00
n25	1.00	
n26	1.00	
n27	1.00	
n28	1.00	
n29	1.00	
n30	1.00	
n31		1.00
n32	1.00	

n33 1.00
n34 1.00
n35 1.00

---- 389 VARIABLE L.L

	BAG	ARR	LEN
OR1.n7	1.00		
OR1.n12	1.00		
OR3.n6	1.00		
OR3.n13	1.00		
OR3.n19	1.00		
OR3.n23	1.00		
OR3.n33	1.00		
OR4.n1	1.00		
OR4.n10	1.00		
OR4.n18	1.00		
OR4.n24	1.00		
OR4.n29	1.00		
OR6.n6		1.00	
OR6.n8		1.00	
OR6.n10			1.00
OR6.n15		1.00	
OR6.n31		1.00	

---- 389 VARIABLE Z.L = 256964.88

---- 389 VARIABLE JN.L

	t1	t2	t3	t4	t5
OR1.BAG	116.46	462.68	962.68	1462.68	1962.68
OR2.BAG	500.00	1000.00	1500.00	2000.00	2500.00
OR3.BAG			43.20	58.36	
OR4.BAG	400.00				
OR5.BAG	500.00	1000.00	1500.00	2000.00	2500.00
OR6.CAV	500.00	1000.00	1500.00	2000.00	2500.00
OR6.ARR	466.54	840.09	1300.80	1800.80	2250.36
OR6.LEN	500.00	952.90	1452.90	1952.90	2452.90
OR6.OLE	500.00	1000.00	1500.00	2000.00	2500.00

---- 389 VARIABLE VP.L

	ZAN	MEP
n4	162.00	
n5	291.00	
n6	399.00	
n7	477.00	
n8	473.00	
n9	400.00	
n10		39.00
n11	412.00	
n12	461.00	
n13	462.00	
n14	433.00	
n15	427.00	
n16	358.00	
n17		23.00
n18	363.00	
n19	325.00	
n20	320.00	
n21	325.00	
n22	323.00	
n23	303.00	
n24		25.00
n25	309.00	
n26	337.00	
n27	361.00	
n28	366.00	
n29	359.00	
n30	297.00	
n31		26.00
n32	308.00	
n33	406.00	
n34	412.00	
n35	445.00	

```

----- 390 VARIABLE VP2.L
ZAN 10314.00,    MEP  113.00

----- 390 VARIABLE QF.L
BAG 5008.43,    ARR  249.64,    LEN  47.10

----- 390 VARIABLE TR.L
          t1          t2          t3          t4          t5
OR1.BAG    383.54    153.78
OR3.BAG    500.00    500.00    456.80    484.84    558.36
OR4.BAG    100.00    900.00    500.00    500.00    500.00
OR6.ARR     33.46    126.45     39.29
OR6.LEN
          47.10

----- 390 VARIABLE VFUEL.L          = 238742.17
      VARIABLE VINVE.L          =    662.71

----- 390 VARIABLE SCOST.L
ZAN 3000.00,    MEP 1920.00

----- 390 VARIABLE WCOST.L
ZAN 11200.00,    MEP 1440.00

----- 390 VARIABLE VP3.L          = 10427.00

----- 391 VARIABLE NSTARTUP.L
ZAN 5.00,    MEP 4.00

----- 391 VARIABLE NWARMUP.L
ZAN 28.00,    MEP 4.00

EXECUTION TIME          =          0.031 SECONDS          3 Mb  WIN226-149 Dec 19, 2007

USER: Reinaldo Morabito          G080414:1726AP-WIN
      Universidade Federal de Sao Carlos, Production Engineering DC6998
      License for teaching and research at degree granting institutions

```

Anexo A – Dados da demanda de vapor no ano de referência (2009)

n	d_n	n	d_n	n	d_n	n	d_n	n	d_n	n	d_n	n	d_n
1	0	51	538	101	390	151	0	201	1477	251	1976	301	638
2	0	52	399	102	436	152	332	202	1691	252	1788	302	370
3	0	53	242	103	436	153	328	203	1780	253	1444	303	230
4	0	54	220	104	227	154	409	204	1640	254	2197	304	246
5	339	55	270	105	437	155	377	205	1418	255	2055	305	24
6	452	56	532	106	504	156	453	206	1672	256	1212	306	24
7	496	57	555	107	525	157	202	207	547	257	1710	307	730
8	484	58	490	108	373	158	0	208	1623	258	2065	308	538
9	522	59	390	109	0	159	212	209	1787	259	2026	309	404
10	402	60	320	110	0	160	386	210	1898	260	2099	310	416
11	0	61	630	111	0	161	439	211	1766	261	2009	311	280
12	442	62	590	112	383	162	379	212	1947	262	1824	312	186
13	469	63	686	113	408	163	401	213	1501	263	757	313	170
14	508	64	664	114	482	164	368	214	666	264	1559	314	186
15	485	65	560	115	337	165	218	215	1530	265	2010	315	343
16	498	66	326	116	296	166	573	216	1518	266	1402	316	318
17	402	67	348	117	432	167	956	217	1443	267	1627	317	236
18	0	68	477	118	439	168	851	218	1404	268	1961	318	0
19	500	69	499	119	398	169	890	219	1390	269	1982	319	0
20	546	70	527	120	420	170	984	220	1465	270	1198	320	172
21	448	71	516	121	0	171	1194	221	912	271	1757	321	217
22	434	72	527	122	0	172	603	222	1475	272	1701	322	162
23	429	73	464	123	0	173	1006	223	1375	273	1961	323	162
24	291	74	530	124	408	174	1259	224	1398	274	1972	324	222
25	0	75	586	125	512	175	1286	225	1413	275	1940	325	286
26	132	76	633	126	503	176	1170	226	1505	276	1528	326	213
27	136	77	661	127	494	177	1085	227	1328	277	623	327	119
28	147	78	670	128	524	178	1089	228	1133	278	1940	328	194
29	150	79	602	129	368	179	549	229	1813	279	1589	329	246
30	110	80	448	130	0	180	996	230	1596	280	1566	330	151
31	35	81	514	131	403	181	1074	231	1829	281	1594	331	224
32	271	82	397	132	508	182	1670	232	1862	282	1671	332	210
33	192	83	395	133	464	183	1490	233	1613	283	1540	333	187
34	481	84	410	134	329	184	1756	234	1413	284	741	334	230
35	519	85	407	135	0	185	1577	235	556	285	1107	335	222
36	324	86	389	136	0	186	1105	236	1238	286	1553	336	173
37	404	87	235	137	0	187	1750	237	1261	287	1739	337	216
38	365	88	200	138	336	188	1623	238	1150	288	1903	338	152
39	190	89	222	139	425	189	1789	239	1964	289	1326	339	190
40	570	90	230	140	428	190	1841	240	2180	290	1268	340	223
41	660	91	483	141	423	191	1788	241	1717	291	682	341	345
42	635	92	509	142	386	192	1858	242	1024	292	1236	342	505
43	654	93	423	143	190	193	543	243	1720	293	1079	343	215
44	661	94	631	144	180	194	1803	244	1404	294	1043	344	245
45	448	95	390	145	310	195	1606	245	1694	295	1096	345	401
46	277	96	378	146	308	196	1610	246	2001	296	1118	346	417
47	545	97	453	147	296	197	1699	247	1927	297	831	347	269
48	590	98	534	148	339	198	1692	248	1916	298	237	348	162
49	579	99	654	149	320	199	1776	249	1246	299	483	349	247
50	571	100	480	150	220	200	700	250	1682	300	639	350	271

Anexo B – Equações matemáticas do modelo proposto

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \left(p_{ikt} \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \right) + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T h_k I_{kt} + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N c_s S_{jn} + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N c_w W_{jn} \quad (3.1)$$

$$I_{kt} = I_{k(t-1)} - \sum_{j=1}^J \sum_{n=l(t)}^{u(t)} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} + \sum_{i=1}^I \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \quad \text{para } \forall k, t \quad (3.2)$$

$$I_{kt} \leq c e_k \quad \text{para } \forall k, t \quad (3.3)$$

$$\sum_{k=1}^K v h_{kt} I_{kt} \geq \beta \cdot \sum_{n=l(t)}^{u(t)} d_n \quad \text{para } \forall t \quad (3.4)$$

$$M_{ikt} = o_{ikt} + M_{ik(t-1)} - \sum_{n=l(t)}^{u(t)} T_{ikn} \quad \text{para } \forall i, k, t \quad (3.5)$$

$$T_{ikn} \geq r i_k L_{ikn} \quad \text{para } \forall i, k, n \quad (3.6)$$

$$T_{ikn} \leq r m_{ik} L_{ikn} \quad \text{para } \forall i, k, n \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^I T_{ikn} \leq r a_k \quad \text{para } \forall k, n \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K v i_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \geq d_n \quad \text{para } \forall n \quad (3.9)$$

$$\sum_{k=1}^K v i_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \geq b c_j m_j e_{jn} W_{jn} \quad \text{para } \forall j, n \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=1}^K v i_{jkn} e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \leq (b c_j W_{jn} - l c_j S_{jn}) e_{jn} \quad \text{para } \forall j, n \quad (3.11)$$

$$S_{jn} \geq W_{jn} e_{jn} - W_{j(n-1)} e_{j(n-1)} \quad \text{para } \forall j, n \quad (3.12)$$

$$S_{jn}, W_{jn}, L_{ikn} \in \{0, 1\}; \quad Q_{jkn} \geq 0; \quad M_{ikt} \geq 0; \quad T_{ikn} \geq 0; \quad I_{kt} \geq 0. \quad (3.13)$$

$$S_{jn} \leq W_{jn} \quad \text{para } \forall j, n \quad (3.14)$$

$$e_{jn} a_{j,ARR} \cdot Q_{j,ARR,n} + e_{jn} a_{j,CAV} \cdot Q_{j,CAV,n} \geq \lambda \cdot (e_{jn} a_{j,BAG} \cdot Q_{j,BAG,n}) \quad \text{para } \forall j, n \text{ e} \quad (3.19)$$

para $v i_{j,BAG,n} \leq \phi$, tal que $v i_{j,BAG,n}$ é função da umidade u_t

$$e_{jn} a_{j,ARR} Q_{j,ARR,n} + e_{jn} a_{j,CAV} Q_{j,CAV,n} \leq \mu (e_{jn} a_{j,BAG} Q_{j,BAG,n}) \text{ para } \forall j, n \text{ e} \quad (3.20)$$

para $vi_{j,BAG,n} \leq \phi$, tal que $vi_{j,BAG,n}$ é função da umidade u_t

$$e_{jn} a_{j,ARR} Q_{j,ARR,n} \leq \omega \left(\sum_{k=1}^K e_{jn} a_{jk} Q_{jkn} \right) \text{ para } \forall j, n \quad (3.21)$$

$$Q_{j,LEN,n} \geq \rho \cdot Q_{j,BAG,n} \text{ para } \forall n \quad (3.22)$$

$$I_{BAG,t} \geq \theta \cdot I_{ARR,t} \text{ para } \forall t \quad (3.23)$$