



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**  
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**JOÃO PAULO SMITH NAZARIO NASCIMENTO**

**PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO DE VAPOR EM MÚLTIPLAS  
CALDEIRAS INDUSTRIAIS**

**Maceió**  
**2014**

**JOÃO PAULO SMITH NAZARIO NASCIMENTO**

**PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO DE VAPOR EM MÚLTIPLAS  
CALDEIRAS INDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada ao curso de  
pós-graduação em Engenharia  
Química, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Química.

**Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sandra Vieira Carvalho**

**Coorientador: Dr. Julio Inácio H. Tavares Neto**

**Maceió  
2014**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

**Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade**

N244p Nascimento, João Paulo Smith Nazário.  
Planejamento da produção de vapor em múltiplas caldeiras industriais / João Paulo Smith Nazário Nascimento. – 2014.  
51 f. : il.

Orientadora: Sandra Helena Vieira de Carvalho.  
Co-orientador: Júlio Inácio Holanda Tavares Neto.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2014.

Bibliografia: f. 49-51.

1. Caldeiras. 2. Geração de vapor. 3. Programação linear .  
4. Programação da produção. I. Título.

CDU: 66.048.911

João Paulo Smith Nazario Nascimento

## PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO DE VAPOR EM MÚLTIPLAS CALDEIRAS INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada à Universidade  
Federal de Alagoas, como requisito para a  
obtenção do Título de Mestre em Engenharia  
Química.

Aprovada em: Maceió, 26 de Maio de 2014.

### BANCA EXAMINADORA



*Sandra Carvalho*

Profª. Drª. Sandra Helena Vieira de Carvalho  
(PPGEQ/UFAL – Orientadora)

*Júlio Inácio Holanda T. Neto*

Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares Neto  
(BRASKEM – Coorientador)

*João Inácio Soletti*

Prof. Dr. João Inácio Soletti  
(PPGEQ/UFAL)

*Henrique Pacca Loureiro Luna*

Prof. Dr. Henrique Pacca Loureiro Luna  
(UFAL - membro externo)

Trabalho dedicado primeiramente a Deus, aos meus amigos, professores, lideranças na empresa onde trabalho e familiares, em especial minha avó Maria e mãe Adenildes, e minha namorada Jacqueline Lins.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por estar sempre ao meu lado, provendo condições pra que eu pudesse seguir em frente ultrapassando barreiras e alcançando objetivos.

A minha avó Maria Nazario de Lima e minha namorada Jacqueline Lins, pela compreensão, amor, companheirismo e solidariedade seja nas horas mais difíceis ou nos momentos de felicidade e por me incentivarem e apoiarem a sempre investir cada vez mais em meus estudos.

Aos professores docentes do Curso de Engenharia Química da UFAL, que me por transmitiram seu conhecimento durante a graduação e também ao longo do curso de mestrado, ressaltando a Dr<sup>a</sup>. Sandra Helena Carvalho e o Dr. João Inácio Soletti, que além de excelentes professores são referências de pesquisadores e ótimos orientadores.

Ao coorientador Júlio Inácio pela compreensão e apoio para o ingresso no curso de mestrado, além da contribuição substancial de sua experiência em algumas matérias do curso e definição do escopo do presente estudo.

A Ana Virgínia Amorim e Antônio de Pádua, por sua compreensão e provisão de tempo, apoio e incentivo a conclusão do curso de mestrado.

A meus amigos Fabian, Vito, Alessandro e João Correia, pelo companheirismo e amizade, sejam nos momentos de lazer ou nos momentos de estudo e trabalho.

## RESUMO

Em aplicações industriais, a energia térmica é obtida em equipamentos específicos, tais como caldeiras ou aquecedores, e distribuída aos locais de utilização através de um fluido de transporte, em sua maioria o vapor de água. A maior parte das indústrias utiliza várias caldeiras para suprir a demanda de vapor, havendo custos operacionais atrelados. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo matemático de otimização em uma linguagem de modelagem algébrica, utilizando o *software* GAMS®. O intuito foi desenvolver uma ferramenta computacional sistêmica para apoiar as decisões operacionais de geração de vapor. De um modo geral, as indústrias não operam todos os geradores de vapor simultaneamente. A escolha do equipamento a ser utilizado, dentre os existentes na planta, é função da demanda de vapor dos processos industriais. No que diz respeito à utilização desses equipamentos, não se considera ferramentas de auxílio estruturadas, ficando as decisões embasadas na experiência dos envolvidos nas atividades operacionais. O modelo permitirá identificar situações específicas para acionamento e desligamento, bem como a carga em cada uma das caldeiras. Além disso, o modelo fornece estimativas dos custos de produção de vapor. Os ajustes e a avaliação da aplicabilidade do modelo ocorreram por meio de um estudo de caso realizado na unidade de produção de Policloreto de Viníla da empresa BRASKEM S/A. Os dados reais fornecidos pela empresa foram comparados aos resultados gerados pelo modelo, sendo avaliada sua eficácia. Os resultados obtidos comprovaram o sucesso na aplicabilidade do modelo, sendo obtido um direcionamento, considerando a geração de vapor no horizonte de um ano. A eficiência de aplicação da ferramenta como embasamento para a operação de geração de vapor foi comprovada para horizontes de planejamento longos, podendo ser aplicado a períodos mais curtos, como meses ou semanas.

**Palavras-Chave:** Caldeiras, Geração de vapor, Programação linear inteira mista, Programação da produção.

## ABSTRACT

In industrial applications, the thermal energy is obtained in specific equipment, such as boilers or heaters, and distributed to local usage through some transport fluid, mostly water vapor. Most industries use multiple boilers to supply its steam demand, having tied operational costs. In this dissertation, a mathematical optimization model in a language of algebraic modeling using GAMS® software was developed. The aim is to develop a computational systemic tool to support operational decisions of the steam generation. Generally, manufacturers do not operate simultaneously all of its steam generators. The choice of equipment to be used is a function of industrial process demand of steam. Regarding the use of such equipment, is not considered structured aid tools. The decisions were based on the experience of those who were involved in operational activities. The model allows to identify specific situations to startup and shutdown, as well as the load on each boiler. In addition, the model provides estimates of steam production costs. Adjustments and evaluation of the applicability of the model occurred through a study case in a factory of the polyvinyl chloride production company, called Braskem S/A. The actual data provided by the company were compared to the results generated by the model, being evaluated their effectiveness. The results proved the model successful applicability, providing a direction, considering the generation of steam in the one year horizon. The application efficiency of the tool as a basis for the operation of steam generation was proved for long planning horizons and can be applied to shorter periods, such as weeks or months.

**Keywords:** Boilers. Steam generating. Mixed integer linear programming. Production scheduling.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	9
2 OBJETIVOS .....	11
2.1 Objetivo Geral .....	11
2.2 Objetivos Específicos .....	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1 Modelagem Matemática e Problemas de Produção.....	12
3.1.1 Dimensionamento de Lotes de Produção ( <i>Lot Sizing Problem</i> ) .....	16
3.1.2 Modelo Geral de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes.....	19
3.2 Pesquisa Operacional Aplicada a Caldeiras .....	24
3.2.1 Modelo de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes para Geradores de Vapor.....	25
4 METODOLOGIA .....	28
4.1 Modelagem do Sistema de Produção de Vapor .....	29
4.2 Aplicação do Modelo ao Processo Industrial.....	36
5 RESULTADOS .....	37
5.1 Operação Real X Resultados do Modelo .....	39
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTA PARA FUTUROS TRABALHOS.....	46
7 REFERÊNCIAS .....	49

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Divisões para definição de períodos e subperíodos	20
<b>Figura 2.</b> Diagrama da modelagem do sistema de produção de vapor.	32
<b>Figura 3.</b> Perfil diário da demanda de vapor da unidade de PVC.	39

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Características técnicas dos geradores de vapor.	38
<b>Tabela 2.</b> Dados de produção de vapor.	40
<b>Tabela 3.</b> Custos com <i>startup</i> por caldeira.	41
<b>Tabela 4.</b> Quantitativo anual de <i>startup</i> (Partidas).	42
<b>Tabela 5.</b> Consumo de combustíveis.	44
<b>Tabela 6.</b> Custos com consumo de combustíveis.	44
<b>Tabela 7.</b> Custos de produção de vapor das caldeiras no período considerado.	45

## 1. INTRODUÇÃO

As indústrias químicas utilizam o vapor saturado como principal vetor de transferência de calor para incremento de temperatura em equipamentos como reatores químicos, trocadores de calor, evaporadores, secadores, dentre outros.

A depender da magnitude da demanda de vapor de algumas fábricas, pode haver várias caldeiras gerando vapor, sendo o momento de acionamento e de desligamento de cada um desses equipamentos, função de parâmetros como oscilação da demanda de vapor e custo de partida/operação de cada caldeira.

Os critérios relacionados às decisões de quanto, quando e em quais equipamentos produzir, são geralmente oriundos da experiência empírica da equipe operacional, sendo tal experiência e eventos indesejáveis que resultem em paradas, os únicos critérios utilizados para definição do planejamento operacional das caldeiras. Não é habitual nas empresas a utilização de uma sistemática que permita, por exemplo, preparar uma projeção futura dos perfis de parâmetros de suma importância no gerenciamento industrial, como: produção de vapor; custos atrelados à geração de vapor; consumo de combustíveis; disponibilidade de matérias primas e fornecedores; capacidade de estocagem de combustíveis, etc.

A previsão fidedigna dos parâmetros acima citados é de grande valia para obtenção de uma previsão do comportamento futuro do sistema de geração de vapor em termos de quanto produzir e quais os custos atrelados.

Uma sistemática ainda mais poderosa (e ainda menos difundida) é utilizar ferramentas de modelagem e otimização para modelar o sistema de geração de vapor em equações matemáticas e resolvê-las de forma otimizada, obtendo assim diretrizes tais quais: seleção e carga de cada caldeira; estimativas de produção em determinados períodos de tempo (horizonte de planejamento) e estimativa de custos atrelados à geração de vapor para o horizonte de planejamento considerado. A projeção citada acima, figura como um retrato futuro bastante aproximado da realidade, uma vez que as equações englobam considerações e restrições matemáticas que representam as condições reais de operação.

O presente trabalho visa desenvolver uma ferramenta sistêmica que forneça o direcionamento operacional necessário para obtenção de previsões otimizadas de produção, consumos e custos do sistema de geração de vapor em múltiplas caldeiras.

O modelo computacional do sistema de geração de vapor foi desenvolvido e implementado no *software* GAMS® (*General Algebraic Model System*), sendo os resultados apresentados por meio de planilha.

Como estudo de caso, o modelo foi aplicado a uma unidade industrial da Braskem S/A, considerando o horizonte de um ano. Fornecendo dados de seleção e carga das caldeiras, estimativa otimizada de produção, consumo de combustíveis e custos de operação, sendo, portanto, capaz de auxiliar na gestão industrial de geração de vapor.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Desenvolvimento de uma ferramenta para planejamento de geração de vapor baseada na resolução otimizada de um modelo matemático computacional, provendo assim, embasamento às principais decisões na operação de geração de vapor.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desenvolvimento de um modelo matemático que relacione as variáveis do sistema de geração de vapor por meio de equações matemáticas de forma concisa;
- Implementação de um programa computacional para resolução do modelo desenvolvido;
- Avaliação do modelo quando aplicado a uma unidade industrial;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são discutidos trabalhos científicos que se referem a problemas de aplicação de pesquisa operacional para modelagem de sistemas de produção de vapor em caldeiras. O intuito é fornecer o embasamento teórico necessário ao entendimento do problema de otimização resolvido na presente dissertação, além de fornecer uma revisão acerca do “estado da arte” de estudos relacionados a modelagem matemática de problemas de sequenciamento e dimensionamento de lotes de produção.

#### 3.1. MODELAGEM MATEMÁTICA E PROBLEMAS DE PRODUÇÃO

Estratégias de produção são moldadas abordando o equilíbrio entre os recursos de produção (suprimento) e as requisições de produto oriundas do mercado (demandas). As atividades de planejamento e controle da produção (PCP) proporcionam subsídios (sistemas, procedimentos e decisões) que conectam as duas vertentes: suprimento e demanda.

Têm-se recursos operacionais suficientes para fornecimento ao consumidor, mas estes não estão direcionados, pois quem irá determinar onde aplicar os recursos operacionais citados é a demanda dos consumidores. Em suma suprimento e demanda, possuem o mesmo propósito: produzir no intuito de satisfazer os seus consumidores, por isso ambas as vertentes devem ser conectadas e tratadas juntas (SLACK et al, 2002).

Os problemas de programação e controle de produção procuram trazer as melhores alternativas para se produzir o suficiente atendendo às demandas em determinado prazo. Esse prazo se trata do período considerado pelo planejamento de produção, sendo conhecido como horizonte de planejamento.

Segundo Slack et al. (2002) ao longo do horizonte de planejamento, a natureza do planejamento e controle de produção (PCP) se modifica, sendo possível classificar os problemas de PCP em três níveis, relacionados a extensão do período de tempo a ser considerado. Estes níveis são: curto, longo e médio prazo. Zattar (2004) denomina esses níveis como planejamento estratégico (longo prazo), planejamento tático (médio prazo) e planejamento operacional (curto prazo).

Em se tratando do longo prazo, o planejamento é realizado por parte da administração (gerência e/ou direção) de produção, que definem metas relativas às pretensões a serem

alçadas e quais os recursos que serão necessários para alcançá-las. Trata-se de um evento de caráter preliminar, tendo, por consequência, pouco a ser controlado e muito a se planejar, sendo aplicada maior ênfase ao planejamento em detrimento ao controle. Neste nível de planejamento são determinados os produtos finais a serem produzidos e suas respectivas quantidades em determinados períodos mais longos de tempo. A secção destes períodos em subdivisões fornecem informações necessárias para dar início ao planejamento de médio prazo (RITZMAN E KRAJEWSKY, 2004).

No planejamento e controle de médio prazo, há um maior foco em se detalhar o planejamento. São definidos, por exemplo, quantitativos de recursos necessários para que a produção possa ocorrer, o quanto produzir em determinado período de tempo, e quais são os níveis de estoque. Períodos considerados como de médio prazo geralmente se referem a um horizonte quantificado em meses.

Já as decisões de curto prazo relacionadas ao PCP englobam o monitoramento das atividades em uma escala de tempo curta, de semanas, dias ou turnos. O intuito é focar ações para que a produção ocorra da maneira mais fidedigna ao que foi planejado, ou seja, o planejamento operacional cria condições para adequada realização dos trabalhos rotineiros diários da empresa.

Independente do horizonte de planejamento os problemas de PCP necessitam da escolha das melhores alternativas de planejamento entre as disponíveis, para que se consiga tomar a melhor decisão com os recursos disponíveis. Para auxiliar nas decisões relacionadas ao PCP, tem-se utilizado amplamente a modelagem matemática baseada em técnicas/fundamentos de Pesquisa Operacional (PO).

A PO é uma ciência aplicada, cujo foco é a resolução de problemas reais, em que se procura introduzir elementos de racionalidade nos processos de tomada de decisão, sem negligenciar, no entanto, os elementos subjetivos e de enquadramento organizacional que caracterizam os problemas.

Na concepção de Schramm e Pinto (2005), pode ser denominada de modelo, uma notação matemática, onde são mapeadas as relações entre as variáveis sejam elas controláveis (manipulável ou controlável de forma plena pelo responsável pelas decisões) ou incontroláveis (alheia ao controle de quem toma as decisões), e o objetivo vinculado ao sistema de produção, sendo este, em geral, o custo (caso se deseje uma minimização), ou o lucro (para casos de maximização).

Logo, pesquisa operacional (PO) trata da modelagem utilizando lógicas de programação matemática, considerando nuances objetivas e subjetivas, para representar sistemas de produção.

Para planejamento de decisões nos âmbitos operacional e tático (curto e médio prazo, respectivamente) uma das abordagens mais utilizadas para tratar problemas em gestão de produção e operações vem sendo a pesquisa operacional utilizando a modelagem por programação matemática. (ROCCO, 2011).

A modelagem matemática aborda decisões descrevendo o sistema estudado por meio de equações e restrições com intuito de representar o sistema de forma a modelar seu comportamento. Possuindo-se o modelo que descreva o comportamento do sistema mapeado é possível realizar ajustes por meio de técnicas de otimização para que estes operem de maneira mais “enxuta”, ou seja, reduzindo ao máximo os custos e/ou aumentando ao máximo os lucros.

Na literatura voltada à gerência da produção e pesquisa operacional são encontrados diversos modelos matemáticos que abordam problemas de planejamento e controle da produção, dentre eles o trabalho de Bertrand e Fransoo (2002) sobre gerenciamento de pesquisa operacional utilizando metodologias para modelagem quantitativa cita as origens históricas da pesquisa operacional e de seu gerenciamento. O artigo trata de uma análise crítica acerca do foco aplicado pelo gerenciamento de pesquisa operacional no rigor matemático em detrimento ao rigor que deveria ser imposto a metodologia científica a ser utilizada na criação do modelo matemático.

Moraes (2005) foca o problema da mistura (blendagem) para a composição de lotes de produtos de minério de ferro, estocados nos pátios da mina Cauê, em Minas Gerais, pertencente à empresa Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). No trabalho foi preparado um modelo de programação linear por metas visando à determinação dos locais de armazenamento de produto estocado, para garantir que a mistura satisfaça às restrições operacionais do pátio, de demanda preestabelecidos pelo cliente e ao mesmo tempo atenda aos limites de especificações de qualidade. O modelo proposto demonstrou resultados computacionais confiáveis que comprovaram a possibilidade de prover metodologias que substituem, com ganho de produtividade, os tradicionais métodos de tentativa e erro, implicando em melhorias na composição dos lotes.

Schramm e Pinto (2005) desenvolveram através de um estudo de caso realizado em uma indústria de calçados, um modelo de programação linear inteira (modelagem matemática computacional onde as variáveis relevantes podem ser expressas por equações e inequações lineares) foi desenvolvido com a finalidade de resolver determinados tipos de problemas, onde as variáveis não podem assumir valores contínuos. O programa objetivou e alcançou a maximização do lucro da empresa, fornecendo o quantitativo de pares de calçados que deveriam ser produzidos diariamente. Como resultado se pôde extrair outras informações do modelo, além de se obter maximização dos lucros.

Os escritos de Bastos (2006) abordaram, através de estudo de caso em uma fábrica da Michelin no Rio de Janeiro, o cálculo de lotes de produção utilizando um método resolvido através do Microsoft Excel Solver. O intuito foi evitar a perda de rendimento global da fábrica devido a não utilização de lotes de produção no planejamento de um equipamento.

Foi desenvolvido um método de cálculo de lotes de produção delimitados pela capacidade de estocagem utilizando o código de otimização não linear de gradiente reduzido genérico (GRG2), desenvolvido por pesquisadores americanos das universidades do Texas e de Cleveland (Leon Lasdon e Allan Waren, respectivamente). O cálculo dos lotes focou no menor número de *set up* a serem executados, porém considerando restrições como tempo de validade dos produtos, capacidade de estocagem e consumo diário de cada produto.

Os lotes econômicos definidos implicaram numa redução do número de *set up* diários de 20 para 9, representando 55% de ganho. Além do que, a disponibilidade do equipamento em questão aumentou de 65% para 77% e houve uma imensa redução das perdas no rendimento global da fábrica por esse equipamento (o valor caiu de 2% para 0,3%). Assim, se pôde observar que a aplicação da equação desenvolvida resultou em ganhos substanciais para o rendimento global da fábrica, no aumento do resultado operacional e minimização dos custos de produção, minimizando os *set ups* e respeitando as restrições impostas pela área de estocagem.

A grande maioria dos trabalhos de pesquisa operacional discutidos até o momento converge para duas vertentes principais. Uma delas está relacionada à determinação de diretrizes relacionadas à definição de quantitativos de produção e momento de produzir, evitando desperdícios e atendendo à demanda, ou seja, ao dimensionamento de lotes de produção. A outra se refere à determinação da ordem de produção dos lotes de forma a otimizar a utilização de recursos minimizando perdas, como por exemplo reduzindo os

tempos de preparação para produção de novos lotes (*set ups*), já que estes reduzem a produtividade, ou seja, trata-se de sequenciar a produção dos lotes de produção. O entendimento de ambas as vertentes foi de suma importância para o desenvolvimento desta dissertação, portanto, os próximos tópicos se destinam ao detalhamento das duas vertentes citadas.

### **3.1.1. Dimensionamento de lotes de produção (*Lot Sizing Problem*)**

Problemas de dimensionamento de lotes de produção (*Lot Sizing Problem* – LSP) abrangem planejar a operação de produção definindo diretrizes em horizontes de tempo pré-determinados, ou seja, trata-se de definir o quanto produzir de cada tipo de produto em cada período, considerando as condições operacionais, visando atender à demanda prevista da forma mais otimizada possível (TOSO, 2008).

Assim, trata-se de determinar quando e quanto produzir de cada produto, levando-se em conta fatores importantes como custos de armazenamento dos itens e custo de produção, além do tempo de preparação das máquinas, atendendo aos prazos estabelecidos e respeitando, no entanto, a capacidade limitada de fabricação.

Os problemas de dimensionamento estão associados a uma das grandes dificuldades do PCP (Planejamento e Controle da Produção), que é conseguir flexibilidade nas operações produtivas, abordando, portanto, um dos grandes desafios para indústrias de manufatura, principalmente as que possuem algumas peculiaridades como, por exemplo, a sazonalidade na demanda por produtos e oferta de matérias primas; a perecibilidade dos produtos e matérias primas; uma grande quantidade de produtos disputando os mesmos recursos produtivos, ou risco de contaminação residual nas linhas de produção (TOSO, 2008).

Bastos (2006) cita que o problema de dimensionamento de lotes (LSP) consiste, de forma geral, em determinar o que e quanto produzir, ajustando a capacidade produtiva às variações de demanda, se valendo de apenas duas alternativas disponíveis. Essas alternativas podem ser classificadas em termos de viabilidade financeira, sendo que uma delas é a considerada financeiramente viável – antecipação da produção nos períodos de folga (utilização de estoques) – e a outra não (aumento da capacidade pela aquisição de mais máquinas).

Algumas características a serem consideradas para modelar os problemas de dimensionamento de lotes tornam esses problemas classificáveis em grupos, conforme descrito a seguir.

Por exemplo, em relação ao número de itens (tipos de produto) que o sistema de produção está projetado para produzir, o problema pode ser classificado como de único item (*Single Item Lot Sizing Scheduling Problem* – SILSP) ou multi-itens (*Multi-Item Lot Sizing Scheduling Problem* – MILSP).

Outras classificações são usualmente aplicadas, como a definição de existência de restrições de capacidades e recursos. Em caso de haver limitação de itens como mão-de-obra, máquinas, equipamentos, capital, dentre outros vários, a serem consideradas no modelo, define-se o problema como capacitado (*Capacitated lot sizing Problem* – CLSP), caso não haja considerações sobre tais limitações são então considerados não capacitados (*Uncapacitated lot sizing Problem* – UCLSP). Em Bitran e Yanasse (1982) e em Trigeiro et al. (1989) são discutidos especificamente algoritmos de modelos de dimensionamento de lotes capacitados, sendo alguns modelos não capacitados discutidos por Wolsey (1989).

Quanto à demanda podem ser definidas duas classificações. Problemas de demanda dinâmica, quando a mesma varia ao longo do tempo e de demanda estacionária, quando esta é invariável ao longo do tempo.

Também se podem classificar os problemas considerando o horizonte de planejamento, em problemas de horizontes finito ou infinito. Esta classificação se cruza com aquela em relação a demanda, já que, horizontes de planejamento infinitos são em geral empregados com demanda estacionária, enquanto que os finitos geralmente são utilizados quando a demanda é dinâmica.

Outra classificação importante é baseada na estrutura de preparação de máquina para produção (*set up*). Pode-se considerar que a sequência de produção dos lotes não tem influência nos tempos e custos de preparação de máquina para um lote, assim esses problemas são classificados como possuidores de estrutura simples de *Set up*. O contrário disto são os problemas de estruturas complexas de *Set up*.

Kawamura (2011) descreve alguns tipos de problema híbridos de dimensionamento de lotes. Esses problemas não se classificam unicamente como nenhum descrito nos parágrafos anteriores, por possuírem algumas características de vários deles. Dentre os problemas que não possuem uma relação completamente única com um dos tipos de problemas existentes, o

mais importante no trabalho acadêmico representado por esta dissertação é o GLSP (*General Lot Sizing and Scheduling Problem* - GLSP). O GLSP é uma integração entre o dimensionamento e sequenciamento de lotes de diversos tipos de produto no sistema de produção com uma única máquina que possui sua capacidade com limitações. A presente dissertação foi construída com base na modelagem de Rocco (2011) onde o mesmo realiza uma adaptação do GLSP para otimizar um sistema de produção de vapor. O trabalho de Rocco será discutido com maiores detalhes na seção 3.2. Nos tópicos a seguir serão detalhados primeiramente os problemas de sequenciamento de lotes para então logo a seguir detalhar a relação de integração entre sequenciamento e dimensionamento de lotes de produção.

No mais pode ser citada a diversidade de trabalhos que se voltam para problemas de dimensionamento de lotes (LSP) e seus algoritmos, como os de Arenales et al. (2004), Jans e Degraeve (2008), Kuik et al. (1994), Salomon e Wassenhove (1994) e Bastos (2006), são encontrados na literatura.

A outra vertente, no que se refere a planejamento e controle de produção, são os problemas de sequenciamento de produção, que se relacionam diretamente com os problemas de LSP.

Os problemas de sequenciamento e de programação de lotes (*sequencing and scheduling* - SP) podem ser definidos como a melhor alocação de recursos de produção disponíveis ao longo do tempo para melhor satisfazer um conjunto de critérios, ou seja, determinar em que ordem produzir os lotes de forma a minimizar os tempos de preparação, que diminuem a capacidade produtiva (BASTOS, 2006). Normalmente, o problema de sequenciamento envolve um conjunto de tarefas a serem executadas, e a consideração de critérios que podem imprimir uma sequencia racional à produção.

O sequenciamento da produção (SP) funciona na implementação de ordem de priorização de processamento, realização de tarefas e de alocação de recursos para produção de determinados lotes, baseada em informações sobre características dos lotes, informações sobre as condições do sistema de produção e priorização da demanda de cada um dos clientes.

Cheng et al. (2004); Johnson e Montgomery (1974); Hax e Candea (1984); Graves et al. (1993); Gershwin (1994); Nahmias (1995) e Pinedo (2005), são exemplos de autores de trabalhos relacionados a sequenciamento de produção.

Na grande maioria dos casos, em ambientes produtivos, decisões de SP (*sequencing and scheduling Problem*) e modelos LSP (*Lot Sizing Problem*) necessitam ser combinados, uma vez que há muitos aspectos correlacionados entre elas que tornam difícil a adaptação isolada desses modelos em situações reais, apesar de que, na literatura, existe segregação das famílias de modelos LSP e SP. (DREXL E KIMMS, 1997).

Esta dissertação se encaixa nos problemas de dimensionamento e sequenciamento da produção de lotes de vapor em múltiplas máquinas paralelas (caldeiras industriais), considerando custos de preparação para produzir (*Set up*). Trata-se, portanto, de uma abordagem integrada entre dimensionamento e sequenciamento de lotes utilizando um algoritmo adaptado de uma classe de problemas chamados de problemas gerais de dimensionamento e sequenciamento de lotes (*General Lot Sizing and Scheduling Problems*), descritos mais detalhadamente a seguir.

### **3.1.2. Modelo Geral de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes**

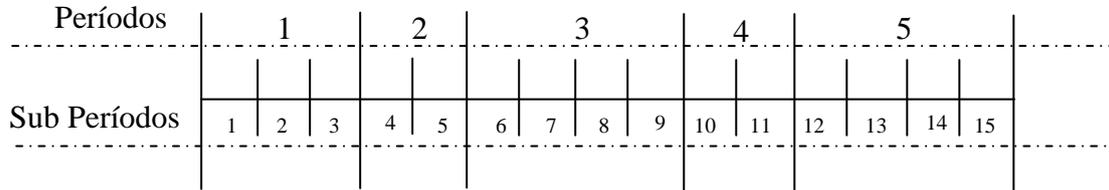
Segundo Kawamura (2011) a demanda dinâmica e conhecida para o horizonte de planejamento considerado, a produção de múltiplos produtos, um sistema produtivo com restrições de capacidade e a ocorrência de *set up* entre a produção de lotes de produtos diferentes, caracterizam um modelo GSLP (*General Lot Sizing and Scheduling Problem – GLSP*).

Outra característica importante do GSLP é abordada em uma discussão acerca da modelagem GLSP encontrada em Fleischmann e Meyer (1997) citada em Rocco (2011), na qual a composição do horizonte de planejamento é dividida em macropériosodos que por sua vez são subdivididos em períodos de menor tamanho (micro períodos ou subperíodos).

Tem-se a substituição de uma variável conhecida dos modelos clássicos de dimensionamento e sequenciamento de lotes, a produção de determinado produto em um determinado período  $t$ , por uma nova variável, a produção de determinado produto em um determinado subperíodo  $n$ , ou seja, para contabilização da produção no período faz-se o somatório de todos os lotes produzidos em cada um dos subperíodos  $n$ , pertencentes ao período  $t$ . Assim, o tamanho do subperíodo torna-se uma variável de decisão do modelo.

Na Figura 1, baseada em Rocco (2011), tem-se um esquemático de como são divididos os períodos e subperíodos para o exemplo de  $N = 15$ .

Figura 1 - Divisões para definição de períodos e subperíodos



Fonte: ROCCO, 2011.

A revisão de Drexl e Kimms (1997) apresenta formulação de um modelo de GLSP descrito pelas equações detalhadas a seguir.

A minimização dos custos de *set up* e estocagem dos produtos (respectivamente) é o intuito da função objetivo (Equação 1). Para representar matematicamente os custos de *set up* na função  $Z$ , tem-se o primeiro termo a esquerda, constituído do somatório duplo da multiplicação entre as variáveis  $a_p$  (custo de *set up* para produção do produto  $p$ ) e  $S_{pn}$  (ocorrência de *set up* para início de produção do produto  $p$  no subperíodo  $n$ ), variando os  $p$  produtos existentes e os  $n$  subperíodos considerados, sendo  $S_{pn}$  uma variável binária (assume valores de 0 em caso de não ocorrência e 1 caso ocorreu *set up*). O termo representa os custos com *Set up* para produção de todos os produtos em todos os subperíodos considerados.

O segundo termo da Equação (1) (à direita) apresenta um somatório duplo da multiplicação entre as variáveis  $h_p$  (custo de manter uma unidade em estoque do produto  $p$ ) e  $I_{pt}$  (Quantidade do produto  $p$  em estoque no período  $t$ ), variando os  $p$  produtos existentes e os  $t$  períodos considerados. O termo representa os custos com estoques em todos os períodos considerados.

$$Z = \text{Min} \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N a_p S_{pn} + \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T h_p I_{pt} \quad (1)$$

Além da função objetivo algumas declarações de domínio de variáveis, equações e inequações que representam o sistema estudado devem ser inseridas para tornar a modelagem mais similar à realidade. Tais equações, declarações e inequações são chamadas de restrições. A primeira restrição do GLSP a ser detalhada é representada pela Equação (2). A equação

define o cálculo da variável  $I_{pt}$  descrita no parágrafo acima como a soma entre duas parcelas, sendo a primeira, a que representa a quantidade estocada do produto  $p$  em um período anterior ao presente ( $t - 1$ ). A segunda parcela se trata da diferença entre o somatório do que foi produzido do produto  $p$  em cada subperíodo (sendo  $Pt$  o primeiro e  $Ut$  o último subperíodo) e o que foi demandado do produto  $p$  no período  $t$  ( $d_{pt}$ ).

$$I_{pt} = I_{p(t-1)} + \sum_{n=Pt}^{Ut} Q_{pn} - d_{pt} \quad p = 1, \dots, P; t = 1, \dots, T \quad (2)$$

A restrição imposta pela Inequação (3) está relacionada com a garantia de que se houver produção do produto  $p$  no subperíodo  $n$ , a máquina deve estar preparada para tal produto. A variável  $k_t$  representa a capacidade máxima de produção no período  $t$  e a variável  $W_{pn}$  representa se a máquina de produção está preparada para produzir o produto  $p$  no subperíodo  $n$ . O produto  $k_t W_{pn}$  deve ser maior ou igual a  $k_p Q_{pn}$ , onde  $k_p$  é a capacidade de produção do produto  $p$  e  $Q_{pn}$  a produção do produto  $p$  no subperíodo  $n$ .

$$k_p Q_{pn} \leq k_t W_{pn} \quad p = 1, \dots, P; t = 1, \dots, T; n = 1, \dots, N \quad (3)$$

A restrição representada pela Inequação (4), se encarrega de determinar que a capacidade máxima produtiva em cada período  $t$  ( $k_t$ ), deve ser maior do que a produção total no mesmo período, representada pelo somatório duplo de  $k_p Q_{pn}$ .

$$\sum_{p=1}^P \sum_{n=Pt}^{Ut} k_p Q_{pn} \leq k_t \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

A Inequação (5) limita a produção a somente a um item por subperíodo.  $W_{pn}$  só pode assumir dois valores 0 ou 1, logo, mesmo que hajam, por exemplo 10 produtos diferentes ( $p \in \{1;10\}$ ) não será possível que haja disposição para produção de todos eles. Na verdade deverá haver disposição (máquina pronta) para produzir apenas um produto por subperíodo.

$$\sum_{p=1}^P W_{pn} \leq 1 \quad n = 1, \dots, N \quad (5)$$

A posição de quando o *set up* deve ocorrer é determinada pela Inequação (6). A variável  $S_{pn}$  assume o valor 1 (ocorrência de *set up* para produzir o produto  $p$  no subperíodo  $n$ ) caso venha de uma condição de indisposição para produzir no subperíodo anterior ( $W_{p(n-1)} = 0$ ). Caso a máquina estivesse preparada para produzir no subperíodo  $n-1$  ( $W_{p(n-1)} = 1$ ) não é necessária a ocorrência de *set up*, ou seja,  $S_{pn}$  assume o valor 0.

$$S_{pn} \geq W_{pn} - W_{p(n-1)} \quad p = 1, \dots, P ; n = 1, \dots, N \quad (6)$$

E por fim, as restrições de 7 a 9 referem-se aos domínios das variáveis de decisão do modelo.

$$W_{pn}, S_{pn} \in \{0,1\} \quad p = 1, \dots, P ; n = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$I_{pt} \geq 0 \quad p = 1, \dots, P ; t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$Q_{pn} \geq 0 \quad p = 1, \dots, P ; n = 1, \dots, N \quad (9)$$

Alguns trabalhos sobre modelagem GLSP são encontrados na literatura, como Meyer (2002), que estende o modelo GLSP para múltiplas máquinas paralelas. Transchel (2011) analisa o problema de planejamento e sequenciamento de produção multiproduto com sequência dependente de custo de instalação e períodos, apresentando um modelo de otimização híbrido misto binário com base no problema geral de dimensionamento de lotes e programação.

Toso e Morabito (2005) e Toso et al. (2009) trabalham a combinação do modelo GLSP com o modelo de dimensionamento de lotes capacitado com tempos de *set up* não dependentes da sequência, apresentado em Hax e Candea (1984), além de desenvolverem formulações utilizando o modelo GLSP para problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes em fábricas de bebida, contemplando múltiplos estágios de produção e custos e tempos de *set up* de múltiplas máquinas.

No trabalho de Toso e Morabito (2005) o objetivo foi fornecer um programa de produção que evite atrasos sendo adequado à demanda, e ao mesmo tempo utilizando de forma ótima os recursos disponíveis, já que, na prática estas vertentes não podem ser segregadas e tratadas em separado. A área de PCP (planejamento e controle de produção) que dimensiona os lotes, enquanto a área operacional realiza o sequenciamento e estas devem atuar de modo simbiótico. Um exemplo disto é a inviabilidade de produção do tamanho dos lotes planejados e dimensionados pelo PCP por parte da área operacional (chão de fábrica) por conta do possível comprometimento da capacidade disponível e do atendimento dos prazos de entrega. No artigo é realizado o desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira mista para representar as decisões envolvidas, tratando as questões expostas no parágrafo anterior de forma integrada. O modelo foi resolvido no *software* GAMS utilizando o *solver* Cplex.

Os experimentos realizados com dados reais demonstraram a capacidade da abordagem em gerar resultados melhores do que os da indústria de produção de rações para nutrição animal, empresa alvo do estudo de caso. Ficou comprovada a efetividade do modelo no auxílio às decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes na empresa, havendo, porém, o inconveniente da necessidade de um elevado esforço computacional requerido pelo Cplex para solucionar o modelo, levando um tempo da ordem de horas para tal. Ficou assim explicita a necessidade de aplicação de técnicas, que permitam a criação de métodos de solução (sejam exatos e/ou aproximados) alternativos para tratar o modelo, que garantam encontrar boas soluções em pouco tempo computacional. No tópico a seguir são discutidos alguns trabalhos relacionados à utilização dos modelos descritos até então na modelagem e aplicação de técnicas de pesquisa operacional.

### 3.2. PESQUISA OPERACIONAL APLICADA A CALDEIRAS

Atualmente há uma vasta gama de métodos de programação baseados na formulação de problemas por um modelo matemático, resolvido através da aplicação de técnicas apropriadas de otimização.

Bojic e Dragicevic (2002) usaram um modelo de programação inteira mista (*Mixed Integer Programming* - 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 (combinação das diferentes fontes de alimentação de energia) 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 programação inteira mista (MIP) em problemas de energia em diversos segmentos industriais e também não industriais.

Hirata et al. (2003) consideraram a possibilidade de aplicar um modelo com equacionamento linear, mesmo o problema a ser resolvido sendo de escala industrial. O motivo foi a capacidade do planejamento de produção em suportar tolerâncias de precisão consideradas razoáveis, tornando modelos lineares, portanto, eficientes.

Outro atenuante para a adoção de modelo baseado em equações lineares foi a constatação de que a aplicação de modelos não lineares exigem elevado esforço computacional e geralmente não fornecem resultados gerais (induzem a ótimos locais) ou simplesmente não fornecem uma solução. O modelo desenvolvido era composto da integração entre uma interface gráfica, um banco de dados em Acces®, planilhas do Microsoft Excel® e programação matemática no GAMS® que foi resolvida pelo solver OSL. Parâmetros como carga de produção, status de partida/parada de equipamentos e temperatura ambiente, foram inclusos nas equações de consumo de utilidades com intuito de cobrir o máximo em termos de situações operacionais. Para as variáveis de seleção de entradas e saídas de operação de equipamentos (parada de manutenção, por exemplo) foi possível empregar variáveis inteiras binárias. O modelo permitiu à engenharia calcular simultaneamente o orçamento dos meses relativos a todo o ano, já considerando demandas de situações otimizadas; agendar paradas de manutenção otimizando os custos oriundos das significativas variações nas demandas de insumos e utilidades que podem ocorrer (nas partidas de plantas, por exemplo, há um enorme consumo de vapor); tomar decisões estratégicas auxiliando na minimização de custo, como a redução em quase 50% da importação de energia elétrica no período de manutenção (novembro, turno da noite), reduzindo em cerca de 4% custos de operação, dentre outros aspectos (inclusive ambientais) como a redução dos consumos de água no processo e o atendimento a parâmetros ambientais pela seleção ótima entre os combustíveis, por exemplo.

O trabalho de Pinto (1995) apresentou uma tentativa de modelagem, de forma integrada a um *software* de aquisição de dados on-line, do sistema termoeletrico de uma indústria petroquímica brasileira, aplicando rotinas de otimização na base de dados obtida para determinar a melhor distribuição de carga entre equipamentos e dos combustíveis a

serem utilizados. O intuito foi a minimização dos custos operacionais e atendendo às restrições impostas a cada equipamento.

O sistema de otimização descrito foi utilizado como ferramenta gerencial, para orientação nas decisões referentes à operação de equipamentos como geradores de vapor, turbogeradores e seus principais equipamentos auxiliares. A técnica de otimização empregada foi programação linear inteira mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP), sendo desenvolvido um modelo matemático com informações relativas a demandas de energia elétrica e vapor e custos dos insumos energéticos, basicamente a partir das equações linearizadas de balanço material e energético de cada equipamento, aplicadas dentro do domínio formado pelas restrições operacionais.

Os principais entraves ao sucesso do modelo foram relacionados à inconsistência na base de dados, não sendo, por exemplo, possível fechar o balanço principalmente devido a erros em medições de vazão. Foi apontado como resultado uma máxima economia alcançável de 65,6% com o sistema operando de forma ótima, sendo observados ganhos de cerca de US\$ 2.750.000,00/ano e benefícios intangíveis, como ferramentas de treinamento para integrantes da área operacional.

Chinese e Meneguetti (2005), apresentaram uma extensiva revisão sobre a utilização de modelos de otimização aplicados em planejamento energético que pode ser encontrada nos trabalhos de Henning (1999).

### **3.2.1. Modelo de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes para Geradores de Vapor**

Rocco (2011) utilizou modelos quantitativos para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes na otimização de geradores de vapor (caldeiras) industriais. O modelo contemplou decisões relacionadas à minimização de custos com aquisições transporte para fábrica e gerenciamento dos estoques de combustíveis adquiridos no sistema dos fornecedores, além de possibilitar a determinação dos momentos ótimos para acionamento e desligamento das caldeiras. Outra consideração incluída no modelo foi a seleção de quais caldeiras produziram vapor.

O trabalho se baseou principalmente, em termos de modelos presentes na literatura, nos modelos gerais de dimensionamento de lotes de produção (GLSP), onde há subdivisão

dos macroperíodos em intervalos de tempo menores, os subperíodos, além do que os períodos são fixos e a demanda do único item (vapor) é conhecida. Os subperíodos são variáveis de decisão determinados pelo modelo considerando o tamanho dos lotes produzidos.

No modelo para as caldeiras industriais, as decisões são tomadas tanto nos subperíodos quanto nos macro períodos, a demanda também é conhecida em cada subperíodo, imprimindo grande semelhança com a modelagem GLSP.

No entanto, há diferenças no modelo desenvolvido na dissertação, como a fixação do tamanho dos macro e subperíodos, assim o tamanho desse não constitui uma decisão do modelo, como é nos problemas gerais de dimensionamento de lotes (GLSP).

Outro diferencial encontra-se na função objetivo elaborada para a modelagem das caldeiras. O custo de estocagem considerado para a modelagem das caldeiras foi relacionado aos insumos da produção (combustíveis), em detrimento aos modelos clássicos onde o custo estocagem se refere aos itens produzidos (produtos). Outro caso a ser destacado é da separação do custo de *set up* das caldeiras em *startup* (ou em *set up* inicial) e *warmup* (ou *set up* contínuo). Nos modelos clássicos existe apenas um tipo de custo de *set up*.

Foi desenvolvida e implementada uma linguagem de modelagem algébrica computacional para o modelo. Foram utilizadas ao todo 17 equações para modelar o sistema de produção de vapor, sendo que 13 delas representaram a operação de produção de vapor em caldeiras. Restrições relativas limite máximo para envio de combustível a fábrica em cada subperíodo; balanceamento da quantidade de combustível entre períodos; balanço da oferta total de cada combustível entre os períodos do horizonte de planejamento; limitação do espaço físico disponível para armazenamento de estoques na fábrica para cada combustível; cálculo do estoque de segurança; disponibilidade de cada caldeira em cada subperíodo considerando decorrência do plano de manutenção, dentre outras. A função objetivo é dividida em 4 parcelas. A primeira representa o custo total de aquisição dos combustíveis, que são queimados nas caldeiras e reabastecem o estoque na fábrica. A segunda apresenta o custo de estocagem dos combustíveis na fábrica. No caso da terceira parcela da função objetivo, esta contabiliza o acionamento (*startup*) de todas as caldeiras do sistema em todos os subperíodos do horizonte de planejamento. A quarta e última parcela se refere à contabilização do custo de aquecimento mínimo de cada caldeira para que o equipamento permaneça ligado, não sendo necessário realizar partida (*warmup*) nas caldeiras.

O *software* GAMS® foi utilizado para desenvolvimento do modelo de produção de vapor, sendo as equações do modelo resolvidas pelo *solver* Cplex.

O modelo foi concebido com  $I$  fornecedores,  $K$  tipos de combustíveis,  $J$  caldeiras industriais,  $T$  períodos e  $N$  subperíodos possuindo assim  $K[T(I+2)+N(2I+1)]+T+N(3J+1)$  restrições e  $K[T(I+1)+N(2I+J)]+2JN+1$  variáveis, das quais  $N(IK+2J)$  são binárias.

No Apêndice A da dissertação de Rocco, há um exemplo computacional que modela o sistema de produção de vapor com  $I = 6$  fornecedores,  $J = 4$  caldeiras,  $K = 5$  combustíveis,  $T = 5$  períodos, e  $N = 35$  subperíodos, resultando em 2.935 restrições e 3.256 variáveis, sendo que destas, 1.330 são binárias. O modelo levou 0,656 segundos para ser processado em computador de 1,7 Gigahertz e 1 GB de memória RAM, convergindo bem rapidamente para a solução ótima, em instâncias com  $N$  inferior a 200 subperíodos.

Um estudo de caso realizado em uma indústria de alimentos de grande porte com localização em Goiânia (GO) forneceu os dados reais de variáveis de processo que permitiram inferir ajustes, e realizar a validação do modelo. Dados como demanda diária de vapor; custos com *startup*; custos com *warmup*; capacidade diária de cada caldeira; perda de capacidade utilizada para realizar *startup*; umidade nos combustíveis em cada período; disponibilidade de operação de cada caldeira; disponibilidade de queima de cada tipo de combustível em cada caldeira e disponibilidade de cada tipo de combustível ofertado por cada um dos fornecedores foi inserido no modelo, para torna-lo mais próximo a realidade.

Das 17 equações totais do modelo, 4 delas são responsáveis pelos cálculos de parâmetros de interesse que representam as soluções do modelo. Uma dessas equações determina os valores para o parâmetro que contabiliza a produção de vapor de cada caldeira em cada subperíodo. Com os valores dessa variável é possível saber qual caldeira funcionou e o quanto de vapor ela produziu em cada subperíodo. Outro parâmetro representado por uma das 4 equações solução do modelo é aquele que soma o que foi transportado de combustível em cada subperíodos para determinar o valor para cada um dos períodos. O último parâmetro trata do resultado monetário do custo de cada combustível em todo o horizonte de planejamento.

Os resultados calculados pelo modelo foram comparados com os dados reais oriundos da empresa. O modelo apresentou melhores desempenhos econômicos em detrimento a operação real, comprovando a necessidade de otimização da operação para obtenção de resultados melhores. Outro ponto importante foi a constatação da eficácia da aplicação do

modelo em situações reais para gerar previsões otimizadas de produção de vapor, apoiando algumas das principais decisões na operação de produção de vapor em caldeiras industriais.

O presente trabalho foi baseado no estudo desenvolvido por Rocco (2011).

#### **4. METODOLOGIA**

O presente capítulo detalha a metodologia de preparação do modelo de otimização desenvolvido, além de detalhes das adequações realizadas para aplicação do modelo ao estudo de caso.

Este trabalho pode ser dividido em 2 etapas:

- Conceituação e desenvolvimento do modelo;
- Coleta de dados reais necessários à utilização do modelo e avaliação comparativa dos resultados deste modelo em relação à operação real.

A etapa de conceituação do trabalho consistiu da preparação de um modelo conceitual baseado no entendimento e interpretação da operação industrial dos geradores de vapor. Nessa etapa, o problema foi definido de forma esquemática através das informações do funcionamento da geração de vapor que foram obtidas junto aos integrantes da operação e através de documentos técnicos. Foi estudado o sistema a ser modelado, focando suas limitações, peculiaridades e características. Esses dados influenciam diretamente na definição de parâmetros e restrições primordiais a tornar o modelo mais fidedigno à realidade operacional.

A seguir é apresentado o detalhamento do modelo em questão.

##### **4.1. MODELAGEM DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE VAPOR**

O presente tópico se refere ao detalhamento do modelo de otimização proposto para auxiliar nas principais decisões de gestão da produção de vapor em múltiplas caldeiras industriais. A modelagem matemática do sistema de produção de vapor foi embasada nos modelos clássicos de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção. A principal diferença é que os modelos clássicos apresentam como foco a estocagem de produtos, visando otimizar a produção, levando em consideração restrições de estoque em um determinado

horizonte de tempo de planejamento. No modelo desenvolvido, as equações de balanço de materiais passam a gerenciar os insumos da produção (combustíveis), e não os produtos finais. Além disto, outro detalhe importante é que no presente trabalho há impossibilidade de estocar o produto final (vapor).

Há grande semelhança com a modelagem dos problemas gerais de dimensionamento de lotes (GLSP), referente às divisões em subperíodos e macro períodos, sendo a demanda conhecida em cada subperíodo. No GLSP o tamanho dos subperíodos é uma variável de decisão do modelo, sendo determinado pelo tamanho dos lotes produzidos. No modelo desenvolvido neste trabalho o tamanho dos macroperíodos e dos subperíodos é fixo.

Outro diferencial se refere à função objetivo elaborada para a modelagem das caldeiras. No modelo desta dissertação não há custos com estocagem, sendo importante destacar, que estes custos se relacionam aos insumos da produção (combustíveis), em detrimento aos modelos clássicos onde o custo se refere aos itens produzidos. O modelo foi desenvolvido para ser aplicado em indústrias, que utilizam como combustível para geração de vapor, o gás natural (GN) provido de maneira contínua, não sendo considerados assim custos com armazenagem.

Outro ponto importante é que nos modelos clássicos existe apenas um tipo de custo de *Set up*, sendo que no modelo proposto houve separação do custo de *Set up* (acionamento pós-parada) das caldeiras em *startup* (ou em *Set up* inicial, mais popularmente conhecido como partida) e *warmup* (ou *Set up* contínuo, mais popularmente conhecido como abafamento). No entanto, como não há, na operação do sistema de geração de vapor da unidade a ser estudada, a prática de abafamento (*warmup*), não serão consideradas restrições referentes a parâmetros oriundos desta prática.

O modelo foi desenvolvido no *software* GAMS (*General Algebraic Modeling System*) utilizando um método de otimização onde algumas das variáveis são inteiras e outras contínuas, chamado programação inteira mista (*Mixed Integer Programming – MIP*), pois possui variáveis inteiras binárias.

Em se tratando da anatomia do modelo, têm-se como constituição do mesmo  $J$  caldeiras,  $T$  períodos e  $N$  subperíodos.

Foi considerado o horizonte de planejamento com 52 períodos (semanas), e 365 subperíodos (dias) tendo como intuito realizar uma análise mais abrangente dos resultados da operação de produção de vapor. No entanto, devido à variabilidade imprevisível de fatores

como demanda de vapor, disponibilidade operacional das caldeiras, preço do combustível, dentre outros, em períodos mais abrangentes, a principal vantagem da ferramenta desenvolvida nesta dissertação se encontra no apoio de decisões de médio prazo (um mês, por exemplo), balizando decisões táticas em relação à gestão de combustível na semana e a operações de ligar e desligar as caldeiras em cada dia.

A seguir é apresentada uma descrição detalhada do modelo desenvolvido.

Índices do modelo:

- ✓  $j$ : indica a caldeira do sistema de produção de vapor ( $j = 1, 2, 3, \dots, J$ );
- ✓  $t$ : macro período (período) do horizonte de planejamento ( $t = 1, 2, 3, \dots, T$ );
- ✓  $n$ : subperíodo do macro período ( $n = 1, 2, 3, \dots, N$ ).

Para o presente trabalho foi adotado  $t$  como semanas e  $n$  como dias, sendo considerado o horizonte de tempo  $T=52$  períodos e  $N=365$  subperíodos.

Parâmetros do modelo:

- ✓  $p_t$ : preço do combustível (Gás Natural, ou GN) no período  $t$ , em R\$/Nm<sup>3</sup>;
- ✓  $cs_j$ : custo de acionamento (*startup*) da caldeira  $j$ , em R\$;
- ✓  $m_j$ : porcentagem mínima da capacidade máxima da caldeira  $j$  para realizar um adequado *startup*;
- ✓  $e_{nj}$ : parâmetro que indica se a caldeira  $j$  está disponível para operação, em função do plano de manutenção, no subperíodo  $n$ ;
- ✓  $vi_{jn}$ : fator de conversão de quantidade de GN (gás natural) em quantidade de vapor gerado na caldeira  $j$  no subperíodo  $n$ , em tonelada de vapor/Nm<sup>3</sup> de GN;
- ✓  $d_n$ : demanda de vapor da fábrica no subperíodo  $n$ , em toneladas;
- ✓  $bc_j$ : capacidade total de produção de vapor da caldeira  $j$  no subperíodo  $n$ , em toneladas;
- ✓  $lc_j$ : vapor gasto para realizar partida (*startup*) na caldeira  $j$ ;

Variáveis de decisão do modelo:

- ✓  $Q_{nj}$ : quantidade de GN (gás natural) consumido na caldeira  $j$  no subperíodo  $n$ ;

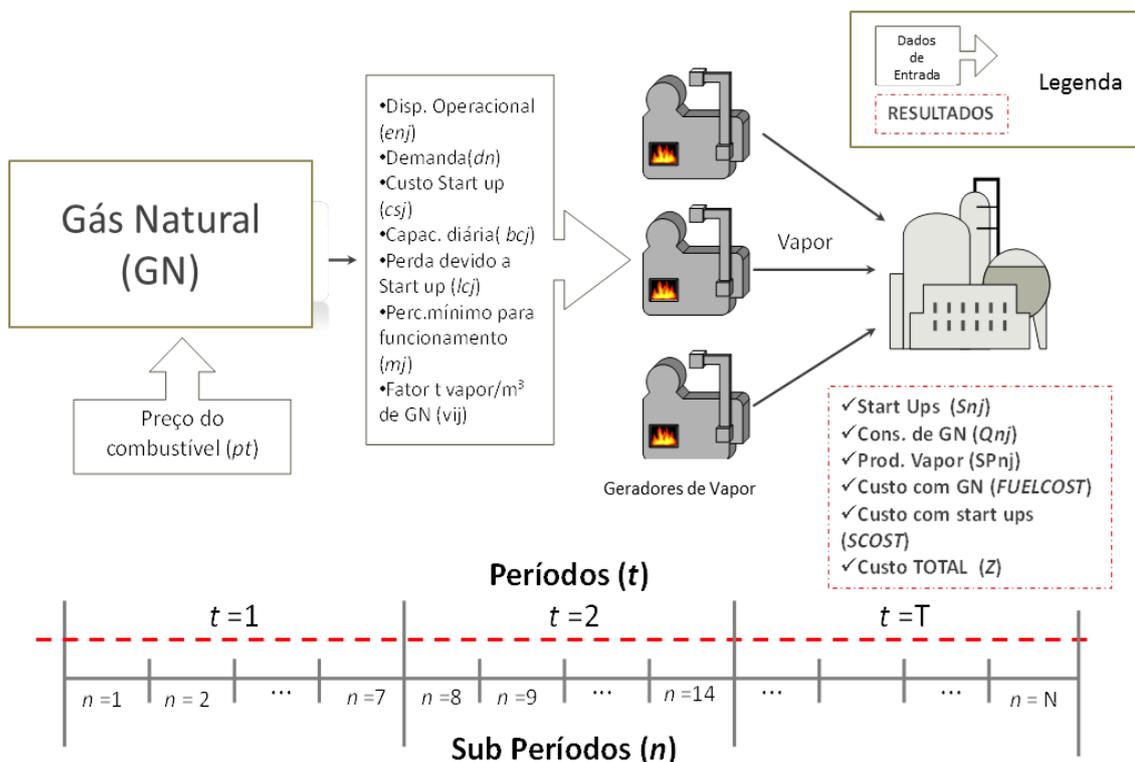
- ✓  $S_{nj}$ : variável inteira binária de determinação de ocorrência de *startup*.  $S_{nj} = 1$  indica o acionamento da caldeira  $j$  no subperíodo  $n$ , considerando que no subperíodo anterior a caldeira estava desligada. Caso  $S_{nj} = 0$ , a caldeira não faz *startup* no subperíodo  $n$ , seja porque já está acionada, ou mesmo por permanecer desligada;
- ✓  $W_{nj}$ : variável inteira binária que indica operação da caldeira. Quando  $W_{nj} = 1$  a caldeira  $j$  se encontra ativa no subperíodo  $n$ . Caso  $W_{nj} = 0$ , a caldeira se encontra inativa no subperíodo  $n$ .

Variáveis de solução do modelo:

- ✓  $SP_{nj}$ : contabiliza a produção de vapor da caldeira  $j$  no subperíodo  $n$ ;
- ✓  $Q_{ij}$ : calcula a quantidade de combustível (GN) queimado na caldeira  $j$  no período  $t$ ;
- ✓  $QFT$ : indica o valor monetário gasto com a aquisição do combustível (Gás Natural, ou GN) em todo horizonte de planejamento.

A Figura 2 a seguir, apresenta um esquemático da modelagem do sistema de produção de vapor em questão, explicitando os dados que alimentam o modelo, os dados que são gerados como resultados previstos, além de demonstrar a divisão do horizonte de tempo de planejamento em macro e subperíodos.

Figura 2 - Diagrama da modelagem do sistema de produção de vapor.



Equações e inequações do modelo:

A Equação 10 representa a função objetivo do modelo proposto. O intuito desta função é minimizar o somatório das duas parcelas que são os principais custos envolvidos no sistema de produção de vapor em questão.

$$Z = \text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J p_t Q_{nj} + \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J cs_j S_{nj} \quad (10)$$

O somatório triplo do produto entre  $Q_{nj}$  (consumo de combustível de cada caldeira  $j$  em cada subperíodo  $n$ ) e o parâmetro  $p_t$  (preço de combustível em cada período  $t$ ), variando os  $t$  períodos,  $n$  subperíodos e  $j$  caldeiras, fornece o montante financeiro gasto com a aquisição dos combustíveis.

A segunda parte da função objetivo (à direita) se refere aos custos de acionamento (*startup*) de todas as caldeiras  $j$  no sistema em todos os subperíodos  $n$  do horizonte de planejamento.

A partida (acionamento ou *startup*) de uma determinada caldeira no subperíodo  $n$ , é definida pela variável inteira binária  $S_{nj}$ , que assume o valor 1, quando ocorre *startup* no subperíodo considerado. Em caso de não ocorrer o cenário acima citado, a variável assume o valor zero, seja porque a caldeira já está acionada ou mesmo por permanecer desligada naquele subperíodo.

O valor financeiro de todos os acionamentos das caldeiras no horizonte de planejamento se dá por meio do somatório, em todos os subperíodos  $n$  e para todas as caldeiras  $j$ , da multiplicação da variável  $S_{nj}$  pelo custo de *startup* de cada caldeira  $j$  ( $cs_j$ ).

A Inequação (11) remete à necessidade de que o somatório da produção de vapor (representada pela multiplicação entre os fatores  $vi_n$ ,  $e_{nj}$  e  $Q_{nj}$ ) de todas as caldeiras seja maior ou no mínimo igual a demanda de vapor em cada subperíodo. O parâmetro  $vi_n$ , representa o fator de conversão da quantidade de combustível em quantidade de vapor (t vapor/Nm<sup>3</sup> de GN), e o parâmetro  $e_{nj}$ , é uma variável inteira binária que determina se há disponibilidade operacional de cada caldeira em cada subperíodo (dia). Já o parâmetro  $Q_{nj}$  representa os valores ótimos calculados de consumo de combustível de cada caldeira em cada subperíodo.

$$\sum_{j=1}^J v i_n e_{nj} Q_{nj} \geq d_n \quad (11)$$

Caldeiras industriais são equipamentos industriais que possuem restrições de carga de vapor, ou seja, apresentam limite mínimo e máximo de produção (cargas de vapor), definidos na fase de projeto. Uma dessas restrições é o percentual mínimo da capacidade máxima da caldeira a ser utilizado para que se obtenha uma operação adequada e segura, essa produção de vapor de cada caldeira é representada pela Inequação (12). Nela é apresentado o parâmetro  $m_j$ , responsável por indicar o percentual mínimo da capacidade de produção de cada caldeira para obter um funcionamento adequado. A produção ocorrerá somente se a caldeira  $j$  estiver aquecida e disponível para operar, ou seja, se tanto a variável  $W_{nj}$  (variável inteira binária que indica operação da caldeira; quando  $W_{nj} = 1$  a caldeira  $j$  se encontra ativa no subperíodo  $n$ ) quanto a variável  $e_{nj}$  forem iguais a 1, caso contrário, a caldeira terá que realizar o *startup*.

$$v i_n e_{nj} Q_{nj} \geq b c_j m_j e_{nj} W_{nj} \quad (12)$$

A Inequação (13) representa o limite máximo na capacidade de produção de vapor que foi modelado em cada caldeira, no subperíodo  $n$ . Ela determina que a produção deve ser menor ou igual a diferença entre a capacidade máxima de cada caldeira e o vapor utilizado para partir determinada caldeira, caso a mesma não estivesse operando no subperíodo anterior.

A parcela  $b c_j m_j e_{nj} W_{nj}$  representa a capacidade máxima de produção da caldeira  $j$ . A variável  $b c_j$  representa a capacidade máxima de produção da caldeira  $j$ . O parâmetro  $m_j$ , assim como na Inequação (12) tem o papel de limitar a produção de vapor, já os outros parâmetros determinam a disponibilidade operacional da caldeira, ou seja, se a caldeira  $j$  não estiver disponível para operação no subperíodo  $n$ , o parâmetro inteiro binário  $e_{nj}$  será igual a zero, não existindo, portanto, produção de vapor na caldeira no subperíodo especificado.

Em se tratando do parâmetro  $W_{nj}$ , este fornece um indicativo do estado da caldeira, ou seja, se ela estava desligada no subperíodo anterior ( $W_{(n-1)j} = 0$ ), e a partida é realizada no subperíodo subsequente ( $W_{nj} = 1$ ), ou seja, a variável de ocorrência de *startup* ( $S_{nj}$ ) assumirá o valor igual a 1.

Assim, a capacidade total da caldeira  $j$  no período  $n$  irá figurar como a diferença entre as parcelas  $(bc_j \cdot m_j \cdot e_{nj} \cdot W_{nj})$  e  $(lc_j \cdot e_{nj} \cdot S_{nj})$ , sendo que na parcela  $lc_j \cdot e_{nj} \cdot S_{nj}$ , o termo  $lc_j$  desconta, em termos de capacidade de produção de vapor, o vapor gasto no tempo decorrente do *startup* da caldeira  $j$ .

$$vi_n e_{nj} Q_{nj} \leq bc_j m_j e_{nj} W_{nj} - lc_j e_{nj} S_{nj} \quad (13)$$

O conjunto de restrições representado pela Equação (14) refere-se à indicação da ocorrência de *startup* das caldeiras. A multiplicação do parâmetro de indicação de operação da caldeira ( $W_{nj}$ ) pelo parâmetro  $e_{nj}$  serve como indicativo da disponibilidade ou não de cada caldeira para a produção de vapor em cada subperíodo.

A variável de *startup* assume sempre valor igual ou maior que a diferença entre os termos  $W_{nj} \cdot e_{nj}$  do subperíodo atual e do subperíodo anterior ( $W_{(n-1)j} \cdot e_{(n-1)j}$ ). Assim sendo, a variável de *startup* somente assumirá valor um ( $S_{nj} = 1$ ), quando a variável  $W$  do período anterior -  $W_{(n-1)j}$  - assumir valor zero e a variável de  $W$  do período atual assumir valor um, caso contrário, a variável de *startup* permanece com o valor zero ( $S_{nj} = 0$ ).

$$S_{nj} \geq W_{nj} e_{nj} - W_{(n-1)j} e_{(n-1)j} \quad (14)$$

A variável  $SP_{nj}$ , definida pela Equação (15), contabiliza a produção de vapor de cada caldeira  $j$  em cada subperíodo  $n$ , ou seja, o programa retorna uma matriz de valores ótimos calculados de consumo de combustível de cada caldeira em cada subperíodo ( $Q_{nj}$ ), sendo possível saber qual caldeira funcionou e qual foi sua carga em cada subperíodo.

$$SP_{nj} = vi_{nj} e_{nj} Q_{nj} \quad (15)$$

A variável  $QFT_{nj}$ , definida pela Equação (16), contabiliza o consumo de combustível total de todas as caldeira em todos os subperíodos. O parâmetro  $e_{nj}$ , assim como em suas outras utilizações em inequações e equações apresentadas anteriormente, faz o papel de sinalizador da disponibilidade operacional de cada caldeira em cada subperíodo. O parâmetro  $Q_{nj}$  representa o consumo de combustível (GN para o estudo desta dissertação) de cada uma das caldeiras em cada subperíodo.

$$QFT_{nj} = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J e_{nj} Q_{nj} \quad (16)$$

Outras variáveis derivadas das anteriormente apresentadas são também calculadas no modelo como: produção de vapor total de cada caldeira (somatório duplo de  $SP_{nj}$  variando-se os  $n$  subperíodos e as  $j$  caldeiras); custo total com aquisição de combustível (somatório do produto entre  $QFT_{nj}$  e  $p_t$  variando-se o período  $t$ ); número de *startups*, ou seja, contabilização de quantas vezes ocorreu o cenário de partida (*startup*) de uma caldeira (Ex.: parâmetro  $S_{nj} = 0$ , e  $S_{(n+1)j} = 1$ , implica em um *startup*) e custo individual de *startups* por cada caldeira, sendo este último calculado tomando como base a curva de aquecimento de cada caldeira. A partir da curva foram obtidos os tempos médios de aquecimento (partida) de cada caldeira. Observando-se os dados reais de produção de vapor e seu respectivo consumo de gás natural (GN), foram separados os períodos em que se tem ciência da ocorrência de *startup*, multiplicando então o tempo horário médio de *startup* de cada caldeira pelo custo horário médio real de consumo de combustíveis (produto entre preço e consumo do combustível) durante os períodos de *startup* (partida) considerados. A seguir se encontra a descrição da aplicação do modelo em uma unidade industrial.

#### 4.2. APLICAÇÃO DO MODELO AO PROCESSO INDUSTRIAL

Alguns dados operacionais de produção de vapor da unidade de produção de PVC da Braskem em Alagoas alimentaram o modelo desenvolvido.

Os seguintes parâmetros foram utilizados na preparação do modelo, sendo, portanto, parte integrante do mesmo.

- Custo com *startups* ( $cs_j$ );
- Capacidade diária de produção de cada caldeira ( $bc_j$ );
- Perda de vapor para realização de *startups* ( $lc_j$ );
- Percentual mínimo da capacidade máxima de produção da caldeira para realizar um adequado *startup* ( $m_j$ );
- Disponibilidade de cada caldeira para operar em cada subperíodo ( $e_{nj}$ );

- Preço do combustível (gás natural) em cada período  $t$  ( $p_t$ );
- Demanda diária de vapor ( $d_n$ );
- Toneladas de vapor geradas a partir de um determinado volume de gás natural (GN) consumido em cada subperíodo ( $vi_n$ );

Dados de operação de geração de vapor da unidade industrial:

- Produção de vapor de cada caldeira em cada subperíodo ( $SP_{nj}$ );
- Quantidade de combustível (GN) queimado em cada caldeira em cada período ( $Q_{ij}$ );
- Valor monetário gasto com a aquisição do combustível (Gás Natural, ou GN) em todo horizonte de planejamento ( $QFT$ );
- Custo total de produção ( $Z$ ).

Os parâmetros listados acima foram levantados para que comparar os valores reais de operação de produção de vapor e os resultados otimizados gerados pelo modelo.

Os dados descritos fizeram parte do modelo desenvolvido. A resolução do modelo gerou resultados em planilha. Os resultados gerados pelo modelo e seu comparativo com a operação real, são descrito em forma de estudo de caso a seguir.

## 5. RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados do estudo de caso realizado com dados oriundos de produção de vapor da unidade de produção de Policloreto de Vinila (PVC) em Marechal Deodoro/AL da Braskem S/A. Foram comparadas as informações geradas pelo modelo desenvolvido para esta dissertação e os dados reais de produção de vapor, para avaliação da eficácia de previsão do modelo.

Devido a necessidade de utilização de vapor para transferência de conteúdo energético aos processos, a unidade de produção de PVC possui uma área de geração de vapor formada por um parque de 3 caldeiras industriais. No ano de 2012 a produção total de vapor nesta área, foi de aproximadamente 645 mil toneladas, sendo produzidas no mesmo período em torno de 286 mil toneladas de PVC na fábrica.

A Unidade de Geração de Vapor (UGV) pertencente à área de Utilidades e Serviços da Braskem PVC AL, é constituída de três caldeiras (GV 01, 02 e 04) que queimam exclusivamente GN (gás natural) com capacidade de produção máxima de 205 t/h, a 42 Kg/cm<sup>2</sup> de pressão e 415 °C de temperatura, distribuídas da seguinte forma:

Os geradores de vapor GV 01 e GV 02 são duas caldeiras iguais, tipo aquatubulares, fabricados pela ZANINI S/A. A outra caldeira do sistema de geração de vapor é GV 04, gerador de vapor aquatubular, modelo DIB-D 85, fabricados pela DEDINI S/A. A Tabela 1 resume as características técnicas dos equipamentos em questão.

Tabela 1. Características técnicas dos geradores de vapor.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	GVs 01 e 02	GV 04
Produção de vapor (kg/h)	60.000	85.000
Pressão de operação (kgf/cm <sup>2</sup> )	42	42
Temperatura de vapor (°C)	415	415
Temperatura da água de alimentação (°C)	110	110
Combustível principal	Gás Natural	Gás Natural
Poder calorífico do gás (kcal/m <sup>3</sup> )	9400	9400
Tiragem	Balanceada	Balanceada
Excesso de ar (%)	30	10
Circulação de água	Natural	Natural
Volume de água em nível normal (m <sup>3</sup> )	52,2	31
Volume de água total (m <sup>3</sup> )	66	35
Temperatura do ar entrada do pré-aquecedor (°C)	27	27
Temperatura do ar saída do pré-aquecedor (°C)	125	70
Tempo de operação	24 horas por dia	24 horas por dia
Superfície de aquecimento total (m <sup>2</sup> )	1517	3952
Rendimento térmico (%)	89,75	94,5

Fonte: Autor, 2013.

Parte do vapor superaquecido deixa a caldeira a 42 Kgf/cm<sup>2</sup> e passa por dois sistemas de redução de pressão que operam independentes, sendo o primeiro baseado em duas turbinas geradoras de energia elétrica. O vapor superaquecido é enviado a essas duas turbinas a vapor (que geram juntas em média 1,2 MW) tendo então sua pressão reduzida a 17 Kgf/cm<sup>2</sup>, para que possa assim ser enviado saturado para utilização nos processos de produção de PVC (Policloreto de Vinila).

O restante do vapor segue por tubulação até 2 válvulas redutoras de pressão, sendo sua pressão reduzida de 42 Kgf/cm<sup>2</sup> para 15 Kgf/cm<sup>2</sup> (vapor saturado), a uma temperatura de 230°C. O vapor de baixa pressão (V-15) alimenta uma tubulação principal de distribuição (header), da qual partem ramificações para as áreas do processo de produção de PVC.

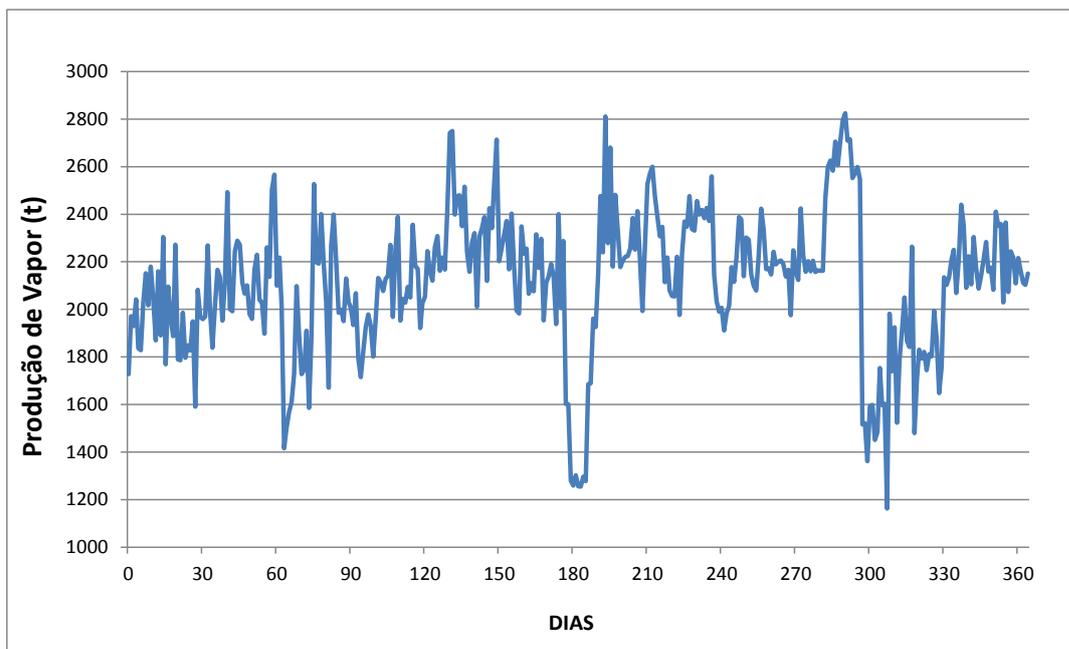
Os próximos tópicos detalham os dados reais de produção de vapor e o comparativo com os resultados gerados pelo modelo.

## 5.1. OPERAÇÃO REAL X RESULTADOS DO MODELO

A produção/demanda de vapor na fábrica de Alagoas não é sazonal durante o ano, mas está diretamente atrelada à operacionalidade das áreas consumidoras. A redução da demanda se dá apenas em casos de manutenções corretivas e/ou paradas para reparos corretivos.

A Figura 3 a seguir ilustra o perfil diário da demanda de vapor da fábrica no período de 21 de novembro de 2012 a 21 de novembro de 2013. O período foi considerado por se tratar do momento de estabilização da produção da unidade de produção de PVC, que antes deste período passou por uma ampliação de suas instalações. Assim trata-se de um período de demanda de vapor estabilizada, sendo, portanto mais representativa.

Figura 3 - Perfil diário da geração de vapor da unidade de PVC.



Fonte: Autor, 2013.

Os vales mais profundos (demandas mínimas) observados no gráfico da Figura 3 são da ordem de 1200 toneladas de vapor, e ocorreram em momentos de parada de pelo menos duas das três caldeiras do sistema de geração de vapor. As paradas geralmente tiveram como causa principal a necessidade de manutenções corretivas nas caldeiras e/ou necessidade de rebaixamento de carga de produção de vapor por baixa demanda nas áreas consumidoras.

Os valores mais altos de consumo de vapor observados na Figura 3 se referem a dias de picos de consumo para produção de PVC, sendo a principal contribuinte a área de polimerização do monocloreto de vinila (MVC) anterior à ampliação da unidade. Na área

referida há diversos equipamentos que consomem vapor como, reatores em batelada para produção PVC, *stripper* de lama de PVC, etc. Os equipamentos da área de polimerização anterior à ampliação possuem tecnologia mais antiga que a área para mesmo fim construída após a ampliação da unidade de produção de PVC, sendo, portanto, menos econômicos em termos de consumo de vapor. Além disto, há alguns agravantes do alto consumo de vapor oriundos da deterioração das instalações, decorrentes do tempo de utilização como: vazamentos de vapor, mau funcionamento de purgadores de condensado, linhas com problemas de revestimento, dentre outros. Tudo isto contribui para que, em termos de demanda de vapor em momentos de pico a área de polimerização consuma 58 t/h de vapor, ou seja, 28% da capacidade horária máxima de produção de vapor da UGV (unidade de geração de vapor).

Os dados apresentados na Figura 3 foram utilizados como dados de entrada para o modelo desenvolvido, informando ao modelo a demanda de vapor em cada dia (subperíodo) do período considerado.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos do modelo e sua comparação com dados da operação do sistema de geração de vapor da unidade industrial.

Tabela 2. Dados de Produção de vapor.

	PROD. DE VAPOR (t/ano)		DIFERENÇA	
	REAL	MODELO	TONELADAS	%
GV 01	263.427	304.310	40.883	15,5
GV 02	218.182	203.251	-14.931	-6,8
GV 04	289.735	263.784	-25.951	-9,0
TOTAL	771.344	771.345	1	0,0

Fonte: Autor, 2013.

Na Tabela 2 é possível observar que o modelo priorizou a produção pela caldeira GV 01 em detrimento das outras. O modelo entende que o custo de partida (*startup*) real da GV 01 é menor que o das demais (conforme a Tabela 3), ou seja, sempre que a demanda de vapor exige que mais de uma caldeira produza ao mesmo tempo, a preferência do modelo em relação ao acionamento é da GV 01, mantendo sua continuidade operacional alta e explicando a produção da GV 01, calculada pelo modelo, representar 39,4 % da produção total e ser 15,5 % maior que na produção real.

Tabela 3. Custos com *startup* por caldeira.

	CUSTO (US\$) POR STARTUP	CUSTO TOTAL (US\$/ano)		DIFERENÇA	
		REAL	MODELO	US\$	%
GV 01	5.457	54.567	21.827	-32.740	-60,0
GV 02	6.839	61.547	34.193	-27.354	-44,4
GV 04	13.630	136.300	40.890	-95.410	-70,0
TOTAL	25.925	252.414	96.909	-155.504	-61,6

Fonte: Autor, 2013.

O modelo sugere uma redução da produção das GVs 02 e 04 em 6,8 e 9%, respectivamente. A maior influência para tal foi o maior custo de partida das duas GVs em detrimento a GV 01, lembrando que o modelo esgota a capacidade de uma caldeira para só então acionar mais uma (ou duas) das outras caldeiras. O mais alto custo de *startup* é aquele referente à GV 04.

Os resultados do modelo sugerem manter a GV 04 operando, sempre que estiver disponível. Em caso de indisponibilidade operacional, no entanto, partir a GV 04 é a última alternativa, sendo preferível esgotar a carga da GV 01 e caso seja necessário acionar a GV 02, para complementar a carga e suprir a demanda. A partida (*startup*) da GV 04 só acontece caso uma das outras caldeiras (GVs) estejam indisponíveis para operar ou a demanda de vapor seja maior que a capacidade produtiva das GVs que já estejam operando.

A Tabela 4 apresenta a distribuição do quantitativo de ocorrências de *startups* para cada caldeira.

Tabela 4. Quantitativo anual de *Startup* (Partidas).

	QUANTIDADE- DE STARTUPS/ANO		DIFERENÇA	
	REAL	MODELO	Nº STARTUPS	%
GV 01	10	4	-6	-60,0
GV 02	9	5	-4	-44,4
GV 04	10	3	-7	-70,0
TOTAL	29	12	-17	-58,6

Fonte: Autor, 2013.

É possível observar que o modelo propõe uma drástica redução na quantidade de partidas nos geradores de vapor. Isto é realizado avaliando a melhor alternativa de configuração para operação das caldeiras, ou seja, o modelo define quais das 3 GVs devem

operar simultaneamente e qual a carga de cada uma para suprir a demanda, levando em conta o custo de partida de cada uma e suas respectivas disponibilidades operacionais.

Há dois fatores principais que influenciam a decisão do cenário operacional sugerido pelo modelo. Um deles, é a anteriormente relatada preferência do modelo em esgotar a carga de uma caldeira, para então complementar a demanda com a produção de outra caldeira. A caldeira de maior carga e a complementar são determinadas pelo custo de acionamento (partida ou *startup*) de cada caldeira, assim sendo, o modelo verifica quais caldeiras estavam em operação no subperíodo anterior ao considerado, e determina a necessidade de acionamento (realizar *startup*) em alguma delas, e qual teria prioridade de partida, por possuir o menor custo de *startup*.

No entanto, considerando um cenário operacional onde todas as GVs estavam operando no dia (subperíodo) anterior, o custo de partida influencia apenas indiretamente em qual caldeira deve ser mantida operando.

Nesse caso, havendo redução do consumo de vapor, o modelo avalia quais caldeiras supririam a demanda de vapor, indicando qual deve sair de operação. A influência indireta do custo de partida aparece no momento de decidir qual delas é a mais viável de parar, levando em consideração a necessidade de retorno à operação em um subperíodo futuro, o que representa custo com partida.

Portanto, o modelo mantém a operação das caldeiras com menor custo de acionamento até esgotar sua capacidade de produção de vapor. Caso seja necessária uma complementação para atendimento da demanda, o modelo mantém operando as caldeiras que apresentam o menor custo de *startup*. Tal decisão é devido à possível saída de operação das caldeiras, por decréscimos na demanda e posterior acionamento em caso de um aumento. Desta forma, se garante que os custos com *startup* (partida) sejam os menores possíveis.

O outro, e não menos importante fator de influência na definição de qual caldeira manter operando ou acionar, é a disponibilidade operacional das GVs. Embora o modelo calcule o melhor cenário em relação a custos de partida, caso alguma GV (caldeira) inclusa no cenário se encontre indisponível operacionalmente (parada), este cenário será excluído pelo modelo. Ou seja, se em um subperíodo (dia) o melhor cenário, em termos de custo, for manter operando com carga alta a GV 04 e manter a GV 01 complementando a demanda, sendo que a GV 01 não estava disponível no dia, o modelo irá partir a GV 02.

As considerações realizadas pelo modelo para geração dos resultados de previsão visam otimizar ao máximo a operação de produção de vapor. As diretrizes operacionais fornecidas pelos resultados do modelo e discutidas nos parágrafos anteriores reduziram em mais de 60% o custo total com *startups*, o que representa uma economia de US\$ 155.504,00 no período de um ano.

A diferença entre o montante total de vapor produzido na simulação realizada pelo modelo e a produção industrial, foi praticamente nula. Para ser mais exato o modelo produziu apenas uma tonelada a mais que a operação real.

Além das informações acerca de perfil de demanda e produção de vapor, outros dados referenciados na Seção 4.2 foram utilizados também como dados de entrada do modelo. Alguns deles são informações confidenciais, as quais não podem ser divulgadas, pois, tornariam público dados industriais restritos a integrantes da Braskem S/A. Os dados industriais, bem como os resultados do modelo passíveis de divulgação serão discutidos a seguir.

O custo total de operação é composto pela soma entre custos relacionados ao consumo de combustíveis e custos relativos a *startups* detalhados.

A Tabela 5 apresenta os dados industriais (reais) de consumo de combustível e o resultado calculado pelo modelo.

Tabela 5. Consumo de combustíveis.

	CONSUMO DE GN (Nm <sup>3</sup> /ano)		DIFERENÇA	
	REAL	MODELO	Nm <sup>3</sup>	%
GV 01	23.156.553	23.932.658	776.105	3,0
GV 02	13.359.737	16.091.157	2.731.420	20,0
GV 04	25.363.204	20.649.186	-4.714.018	-19,0
<b>TOTAL</b>	<b>61.879.494</b>	<b>60.673.001</b>	<b>-1.206.493</b>	<b>-2</b>

Fonte: Autor, 2013.

Em termos de custos individuais de cada caldeira, a GV 04 apresentou a diferença mais significativa entre resultados do modelo e dados da operação industrial. Isso se deve principalmente a dois fatores: a redução drástica (70%) nos acionamentos da GV 04 proposta pelo modelo, e a ocorrência de vários momentos onde o modelo decidiu operar a caldeira com carga baixa, servindo apenas de complemento a caldeira GV 01.

A redução de acionamentos e carga da caldeira, proposta pelo modelo, resultou em uma redução de 19% do consumo de gás natural (GN) da GV 04. O consumo de combustível

da caldeira em questão é o maior dentre as 3 GVs, por isso, apesar do aumento significativo do consumo na GV 02 (superior a 20%), calculado pelo modelo, a redução do consumo da GV 04 foi suficiente para garantir uma economia de 1.206.493 Nm<sup>3</sup>, o que representa uma redução de 2% no consumo de combustível (e portanto no custo) em relação à operação real.

Em relação a operação proposta pelo modelo para a GV 02, houve um aumento de 21,7% no custo com gás natural (GN), conforme é apresentado na Tabela 6. Esse aumento, no entanto, foi superado pela redução (superior a 26%) do custo referente ao consumo de combustível da GV 04. Assim, o resultado final do modelo foi uma economia de US\$ 8.783.912,00/ano em termos absolutos (redução percentual de 6,4%).

Tabela 6. Custos com consumo de combustíveis.

	CUSTO COM GN (US\$/ano)		DIFERENÇA	
	REAL	MODELO	US\$	%
GV 01	48.973.093	50.136.484	1.163.391	2,4
GV 02	27.788.052	33.809.713	6.021.661	21,7
GV 04	59.603.529	43.634.565	-15.968.964	-26,8
TOTAL	136.364.674	127.580.762	-8.783.912	-6,4

Fonte: Autor, 2013.

Baseado nos dados de custos relacionados a *startups* e consumo de combustível, é possível se realizar uma análise relativa aos custos totais da operação de produção de vapor.

Um resumo destes é apresentado na Tabela 7, que demonstra que operando segundo proposição do modelo, alcançou-se uma redução do custo total da produção de vapor em 7%, o que representa uma economia de US\$ 8.939.416,00/ano. O maior impacto foi devido à significativa redução de custos de produção na GV 04 sugerida pelo modelo (aproximadamente 27%).

Tabela 7. Custos de Produção de vapor das caldeiras no período considerado.

	CUSTO TOTAL DE PRODUÇÃO (US\$/ano)		DIFERENÇA	
	REAL	MODELO	US\$	%
GV 01	49.027.660	50.158.311	1.130.651	2,3
GV 02	27.849.599	33.843.906	5.994.307	21,5
GV 04	59.739.829	43.675.455	-16.064.374	-26,9
TOTAL	136.617.088	127.677.671	-8.939.416	-6,5

Fonte: Autor, 2013.

A resolução computacional do modelo resultou em 4.269 restrições e 4.067 variáveis, sendo que destas, 2.027 são binárias. O modelo levou 0,125 segundos para ser processado em computador de 2,13 Gigahertz e 4 GB de memória RAM, convergindo bem rapidamente para a solução ótima.

O modelo desenvolvido, gera uma planilha com dados que servem de guia para uma operação otimizada. As seguintes variáveis são determinadas: carga diária de produção por caldeira; consumo diário de gás natural por caldeira; custo com combustível; identificação do momento de cada *startup*, custo total de produção de vapor.

Os resultados gerados foram satisfatórios, considerando, contudo, as limitações que não foram abordadas, e que tornariam o modelo ainda mais próximo à realidade.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTA PARA FUTUROS TRABALHOS

A abordagem de modelagem desenvolvida e discutida na presente dissertação, se configura como uma ferramenta alternativa para o planejamento da produção de vapor em indústrias químicas. Atualmente, não é difundida a utilização de ferramentas embasadas e fundamentadas em pesquisa operacional, para apoiar as decisões de produção de vapor a nível industrial.

O modelo desenvolvido considerou um horizonte de tempo de um ano, sendo os resultados, comparados com os dados operacionais da unidade industrial. O intuito de se escolher esse período foi testar o poder de previsão de um modelo mais abrangente em termos de tempo. Foram levantados dados reais de produção relativos a parâmetros que fizeram parte do modelo (quantidade de vapor produzida por quantidade de GN consumida; preço do combustível; demanda de vapor; disponibilidade operacional das caldeiras, etc).

A aplicação do modelo a um menor horizonte de tempo de planejamento, por exemplo, de um mês, necessitaria de uma menor quantidade de dados reais, mapeando de forma menos fidedigna o processo de produção. Portanto, o período utilizado para aplicação do modelo (um ano) visou reduzir os erros atrelados a previsões imprecisas sobre o sistema de produção de vapor.

Por outro lado, como o modelo foi desenvolvido para realizar previsões, em sua utilização prática, alguns dos dados reais utilizados na composição do modelo teriam que ser estimativas futuras (o perfil de demanda, por exemplo). Assim sendo, considerar um maior horizonte de tempo de planejamento implicaria na inserção da imprecisão de uma estimativa futura. Portanto, é sugerida a redução dos períodos de aplicação do modelo para horizontes de tempo mais curtos, ou seja, deve-se utilizar o modelo para prever parâmetros como: produção de vapor e consumo de combustíveis por período e por caldeira; quantidades de *startups*; momento de utilização de cada gerador de vapor e custos atrelados à geração de vapor, em períodos como meses ou semanas, sendo os subperíodos divididos em dias. Para tal, é necessário realizar uma adaptação simples do modelo deste trabalho para que este considere períodos curtos como horizonte de tempo de planejamento e forneça previsões também em períodos mais curtos.

No estudo de caso desenvolvido, o modelo foi aplicado a unidade industrial de produção de PVC da Braskem S/A, portanto, os resultados obtidos pelo modelo foram

considerados satisfatórios quando comparados com a operação real. Os resultados do modelo apresentaram uma redução do custo total da produção de vapor no ano em 7%, o que representaria uma economia de US\$ 8.939.416,00/ano. Assim o modelo apresentado pode ser aplicado para o planejamento da produção de vapor a outras empresas e segmentos industriais, desde que adaptado à realidade de cada unidade.

Algumas vertentes de estudos, derivadas do modelo desse trabalho, são discutidas a seguir.

Um primeiro ponto a se abordar seria a vertente ambiental, atualmente bastante divulgada no tocante a preocupação com as emissões de gases poluentes na atmosfera pelos sistemas de produção.

Uma extensão interessante na pesquisa do presente trabalho seria considerar um modelo multi objetivo, no qual ao mesmo tempo em que se atendesse à demanda de vapor da fábrica, foca-se também, em minimizar a emissão de gás carbônico devido à queima dos combustíveis nas caldeiras. A abordagem abrangeria tanto questões ecológicas, de suma importância para desenvolvimento de um diferencial empresarial no mundo atual, quanto a maximização da produtividade, grande alvo das empresas.

No que se refere a aproximar as restrições e equações do modelo, da realidade industrial, uma sugestão interessante seria a introdução de um fator que leve em consideração a eficiência de combustão de cada caldeira. O fator de conversão de gás natural (GN) em vapor ( $vi_j$ ) utilizado no modelo varia mensalmente, não considerando as variações de eficiência de combustão das caldeiras em períodos menores, como dias e semanas, distanciando de certa forma os resultados da realidade. Outro ponto, é que o modelo foi desenvolvido para aplicação em indústrias que utilizem gás natural como combustível. Seriam interessantes adaptações do modelo para sistemas de geração de vapor que utilizam outros tipos de combustíveis, como a biomassa. O modelo então, consideraria restrições relacionadas à gestão de estoques de combustíveis, otimização da utilização considerando a umidade de cada biomassa, disponibilidade de cada uma delas (sazonalidade), etc.

Ainda no âmbito de melhorar a proximidade com a operação industrial, outro ponto importante se refere à limitação do modelo desenvolvido, em acionar exclusivamente uma caldeira até que se esgote sua capacidade, acionando um segundo equipamento apenas quando a demanda de vapor no subperíodo não for atendida totalmente por apenas uma caldeira. A característica torna os resultados do modelo, menos próximos a realidade.

Uma solução para isto seria o balanceamento da geração de vapor entre as caldeiras simultaneamente, sem imposição numérica do programador, ou seja, o modelo decidiria em qual momento acionar qual caldeira e qual seria a carga desta.

Seria de grande valia tornar os parâmetros demanda de vapor ( $dn$ ) e plano de manutenção das caldeiras ( $e_{nj}$ ) em variáveis de decisão do modelo. Assim momentos de parada e partida, além da carga de cada gerador de vapor em cada período/subperíodo seriam definidos pelo modelo considerando as informações inseridas como base de dados para o mesmo, isto traria uma maior aproximação do modelo à realidade operacional.

Um assunto correlato seria inserir no modelo, além das duas variáveis de decisão citadas acima, a possibilidade de falhas dos equipamentos.

Possivelmente, nessa situação, o modelo traria a sugestão de, em alguns momentos, acionar caldeiras, somente em regime de *warmup* (abafamento), garantindo algum nível de segurança ao sistema, evitando que se ultrapasse os limites de segurança dos equipamentos de geração de vapor e ao mesmo tempo se otimizem os custos de operação.

## 7. REFERÊNCIAS

- ARENALES, M.N. & CLARK, ARAÚJO, S. A., A.R. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte. *Gestão & Produção*, v.11, n.2, p.165-176, 2004.
- ASME PTC 4.1: Performance test code on steam generating units, ASME, Nova York, EUA, 2004.
- ASSIS, Bruno Bastos. Avaliação do ciclo de vida do produto como ferramenta para o desenvolvimento sustentável. 2009. 66p. Monografia de Conclusão de Curso - Universidade Federal De Juiz De Fora, Juiz de Fora, MG, 2009.
- 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.
- BASTOS, Alexandre Paranhos; LAURIA, Rodrigo Linhares. Otimização no dimensionamento de lotes de produção restringido pela área de estocagem. XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP, Fortaleza, CE, 09 a 11 de Outubro, 2006.
- BERTRAND, J.W.M. & FRANSOO, J.C.. Modelling and simulation operations management research methodologies using quantitative modeling, *International Journal of Operations & Production Management*, v.22, n. 2, p. 241-264, 2002.
- BITRAN, G.R. & YANASSE, H.H. Computational complexity of the capacitated lot size problem. *Management Science*, v.28, p.1174-1186, 1982.
- BOJIC, M. & DRAGICEVIC, 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.
- 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. Optimization models for decision support in the development of biomass-based industrial district-heating networks in Italy. *Applied Energy*, v.82, p.228-254, 2005.
- SERFATY, Ricardo. Combustão e Queimadores. CENPES/Engenharia Básica/Equipamentos, Rio de Janeiro, RJ, p.97, 2007.
- DREXL, A. & KIMMS, A. Lot sizing and scheduling – survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, v.99, n.2, p.221-235, 1997.
- FLEISCHMANN B. & MEYER H. The general lotsizing and scheduling problem. *OR Spektrum*, v.19, p.11-21, 1997.
- GERSHWIN, S. Manufacturing systems engineering. New Jersey: Prentice Hall.1994.

GRAVES, S.C. & RINNOOY KAN, A.H.G. & ZIPKIN, P.H. Logistics of production and inventory. Handbook in operations research and management science, v. 4. Amsterdam North-Holland, 1993.

HAX, A. & CANDEA, D. Production and inventory management. New Jersey: Prentice-Hall; Englewood Cliffs, 1984.

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.

HIRATA, K., SAKAMOTO, H., O'YOUNG, L., CHEUNG, K. Y., HUI, C. W. Multi-site integration – an industrial case study. Computers & Chemical Engineering, v. 28, p. 139-148, 2004.

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: Wiley. 1974.

KAWAMURA, M. Seiti. Dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção na indústria de bens de consumo de higiene pessoal. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 2011.

LAW, A.M. & KELTON, W.D. Simulation modeling and analysis, 2ª Ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

MORAES, Edilaila F.. Análise um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina cauê da CVRD, Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, MG, 2005.

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

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.

NAHMIAS, S. Production and operations analysis. Irwin, Homewood, 1995.

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

PINTO, J. H. F., Otimização on-line do Sistema Termoelétrico de uma Companhia Petroquímica, 1995. Figener S/A Engenheiros Associados. Disponível em: <[http://www.figener.com.br/informativos/informativo\\_03.pdf](http://www.figener.com.br/informativos/informativo_03.pdf)>. Acesso em: Junho 2013.

RITZMAN, L. P. E KRAJEWSK L. J. Administração da produção e operações. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

ROCCO, C. D. ; MORABITO, R. . Modelos de otimização para o gerenciamento de insumos na operação de caldeiras industriais. In: XXIX Congresso Nacional de Engenharia de Produção, 2009, Salvador. Anais em CD-ROM: XXIX Congresso Nacional de Engenharia de Produção, 2009.

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. Dissertação de Mestrado. UFSCar, São Carlos, SP, 2011.

KUIK, R., SALOMON, M. e WASSENHOVE, L..Batching decisions: structure and models, European Journal of Operational Research, v.75, p.234-263, 1994.

SCHRAMM, Fernando; PINTO, Dorival de C.. Otimização do planejamento da produção de uma indústria de calçados. XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP, Porto Alegre, RS, 29 de out. a 01 de nov., 2005.

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

TRANSCHEL, Sandra. A hybrid general lot-sizing and scheduling formulation for a productio process with a two stage product structure. International Jornal of Production Research, v.49, n.9, p.2463-2480, 2011.

TOSO, E.A.V.; MORABITO, R. & CLARK, A. R. Lot-sizing and sequencing optimization 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.

TOSO, E.A.V.. Dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção na indústria de suplementos para nutrição Animal. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos, SP, 2008.

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

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

ZATTAR, I. C. Análise da aplicação dos sistemas baseados no conceito de capacidade finita nos diversos níveis da administração da manufatura através de estudos de caso. (Dissertação de Mestrado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 2004.