

PAULA LOPES DE JESUS SABOIA

PROBLEMA INTEGRADO DE DIMENSIONAMENTO E  
SEQUENCIAMENTO DE LOTES DE PRODUÇÃO EM UMA FÁBRICA DE  
PRODUTOS DE HIGIENE PESSOAL

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do diploma de Engenheiro de  
Produção.

São Paulo  
2010





PAULA LOPES DE JESUS SABOIA

PROBLEMA INTEGRADO DE DIMENSIONAMENTO E  
SEQUENCIAMENTO DE LOTES DE PRODUÇÃO EM UMA FÁBRICA DE  
PRODUTOS DE HIGIENE PESSOAL

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do diploma de Engenheiro de  
Produção.

Orientadora:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Débora Pretti Ronconi

São Paulo

2010

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Saboia, Paula Lopes de Jesus**

**Problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção em uma fábrica de produtos de higiene pessoal/ P.L.J Saboia. - São Paulo, 2010.**

**147 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.**

**1. Sequenciamento da produção 2. Produção (Economia)  
3. Custo industrial I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II. t.**

A minha mãe, ao meu pai, aos meus avós e àqueles que  
seguiram comigo até o fim desse novo começo



## AGRADECIMENTOS

A Prof. Dra. Débora Pretti Ronconi pela orientação exemplar, confiante e amigável e pelos ensinamentos de grande valia de Engenharia de Produção.

A equipe da Kimberly-Clark pelo desenvolvimento que me deu ao longo desses dois anos de estágio com treinamentos, palestras e cursos. Em especial ao Márcio Kawamura por atuar como co-orientador deste trabalho e sem o qual o empenho em sua realização definitivamente não teria sido o mesmo.

A minha mãe Maria Alice que sempre me deu o amor e apoio para chegar a esta etapa da minha vida, além de ter sido e continuar sendo um exemplo de pessoa persistente e forte. Ao meu pai Antonio Carlos que sempre me divertiu das maneiras mais engraçadas e me fazia esquecer dos problemas. Aos meus avós por todo o carinho que me deram desde criança. A todos eles, agradeço por todos os passeios nos finais de semana que deixaram de fazer para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

Aos meus amigos que fizeram a tortura politécnica ter um gosto doce. Em especial ao pessoal do CAEP com quem eu pude conviver durante três anos, me divertindo em Integrapolis e cervejadas, e sem os quais os trabalhos acadêmicos não teriam a mesma dificuldade ou facilidade.

Ao pessoal da xerox que ajudaram muito nas horas de copiar material para estudar. A Cris e ao Osni, os grandes amigos-pais de quem passa pela Engenharia de Produção, pelo exemplo de pessoas amáveis e carinhosas que são.

Gostaria de agradecer em especial meus amigos Lemos, Luís Henrique, Renata, Sofia, Ruth e meu namorado Thiago, que não desistiram de mim, mesmo indo esporadicamente a passeios e festas durante este ano. Essas pessoas contribuíram e agregaram muito na minha jornada, com risadas e brincadeiras e até mesmo com broncas e críticas que me fizeram abrir os olhos e pensar de uma nova maneira.

A todas essas pessoas um muito obrigado repleto de sinceridade.

## EPÍGRAFE

“Uma jornada de milhares de quilômetros deve começar com um único passo”

Provérbio chinês

## RESUMO

Este trabalho se propõe a analisar a questão do dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção em uma fábrica de uma empresa de bens de consumo descartáveis do ramo de higiene pessoal e limpeza doméstica. Trata-se de auxiliar o processo de planejamento da produção levando em conta os custos de preparação de máquina, de produção, de estocagem e de *backorders*. Embora seja um tema amplamente tratado na literatura, há pouco material disponível envolvendo máquinas distintas operando em paralelo, *setup* dependente da sequência e permissão de *backorders*. Além disso, não há nenhum trabalho que considere o número de equipes supervisoras de produção. Por se tratar de um problema NP-difícil não foi possível encontrar uma solução viável por métodos exatos. Aplicou-se então uma estratégia da heurística *relax-and-fix* tradicionalmente utilizada na literatura para a resolução deste tipo de problema. Experimentos computacionais foram realizados para comparar os resultados propostos pela heurística com os obtidos na realidade pela empresa. Os custos sugeridos pela heurística ficaram abaixo dos custos praticados pela organização. Por fim testes adicionais foram realizados incluindo a resolução do problema com parâmetros diferentes de entrada e uma análise do impacto da variação do número disponível de equipes de supervisão da produção no custo total da operação.

**Palavras- chave:** *setup* dependente, dimensionamento, sequenciamento, heurística *relax-and-fix*





## ABSTRACT

This paper aims to explore the issue of lot sizing and scheduling problem in a plant of a consumer goods company in the business of disposable personal hygiene and household cleaning. This work addresses to assist production planning process taking into account the setup costs, production costs, storage costs and backorder costs. Although it is a topic widely addressed in the literature, there is little available involving different parallel machines, sequence dependent setup times and permission of backorders. Furthermore, there is not any work that considers the number of supervisory staff in production. Because it is an NP-hard problem one could not find a viable solution by exact methods. Thus, a strategy of relax-and-fix heuristics, traditionally used in literature, was applied to solve the problem. Computational experiments were conducted to compare the results proposed by heuristic with those obtained in reality by the company. Costs suggested by the heuristics were below company's operational costs. Finally additional tests were made including its resolutions for a planning horizon with different input parameters and an analysis of operational costs obtained when varying the number of supervisory staff in production.

**Key words:** sequence dependent setup times, lot sizing, scheduling, relax-and-fix heuristics



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA .....</b>	<b>21</b>
<b>3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>27</b>
3.1 Descrição do Problema .....	27
3.2 Processo Atual.....	33
3.3 Objetivo do Trabalho .....	35
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>39</b>
4.1 Problema-tema do presente estudo .....	39
4.2 Características dos modelos da literatura .....	41
4.3 Evolução das formulações matemáticas .....	45
4.3.1 Problema discreto (DLSP) .....	46
4.3.2 Problema com conservação do estado de preparação da máquina (CSLP).....	47
4.3.3 Problema com dimensionamento proporcional à capacidade (PLSP) .....	47
4.3.4 Problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes (GLSP).....	48
4.3.5 Problema geral com tempos de setup dependentes da sequência (GLSPST).....	48
4.3.6 Problema geral em máquinas em paralelo (GLSPPL).....	50
4.4 Resumo das formulações apresentadas .....	52
<b>5 MODELO PROPOSTO .....</b>	<b>55</b>
5.1 O Modelo .....	55
5.2 Detalhamento do modelo .....	60
5.3 Testes Preliminares .....	67
5.4 Validade do modelo .....	75
<b>6 OBTENÇÃO DOS DADOS .....</b>	<b>79</b>
<b>7 RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>85</b>

7.1 Método exato de resolução .....	85
7.2 Aplicação da heurística .....	86
7.3 Apresentação dos resultados .....	90
7.4 Testes adicionais .....	93
7.4.1 Diferente cenário de operação da fábrica .....	93
7.4.2 Variação do número de equipes de supervisão da produção .....	97
<b>8 CONCLUSÕES .....</b>	<b>105</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE A - Cálculo de demanda das equipes supervisoras de máquina .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE B - Código do problema em linguagem OPL .....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE C - Dados de entrada para o problema piloto.....</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE D - Dados de entrada para o problema real HP1 .....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNDICE E - Saída para o problema real HP1 .....</b>	<b>122</b>
<b>APÊNDICE F - Dados de entrada para o problema real HP2.....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE G - Saída para o problema real HP2.....</b>	<b>138</b>

Capítulo 1

# **Introdução**



# 1 INTRODUÇÃO

A questão do dimensionamento e do sequenciamento de lotes se tornou uma necessidade para qualquer empresa que queira sobreviver no mercado onde está inserida principalmente frente a um cenário tão competitivo e acirrado.

O dimensionamento de lotes envolve a quantidade produzida em uma máquina sem a existência de paradas para trocar a produção de uma família de produtos para outra. Dimensionar os lotes incorretamente pode acarretar pedidos não atendidos e excesso de produto acabado em estoque, por exemplo.

Já o sequenciamento destes lotes, tem por objetivo determinar em que ordem os lotes devem ser produzidos e em quais máquinas, alocando da melhor maneira os recursos por vezes escassos. Se por um lado sequenciar as tarefas tende a garantir o atendimento dos pedidos no prazo correto e balancear os estoques, por outro, ainda melhora a gestão dos recursos envolvidos na produção conforme ressalta Pinedo (2002).

O problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção consiste em determinar simultaneamente a quantidade a ser produzida, em qual máquina, em qual momento. O presente estudo abordará este tema e propõe solucionar um problema de planejamento no nível tático/operacional de uma empresa inserida no ramo de higiene pessoal com a utilização de técnicas de pesquisa operacional.

O processo de planejamento e programação da produção da empresa sob ótica de estudo apresentou oportunidades de melhoria que deram abertura para o desenvolvimento deste trabalho. Em linhas gerais, a forma como se planeja e programa a produção na empresa está fortemente baseada na experiência do operador e de seu supervisor, além de ser quase que na sua totalidade realizada por meio de planilhas eletrônicas. Assim, com uma forma não automatizada de trabalho, a criação de cenários alternativos de solução fica dificultada e relativamente lenta.

Dessa forma, pretende-se melhorar o processo atual de planejamento das operações utilizando técnicas de pesquisa operacional para minimizar os custos envolvidos na produção de uma família de produtos da empresa, considerando as capacidades produtivas e restrições inerentes às operações da fábrica responsável. As melhorias que o estudo atual pretendem trazer à forma como a área de planejamento trabalha incluem assertividade no planejamento e programação das tarefas da fábrica eliminando possíveis retrabalhos diários no Plano Mestre de

Produção e envolvendo um método mais preciso de dimensionamento de lotes e programação das tarefas nas máquinas.

Vale ressaltar ainda que, o problema abordado neste trabalho pode ser enquadrado nas classificações da literatura como *GLSPPL (General Lot Sizing and Scheduling Problem with Parallel Machines)* estudado por Meyr (2002). No entanto o presente estudo considera diferentes características das abordadas por este autor como, existência de número limitado de equipes supervisoras da produção e permissão de atraso ou não entrega de produtos.

A descrição da empresa é feita no capítulo 2. Nele será dado um panorama da empresa onde o presente trabalho foi desenvolvido, sua missão, sua visão e seus valores, principais produtos e categorias de produtos, principais concorrentes. Além disso, explica-se como está estruturada a diretoria na qual o estágio, que possibilitou o desenvolvimento deste estudo, foi desenvolvido.

O capítulo 3 aborda o problema identificado no processo atual de planejamento da produção. Há uma descrição do mercado de absorventes no Brasil e as empresas mais atuantes neste setor. Além disso, apresenta-se detalhadamente o problema abordado, o processo atual de planejamento existente na empresa e o objetivo do trabalho.

O capítulo 4 versa sobre a pesquisa bibliográfica acerca do tema de dimensionamento e sequenciamento de lotes. As características dos problemas presentes na literatura são explicados para melhor entendimento dos modelos matemáticos existentes. Além disso, há uma descrição dos diferentes tipos de problemas, partindo do mais simples até chegar no *GLSPPL*.

No capítulo 5 a modelagem matemática para a resolução do problema é apresentada e detalhada, bem como os resultados computacionais preliminares para um problema piloto com dados reais que possibilitaram a validação do modelo formulado.

No capítulo 6 será dada uma breve descrição de como os dados de entrada para o problema real foram obtidos ou calculados.

No capítulo 7 os resultados obtidos para o problema serão discutidos, analisados e comparados com os dados da empresa, comprovando a eficácia da metodologia proposta. Além disso, serão tratados dois testes adicionais. O primeiro comprovará a funcionalidade do modelo para diferentes cenários de operação da empresa. O segundo discutirá sobre a necessidade de contratação de mais equipes para cada cenário estudado.

Por fim, o capítulo 8 versa sobre as conclusões acerca do problema estudado, seus resultados e sugestões de possíveis estudos futuros.



## Capítulo 2

# **Descrição da empresa**



## 2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A empresa de estudo do presente trabalho de formatura é a Kimberly-Clark Brasil. Trata-se de uma empresa inserida na *Kimberly-Clark Corporation*, uma multinacional norte-americana com produtos comercializados em mais de 150 países, atuante no setor de produção de bens de consumo descartáveis voltados para higiene pessoal e limpeza doméstica.

A empresa está presente no Brasil desde 1996, mas foi somente há 5 anos que começou a figurar entre as empresas líderes do seu ramo de atuação no país. No ano de 2009 a empresa atingiu um faturamento de US\$ 730 milhões.

A missão da empresa é: *promover soluções de higiene e limpeza de forma sustentável para todas as pessoas, todos os dias e em todos os lugares*. Sua visão é redefinida a cada cinco anos ou toda a vez que a visão estabelecida é atingida antes do tempo previsto. Na figura 1 estão esquematizados as bases da visão 2015: liderança de mercado, inovação com execução perfeita, distribuição e conquista do ponto de venda, competitividade operacional e sustentabilidade.



Figura 1 - Visão 2015 da Kimberly-Clark Brasil (material interno da empresa)

Como pilares de funcionamento, a K-C Brasil se apóia em 8 valores, esquematizados na figura 2: valorização das pessoas, trabalho em time, paixão pelo que fazemos, integridade, inovação, compromisso com o consumidor, compromisso com o cliente, responsabilidade social.

Atualmente a K-C Brasil conta com 4 plantas industriais (localizadas em Eldorado do Sul - RS, Correia Pinto - SC, Mogi das Cruzes - SP e Suzano - SP) e 2 Centros de Distribuição (CDs) (em Mogi das Cruzes - SP e Recife - PE), além de um escritório central

em São Paulo e outro em Recife, empregando pouco mais de 4 mil funcionários distribuídos nessas unidades.



Figura 2 - Valores da Kimberly-Clark Brasil (material interno da empresa)

Na figura 3 pode-se visualizar melhor como estão distribuídas as plantas e os CDs da empresa. É importante atentar que no caso das fábricas de Suzano, Mogi e do CDMA (Centro de Distribuição Mata Atlântica) como estão localizados em cidades muito próximas, optou-se por não representar exatamente onde se localizam as plantas.

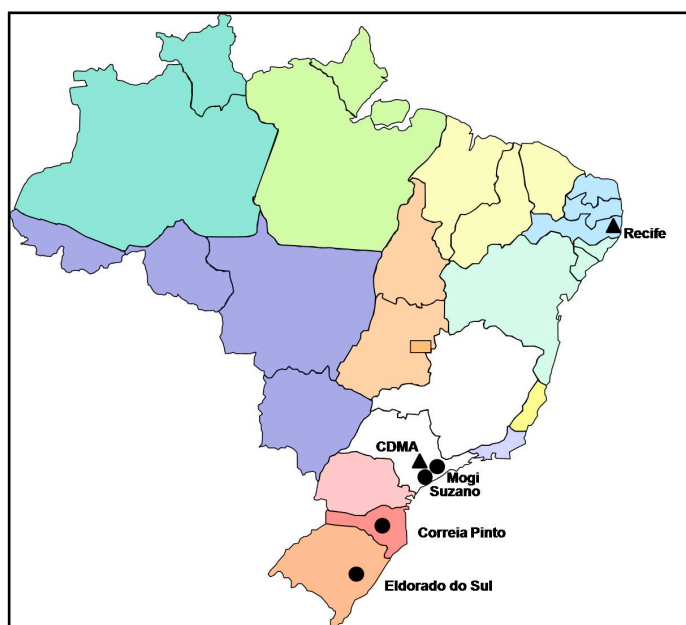


Figura 3 - Plantas industriais e CDs da empresa (elaborado pela autora)

A linha de produtos da empresa pode ser dividida em três grandes famílias:

- a) **Kimberly-Clark Professional:** produtos destinados ao comércio B2B como soluções de higiene em banheiros de restaurantes, hotéis, clubes, hospitais e

fábricas. Os principais concorrentes nesta categoria são a Santher e a Melhoramentos;

- b) **Health Care**: linha de produtos destinados a procedimentos cirúrgicos e roupas de não-tecido para serem usadas pela equipe médica e pelo paciente, atendendo todos os requisitos e especificações de esterilização. Também voltado para o mercado B2B. A Procter&Gamble é a principal concorrente deste segmento;
- c) **Kimberly-Clark Consumo**: Procter&Gamble, Johnson&Johnson's, Santher e Melhoramentos são os principais concorrentes desta família de produtos, esquematizada na figura 4, que ainda pode ser dividida em quatro sub-grupos:
  - i) **Adult Care**: produtos destinados a adultos com problemas de incontinência urinária;
  - ii) **Family Care**: abrange principalmente a categoria de papéis higiênicos, guardanapos e panos para limpeza doméstica. É nesta categoria que se enquadra o papel higiênico Neve, carro chefe da companhia e líder de mercado no segmento de papéis higiênicos de folha dupla.
  - iii) **Infant Care**: inclui produtos para bebês, como fraldas descartáveis, xampu, sabonete, toalhas umedecidas e outros;
  - iv) **Feminine Care**: voltado principalmente para a produção de absorventes femininos descartáveis.



Figura 4 - Alguns dos produtos e marcas da Kimberly-Clark Consumo (elaborado pela autora)

Em particular, o presente estudo focará na categoria de *Feminine Care*, cujos principais produtos (absorventes e protetores) são processados na fábrica de Eldorado do Sul responsável por atender toda a demanda de absorventes femininos descartáveis do Brasil. A fábrica conta com quase 400 colaboradores e 17.704 m<sup>2</sup> de área construída.

O planejamento e controle da produção dessa fábrica está sob responsabilidade da diretoria de *Supply Chain*, mais especificamente da área de PCO (Planejamento e Controle Operacional). Além de cuidar da categoria de *Feminine Care* a área ainda concentra as decisões de planejamento das outras categorias (*Adult Care*, *Infant Care* e *Family Care*). O planejamento das categorias de *Feminine Care*, *Adult Care* e *Infant Care* está sob alçada de um supervisor, enquanto o planejamento de *Family Care* está sob alçada de outro.

Há um terceiro supervisor responsável pelo Planejamento da Demanda. As atividades dessa área incluem prever a quantidade de produtos que será demandada em um período de quatro meses. O processo de determinação dos números de previsão de demanda envolvem tanto modelos matemáticos, quanto reuniões entre todos os líderes de equipes/áreas, mas principalmente os líderes de venda. Como eles estão sempre em contato com os clientes, têm o melhor senso crítico para ajudar a determinar o quanto provavelmente um cliente comprará nos próximos meses.

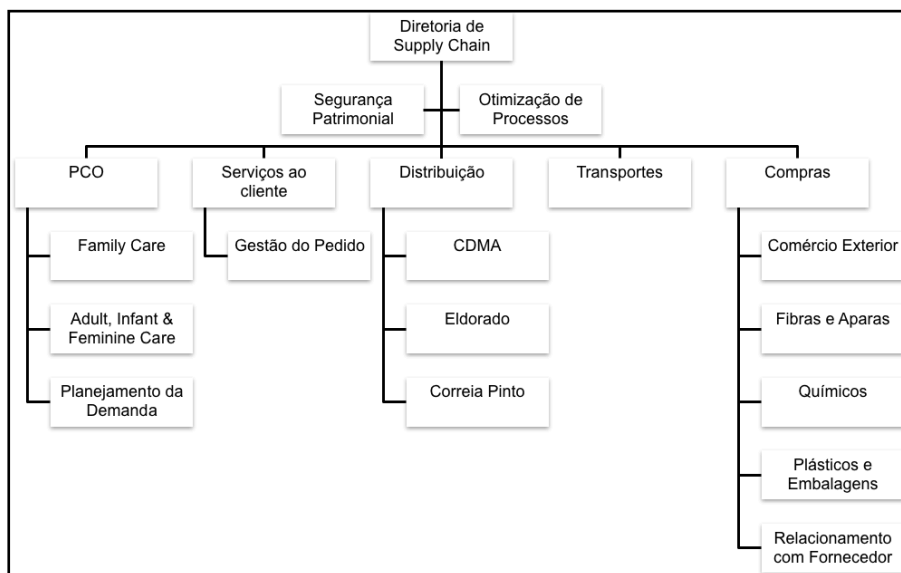


Figura 5 - Organograma da Diretoria de *Supply Chain* (elaborado pela autora)

Outra área que apresenta especial relevância para o presente trabalho e que, portanto, também será descrita é a área de Otimização de Processos. Ela é responsável por desenvolver projetos de aplicação de pesquisa operacional para todas as outras áreas da diretoria de *Supply Chain*, de forma a fornecer apoio e soluções de otimização. Foi, justamente, nessa área que se deu o vínculo com a empresa através de estágio e que possibilitou o desenvolvimento do presente estudo. O organograma desta diretoria, apresentado na figura 5, contribui para um melhor entendimento do papel de cada área dentro de *Supply Chain*.

## Capítulo 3

# **Definição do problema**





### 3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo será dado um panorama sobre o mercado de absorventes femininos no Brasil, englobando seu crescimento e valor em reais movimentado em 2009. Também será tratada a participação em valor do mercado entre as principais empresas atuantes no setor e o percentual da receita líquida da Kimberly-Clark que advém da venda de absorventes.

Em seguida, o problema abordado será detalhado e posicionado em um dos três níveis hierárquicos de planejamento e explicando suas particularidades em relação aos modelos tradicionalmente propostos na literatura.

Por fim, será descrito o processo atual de planejamento e programação da produção que, embora seja bom, envolve certas limitações que deram abertura para o desenvolvimento do presente estudo.

#### 3.1 Descrição do Problema

O mercado de absorventes femininos no Brasil se mostra cada vez mais acirrado e competitivo. A entrada recente de novos concorrentes ameaça a hegemonia de marcas que por muito tempo detinham a liderança do mercado. Com a presença de várias marcas e opções imediatas de compra, cada vez mais, se faz necessária a presença dos produtos nas gôndolas dos supermercados. Cabe observar que os supermercados são clientes-chave de quaisquer empresas de bens de consumo. Nesse cenário, não cumprir os prazos de entrega gera atraso ou não atendimento de pedidos de produtos e pode acarretar perda de venda para um potencial consumidor final.

Segundo dados internos da empresa fornecidos pela Nielsen, o segmento de absorventes externo e interno movimentou em 2009 cerca de R\$ 1,35 bilhão no Brasil, 7,5% a mais do que em 2008. Atualmente a marca líder é a *Sempre Livre* da tradicional Johnson&Johnson's e foi responsável por 35% deste valor. Em segundo lugar está *Always* da Procter&Gamble que detém 24% do mercado em reais, seguido pela *Intimus* da Kimberly-Clark com 23%. No entanto, quando se considera o mesmo mercado em volume de vendas, a

segunda posição se inverte com a terceira e a Kimberly-Clark aumenta sua participação para 24%. Os gráficos das figuras 6 e 7 ilustram essas duas abordagens.

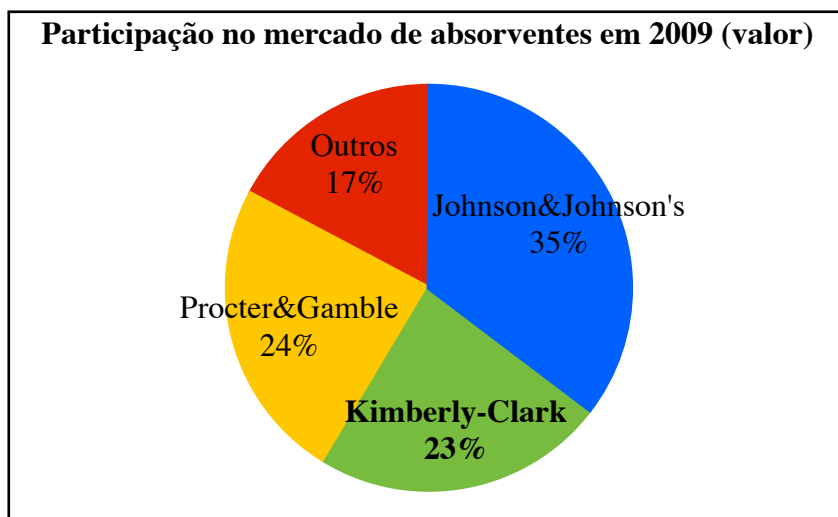


Figura 6 - Participação em reais da Kimberly-Clark no mercado brasileiro de absorventes em 2009 (elaborado pela autora com dados de mercado da Nielsen)

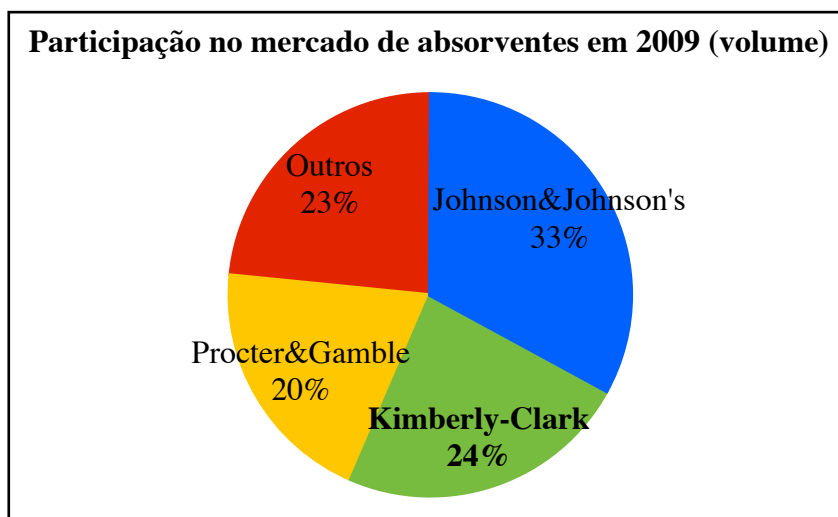


Figura 7 - Participação em volume da Kimberly-Clark no mercado brasileiro de absorventes em 2009 (elaborado pela autora com dados de mercado da Nielsen)

Pela análise dos gráficos pode-se dizer que embora a liderança da Johnson & Johnson's seja bem sólida, a Kimberly-Clark detém uma importante fatia do mercado. Assim, os absorventes femininos *Intimus* além de representarem grande importância no mercado, também representam grande importância para a empresa. Essa importância é reforçada através da análise do gráfico da figura 8, que mostra a parcela da receita líquida da companhia em 2009 que é detida pelos absorventes *Intimus*.

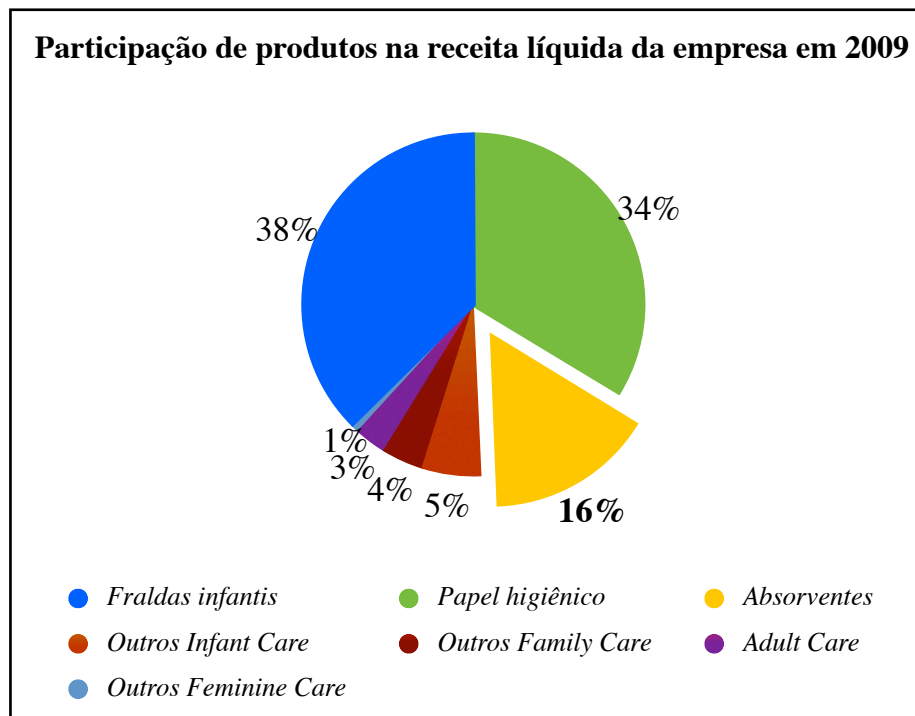


Figura 8 - Participação de absorventes na receita líquida em empresa em 2009  
(elaborado pela autora com dados internos da empresa)

Considerando argumentos expostos, pode-se dizer que os absorventes representam grande parcela da receita líquida da empresa, estão inseridos em um mercado competitivo e acirrado e representam uma categoria de produto importante para o segmento de higiene pessoal feminina.

Neste sentido, as decisões de planejamento e controle da produção exercem uma influência muito forte nas operações da organização, principalmente naquelas que se enquadram no modelo *Make to Stock* de produção, como é o caso da Kimberly-Clark Brasil.

#### Dimensionamento e sequenciamento de lotes

Os problemas de produção, em geral, são classificados em três níveis hierarquicamente relacionados: estratégico, tático e operacional. Cada um dos níveis superiores alimenta o nível diretamente inferior com as decisões tomadas no primeiro. Nesse contexto, a cada nível, o horizonte de planejamento diminui e com ele, segundo Slack (1997), a facilidade de fazer planos e replanejamentos. Além disso, segundo o autor, os níveis hierárquicos mais altos

envolvem mais planejamento do que controle e essa relação se inverte a medida que os níveis diminuem.

O estratégico, nível mais alto, contempla as decisões que serão tomadas no longo prazo geralmente envolvendo altos investimentos e planejando os recursos de forma agregada, por exemplo, determinar o número de máquinas e equipamentos de uma fábrica tendo em vista a demanda daqui alguns anos.

O tático trata de dois tipos de planejamento o agregado e o de quantidades de produção. O primeiro determina níveis de mão-de-obra, subcontratação e horas extras num horizonte de planejamento de meses a um ano. O segundo determina quanto e quando produzir de cada produto em um horizonte de semanas a seis meses.

Por fim o nível operacional controla as atividades diárias de operação da fábrica, alimentadas pelas decisões vindas do nível tático. Neste nível os recursos e a demanda são tratados de forma desagregada e qualquer intervenção de grande escala fica dificultada. Este nível, por ser o mais baixo, é o que apresenta menor planejamento e maior controle.

O problema abordado neste trabalho enfoca a solução de um problema no nível tático/operacional, no que tange o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes com máquinas operando em paralelo a taxas de produção distintas e com capacidade de produção limitada da fábrica de absorventes da Kimberly-Clark Brasil, responsável por atender toda a demanda de absorventes da empresa no Brasil.

Por determinação dos tamanhos dos lotes entende-se que se deve determinar a quantidade de produtos que certa máquina processará de uma só vez, ou seja, sem a existência de tempos de preparação de máquina neste intervalo de tempo. Já o sequenciamento destes lotes, objetiva responder a questão de qual ordem os lotes devem ser produzidos e em quais máquinas. Em particular, para o problema em questão, o dimensionamento de lotes pode ser classificado como monoestágio segundo Araujo e Arenales (2000), pois a fabricação dos produtos não depende de nenhum produto componente.

Segundo Meyr (2002) pelo fato da sequência depender dos tempos de *setup*, a capacidade disponível para a produção em determinada máquina somente é conhecida quando o tamanho e a sequência dos lotes já foram determinados. Dessa forma, o tamanho dos lotes, a determinação em qual máquina produzir e a ordem devem ser feitos simultaneamente.

Assim, para a resolução do problema abordado busca-se determinar ao mesmo tempo, o tamanho dos lotes, a máquina de produção destes e em que sequência eles devem ser

produzidos. Além disso, objetiva-se minimizar os custos envolvidos na operação respeitando as restrições inerentes do processo.

Vale destacar que, o problema deste trabalho envolve algumas características particulares como máquinas operando em paralelo e com diferentes taxas e custos de produção, número limitado de equipes supervisoras de produção, custos e tempos de preparação de máquinas dependentes da sequência e, finalmente, permissão de atrasos de entrega de produtos dentro do horizonte de planejamento.

O problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes se mostra cada vez mais importante para empresas que se enquadram no modelo *Make to Stock* de produção, como é o caso da Kimberly-Clark Brasil. Dimensionar incorretamente os lotes pode acarretar pedidos não atendidos e excesso de produto acabado em estoque. Da mesma forma, sequenciá-los incorretamente pode gerar descumprimento de prazos, acumulação de produtos, maiores custos de *setup* de máquinas e redução da capacidade produtiva da fábrica.

### Detalhamento do problema

A fábrica na qual o trabalho foi desenvolvido conta com máquinas distintas operando em paralelo. As máquinas possuem diferentes taxas de produção. Dessa forma, os custos de produção também podem ser diferentes, dependendo da máquina utilizada.

Tais máquinas são responsáveis por produzir os principais itens da categoria de *Feminine Care* da empresa, que podem ser divididos em três grupos: protetores diários; absorventes internos; absorventes externos.

É importante ressaltar que cada máquina pode produzir somente alguns itens do *portifolio* da família de produtos. Ou seja, nenhuma delas é versátil o suficiente para produzir qualquer um dos produtos que a fábrica produz.

Na figura 9 está representado um esquema da fábrica de Eldorado do Sul. A área alaranjada da figura corresponde as máquinas AF-4 e AF-15 que são usadas para a produção de protetores diários. As máquinas da área esverdeada, E1 e E2, são as chamadas encartuchadeiras e podem fazer qualquer item de absorventes interno. As demais máquinas podem produzir os absorventes externos. A encartuchadeira E2 é normalmente utilizada para

realizar testes de produção para produtos que se pretendem lançar e, por isso, não será considerada no estudo. Para realizar os testes há uma equipe fixa nessa máquina.

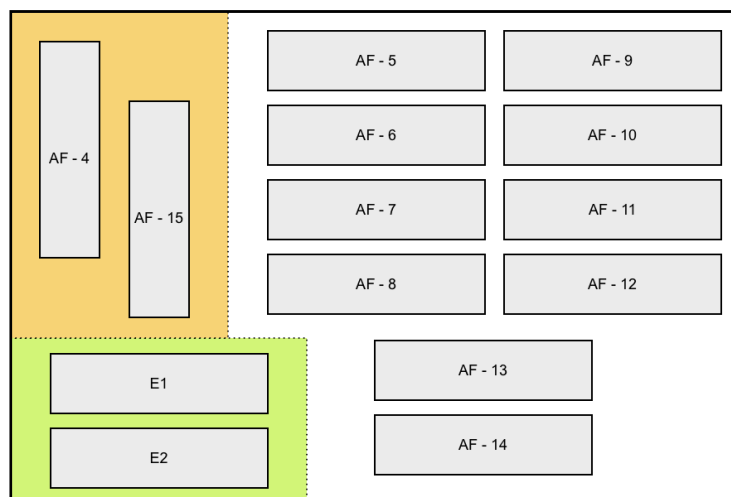


Figura 9 - Esquema geral da fábrica de Eldorado do Sul (elaborado pela autora)

Poder-se-ia solucionar o presente trabalho de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção classificando as máquinas da fábrica em três famílias, representadas pelas três cores da figura, e tratar o problema para cada uma das famílias independentemente.

No entanto, a fábrica deve ser encarada como um todo. Existem as equipes de supervisão da produção que são necessárias para supervisionar a saída de produtos nas máquinas. Alguns produtos precisam de duas dessas equipes. Assim, sem a presença de pelo menos uma equipe uma máquina não pode operar. O número de equipes disponíveis é igual ao número de máquinas. Além disso, essas equipes não estão pré-alocadas em nenhum grupo de máquinas, a não ser uma equipe na E2.

A restrição da supervisão das equipes, aliados a sua disponibilidade e número de máquinas significa que toda a vez que um produto que exija duas equipes estiver sendo fabricado alguma das máquinas deverá estar parada.

Também poder-se-ia sugerir dobrar o número de equipes existentes e deixar duas fixas em cada máquina, solucionando o problema de deixar uma máquina parada quando fosse o caso de produzir algum produto que exigisse 2 equipes de supervisão. No entanto, para saber se isso realmente seria necessário é preciso determinar se há demanda para essa contratação.

Dessa forma, os seguintes passos de cálculo foram feitos. Primeiro obteve-se a relação de produtos que cada máquina pode produzir. Para cada máquina e cada produto que ela pode processar há uma capacidade diária de produção. Então, para um dado produto, utilizou-se a capacidade diária máxima e mínima de produção dele. Em seguida, dividiu-se a previsão de

demanda deste produto pelas capacidades máxima e mínima obtendo-se um tempo necessário máximo e mínimo em dias que atenderia a demanda prevista no mês. Feito isso para todos os produtos da fábrica, os tempos mínimos e máximos foram somados e comparados com a disponibilidade das máquinas no mês em horas, obtendo-se a porcentagem de ocupação de máquina. O gráfico da figura 10 mostra a porcentagem de ocupação de máquina ao se utilizar as máquinas segundo a sua taxa mínima de produção e segundo a sua taxa máxima.

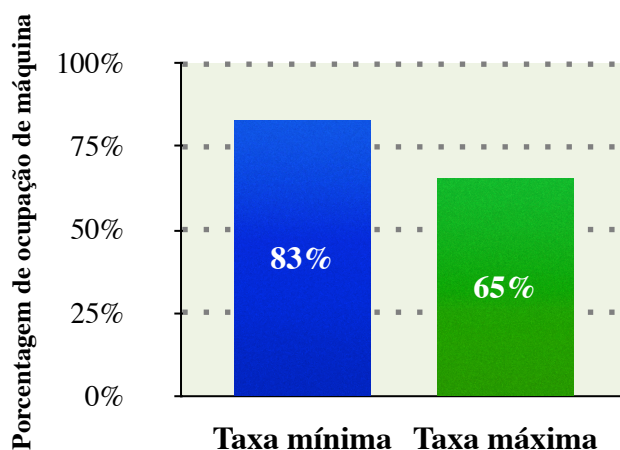


Figura 10 - Necessidades de ocupação de máquina para atender a demanda considerando as taxas máxima e mínima de produção das máquinas (elaborado pela autora)

Analisando o gráfico, pode-se perceber que mesmo utilizando-se a menor taxa de produção as máquinas ficam ocupadas pouco mais que 75% do tempo mensal disponível. Isso indica que há a possibilidade de se ter máquinas paradas, sem comprometer o atendimento da demanda. Dessa forma, não há necessidade de se contratar mais equipes, incorrendo em maiores gastos com mão-de-obra para a empresa, uma vez que não há uma demanda que justifique tal contratação.

Os cálculos que justificam os resultados apresentados no gráfico podem ser encontrados no apêndice A.

### 3.2 Processo Atual

As operações diárias da fábrica na qual o presente trabalho versará são controladas pela área de PCO, conforme já descrito.

Na empresa se trabalha com um horizonte de planejamento de quatro meses, sendo que a revisão dos números de previsão ocorre mensalmente. Assim, no mês  $n$  determina-se a previsão para o mês  $n+1$ , revisa-se a previsão do mês  $n+2$  e  $n+3$  e faz-se a previsão para o mês  $n+4$ . Por exemplo, em janeiro determina-se os números de demanda para fevereiro e revisam-se os números para março, abril e faz-se a previsão de maio. Em fevereiro determina-se os números para março e revisam-se os de abril e maio, faz-se a previsão para junho.

Embora os números de previsão de demanda estejam estruturados em quatro meses, os planejadores lidam com um horizonte mensal de planejamento. Assim, todo o início do mês, os planejadores de PCO fazem o PCP para as fábricas.

As etapas para o planejamento e programação da produção são feitas utilizando planilhas eletrônicas utilizando bases de dados obtidas pelo ERP (*Enterprise Resource Planning*) da empresa, e nelas há oportunidades de melhorias que possibilitam o desenvolvimento deste trabalho.

O processo se inicia pelo Plano Mestre de Produção definindo a quantidade a ser produzida. Assim, a partir do estoque final do mês anterior, previsão de demanda, distribuição semanal de vendas para o mês em questão e o estoque final desejado para o mês, pode-se determinar as necessidades de produção. Por distribuição semanal de vendas entende-se a porcentagem da demanda que será faturada em cada semana. Normalmente na primeira semana fatura-se 15% da demanda, na segunda 20%, na terceira, 25% e na quarta 40%. Essas porcentagens são a distribuição semanal de vendas.

Em seguida o planejador determina em qual máquina, das disponíveis para a produção de determinado item, a produção será feita, sequenciando-a em seguida. A planilha utilizada faz uma avaliação macro de capacidade quando o planejador define em qual máquina o produto será produzido, para que ele possa trocar de máquina caso a capacidade ultrapasse valores estabelecidos.

Conforme o planejador vai sequenciando a produção ele se preocupa em achar uma sequência relativamente boa para a produção, baseado na sua experiência, e que minimize o não atendimento ou atrasos de entrega. Dessa forma, entram na linha primeiro os item cuja cobertura de estoque é menor, justamente para evitar cenários de não atendimento.

Por fim, uma vez definida a quantidade, a máquina e a sequência, o planejador checa em quais dias do mês foi planejada a produção de produtos que necessitem de 2 equipes supervisoras e ajusta manualmente a restrição das equipes tendo em vista a capacidade de produção diária.



Nesse contexto, é importante ressaltar que a forma como se planeja e programa a produção hoje na empresa está fortemente baseada na experiência do operador e de seu supervisor para os ajustes de capacidade e de restrições de equipes. Assim, com uma forma não automatizada de trabalho, seja por meio de planilhas, seja pelo uso de módulos do ERP, a criação rápida de cenários alternativos de solução fica dificultada e relativamente lenta.

Um outro problema é o fato de que com a distribuição de vendas na quarta semana do mês, que corresponde normalmente a 40% das vendas, não há capacidade de se produzir essa porcentagem da demanda. Assim, os lotes produzidos são grandes para garantir que, frente a tal elevação na demanda, não faltará produto. Dessa forma, não há nenhum sincronismo entre a decisão de produzir e possível falta de produtos, a não ser a decisão de entrada na linha, cujo critério é “primeiro o produto com menos estoque”.

Além disso, esses lotes grandes, que conseguem atender até 30 dias de demanda, são bem vistos pelos líderes de equipe já que lotes grandes significam poucas trocas de produtos nas máquinas e, portanto, baixo tempo de *setup* e aparentemente significam alta utilização de máquina, justamente por não haver paradas para troca.

### **3.3 Objetivo do Trabalho**

O presente estudo tem o objetivo de melhorar o processo atual do planejamento operacional da produção de absorventes femininos descartáveis na fábrica de Eldorado do Sul da Kimberly-Clark Brasil.

Assim, pretende-se melhorar o processo atual de forma que minimize os custos de produção, estoque, falta de produtos e *setup*, considerando as capacidades produtivas e restrições inerentes às operações da fábrica. As melhorias que o estudo atual pretende trazer à forma como a área de PCO trabalha incluem assertividade no PCP da fábrica eliminando possíveis retrabalhos diários no Plano Mestre de Produção e envolvendo um método mais preciso de dimensionamento de lotes e programação das tarefas nas máquinas.



## Capítulo 4

# **Revisão bibliográfica**



## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo embasar teoricamente o presente trabalho expondo os conceitos e modelos apresentados na literatura, norteados o desenvolvimento do tema e dando respaldo a posterior metodologia de resolução.

Nesse sentido, alguns conceitos serão apresentados segundo a visão de diferentes autores, bem como as principais formulações matemática que versam sobre a questão integrada de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção partindo de casos mais simples e evoluindo até chegar no ambiente de máquinas distintas operando em paralelo com *setup* dependente da sequência.

### 4.1 Problema-tema do presente estudo

A questão do dimensionamento e do sequenciamento de lotes se tornou uma necessidade para qualquer empresa que queira sobreviver no mercado onde está inserida principalmente frente a um cenário tão competitivo e acirrado. Em particular, para empresas que se enquadram no modelo *Make to Stock* de produção, como é o caso da Kimberly-Clark Brasil, o planejamento da produção exerce um papel de extrema importância envolvendo tais questões.

O dimensionamento de lotes envolve a quantidade produzida em uma máquina sem a existência de paradas para trocar a produção de uma família de produtos para outra. Dimensionar os lotes incorretamente pode acarretar pedidos não atendidos e excesso de produto acabado em estoque, por exemplo.

Já o sequenciamento destes lotes, tem por objetivo determinar em que ordem os lotes devem ser produzidos e em quais máquinas, alocando da melhor maneira os recursos por vezes escassos. Se por um lado sequenciar as tarefas tende a garantir o atendimento dos pedidos no prazo correto e balancear os estoques, por outro, ainda melhora a gestão dos recursos envolvidos na produção conforme ressalta Pinedo (2002).

O problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção consistem em determinar simultaneamente a quantidade a ser produzida, em qual máquina,

em qual momento. Essas três decisões tem que ser tomada ao mesmo tempo, pois, segundo Meyr (2002), nos problemas em que os tempos de *setup* são dependentes da sequência, a capacidade disponível para a produção em determinada máquina somente é conhecida quando o tamanho e a sequência dos lotes já foi determinada.

De forma geral, o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes envolve decisões por vezes contrárias. Pochet e Wolsey (2006) ressaltam que decidir produzir um grande lote para que haja uma diluição dos custos de *setup*, que podem ser encarados como fixos, afeta os custos relacionados à armazenagem destes produtos no tempo. Por outro lado, decidir produzir lotes menores para incorrer menores custos de estocagem, faz o custo de *setup* ser maior por unidade de produto.

Dada a sua importância no meio empresarial, conforme citado, e acadêmico, pela complexidade matemática, tal tema tem sido alvo de vários estudos. Trabalhos como os de Zhu e Wilhelm (2006), Drexl e Kimms (1997), Meyr (2002), Quadt e Kuhn (2009), Mateus *et al.* (2009) são alguns dos artigos publicados que revisam a literatura sobre o assunto.

Outros trabalhos envolvem a adaptação de modelos presentes na literatura a problemas reais, buscando obter a melhor solução possível, seja por métodos exatos de resolução, seja pela aplicação de heurísticas e meta-heurísticas. Toso e Morabito (2005), Ferreira, Morabito e Rangel (2008), Meyr (2000), Meyr (2002), Beraldi *et al.* (2007) são alguns trabalhos que buscam resolver problemas reais encontrados na indústria.

Embora a questão do dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção apresente bastante material na literatura, Zhu e Wilhelm (2006) afirmam que o ambiente produtivo com máquina única engloba boa parte dos trabalhos publicados, havendo poucos artigos acerca de outros ambientes. No caso, Meyr (2002) pontua que o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes envolvendo recursos produzindo em paralelo não são frequentemente tratados na literatura.

Além disso, a permissão de atraso ou não atendimento de pedidos está presente em poucos trabalhos. Da mesma forma, Drexl e Kimms (1997) identificaram a necessidade de se estudar ambientes com máquinas em paralelo e casos com estrutura de *setup* dependente da sequência.

Por fim, não foi encontrado na literatura nenhum trabalho envolvendo equipes de supervisão e a restrição de parada de máquina caso um produto exija duas equipes para ser processado. Nesse sentido, o trabalho procurará estudar essa característica do problema com o objetivo de resolver o problema de planejamento na empresa sob foco de estudo.

## 4.2 Características dos modelos da literatura

Os problemas abordados através de pesquisa operacional devem ser inicialmente modelados para posterior resolução. Pochet e Wolsey (2006) citam que a fase de modelagem tem o objetivo de descrever uma abstração matemática, o modelo, do problema a ser resolvido. Os elementos constituintes do modelo são: objetos manipulados (produtos, máquinas, equipes, etc.), dados associados aos objetos (demanda, capacidade, etc.), decisões (elemento expresso pelas variáveis de decisão), restrições (que devem ser respeitadas pelas decisões de forma a gerar soluções factíveis para o problema) e a função objetivo (que compara e avalia as soluções disponíveis e seleciona a melhor, desde que factível).

De modo geral, a partir dos vários artigos presentes na literatura, tanto os que a revisam, quanto os que tratam sobre um problema em específico, pode-se diferenciar os vários tipos de formulações e abordagens principalmente pelos objetos e seus dados, envolvidos na modelagem. Karimi, Fatemi e Wilson (2003) sintetizam tais objetos e dados e citam que suas características influenciam a complexidade de resolução do problema e, por consequência o tempo para obtenção de uma solução ótima. Os objetos tratados pelos autores estão enumerados a seguir. Sua explicação acompanha as características que cada objeto pode assumir dependendo do problema que se quer tratar.

**1) Produtos:** são os itens finais que se deseja saber quanto, onde e quando deve ser produzido. Normalmente são referenciados como famílias de produtos.

- **Quantidade:** as atividades da fábrica podem se organizar para produzir apenas um item final, ou diversos itens. Karimi, Fatemi e Wilson (2003) ressaltam que os modelos com vários itens são mais complexos que os modelos com apenas um item. Os trabalhos presentes na literatura abrangem vastamente ambos os modelos.
- **Perecibilidade:** quando os produtos envolvidos no problema possuem prazo de validade relativamente curto, ou se deterioram-se ao passar o tempo. A formulação deve envolver restrições que estipulem um período máximo de armazenagem. Respeitar os prazos de validade são de extrema importância, tanto para a produção quanto para vendas. A produção deve saber coordenar o período de armazenagem com precisão para que não perca seus ativos de estoque nem disponibilize produtos vencidos ao mercado.

**2) Máquinas:** com relação aos tipos de máquinas as seguintes características podem ser extraídas dos problemas da literatura

- **Quantidade:** os trabalhos presentes na literatura tratam tanto de problemas envolvendo apenas uma máquina, conforme presente em Toso e Morabito (2005), como casos de várias máquinas, presente em Meyr (2002).
- **Característica:** as máquinas podem ser idênticas, como em Quadrt e Kuhn (2009), ou distintas, como em Meyr (2002), que implica em taxas de produção diferentes

**3) Demanda:** os dados sobre o quanto se pretende vender de determinado produto são dados de entrada do problema e podem categorizados segundo as seguintes características.

- **Variação no tempo:** se a quantidade demandada varia ao longo do tempo, a demanda é considerada dinâmica, caso não haja tal variação é chamada de estacionária.
- **Conhecida de antemão:** se a demanda é conhecida, seja por previsão de demanda, ou mesmo porque não varia ao longo do tempo, é chamada de determinística. Caso os valores demandados não sejam conhecidos previamente e envolvam alguma probabilidade a demanda é chamada de probabilística.
- **Dependência entre níveis:** se a quantidade demanda em um nível de produção depende da demanda do nível anterior, ela é dependente e comumente presente em problemas com múltiplos níveis de produção. Quando há somente um nível e portanto, não há tal dependência a demanda é classificada como independente.

A maioria dos trabalhos presentes na literatura tratam de problemas que consideram a demanda dinâmica e determinística.

Karimi, Fatemi e Wilson (2003) deixam claro que problemas envolvendo demanda dinâmicas ou dependentes são mais complexos que demandas estacionárias ou independentes. O mesmo acontece com a complexidade de problemas com demanda probabilística em relação aos de demanda determinística.

**4) Não atendimento de pedidos:** diz respeito a indisponibilidade de produtos para atender certa quantidade de demanda. Quando é permitido que tal parcela da demanda seja atendida posteriormente a data estipulada, diz-se que há um *backorder*, caso a demanda não



seja atendida há uma venda perdida. Para ambos os casos tais ocorrências são representadas por penalizações na função objetivo.

Karimi, Fatemi e Wilson (2003) consideram que a permissão dessa indisponibilidade de produtos afeta a complexidade da resolução do modelo. Ferreira, Morabito e Rangel (2008), Arenales *et al.* (2007), Kawamura e Ronconi (2010), Mateus *et al.* (2009), Quadts e Kuhn (2009) são trabalhos que versam sobre a permissão de atrasos de entrega ou de não atendimento de parcela da demanda.

**5) Horizonte de planejamento:** corresponde ao período de planejamento no qual se pretende programar a produção, garantindo a melhor utilização dos recursos disponíveis para atender a demanda considerada.

- **Finito ou infinito:** horizontes finitos, estão associados a demandas dinâmicas, ou seja conhecidas, já horizontes infinitos estão associados a demandas estacionárias.
- **Dividido em subperíodos:** quando o horizonte é dividido em subperíodos, ele se enquadra na categoria de *small bucket* e, neste caso, somente um produto pode ser processado, ou seja no máximo um *setup* é permitido. Se for permitido mais de um *setup* por subperíodo, ou seja a produção de mais de um tipo de produto, o horizonte pode ser classificado como *big bucket*. Quadts e Kuhn (2009) enfatizam que os problemas do tipo *small bucket* costumam ser mais vantajosos que o *big bucket* no que tange o sequenciamento, mas a custos altos de processamento computacional.
- **Característica do subperíodo:** os problemas podem ser modelados com subperíodos fixos, ou se adaptando à quantidade produzida.

**6) Capacidade:** diz respeito a todo recurso, desde horas de mão-de-obra, equipamentos, máquinas, capital. Quando limitada, ou escassa, o problema é chamado de *capacitated*, quando tais recursos não apresentam nenhum tipo de limitação o problema é classificado como *uncapacitated*. Pochet e Wolsey (2006) explicam que o problema pode ser *capacitated*, mas pode haver flexibilidade dos recursos para aumento incremental de capacidade conforme a necessidade e a qualquer momento. Neste caso é mais adequado considerar o problema como *uncapacitated*.

A maioria dos trabalhos acadêmicos trata de problemas *capacitated* e, normalmente, a capacidade limitada em questão é relacionada com a disponibilidade de máquina. No entanto,

alguns trabalhos envolvem a capacidade de tempo disponível para que a força de trabalho realize suas atividades, como nos problemas de Toso e Morabito (2005), e conforme presente em Hax e Candea (1987) e Arenales *et al.* (2007).

Karimi, Fatemi e Wilson (2003) ressaltam que problemas envolvendo capacidades limitadas são mais complexos que os problemas que não lidam com tal restrição.

**7) Níveis de produção:** são chamados de único nível os sistemas de produção que envolvem a transformação direta da matéria-prima em produtos acabados, sem haver etapas intermediárias de montagem de componentes ou produtos semi-acabados. Dessa forma, a demanda é independente e pode ser obtida diretamente da previsão. Quando o sistema de produção é de múltiplos níveis, os dados de entrada para um nível dependem dos valores de saída do nível anterior, dessa forma a demanda é dependente.

A dependência entre itens é modelada pela estrutura de produto ou árvore de material. Pochet e Wolsey (2006) pontuam que tal estrutura pode ser classificada em sequencial (a), montagem (b) ou geral (c), conforme ilustra a figura 11.

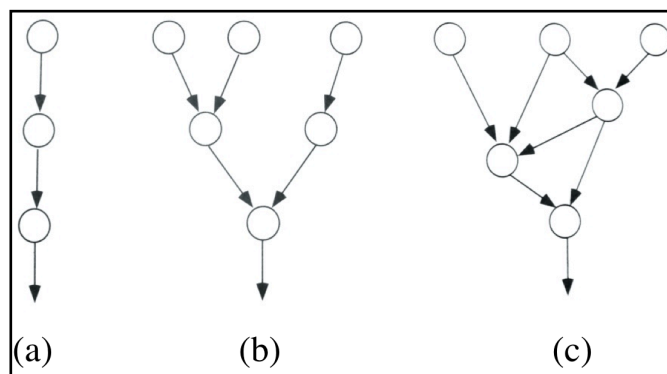


Figura 11 - Tipos de estrutura de produtos em modelos de múltiplos níveis (adaptado de Pochet e Wolsey (2006))

Karimi, Fatemi e Wilson (2003) enfatizam que a resolução de problemas com múltiplos níveis (figura 11 - b e c) de produção é mais difícil do que aquela com apenas um nível (figura 11 - a). O trabalho de Ferreira, Morabito e Rangel (2008) trata da resolução de um problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes com dois níveis de produção em uma fábrica de refrigerantes.

**8) Estrutura dos tempos/ custos de *setup*:** se os tempos/ custos de *setup* dependem da sequência dos lotes ou de decisões anteriores, a estrutura é chamada complexa. A maioria dos trabalhos presentes na literatura versam sobre problemas dentro desta classificação.

Se os tempos e custos de *setup* não dependem da sequência ou de decisões anteriormente tomadas, a estrutura é considerada simples, conforme abordado no trabalho de Quadrt e Kuhn (2009).

Karimi, Fatemi e Wilson (2003) explicam que considerar tempos de *setup*, inclui variáveis binárias na formulação matemática do problema. Estas variáveis indicam a troca de produção entre dois produtos de famílias diferentes. A introdução dessas variáveis binárias no problema torna o modelo matemático mais complexo, da mesma forma que as estruturas de *setup* dependentes da sequência também o são, quando comparadas com as independentes.

Além disso, caso haja a possibilidade de manter o estado de preparação da máquina entre períodos, ou subperíodos, há o chamado *setup carry-over*.

#### **4.3 Evolução das formulações matemáticas**

Os sistemas de planejamento da produção se inserem em um contexto de crescente sofisticação, a fim de aumentar tanto a produtividade, quanto a flexibilidade das operações, conforme tratado em Pochet e Wolsey (2006).

No que tange problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção, pode-se dizer que as formulações matemáticas também estão acompanhando tal evolução em termos de sofisticação, cada vez mais tentando inserir nos modelos e simulações as características e restrições dos problemas reais encontrados na indústria.

De acordo com Drexel e Kimms (1997) e Karimi, Fatemi e Wilson (2003), as pesquisas acerca do dimensionamento de lotes iniciaram com a determinação do modelo clássico de lote econômico, que assumia a produção em um único nível, sem restrições de capacidade, demanda estacionária e horizonte de planejamento infinito. Como tais suposições eram muito restritivas, face aos problemas da realidade, outros modelos foram desenvolvidos incluindo as restrições de capacidade para a produção de vários itens. Mesmo com apenas essas mudanças o problema já era considerado NP-difícil, ou seja, não se pode esperar encontrar um algoritmo que gere uma solução ótima a tempos computacionais razoáveis (Quadrt e Kuhn (2009)).

A próxima mudança considerada foi a suposição de demanda dinâmica e horizonte finito do modelo de Wagner-Whitin, mas que voltava a considerar a capacidade ilimitada. Dessa forma, as abordagens de demanda dinâmica com restrições de capacidade continuavam a instigar a comunidade acadêmica.

Drexl e Kimms (1997) apresentam o problema conhecido na língua inglesa por *capacitated lot sizing problem* (CLSP). Os autores pontuam que esta formulação é uma extensão do modelo de Wagner-Whitin, mas que considera a capacidade disponível da máquina. No entanto, as decisões de sequenciamento não estão integradas a este modelo. Os autores explicam que a abordagem tradicional seria resolver inicialmente o CLSP e em seguida, resolver o problema de sequenciamento em cada período separadamente.

Pochet e Wolsey (2000) ressaltam que dados os contextos de aumento da competitividade, pressão por redução de custos e necessidade de responder rapidamente a mudanças nas diretrizes do mercado, os sistemas produtivos foram forçados a integrarem as decisões relacionadas ao dimensionamento de lotes com o seu sequenciamento.

Estão apresentados nas seções a seguir os modelos presentes na literatura que integram as decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes em apenas um nível de produção. Drexl e Kimms (1997) ressaltam que todos estes problemas são classificados como NP-difícil. Vale ressaltar ainda que quaisquer um dos problemas apresentados podem tratar de estrutura de *setup* complexa ou simples.

#### 4.3.1 Problema discreto (DLSP)

Neste problema, conhecido na literatura como *Discrete Lot sizing and Scheduling Problem* (DLSP), considera-se a produção em apenas uma máquina. O horizonte de planejamento finito é tratado como *small buckets*, pois o horizonte é dividido em subperíodos, normalmente considerados como horas ou turnos de trabalhos. A principal característica do modelo é que assume-se a hipótese “tudo-ou-nada”, ou seja, somente um produto pode ser produzido por subperíodo, e se for, utiliza toda a capacidade disponível.

Drexl e Kimms (1997) ressaltam que a maioria dos autores consideram que a capacidade não varia como tempo. Essa hipótese é razoável, uma vez que as decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes se encontram no nível operacional/ tático do

planejamento, nível que lida com horizontes relativamente curtos de tempo. Considerando estes horizontes, pode-se dizer que na prática as capacidades produtivas de uma empresa madura não variam, dado que o arranjo físico já está estabelecido e os custos marginal de incremento da capacidade são relativamente altos. Tais custos são referentes os custos envolvendo a aquisição de novas máquinas e os custos envolvendo movimentação das máquinas já existentes para melhor adequar o arranjo físico ao processo produtivo.

#### 4.3.2 Problema com conservação do estado de preparação da máquina (CSLP)

Este problema é conhecido na literatura como *Continuous Setup Lot sizing and Scheduling Problem (CSLP)*. Nele, as mesmas hipóteses do modelo DLSP são assumidas, embora a condição “tudo-ou-nada” não esteja presente, assim, somente um produto pode ser produzido por período, mas não necessariamente utiliza capacidade total se produzido. Neste caso, se a capacidade não é utilizada totalmente a restante é deixada ociosa.

Além disso, a diferença básica entre o DLSP e o CSLP é que, enquanto no primeiro se determinada máquina estiver preparada para a produção de um item, ela obrigatoriamente deverá realizar a produção, no segundo ela pode ou não processar o item, ou seja, pode ficar ociosa. Dessa forma, no DLSP se uma máquina finaliza a produção de um item no período  $t$  e fica ociosa até  $t'$ , se em  $t'+1$  ela processa o item, os custos de *setup* serão incorridos duas vezes. Por outro lado, no modelo CSLP se a máquina estiver ociosa, seu o estado de preparação pode ser conservado e, portanto, não se incorre em novos custos de preparação. Essa conservação no estado de preparação da máquina é chamado de *setup carryover*.

#### 4.3.3 Problema com dimensionamento proporcional à capacidade (PLSP)

O PLSP (*Proportional Lot sizing and Scheduling Problem*) considera que, diferentemente do CSLP, caso o item produzido não utilize a capacidade total em um subperíodo, outro item pode ser processado utilizando a capacidade restante. Assim, o modelo

permite que no máximo um *setup* ocorra no subperíodo, ou seja, no máximo dois itens sejam produzidos.

Neste problema a conservação do estado de preparação de máquina pode ser mantida, e, portanto, não incorre em custos de *setup* caso a máquina passe de ativa, para ociosa e para ativa novamente, conforme explicado no item 4.3.2 com relação a diferença entre o DLSP e o CSLP.

#### 4.3.4 Problema geral de dimensionamento e sequenciamento de lotes (GLSP)

Este problema, conhecido na literatura como *General Lot sizing and Scheduling Problem (GLSP)*, considera um único nível de produção, integra as decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes de vários produtos, em apenas uma máquina de capacidade limitada.

Este problema é considerado *small buckets*, mas a principal diferença com relação aos problemas anteriores é que os períodos são divididos em subperíodos, sendo o número de subperíodos dentro do período definido *a priori* para permitir a modelagem matemática (Arenales *et al.* (2007)).

Portanto, enquanto os problemas *big buckets* são os divididos em períodos (meses ou semanas), os *small buckets* divididos em subperíodos (dias ou turnos), o GLSP é dividido em ambos, estando os subperíodos dentro dos períodos. Normalmente, é no final de cada período que se calcula o balanço de quantidades demandadas, estocadas, produzidas e não atendidas.

A maioria dos artigos presentes na literatura se enquadram nessa classificação, embora cada um apresente particularidades em relação ao modelo clássico, além de poder considerarem tempos de preparação de máquina dependentes da sequência.

#### 4.3.5 Problema geral com tempos de *setup* dependentes da sequência (GLSPST)

Embora muitos trabalhos versem sobre os cinco primeiros itens tratados anteriormente e apresentados resumidamente por Drexel e Kimms (1997), a maioria dos trabalhos recentes

tratam de problemas com tempos de *setup* dependentes da sequência. Vale ressaltar que todos os trabalhos citados nesta seção consideram que a produção é feita em apenas uma máquina.

Meyr (2000) trata justamente do GLSPST (*General Lot sizing and Scheduling Problem with Sequence-dependent Setup Times*) para uma máquina e apresenta um algoritmo para resolver o problema proposto, utilizando meta-heurísticas *Threshold Accepting* (TA) e *Simulated Annealing* (SA).

Zhu e Wilhelm (2006) revisam a literatura, publicada dentro da última década, somente no que tange problemas considerando o *setup* dependente da sequência. Os autores exploram, para quatro ambientes produtivos - de única máquina; de várias máquinas; *flow shop*; *job shop* - estratégias de resolução de problemas apresentados na literatura por métodos exatos, híbridos, heurísticas. Os autores ainda apresentam taxonomias a cerca dos estudos revisados de acordo com as quatro configurações de máquina.

Toso e Morabito (2005) baseiam-se em Hax e Candea (1984), que propõem um modelo que considera o nível da força de trabalho medida em homens-hora com permissões de não atendimento de pedidos, para estudar o dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção em uma empresa de rações para animais. A produção é realizada em ambiente monoestágio, com apenas uma máquina, com tempos de preparação dependentes da sequência e considerando o nível da força de trabalho em medida em homens-hora. No entanto, o problema não leva em consideração a permissão de *backorders*. É interessante ressaltar que o problema apresentado pelos autores envolve tempos de *setup* que violam a desigualdade triangular, devido a existência de produtos que tendem a “limpar” a linha onde foram produzidos. Os autores resolvem o problema proposto utilizando estratégias de heurísticas do tipo *relax-and-fix*.

Toso, Morabito e Clark (2008) apresentam uma nova formulação para o problema da indústria de nutrição animal a partir da formulação ATSP (*Asymmetric Travelling Salesman Problem*), tradicionalmente usada em problemas de roteirização de veículos, e comparam-na com a abordagem clássica do GLSP. Os autores comparam metodologias de resolução para o problema, considerando dois cenários. No primeiro cenário ao se iniciar um período do horizonte, a máquina não está preparada para nenhum produto. Já no segundo cenário, o estado de preparação da máquina no início de um período é exatamente igual ao seu estado no fim do período anterior.

Para o primeiro cenário, os autores propõem a resolução do problema ATSP por eliminação de subrotas, e do problema GLSP pelo método *branch and cut*. Toso, Morabito e Clark (2008) comprovam que, em média, a estratégia ATSP é mais rápida que a GLSP.

Para o segundo cenário, a resolução do problema ATSP envolve a eliminação de subrotas e o método *patching*, enquanto que para a formulação GLSP utilizam os resultados do método *branch and cut*, apresentado em Toso e Morabito (2005), e mais duas estratégias da heurística *relax-and-fix*. Os autores mostram que, em geral, a melhor estratégia é ATSP-*patching*.

Toso, Morabito e Clark (2009) utilizam o mesmo modelo de Toso e Morabito (2005) para estudar o problema proposto na indústria de ração animal considerando tempos de *setup* dependentes da sequência, quando a demanda é maior e quando não há possibilidade de limpar a máquina entre os períodos, e independentes, quando a demanda é menor e há a possibilidade de limpeza.

Para a modelagem com *setup* dependente da sequência, experimentos computacionais iniciais mostraram que o modelo leva muito tempo para achar a solução ótima por métodos exatos. Alguns modelos alternativos e métodos foram explorados de maneira a melhorar o tempo de resposta da solução, desde que viável para uso operacional. Dentre os métodos incluem três variantes da heurística *relax-and-fix*: decomposição no tamanho dos lotes, decomposição cronológica dos períodos  $t$  e decomposição cronológica inversa dos períodos  $t$ . O primeiro método se mostrou o mais promissor.

#### 4.3.6 Problema geral em máquinas em paralelo (GLSPPL)

Meyr (2002) apresenta a formulação para o *General Lot sizing and Scheduling Problem with Parallel Machines* (GLSPPL) para vários produtos considerando tempos de *setup* dependentes da sequência, máquinas operando em paralelo e com taxas de produção diferentes. Não é considerado a permissão de atraso na entrega de pedidos. O autor resolve o problema utilizando metaheurísticas *Threshold Accepting* (TA) e *Simulated Annealing* (SA) adaptadas para o problema envolvendo várias máquinas, uma vez mostrada a eficiência de tais estratégias em Meyr (2000) para os problemas em apenas uma máquina.



Beraldi *et al.* (2007) tratam do problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção com capacidade limitada, envolvendo vários produtos, em várias máquinas iguais operando em paralelo, com *setup* dependente da sequência, sem a permissão de *backorders*. Em seu trabalho foi assumido que apenas um *setup* poderia ocorrer no início de cada período. O objetivo do trabalho é desenvolver algoritmos apropriados para aplicação de maior escala, como ao considerar diversas máquinas. Assim, Beraldi *et al.* (2007) desenvolveram novas decomposições de heurísticas baseadas nas abordagens de *rolling-horizon* e *relax-and-fix*, comprovando que a última mostra melhores resultados que a primeira.

Quadt e Kuhn (2009) tratam do problema CLSP considerando a permissão de *backorders*, conservação do estado de preparação de máquina, máquinas iguais operando em paralelo. Por derivar do CLSP, o problema envolve um horizonte de planejamento dividido em *big buckets*. Os autores desenvolvem um procedimento, chamado de modelo agregado, de resolução do problema que troca as variáveis binárias das formulações padrões por variáveis inteiras, o que torna o modelo mais fácil de resolver usando os procedimentos mais conhecidos. No entanto, os autores ressaltam que devido ao modelo agregado a abordagem de resolução apresentada funciona apenas para o caso de máquinas idênticas, não se aplicando para a configuração de máquinas distintas.

Mateus *et al.* (2009) tratam de um problema GLSPPL, considerando apenas um nível de produção, permissão de *backorders*, *setup* dependente da sequência. Quatro das máquinas são iguais e envolvem tratamentos manuais, outras duas são automáticas. Os autores propõem um método de resolução em duas etapas. Primeiro resolvem o dimensionamento e em seguida o sequenciamento. A formulação para o problema, no que tange a primeira etapa, não envolve nenhuma subdivisão dos períodos e a segunda etapa usa o tempo em um período de forma contínua, decidindo o instante de início de cada lote de produção.

O primeiro módulo considera a capacidade agregada nos períodos e tempos de *setup* estimados. O tamanho dos lotes para o período seguinte é dado de entrada para uma rotina de sequenciamento, resolvida por heurísticas. O dimensionamento para os períodos subsequentes é reavaliado segundo a produção de lotes que não foram completados dentro do tempo permitido no sequenciamento. O processo é iterado até que as decisões de dimensionamento sejam consolidadas detalhadamente e adequadas ao sequenciamento para todo o horizonte de planejamento.

Mateus *et al.* (2009), embora confirmem a melhoria da solução proposta pelo modelo, quando comparada com a solução praticada na realidade, não comparam a metodologia de resolução utilizada com nenhuma outra metodologia, para efeitos comparativos de velocidade e qualidade na obtenção dos resultados.

#### 4.4 Resumo das formulações apresentadas

A tabela 1 apresenta um resumo das formulações apresentadas considerando apenas os problemas em único nível de produção. Nas colunas estão as características principais tratadas na seção 4.2 deste capítulo. Nas linhas estão os modelos citados da seção 4.3.1 até 4.3.6, divididos entre decisões de dimensionamento e sequenciamento separadas ou integradas. Vale ainda ressaltar que a permissão de *backorders* pode existir ou não de acordo com as características do problema considerado. As células em branco indicam que a característica não se aplica ao problema a que se refere.

Tabela 1 - Resumo das formulações presentes na literatura

Tipo de problema		Características						
		Horizonte de planejamento	Demanda	Considera a capacidade	Divisão do horizonte	Estrutura de <i>setup</i>	Máquinas	Particularidades
Decisões separadas	Lote mínimo	Infinito	Estacionária	Não				
	WW	Finito	Dinâmica	Não	Períodos			
	CLSP	Finito	Dinâmica	Sim	Períodos		Única	
Decisões integradas	DLSP	Finito	Dinâmica	Sim	Subperíodos	Simples/complexa	Única	Hipótese "tudo-ou-nada"
	CSLP	Finito	Dinâmica	Sim	Subperíodos	Simples/complexa	Única	<i>Setup carryover</i>
	PLSP	Finito	Dinâmica	Sim	Subperíodos	Simples/complexa	Única	2 produtos por subperíodo
	GLSP	Finito	Dinâmica	Sim	Períodos e subperíodos	Simples/complexa	Única	Horizonte dividido em períodos e estes em subperíodos
	GLSPST	Finito	Dinâmica	Sim	Períodos e subperíodos	Complexa	Única	Estrutura de <i>setup</i> complexa
	GLSPPL	Finito	Dinâmica	Sim	Períodos e subperíodos	Complexa	Várias	Máquinas em paralelo (idênticas ou distintas)

## Capítulo 5

# **Modelo proposto**



## 5 MODELO PROPOSTO

Neste capítulo será apresentado o modelo matemático para o problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes em um ambiente de máquinas em paralelo com diferentes taxas de produção. A função objetivo busca minimizar os custos de estocagem, de não atendimento de pedidos, de *setup* e de produção sujeito a restrições de demanda, de capacidade de produção e de equipes de supervisão da produção.

Além disso, para uma análise preliminar do funcionamento do modelo matemático será tratado um problema piloto simplificado, mas com dados de entrada reais da empresa sob ótica de estudo.

Com o intuito de facilitar o entendimento do modelo, as restrições serão explicadas detalhadamente e exemplos simplificados serão apresentados a fim de ilustrar cada uma delas. Em seguida os resultados para este problema piloto serão apresentados gradualmente seguindo a ordem de cada uma das restrições e explicando como o modelo se comportou em cada uma delas.

Por fim, uma vez comprovada a funcionalidade do modelo, ele será validado e, portanto, estará adequado para aplicação no problema real.

### 5.1 O Modelo

O problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção que o presente estudo busca solucionar considera que existem  $n$  produtos que podem ser fabricados em  $R$  máquinas durante  $T$  períodos de tempo do horizonte de planejamento. Cada produto  $i$  pode ser processado na máquina  $k$  cujo parâmetro  $P_{ik}$  seja igual a 1.

As máquinas operam em paralelo e são distintas entre si, ou seja suas taxas de produção  $tp_{ik}$  não são iguais e consequentemente os custos de produção  $cp_{ik}$  também são diferentes.

A demanda  $d_{it}$  dos itens  $i$  no período  $t$  é conhecida, determinística e varia a cada período  $t$ . Caso a demanda não seja atendida há uma penalização  $a_i$  para cada item de demanda não entregue. Essa permissão de não entrega ou atraso é conhecida na literatura como *backorders*. Uma vez que o problema envolve apenas um nível de produção a demanda é independente.

O horizonte de planejamento é dividido em períodos  $t$  e cada período é, por sua vez, dividido em subperíodos  $s$ . Os subperíodos não se sobrepõem e devem ser pequenos o suficiente para que em um subperíodo somente um produto possa ser processado em uma máquina. No entanto, durante um intervalo  $t$  de tempo, há a possibilidade de se produzir dois ou mais itens. Assim, supondo que o horizonte de planejamento seja referente a um mês, pode-se considerar os períodos como sendo as semanas e os subperíodos como sendo dias, ou turnos de produção.

Na literatura, os subperíodos são comumente variáveis de decisão do modelo e seu tamanho é determinado segundo a quantidade produzida nele. No entanto, para o problema considerado, os subperíodos são dados de entrada do modelo. Essa condição é necessária para facilitar o cálculo de quantidades de equipes de supervisão em atividade, cálculo este que será explicado mais adiante.

As máquinas possuem capacidade  $Cap_{ks}$  limitada, expressa em horas e dependente do subperíodo. Isso é necessário para que a capacidade possa ser reduzida quando há paradas de máquina por manutenção, por exemplo. Tal capacidade deve limitar o tempo de produção e de preparação de um item.

Este tempo de preparação incorre em certa perda de material uma vez a máquina não inicia a produção com itens conformes, havendo um tempo de ajustes de parâmetros até produzir itens adequados.

No problema abordado no presente estudo estes tempos para ajuste são dependentes da sequência. Os custos  $cs_{jik}$  e tempos  $st_{jik}$  desta mudança são chamados respectivamente de custos e tempos de *setup* envolvidos na preparação da máquina em trocar a produção do item  $i$  para o item  $j$ .

O modelo de programação linear inteira mista apresentado a seguir baseia-se no modelo de Meyr (2002).

## Índices

$i, j$ : produto/item, com valores que vão de 1 até  $n$

$k$ : máquina, com valores que vão de 1 até  $R$

$t$ : período, com valores que vão de 1 até  $T$

$s$ : subperíodo, com valores que vão de 1 até  $S$

## Variáveis

$x_{iks}$  : quantidade de produto  $i$  processado na máquina  $k$  no subperíodo  $s$

$y_{jiks}$  : 1, se há troca de produção do item  $j$  para o item  $i$  na máquina  $k$  no subperíodo  $s$ , 0, caso contrário

$z_{iks}$  : 1, se a máquina  $k$  está preparada para produzir o item  $i$  no subperíodo  $s$ , 0, caso contrário

$w_{iks}$  : 1, se há pelo menos uma equipe supervisionando a produção do item  $i$  na máquina  $k$  no subperíodo  $s$ , 0, caso contrário

$I_{it}$  : quantidade de itens  $i$  estocada no fim do período  $t$

$F_{it}$  : quantidade de *backorder* do item  $i$  no fim do período  $t$

## Parâmetros

$d_{it}$  : demanda do item  $i$  no período  $t$

$tp_{ik}$  : tempo de produção unitário do item  $i$  na máquina  $k$

$st_{jik}$  : tempo de *setup* para produzir o item  $i$  imediatamente após o item  $j$  na máquina  $k$

$Cap_{ks}$  : capacidade de produção da máquina  $k$  no subperíodo  $s$

$CS_{jik}$  : custo de *setup* para preparar a máquina  $k$ , da produção de itens  $j$  para a produção de itens  $i$

- $cp_{ik}$  : custo de produzir um item  $i$  na máquina  $k$
- $ce_i$  : custo unitário de manter em estoque uma unidade do item  $i$
- $a_i$  : penalidade por *backorder* de uma unidade do item  $i$
- $E_i$  : número de equipes necessárias supervisionando a produção do item  $i$
- $D$  : número de equipes de supervisão disponíveis na fábrica
- $S_t$  : número de subperíodos contidos no horizonte de tempo  $t$
- $p_{ik}$  : 1, se o produto  $i$  puder ser processado na máquina  $k$ , 0, caso contrário
- $I_{i0}$  : quantidade de itens  $i$  em estoque no início do horizonte de planejamento
- $F_{i0}$  : quantidade de itens  $i$  de *backorder* no início do horizonte de planejamento
- $A_i$  : quantidade máxima permitida de itens  $i$  de *backorder* no fim do horizonte de planejamento
- $V_i$  : quantidade mínima que se deseja ter em estoque do item  $i$  no fim do horizonte de planejamento
- $I_{iT}$  : quantidade de itens  $i$  em estoque no fim do horizonte de planejamento
- $F_{iT}$  : quantidade de itens  $i$  de *backorder* no fim do horizonte de planejamento
- $G$  : um número grande



## Modelo

Função Objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (ce_i \cdot I_{it} + a_i \cdot F_{it}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^R \sum_{s=1}^S (cs_{jik} \cdot y_{jiks}) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^R \sum_{s=1}^S (cp_{ik} \cdot x_{iks})$$

Sujeito a:

$$(I_{it-1} - F_{it-1}) + \sum_{k=1}^R \sum_{s \in S_i} x_{iks} - (I_{it} - F_{it}) = d_{it} \quad \forall i, t \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n (tp_{ik} \cdot x_{iks}) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^R (st_{jik} \cdot y_{jiks}) \leq Cap_{ks} \quad \forall k, s \quad (2)$$

$$tp_{ik} \cdot x_{iks} \leq Cap_{ks} \cdot z_{iks} \quad \forall i, k, s \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n z_{iks} = 1 \quad \forall k, s \quad (4)$$

$$y_{jiks} \geq z_{jk, s-1} + z_{iks} - 1 \quad \forall i, j, k, s \quad (5)$$

$$z_{iks} \leq p_{ik} \quad \forall i, k, s \quad (6)$$

$$z_{ik0} = 0 \quad \forall i, k \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^R (E_i \cdot w_{iks}) \leq D \quad \forall s \quad (8)$$

$$x_{iks} \leq G \cdot w_{iks} \quad \forall i, k, s \quad (9)$$

$$I_{iT} \geq V_i \quad \forall i \quad (10)$$

$$F_{iT} \leq A_i \quad \forall i \quad (11)$$

$$I_{it} \geq 0 \quad \forall i, k, s \quad (12)$$

$$F_{it} \geq 0 \quad \forall i, k, s \quad (13)$$

$$x_{iks} \geq 0 \quad \forall i, k, s \quad (14)$$

$$y_{jiks} \geq 0 \quad \forall i, k, s \quad (15)$$

$$z_{iks} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, s \quad (16)$$

$$w_{iks} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, s \quad (17)$$

## 5.2 Detalhamento do modelo

A seguir serão descritas detalhadamente a função objetivo e as restrições do modelo matemático. Com a finalidade de facilitar a compreensão de cada componente da formulação, as explicações serão acompanhadas de exemplos ilustrativos.

### Função objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (ce_i \cdot I_{it} + a_i \cdot F_{it}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^R \sum_{s=1}^S (cs_{jik} \cdot y_{jiks}) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^R \sum_{s=1}^S (cp_{ik} \cdot x_{iks})$$

A função objetivo busca minimizar os custos de estocagem, *backorders*, produção e *setup* no horizonte de planejamento considerado.

$$\textbf{Restrições (1): } (I_{it-1} - F_{it-1}) + \sum_{k=1}^R \sum_{s \in S_i} x_{iks} - (I_{it} - F_{it}) = d_{it} \quad \forall i, t$$

O conjunto de restrições (1) faz o balanço entre a quantidade produzida em  $t$ , a quantidade estocada no fim período  $t-1$  e *backorders* no fim de  $t-1$ , com a quantidade demandada em  $t$ , a estocada no final de  $t$  e *backorders* no final de  $t$ .

Na parcela que contabiliza a quantidade produzida  $\sum_{k=1}^R \sum_{s \in S_t} x_{iks}$ , é interessante notar que o

somatório não envolve todos os subperíodos do horizonte de planejamento, mas somente os subperíodos que correspondem ao período  $t$  tido em consideração  $s \in S_t$ .

A figura 12 ilustra a relação entre os períodos  $t$ , subperíodos  $s$  e  $s \in S_t$ . Ela representa uma linha do tempo dividida, em cima, em períodos  $t$  e, em baixo, em subperíodos  $s$ .

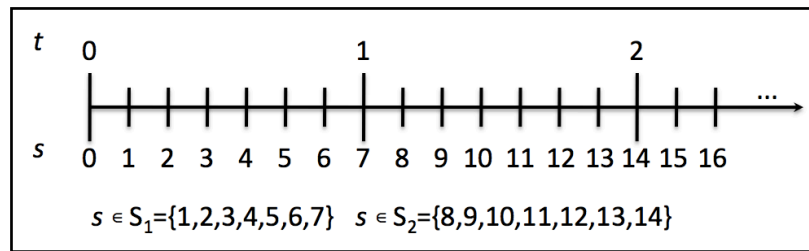


Figura 12 - Relação entre períodos  $t$  e subperíodos  $s$  (elaborado pela autora)

$$\text{Restrições (2): } \sum_{i=1}^n (tp_{ik} \cdot x_{iks}) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^R (st_{jik} \cdot y_{jiks}) \leq Cap_{ks} \quad \forall k, s$$

As restrições do tipo (2) garantem que os tempos de preparação de máquina somados aos tempos de produção não excedam a capacidade de máquina no subperíodo considerado.

Utilizar a restrição de capacidade para cada subperíodo  $s$ , garante que o tempo de preparação de máquina seja incluído no subperíodo correspondente à produção do produto que iniciou seu processamento.

A tabela 2 mostra um exemplo para dois produtos, P1 e P2, que compartilham uma máquina ao longo de 5 subperíodos. Para este exemplo, supõe-se que: um subperíodo representa 24 horas, a máquina tem capacidade de produzir 1000 caixas, tanto de P1, quanto de P2 por dia, o tempo de *setup* de P1 para P2 é de 3 horas. A tabela apresenta nas duas linhas intermediárias a quantidade produzida em caixas de cada produto. A última linha corresponde a capacidade utilizada, em horas, da máquina.

Tabela 2 - Exemplo de aplicação do conjunto de restrições (2)

Produto \ Subperíodo	1	2	3	4	5
P1	1000	1000			
P2			875	1000	100
Horas produzindo	24	24	21	24	24

Portanto, observa-se que de  $s=2$  para  $s=3$ , perde-se 3 horas para preparar a máquina para a produção de P2, deixando de produzir 125 caixas deste produto devido a este tempo de *setup*.

**Restrições (3):**  $tp_{ik} \cdot x_{iks} \leq Cap_{ks} \cdot z_{iks} \quad \forall i, k, s$

O conjunto de restrições (3) garante que só haverá produção do item  $i$  caso a máquina  $k$  esteja preparada para processar o item no início do subperíodo  $s$ .

Dessa forma:

- se  $z_{iks} = 0 \Rightarrow x_{iks} \leq 0 \Rightarrow x_{iks} = 0$ , ou seja, não haverá produção do item  $i$  estando a máquina  $k$  despreparada para produzi-lo em  $s$ ;
- se  $z_{iks} = 1 \Rightarrow x_{iks} \leq \frac{Cap_{ks}}{tp_{ik}} \Rightarrow 0 \leq x_{iks} \leq \frac{Cap_{ks}}{tp_{ik}}$ , ou seja, se a máquina estiver

preparada, pode haver ou não produção do item, produção esta limitada a uma quantidade igual a capacidade produtiva da máquina em unidades.

**Restrições (4):**  $\sum_{i=1}^n z_{iks} = 1 \quad \forall k, s$

O conjunto de restrições (4) determina que cada máquina  $k$  está preparada para produzir apenas um item em cada subperíodo  $s$ . Ou seja, uma máquina não pode produzir ao mesmo tempo dois produtos.

$$\text{Restrições (5): } y_{jiks} \geq z_{jk,s-1} + z_{iks} - 1 \quad \forall i, j, k, s$$

As restrições (5) relacionam os estados de preparação de máquina  $z_{iks}$  com a mudança de produção entre dois itens  $y_{jiks}$ . Assim, se em  $s-1$  a máquina  $k$  está preparada para produzir o item  $j$ , ou seja  $z_{jk,s-1}=1$ , e em  $s$  ela está preparada para produzir o item  $i$ , ou seja  $z_{iks}=1$ , a variável  $y_{jiks}$  assume um valor maior ou igual a 1, indicando que houve mudança de produção do item  $j$  para o  $i$  na máquina  $k$  de  $s-1$  para  $s$ . A tabela 3 mostra os valores de  $y_{jiks}$  para a mudança de produção do produto P1 para P2 na máquina M ao longo de quatro subperíodos.

Tabela 3 - Exemplo de valores para a variável  $y_{jiks}$

$j$	$i$	$k$	$s$			
			1	2	3	4
P1	P1	M	1	1	0	0
P1	P2	M	0	0	1	0
P2	P2	M	0	0	0	1

Analisando a tabela apresentada, percebe-se que a variável  $y_{jiks}$  é a variável responsável pelo sequenciamento da produção. Além disso, ela aloca o tempo de *setup* no subperíodo correspondente ao início de produção do novo produto, no caso do exemplo  $s=3$ .

$$\text{Restrições (6): } z_{iks} \leq p_{ik} \quad \forall i, k, s$$

O conjunto de restrições (6) garante que uma máquina só estará preparada para produzir certo item, caso isso seja permitido pelo parâmetro  $p_{ik}$ .

Assim:

- se  $p_{ik} = 1 \Rightarrow z_{iks} \leq 1 \Rightarrow z_{iks} = \{0,1\}$ , ou seja, se for permitida a produção do item  $i$  na máquina  $k$ , esta máquina poderá ou não estar preparada para produzir o item no subperíodo  $s$ . Cabe ao modelo decidir sob quais condições isso ocorrerá de forma que minimize os custos envolvidos no problema;

- se  $p_{ik} = 0 \Rightarrow z_{iks} \leq 0 \Rightarrow z_{iks} = 0$ , ou seja, se a máquina não pode, por restrições técnicas, processar o item, ela nunca estará preparada para produzi-lo durante todo o horizonte de planejamento.

**Restrições (7):**  $z_{ik0} = 0 \quad \forall i, k$

O conjunto de restrições (7) garantem que a máquina  $k$  não está preparada para produzir nenhum item  $i$  no início do horizonte de planejamento.

**Restrições (8):**  $\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^R (E_i \cdot w_{iks}) \leq D \quad \forall s$

O conjunto de restrições (8) indicam que, como somente há  $D$  equipes de supervisão disponíveis para realizar a produção, em cada subperíodo  $s$  não se pode produzir uma combinação de produtos cuja soma de seus respectivos parâmetros  $E_i$  seja maior que  $D$ .

Devido a este conjunto de restrições se optou por determinar os subperíodos fixos para todas as máquinas. Se os subperíodos fossem de tamanhos diferentes e variassem de acordo com a quantidade produzida, como é frequentemente apresentado na literatura, ficaria difícil calcular a soma do número de equipes necessárias em cada subperíodo. As figuras 13 e 14 ilustram a abordagem de subperíodos iguais e a abordagem de subperíodos diferentes, respectivamente. Os retângulos pontilhados indicam a unidade de tempo na qual se calcula o total de equipes alocadas nas máquinas.

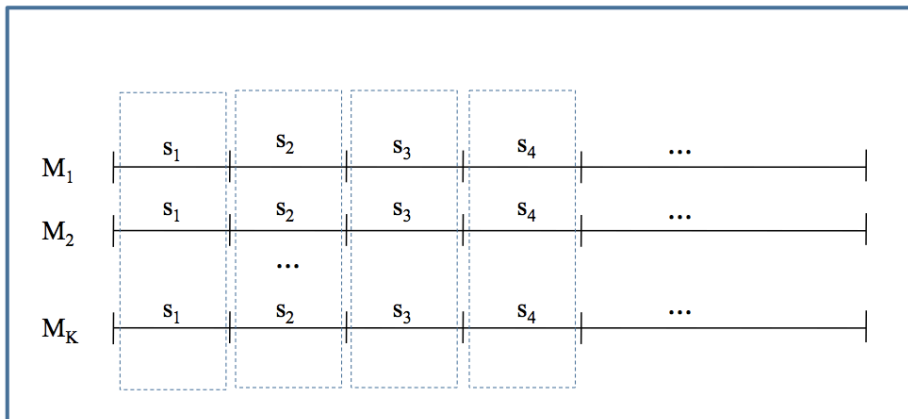


Figura 13 - Situações de subperíodos iguais para cada máquina (elaborado pela autora)

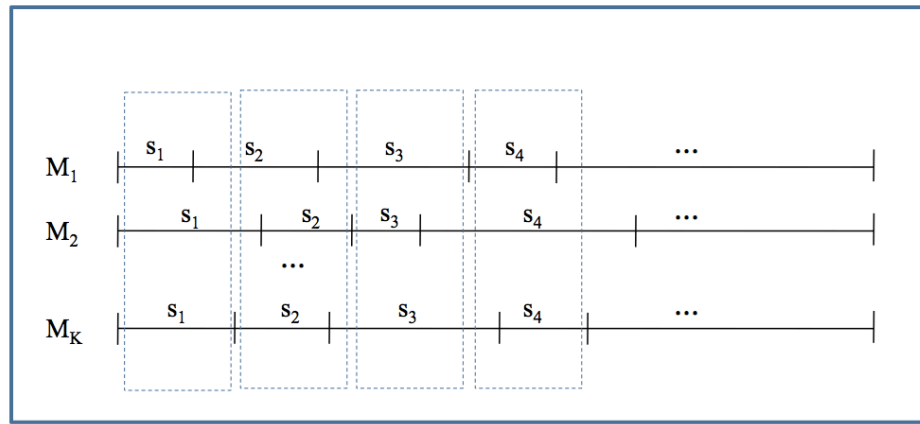


Figura 14 - Situações de subperíodos diferentes para cada máquina (elaborado pela autora)

Observando as figuras 13 e 14, percebe-se que ao calcular o número de equipes alocadas, deixando os subperíodos livres para se adequarem à quantidade produzida, o cálculo poderia considerar subperíodos diferentes para cada máquina, obtendo-se dois ou mais resultados possíveis, para o total de equipes.

**Restrições (9):**  $x_{iks} \leq G \cdot w_{iks} \quad \forall i, k, s$

O conjunto de restrições (9) é responsável por ativar ( $w_{iks} = 1$ ) ou desativar ( $w_{iks} = 0$ ) a necessidade de equipes supervisionando a produção do item  $i$  na máquina  $k$  no subperíodo  $s$ .

Observa-se que:

- se  $w_{iks} = 0 \Rightarrow x_{iks} \leq 0 \Rightarrow x_{iks} = 0$ , ou seja o item não será produzido nessa máquina nesse subperíodo se não há a alocação de equipe(s) supervisionando sua produção.
- se  $w_{iks} = 1 \Rightarrow x_{iks} \leq G \Rightarrow 0 \leq x_{iks} \leq G$ , ou seja se há a alocação de equipe(s) supervisionando a produção, pode ou não haver produção do item.

**Restrições (10):**  $I_{iT} \geq V_i \quad \forall i$

As restrições (10) estipulam que o estoque no final do horizonte de planejamento deve ser maior ou igual a um valor mínimo estipulado pela empresa. Este valor faz parte da estratégia da empresa e é determinado pela diretoria de *Supply Chain* e pela diretoria de Operações.

**Restrições (11):**  $F_{iT} \leq A_i \quad \forall i$

As restrições (11) garantem que no final do horizonte de planejamento somente seja entregue fora do prazo uma quantidade de produtos menor ou igual a um valor estabelecido  $A_i$ .

**Restrições (12):**  $I_{it} \geq 0 \quad \forall i, k, s$

**Restrições (13):**  $F_{it} \geq 0 \quad \forall i, k, s$

**Restrições (14):**  $x_{iks} \geq 0 \quad \forall i, k, s$

**Restrições (15):**  $y_{jiks} \geq 0 \quad \forall i, k, s$

O conjunto de restrições (12), (13), (14) e (15) indicam a não negatividade das variáveis reais de decisão  $I_{it}, F_{it}, x_{iks}$ . No caso de  $y_{jiks}$ , a variável não precisa ser declarada como binária, uma vez que somente assumirá valores 0 e 1, devido ao conjunto de restrições (5). A tabela 4 mostra todas as situações e respectivos valores que  $y_{jiks}$  pode assumir.

Tabela 4 - Possíveis valores para a variável  $y_{jiks}$

$z_{jk,s-1}$	$z_{iks}$	$z_{jk,s-1} + z_{iks} - 1$	$y_{jiks}$
0	1	$0 + 1 - 1$	0
0	0	$0 + 0 - 1$	0
1	1	$1 + 1 - 1$	1
1	0	$1 + 0 - 1$	0

**Restrições (16):**  $z_{iks} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, s$

**Restrições (17):**  $w_{iks} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, s$

Por fim, o conjunto de restrições (16) e (17) indicam que as variáveis de decisão  $z_{iks}$  e  $w_{iks}$  pertencem ao conjunto fechado inteiro  $\{0,1\}$ , representando variáveis binárias.



### 5.3 Testes Preliminares

Para analisar se o modelo matemático fornece resultados compatíveis com as restrições envolvidas, foi elaborado um problema piloto pequeno de apenas 4 produtos (P1, P2, P3, P4) em duas máquinas (M1, M2) com 3 equipes de supervisão disponíveis. Este problema piloto recebeu dados de entrada reais da empresa onde o presente estudo foi realizado.

O modelo matemático foi desenvolvido no *software* IBM OPL IDE versão 6.3, que serve de interface para o programa CPLEX. Utilizou-se um computador da marca Sony com 4GB de memória RAM e velocidade de 2,2GHz cada núcleo do processador Intel Core 2 Duo. O sistema operacional utilizado foi Windows 7, de 64-bit. Os dados de entrada para o problema podem ser encontrados no apêndice B. O código do modelo, escrito em linguagem OPL, pode ser encontrado no apêndice C.

Os detalhes de como foram obtidos os dados, tanto para o problema piloto, quanto para o problema real serão discutidos no próximo capítulo.

O problema utilizado para testar o funcionamento do modelo matemático envolveu 4 produtos, 2 máquinas e 3 equipes supervisoras disponíveis para a produção. Considerou-se um horizonte de planejamento de 28 dias, divididos em quatro semanas de 7 dias cada um. Assim o parâmetro  $s$  do modelo variou de 1 até 28, correspondendo aos dias do mês, divididos em  $t=4$  períodos conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Relação entre  $s$  e  $t$  para o problema piloto

$t$	$s$						
<b>1</b>	1	2	3	4	5	6	7
<b>2</b>	8	9	10	11	12	13	14
<b>3</b>	15	16	17	18	19	20	21
<b>4</b>	22	23	24	25	26	27	28

É importante ressaltar que em um  $s$  somente um produto pode ser produzido em uma máquina não havendo paradas para troca de produtos. Para o problema, considerou-se que as máquinas estavam disponíveis 24 horas por dia sendo essa a sua capacidade diária em horas.

Outro ponto importante de se enfatizar é que embora a variável  $st_{jik}$  dependa da máquina na qual a troca de produção ocorre, a matriz de tempos de *setup* para as máquinas são iguais.

As tabelas no apêndice B mostram os dados de entrada para o problema. Alguns valores são bem próximos entre si, sendo, por vezes, diferentes apenas na terceira ou quarta casa decimal. Os dados de entrada foram considerados com todas as casas decimais, mas a título de simplificação os números aparecem arredondados nas tabelas.

O modelo demorou 32 segundos para achar a solução ótima. Os resultados acerca dos custos envolvidos na função objetivo podem ser analisados na tabela 6. Em seguida, será feita uma análise envolvendo cada uma das restrições para que o funcionamento do modelo seja validado.

Tabela 6- Resultados da função objetivo para o problema piloto

Custo	Expressão	Valor ótimo (R\$)
<b>Estocagem</b>	$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (ce_i \cdot I_{it})$	17.183
<b>Backorder</b>	$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (a_i \cdot F_{it})$	46.689
<b>Produção</b>	$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^R \sum_{s=1}^S (cp_{ik} \cdot x_{iks})$	1.347.071
<b>Setup</b>	$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^R \sum_{s=1}^S (cs_{jik} \cdot y_{jiks})$	2.926
<b>Total</b>		1.413.869

$$\textbf{Restrições (1): } (I_{it-1} - F_{it-1}) + \sum_{k=1}^R \sum_{s \in S_i} x_{iks} - (I_{it} - F_{it}) = d_{it} \quad \forall i, t$$

O conjunto de restrições (1) faz o balanço entre produção, estoques, não atendimento e demanda num período e no anterior. Tal conjunto pode ser reescrito na seguinte forma:

$$(I_{it-1} - F_{it-1}) + \sum_{k=1}^R \sum_{s \in S_t} x_{iks} = (I_{it} - F_{it}) + d_{it}$$

A tabela 7 mostra justamente tal igualdade. As colunas 6 e 10 da tabela mostram o cálculo de cada um dos lados da equação. Os valores nessas colunas são iguais para cada produto no período considerado, confirmando a validade e funcionalidade do conjunto de restrições.

Tabela 7 - Funcionalidade das restrições (1)

t	$P_i$	$I_{it-1}$	$F_{it-1}$	$\sum_{k=1}^R \sum_{s \in S_t} x_{iks}$	$\Sigma$	$I_{it}$	$F_{it}$	$d_{it}$	$\Sigma$
1	<b>P1</b>	53.969	0	0	<b>53.969</b>	49.233	0	4.736	<b>53.969</b>
1	<b>P2</b>	3.979	0	0	<b>3.979</b>	3.978	0	1	<b>3.979</b>
1	<b>P3</b>	4.898	0	8.501	<b>13.399</b>	10.935	0	2.464	<b>13.399</b>
1	<b>P4</b>	2.903	0	0	<b>2.903</b>	2.491	0	412	<b>2.903</b>
2	<b>P1</b>	49.233	0	8.389	<b>57.622</b>	44.576	0	13.046	<b>57.622</b>
2	<b>P2</b>	3.978	0	201	<b>4.179</b>	3.299	0	880	<b>4.179</b>
2	<b>P3</b>	10.935	0	6.710	<b>17.645</b>	12.339	0	5.306	<b>17.645</b>
2	<b>P4</b>	2.491	0	2.209	<b>4.700</b>	0	0	4.700	<b>4.700</b>
3	<b>P1</b>	44.576	0	9.011	<b>53.587</b>	43.162	0	10.425	<b>53.587</b>
3	<b>P2</b>	3.299	0	1.492	<b>4.791</b>	3.365	0	1.426	<b>4.791</b>
3	<b>P3</b>	12.339	0	0	<b>12.339</b>	9.777	0	2.562	<b>12.339</b>
3	<b>P4</b>	0	0	5.230	<b>5.230</b>	2.395	0	2.835	<b>5.230</b>
4	<b>P1</b>	43.162	0	4.521	<b>47.683</b>	30.696	0	16.987	<b>47.683</b>
4	<b>P2</b>	3.365	0	6.016	<b>9.381</b>	2.346	2.191	9.226	<b>9.381</b>
4	<b>P3</b>	9.777	0	0	<b>9.777</b>	6.551	0	3.226	<b>9.777</b>
4	<b>P4</b>	2.395	0	9.485	<b>11.880</b>	9.610	0	2.278	<b>11.888</b>

$$\text{Restrições (2): } \sum_{i=1}^n (tp_{ik} \cdot x_{iks}) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^R (st_{jik} \cdot y_{jiks}) \leq Cap_{ks} \quad \forall k, s$$

As restrições (2) limitam a soma do tempo produzido com tempo de preparação de máquina à sua capacidade (24 horas) em todos o subperíodos. Na tabela 8 encontra-se, para cada subperíodo e cada máquina, a quantidade produzida de um determinado produto e a capacidade que foi utilizada na produção e preparação de máquina.

Além disso, o conjunto garante que o tempo de *setup* deve ser alocado no subperíodo que o novo produto entra em linha. Isso pode ser observado quando M2 muda a produção de P1 para P2, de s=24 para s=25, e perde 0,25 horas sendo preparada. Este valor é, justamente, alocado no subperíodo em que P2 inicia a produção (s=25).

Tabela 8 - Solução para o sequenciamento e dimensionamento de lotes do problema piloto (M1 e M2)

s	M1				Capacidade utilizada	M2				Capacidade utilizada
	P1	P2	P3	P4		P1	P2	P3	P4	
1	-	-	449	-	8,03	-	-	-	-	-
2	-	-	1.342	-	24,00	-	-	-	-	-
3	-	-	1.342	-	24,00	-	-	-	-	-
4	-	-	1.342	-	24,00	-	-	-	-	-
5	-	-	1.342	-	24,00	-	-	-	-	-
6	-	-	1.342	-	24,00	-	-	-	-	-
7	-	-	1.342	-	24,00	-	-	-	-	-
8	-	-	1.342	-	24,00	1.491	-	-	-	23,75
9	-	-	1.342	-	24,00	1.507	-	-	-	24,00
10	-	-	1.342	-	24,00	1.507	-	-	-	24,00
11	-	-	1.342	-	24,00	1.507	-	-	-	24,00
12	-	-	1.342	-	24,00	870	-	-	-	13,86
13	-	-	-	854	15,13	1.507	-	-	-	24,00
14	-	-	-	1.355	24,00	-	201	-	-	3,20
15	-	-	-	-	-	1.491	-	-	-	23,75
16	-	-	-	-	-	1.507	-	-	-	24,00
17	-	-	-	1.355	24,00	1.507	-	-	-	24,00
18	-	-	-	1.355	24,00	-	1.492	-	-	23,75
19	-	-	-	1.165	20,63	1.491	-	-	-	23,75
20	-	-	-	-	-	1.507	-	-	-	24,00
21	-	-	-	1.355	24,00	1.507	-	-	-	24,00
22	-	-	-	1.355	24,00	1.507	-	-	-	24,00
23	-	-	-	1.355	24,00	1.507	-	-	-	24,00
24	-	-	-	1.355	24,00	1.507	-	-	-	24,00
25	-	-	-	1.355	24,00	-	1.492	-	-	23,75
26	-	-	-	1.355	24,00	-	1.508	-	-	24,00
27	-	-	-	1.355	24,00	-	1.508	-	-	24,00
28	-	-	-	1.355	24,00	-	1.508	-	-	24,00

$$\text{Restrições (3): } tp_{ik} \cdot x_{iks} \leq Cap_{ks} \cdot z_{iks} \quad \forall i, k, s$$

O conjunto de restrições (3) garante que só haverá produção do item *i* caso a máquina *k* esteja preparada para processar o item no início do subperíodo *s*. O inverso não é

verdadeiro, ou seja se a máquina estiver preparada não significa que obrigatoriamente deve haver produção.

Na tabela 8, as células em amarelo correspondem aos valores unitários da variável  $z_{iks}$ . Dessa forma, percebe-se que como não há produção sem que a máquina tenha sido preparada as restrições foram respeitadas.

$$\text{Restrições (4): } \sum_{i=1}^n z_{iks} = 1 \quad \forall k, s$$

O conjunto de restrições (4) determina que cada máquina  $k$  está preparada para produzir apenas um item em cada subperíodo  $s$ . Ou seja, uma máquina não pode produzir ao mesmo tempo dois produtos.

Esse conjunto de restrições é facilmente confirmado visualmente pelo fato de que, na tabela 8, não há nenhuma máquina processando dois itens no mesmo subperíodo.

$$\text{Restrições (5): } y_{jiks} \geq z_{jk,s-1} + z_{iks} - 1 \quad \forall i, j, k, s$$

As restrições (5) relacionam os estados de preparação da máquina com a variável que indica quando ocorre uma troca, de um produto  $i$  para um  $j$  na máquina  $k$ .

No caso do problema piloto, a tabela 9 apresenta os resultados para os valores da variável  $y_{jiks}$ . As linhas que somente envolveram valores nulos da variável foram omitidas da tabela.

Tabela 9 - Valores das variáveis  $y_{jiks}$  para cada subperíodo variando de 1 até 28

$j$	$i$	$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
P2	P2	M1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	P4	M1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	P4	M1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P1	P1	M2	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
P1	P2	M2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	P3	M2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
P2	P1	M2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	P1	M2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	P3	M2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

As linhas que apresentam somente um número 1 indicam exatamente a troca de produção dos itens na máquina. O  $s$  correspondente a essa troca é exatamente o primeiro subperíodo no qual se inicia a produção de um novo item.

**Restrições (6):**  $z_{iks} \leq p_{ik} \quad \forall i, k, s$

As restrições (6) indicam que existe a possibilidade de que uma máquina esteja preparada para produzir um item, somente se isso for viável tecnicamente.

Observando a tabela 8 nota-se que nenhuma máquina exceto M1 fica preparada para P4 e que tal item não é processado em M2.

**Restrições (7):**  $z_{ik0} = 0 \quad \forall i, k$

O conjunto de restrições (7) garantem que nenhuma máquina esteja preparada para processar nenhum produto no início do horizonte de planejamento.

**Restrições (8):**  $\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^R (E_i \cdot w_{iks}) \leq D \quad \forall s$

O conjunto de restrições (8) garante que o número total de equipes de supervisão em uso durante um determinado subperíodo seja menor ou igual ao número de equipes disponíveis. Para o problema piloto considerou-se a disponibilidade de 3 equipes. A tabela 10 mostra o número de equipes utilizadas na coluna  $E_i$  que não ultrapassa 3 qualquer que seja o subperíodo considerado (primeira coluna). Na linha  $E_i$  foram colocados os números necessários de equipes para cada produto.

Tabela 10 - Alocação das equipes de supervisão da produção para o problema piloto

<i>s</i>	<i>Ei</i>	M1				M2			
		P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
		1	2	2	1	1	2	2	1
1	3	-	-	1	1	-	-	-	-
2	3	-	-	1	1	-	-	-	-
3	3	-	-	1	1	-	-	-	-
4	3	-	-	1	1	-	-	-	-
5	3	-	-	1	1	-	-	-	-
6	2	-	-	1	-	-	-	-	-
7	3	-	-	1	1	-	-	-	-
8	3	-	-	1	-	1	-	-	-
9	3	-	-	1	-	1	-	-	-
10	3	-	-	1	-	1	-	-	-
11	3	-	-	1	-	1	-	-	-
12	3	-	-	1	-	1	-	-	-
13	2	-	-	-	1	1	-	-	-
14	3	-	-	-	1	-	1	-	-
15	3	-	-	-	-	1	1	-	-
16	3	-	-	-	-	1	1	-	-
17	2	-	-	-	1	1	-	-	-
18	3	-	-	-	1	-	1	-	-
19	2	-	-	-	1	1	-	-	-
20	3	-	-	-	-	1	1	-	-
21	2	-	-	-	1	1	-	-	-
22	2	-	-	-	1	1	-	-	-
23	2	-	-	-	1	1	-	-	-
24	2	-	-	-	1	1	-	-	-
25	3	-	-	-	1	-	1	-	-
26	3	-	-	-	1	-	1	-	-
27	3	-	-	-	1	-	1	-	-
28	3	-	-	-	1	-	1	-	-

**Restrições (9):**  $x_{iks} \leq G \cdot w_{iks} \quad \forall i, k, s$

O conjunto de restrições (9) garantem que se há produção do item  $i$  então a quantidade de equipes necessárias  $E_i$  deve estar supervisionando-a. Se for feita uma sobreposição da tabela 8 com a tabela 10 fica claro que em toda a célula nas quais há quantidade produzida na tabela 7, as variáveis  $w_{iks}$  têm valor unitário.

**Restrições (10):**  $I_{iT} \geq V_i \quad \forall i$

As restrições (10) estipulam que o estoque no final do horizonte de planejamento deve ser igual ou maior que um valor mínimo estipulado pela empresa.

A tabela 11 mostra os resultados para as variáveis  $I_{it}$  ao fim de cada  $t$ . Em especial para  $t=4$ , percebe-se que os valores são, no caso, iguais aos valores  $V_i$ . Este valor é estipulado pela empresa e varia a cada mês de acordo com sua estratégia de produção.

Tabela 11 - Resultados para a quantidade estocada ao fim de cada período

$I_{it}$	t=0	t=1	t=2	t=3	t=4	$V_i$
P1	53.969	49.233	44.576	43.162	30.696	30.696
P2	3.979	3.978	3.299	3.365	2.346	2.346
P3	4.898	10.935	12.339	9.777	6.551	6.551
P4	2.903	2.491	0	2.395	9.610	9.610

**Restrições (11):**  $F_{iT} \leq A_i \quad \forall i$

As restrições (11) garantem que a quantidade não atendida no fim do horizonte de planejamento não ultrapasse um valor estipulado pela empresa. Este valor é normalmente a quantidade de caixas em porcentagem da demanda do horizonte de planejamento que, no máximo, pode-se deixar de atender. Pela tabela 7, nota-se que houve 2.191 caixas de P2 não atendida em  $t=4$ . Este é exatamente o limite estipulado de *backorder* para este produto. Para os demais itens não houve nenhuma quantidade de produto não atendida no horizonte de planejamento considerado.

**Restrições (12):**  $I_{it} \geq 0 \quad \forall i, k, s$

**Restrições (13):**  $F_{it} \geq 0 \quad \forall i, k, s$

**Restrições (14):**  $x_{iks} \geq 0 \quad \forall i, k, s$

**Restrições (15):**  $y_{jiks} \geq 0 \quad \forall i, k, s$

O conjunto de restrições (12), (13), (14) e (15) impõem que as variáveis reais de decisão não sejam negativas, e de fato, não houve nenhuma variável que o modelo indicou como sendo negativa.

**Restrições (16):**  $z_{iks} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, s$

**Restrições (17):**  $w_{iks} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, s$



Por fim, as restrições (16) e (17) indicam as variáveis binárias do problema. Todas elas assumiram valores nulos ou unitários na solução do problema piloto.

#### **5.4 Validade do modelo**

Após analisar o funcionamento de cada uma das restrições envolvidas, pode-se afirmar que o modelo matemático, na forma como foi elaborado, atende todas elas.

Além disso, as restrições e condições específicas do problema que o presente trabalho pretende solucionar se mostraram adequadas e corretamente modeladas no modelo de programação inteira mista apresentado nas páginas deste trabalho.



## Capítulo 6

# **Obtenção dos dados**



## 6 OBTENÇÃO DOS DADOS

Este capítulo versa sobre a obtenção dos dados do problema de sequenciamento e dimensionamento de lotes na fábrica de absorventes de Eldorado do Sul da Kimberly-Clark Brasil. Assim, pretende-se especificar como os dados de entrada foram obtidos e como, a partir de alguns deles, se calculou certos parâmetros que serão utilizados pelo modelo.

A maioria dos dados dos produtos envolvidos no problema considerado foram obtidos com o planejador de produção da fábrica. Alguns parâmetros que não foram obtidos diretamente com planejador, foram calculados a partir de dados fornecidos por ele. A tabela 12 apresenta a origem dos dados dos parâmetros do problema.

É importante ressaltar que os dados foram modificados para garantir a sua confidencialidade, mas a proporção entre eles foi mantida para que não houvessem distorções ao fazer as alterações.

Tabela 12 - Origem dos dados dos parâmetros coletados

Parâmetro	Descrição	Origem de obtenção do parâmetro
$d_{it}$	Demanda	Valores obtidos com a área de Planejamento da Demanda
$tp_{ik}$	Tempo de produção	Valores obtidos com o planejador de produção da fábrica
$st_{jik}$	Tempo de <i>setup</i>	Valores obtidos com o planejador de produção da fábrica
$Cap_{ks}$	Capacidade	Para todos os dias foi considerado 24, exceto naqueles nos quais a máquina se encontra parada por manutenção durante dois turnos
$CS_{jik}$	Custo de <i>setup</i>	Referente a perda de material decorrente de produtos não conformes produzidos inicialmente resultado dos ajustes e testes iniciais da máquina quando é preparada para produzir um item

Parâmetro	Descrição	Origem de obtenção do parâmetro
$cp_{ik}$	Custo de produção	Valores obtidos com a área de finanças. Os valores já incluem o rateio com custos indiretos de produção
$ce_i$	Custo de armazenagem	Valores obtidos com o planejador de produção da fábrica
$a_i$	Penalidade por <i>backorder</i>	Valor calculado como o lucro perdido por unidade de produto entregue fora do prazo
$E_i$	Número de equipes necessárias supervisionando a produção do item	Valores obtidos com o planejador de produção da fábrica
$D$	Equipes disponíveis	Valores obtidos com o planejador de produção da fábrica
$p_{ik}$	Permissão de produção do item na máquina	Valores obtidos com o planejador de produção da fábrica
$V_i$	Valor mínimo de estoque	Valores determinados estrategicamente pela empresa. Dado obtido com o planejador de produção da fábrica.
$A_i$	Valor máximo de <i>backorder</i>	Valores obtidos com o planejador de produção da fábrica
$I_{i0}$	Estoque inicial	Valores obtidos com o planejador de produção da fábrica
$F_{i0}$	<i>Backorder</i> inicial	Valores obtidos com o planejador de produção da fábrica

Com relação ao tempo de *setup*, é interessante explicar que o parâmetro assume valores nulos, 0,25 horas ou 3 horas. Os valores nulos dizem respeito ao *setup* entre os mesmos itens, as 3 horas correspondem ao tempo de troca entre produtos diferentes, e os 15 minutos representam o tempo de troca entre produtos chamados de regulares e produtos com

subembalagem, ou produtos promocionais. Essa classificação significa que na verdade a troca de produção está acontecendo entre dois produtos que diferem muito pouco entre si, seja por uma subembalagem ou uma contagem de tiras de absorventes diferente.

As subembalagens são produtos idênticos ao seu item regular, mas que são separados por subembalagens de plásticos antes de serem colocados dentro da caixa. A figura 15 (a) caracteriza uma caixa do item regular e (b) uma caixa do item de subembalagem.

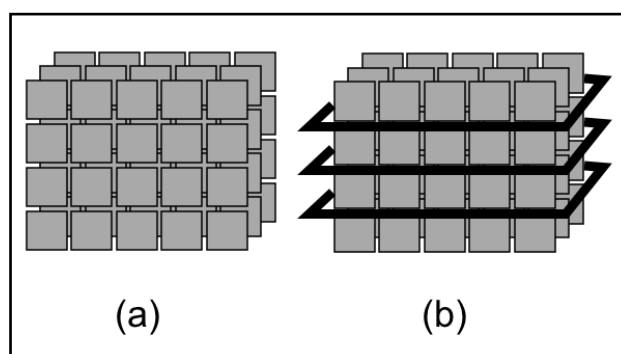


Figura 15 - Caixa do item regular (a) e da sua subembalagem (b) (elaborado pela autora)

Supondo que uma embalagem de absorvente seja representado pelo quadrado cinza na figura, na sua caixa cabem 60 embalagens soltas. O item chamado de subembalagem é o mesmo produto, mas ao invés das embalagens serem colocadas soltas na caixa, há uma outra embalagem de plástico envolvendo, no caso da figura, 15 embalagens (representados pelos “andares” em preto). Então, são colocadas na caixa, 4 subembalagens com 15 embalagens cada uma, totalizando 60 embalagens individuais.

Os itens de subembalagem são exatamente os produtos que necessitam de 2 equipes para a sua produção, isso por que o processo de colocar as embalagens dentro da subembalagem é feito manualmente demandando mais pessoas para empacotar as embalagens prontas, que saem rapidamente da máquina. Assim, o tempo de preparação neste caso é apenas um tempo para que as equipes se organizem com o material para fazer a subembalagem.

Normalmente tais itens são fornecidos para clientes do canal atacado que ao invés de venderem apenas uma única embalagem para o consumidor, como é praticado pelo varejo, vendem a subembalagem a um preço com desconto.

No caso do produto promocional, ele não requer duas equipes supervisionando sua produção, mas também representa o mesmo produto, com a diferença de possuir mais tiras de absorventes dentro da sua embalagem. O tempo de *setup* neste caso envolve apenas a troca das embalagens na máquina levando apenas 15 minutos para efetuar a mudança.

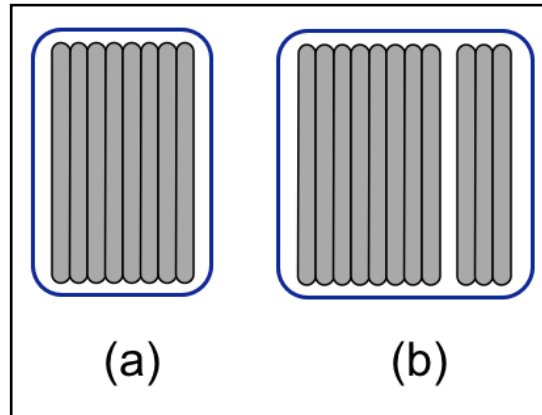


Figura 16 - Embalagem do item regular (a) e do item promocional (b) (elaborado pela autora)

Supondo que uma embalagem, figura 16 (a), contenha 8 tiras de absorventes, o seu item promocional tem, por exemplo, 3 tiras a mais, figura 16 (b).



## Capítulo 7

# **Resultados obtenidos**



## 7 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo será abordada a resolução do problema real de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção que se pretende solucionar na fábrica de Eldorado do Sul da Kimberly-Clark Brasil.

Este problema é conhecido na literatura como GLSPPL (*General Lot Sizing and Scheduling Problem with Parallel Machines*) e classificado como NP-difícil. No entanto, a formulação para o problema que se pretende solucionar apresenta algumas diferenças com relação ao modelo clássico, apresentado no capítulo 4. Essas diferenças incluem máquinas distintas operando em paralelo, permissão de *backorders* existência de equipes de supervisão da produção, *setup* dependente da sequência e subperíodos fixos no horizonte de planejamento.

Inicialmente, tentou-se resolver a formulação proposta no capítulo 5 através de métodos exatos. No entanto, devido a forte natureza combinatória do problema não foi possível obter a solução ótima dentro de um intervalo de tempo estipulado. Dessa forma, foi aplicada a heurística *relax-and-fix*, tradicionalmente usada para a resolução de problemas como o abordado neste trabalho, que traz soluções boas em tempos computacionais razoáveis.

Além disso, dois testes adicionais foram realizados para validar o funcionamento do modelo para a empresa. O primeiro leva em consideração dois horizontes de planejamento com cenários de operações distintos. O segundo analisa a necessidade de equipes de supervisão da produção para melhorar a operação.

### 7.1 Método exato de resolução

A primeira etapa de resolução do problema real envolveu a tentativa resolução da formulação proposta no capítulo 5 através do *software* CPLEX. A justificativa para tal escolha advém do fato de que este programa é amplamente utilizado nos problemas presentes na literatura e também porque está presente no desenvolvimento de projetos envolvendo pesquisa operacional na empresa sob foco de estudo. Dessa forma, resolver o problema

abordado via um *software* que se encontra disponível na empresa se mostrava de crucial importância.

Conforme já foi citado anteriormente, o modelo matemático foi desenvolvido no *software* IBM OPL IDE versão 6.3, também disponível na empresa, que serve de interface para o programa CPLEX. Utilizou-se um computador da marca Sony com 4GB de memória RAM e velocidade de 2,2GHz cada núcleo do processador Intel Core 2 Duo. O sistema operacional utilizado foi Windows 7, de 64-bit. Os dados de entrada para o problema real podem ser encontrados no apêndice D.

Achou-se razoável determinar um tempo de execução de uma hora para obter a solução para o problema. Assim, limitou-se o tempo de resolução do CPLEX para esse intervalo de tempo. No entanto, dentro desse intervalo o *software* não encontrou nenhuma solução inteira factível para o problema.

Provavelmente isso ocorreu porque se trata de um problema de alta complexidade envolvendo uma estrutura de muitas máquinas e produtos. Além disso, conforme citado na revisão bibliográfica, Karimi, Fatemi e Wilson (2003) pontuam que quando os tempos de preparação de máquina são levados em consideração o modelo matemático torna-se mais complexo o que dificulta tempos de resposta razoavelmente rápidos.

Como o método exato de resolução não apresentou resposta, decidiu-se então aplicar uma estratégia da heurística *relax-and-fix*, que é tradicionalmente aplicada para a resolução de problemas com o tipo e porte do abordado neste trabalho.

## 7.2 Aplicação da heurística

A heurística *relax-and-fix* é definida por Wolsey (1998) como sendo um método de decomposição do modelo de programação inteiro misto (MIP) em problemas menores e de mais fácil resolução que são resolvidos mais rapidamente e trazem boas soluções ao problema original. Zanakis, Evans e Vazacopoulos (1989) complementam que a saída dos subproblemas anteriores são entradas para os subproblemas seguintes e em seguida as soluções vão gradualmente sendo adicionadas umas as outras. Trabalhos recentes como os de Toso e Morabito (2005), Ferreira, Morabito e Rangel (2008), Beraldi *et al.* (2007) e

Kawamura e Ronconi (2010) utilizaram essa abordagem para resolver problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes.

A técnica de aplicação da heurística *relax-and-fix* envolve decompor o problema original em subproblemas menores. As variáveis inteiras ou binárias do problema são particionadas em conjuntos e esses conjuntos determinam os subproblemas. Em seguida, eles são resolvidos sequencialmente. No primeiro subproblema, as variáveis dentro do conjunto da variável particionada são determinadas como binárias e as demais são reais. Uma vez resolvido o primeiro subproblema, passa-se ao segundo, fixando-se as variáveis obtidas anteriormente. Assim, o conjunto de variáveis que estão no problema em etapa de resolução, são mantidas inteiras, enquanto que as variáveis do conjunto do subproblema anterior já estão definidas e fixadas e as variáveis do conjunto dos subproblemas posteriores estão relaxadas, ou seja, reais.

Para exemplificar será exibida a notação para aplicação da heurística, baseado em Kawamura e Ronconi (2010). A figura 17 ilustra o método *relax-and-fix* descrito a seguir. Considera-se o seguinte problema inteiro:

$$\begin{array}{ll} \max & cx \\ \text{sujeito a} & Ax = B \\ & x \in Z_+ \end{array}$$

A primeira etapa consiste em dividir as variáveis inteiras  $x$  em conjuntos  $n_1, n_2, \dots, n_r$  nos quais:  $x_1 \in Z_+^{n_1}, x_2 \in R_+^{n_2}, \dots, x_r \in R_+^{n_r}$ . Assim o novo problema pode ser modelado como segue:

$$\begin{array}{ll} \max & cx \\ \text{sujeito a} & Ax = B \\ & x_1 \in Z_+^{n_1}, x_2 \in R_+^{n_2}, \dots, x_r \in R_+^{n_r} \end{array}$$

Resolve-se o problema apresentado e em seguida fixa-se as variáveis  $x_1$  obtidas. Dessa forma, a segunda etapa é resolver o seguinte subproblema:

$$\begin{aligned}
 & \max cx \\
 \text{sujeito a} \quad & Ax = B \\
 & x_1 = \hat{x}_1, x_2 \in Z_+^{n_2}, \dots, x_t \in R_+^{n_t}, \dots, x_r \in R_+^{n_r}
 \end{aligned}$$

onde  $\hat{x}_1$  são os valores obtidos na resolução do primeiro subproblema. Realiza-se esse procedimento até o subproblema r-1, que pode ser modelado como segue:

$$\begin{aligned}
 & \max cx \\
 \text{sujeito a} \quad & Ax = B \\
 & x_1 = \hat{x}_1, x_2 = \hat{x}_2, \dots, x_{r-1} \in Z_+^{n_{r-1}}, x_r \in R_+^{n_r}
 \end{aligned}$$

Por fim, o último problema terá todas as variáveis dos problemas anteriores a ele fixadas, bastante apenas resolver as variáveis  $x_r \in Z_+^{n_r}$ . Assim o subproblema r, último, pode ser modelado como segue:

$$\begin{aligned}
 & \max cx \\
 \text{sujeito a} \quad & Ax = B \\
 & x_1 = \hat{x}_1, x_2 = \hat{x}_2, \dots, x_{r-1} = \hat{x}_{r-1}, x_r \in Z_+^{n_r}
 \end{aligned}$$

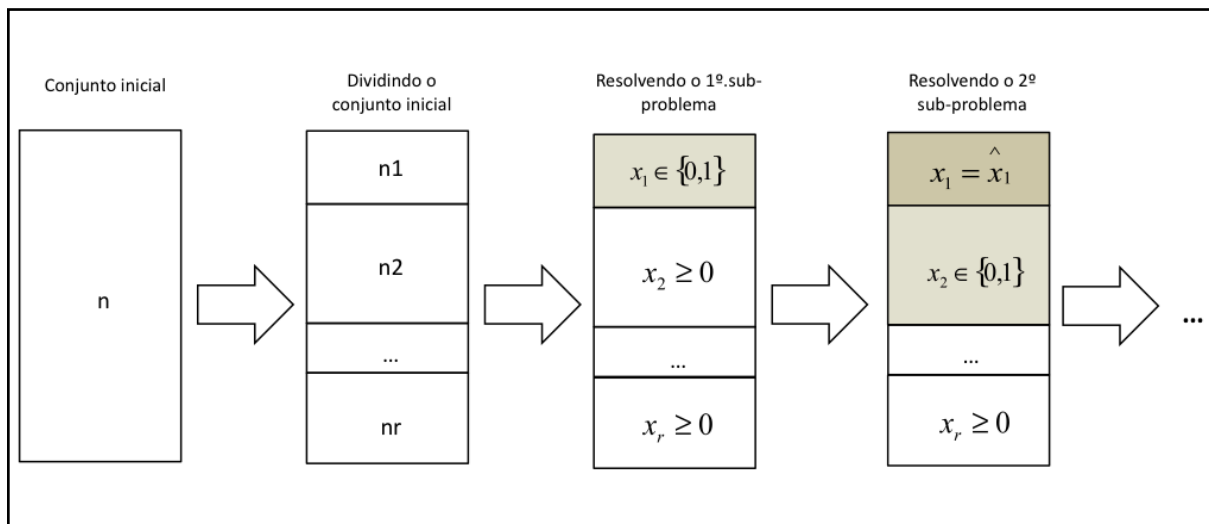


Figura 17 - Decomposição das variáveis pelo método da heurística relax-and-fix (adaptado da comunicação pessoal de Kawamura e Ronconi (2010))

Existem várias estratégias de decomposição das variáveis inteiras do problema. Kawamura e Ronconi (2010) propõem 11 estratégias, sendo duas delas chamadas de híbridas. Os autores realizam teste computacionais para 12 tipos de problemas diferentes. Os estudos mostram que para o problema que mais se aproxima do porte do problema abordado no presente trabalho, a estratégias que conseguiram obter uma solução viável dentro do limite de tempo são: decomposição cronológica dos períodos  $t$ , decomposição cronológica inversa dos períodos  $t$ , decomposição dos produtos de menor demanda, para os de maior demanda, e híbrida 2.

Como a estratégia de decomposição cronológica dos períodos  $t$  é a mais tradicionalmente utilizada na literatura, optou-se por aplicá-la ao problema abordado neste trabalho.

Mais detalhadamente, essa estratégia consiste em particionar os subproblemas segundo a variável inteira, na sua dimensão de tempo. A ordem de resolução dos subproblemas se dá do subproblema com intervalo de tempo mais próximo do início do horizonte de planejamento até o mais distante.

Para aplicar a heurística, dividiu-se o horizonte de planejamento de um mês em quatro semanas, ou seja, quatro subproblemas. Além disso, a decomposição foi feita na dimensão de  $s$ , a partir das variáveis  $z_{iks}$ , que indicam se a máquina  $k$  está ou não preparada para processar o item  $i$  no subperíodos  $s$ . As variáveis  $w_{iks}$  também binárias, foram mantidas inteiras durante todas as etapas da heurística. A figura 18 esquematiza a decomposição do horizonte de planejamento em 4 subconjuntos, e, da mesma forma, a decomposição da variável  $z_{iks}$  acompanha a divisão em 4 problemas menores. Cada figura (a), (b), (c) e (d) representa cada uma das etapas da heurística para o problema abordado.

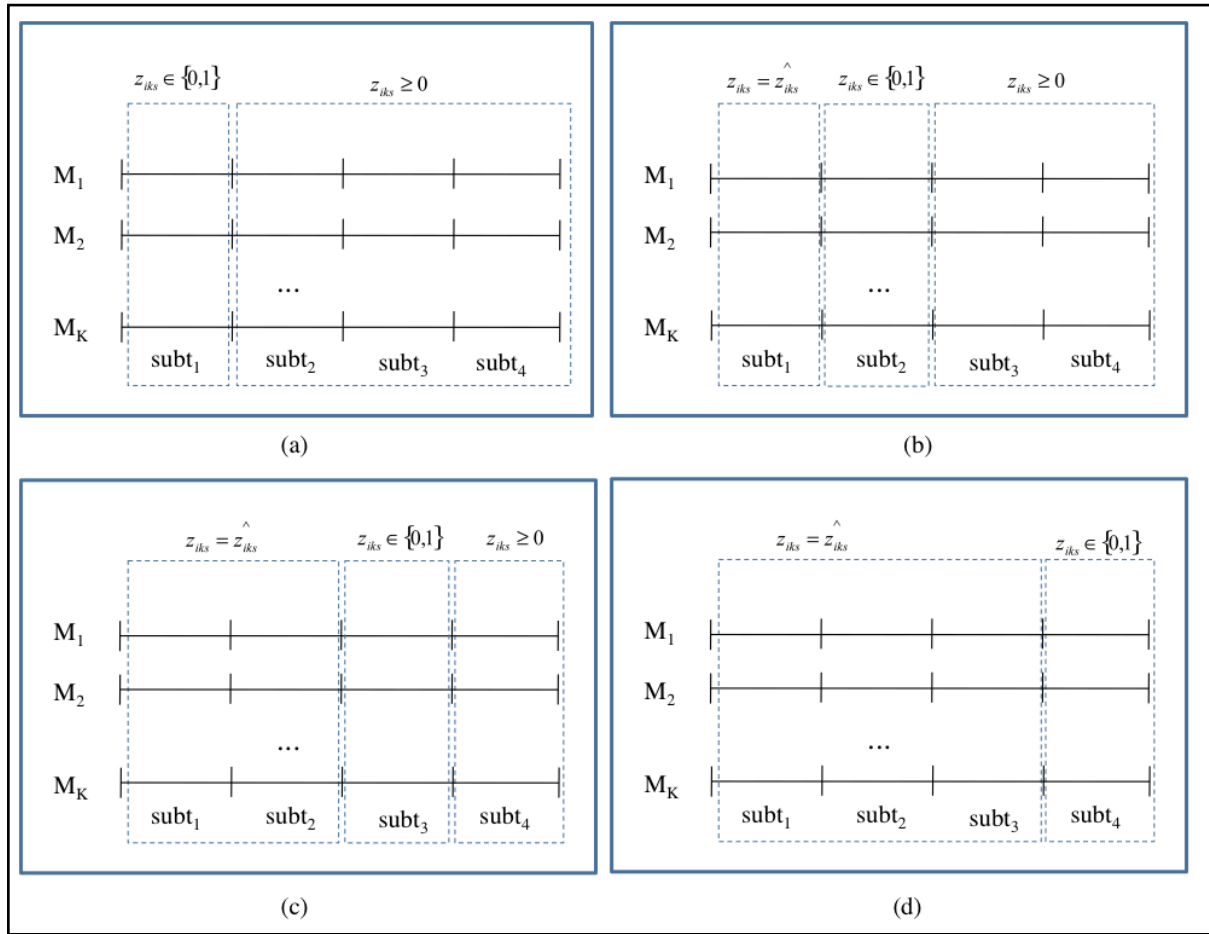


Figura 18 - Decomposição da variável  $z_{iks}$  para o problema abordado (adaptado da comunicação pessoal de Kawamura e Ronconi (2010))

### 7.3 Apresentação dos resultados

A heurística foi aplicada para um mês do primeiro semestre de 2010, chamado de HP1. Neste mês, apenas 12 máquinas foram utilizadas para produzir 46 produtos, e, portanto, estavam disponíveis apenas 12 equipes de supervisão da produção. Os dados de entrada para HP1 podem ser encontrados no apêndice D.

O *software* foi executado durante 15 minutos para cada um dos quatro subproblemas, totalizando 1 hora de execução da heurística. Foi possível encontrar uma solução viável dentro do limite de tempo estabelecido. Quando essa solução é comparada com o problema relaxado, ou seja, deixando todas as variáveis inteiras ou binárias livres para variar no



conjunto dos números reais positivos, obtém-se um *gap* de no máximo 1,99%, indicando que a solução obtida pela heurística embora não seja a ótima, é de boa qualidade.

A saída obtida pela heurística para HP1 (balanço de quantidades, plano de produção obtido e saídas das variáveis  $y_{jiks}$ ,  $w_{iks}$  e  $z_{iks}$ ), pode ser encontrada no apêndice E. A tabela 13 apresenta os custos obtidos pela heurística em HP1 e os custos realmente obtidos pela empresa nesse mesmo horizonte de planejamento. Já a tabela 14 apresenta os resultados em volume de caixas.

Tabela 13- Comparação de custos obtidos para HP1

<b>Custos</b>	<b>Modelo</b>	<b>Empresa</b>	<b>Diferença</b>	<b>Diferença %</b>
<b>(R\$)</b>	<b>(Heurística)</b>	<b>(Realizado)</b>	<b>absoluta</b>	
Estoque	34.178	42.315	8.137	19%
Produção	6.963.498	7.765.501	802.003	10%
<i>Backorders</i>	988.294	1.369.853	381.560	28%
<i>Setup</i>	126.620	76.650	-49.969	-65%
<b>Total</b>	<b>8.112.588</b>	<b>9.254.319</b>	<b>1.141.731</b>	<b>12%</b>

Tabela 14- Comparação de volume em caixas obtidos para HP1

<b>Volume</b>	<b>Modelo</b>	<b>Empresa</b>	<b>Diferença</b>	<b>Diferença</b>
<b>(caixas)</b>	<b>(Heurística)</b>	<b>(Realizado)</b>	<b>absoluta</b>	<b>%</b>
Estoque inicial	117.151	117.151	-	0%
Produção	309.728	331.776	22.048	7%
Demanda	366.341	366.341	-	0%
Backorders	41.378	52.647	11.269	21%
Estoque final	101.606	101.606	-	0%

Comparando os custos obtidos, percebe-se que o modelo obtém significativas melhorias para todos os custos considerados, exceto para o custo de *setup*. Esse resultado já era esperado e está coerente com o descrito no item 3.2 quando o processo atual de planejamento e controle da produção da empresa foi descrito.

Ao contrário do modelo, que busca um benefício global, no que tange os custos envolvidos, a empresa prefere produzir lotes grandes, que conseguem atender até 30 dias de demanda, por significarem poucas trocas de produtos nas máquinas e, portanto, baixo tempo de *setup*. Além disso, aparentemente significam alta utilização de máquina, justamente por não haver paradas para troca.

Um outro ponto interessante de se enfatizar é que as quantidades inicial e final estocadas pela empresa em HP1 são as mesmas que a considerada pelo modelo. Assim, analisando os resultados para a quantidade produzida e atendida com atraso, percebe-se que o modelo consegue produzir menos, sem atrasar uma parcela grande da demanda, como o realizado pela empresa, ou seja, consegue um melhor balanceamento da cadeia e economiza produzindo menos e atendendo mais pedidos no prazo correto. Portanto, a redução de custos que o modelo sugere é de aproximadamente 12%.

O gráfico da figura 19 mostra a participação de cada parcela dos custos na economia total sugerida pelo modelo.

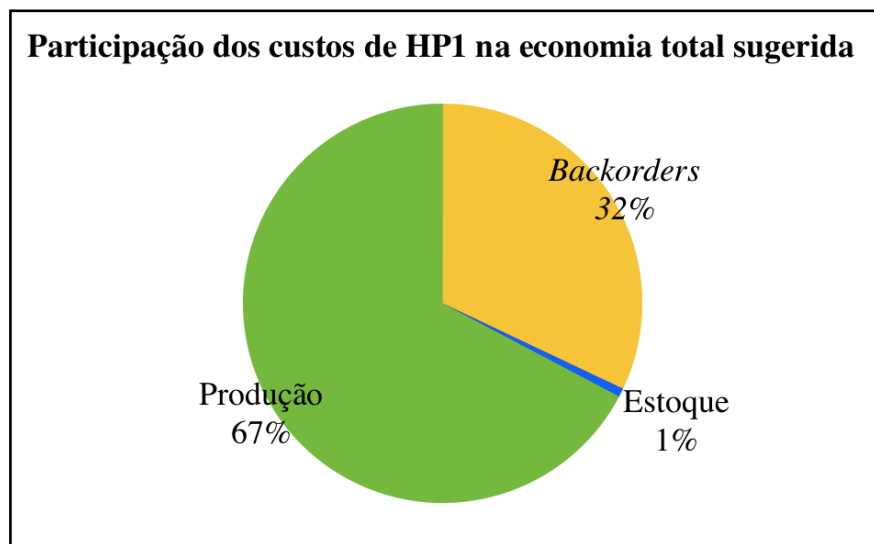


Figura 19 - Participação dos custos de HP1 na economia total sugerida

É importante explicar que o problema real foi abordado tomando como base dados de um horizonte de planejamento, chamado de HP1, referente a um mês do primeiro semestre de 2010. O cenário no qual a empresa se encontrava nesse HP1 correspondia a uma previsão de demanda mais assertiva que em comparação com o segundo semestre do mesmo ano. Além disso, os estoques estavam razoavelmente balanceados e a cadeia produtiva estava mais controlada.

Dessa forma, a previsão estipulada por *Supply Chain* em conjunto com a área de vendas fez com que não houvesse um excesso imprevisto de demanda. Por causa disso, a quantidade de estoques que se desejava ter no final do mês era menor que a quantidade inicial, já que o planejamento estava mais alinhado com as operações e as incertezas existentes no processo estavam sob controle.

## 7.4 Testes adicionais

Além de aplicar o modelo para um problema em específico da empresa, decidiu-se estudar o comportamento do modelo e seus resultados segundo duas análises.

A primeira leva em consideração o período do ano. Assim, já que HP1 estava inserido em um cenário mais estável do ponto de vista das operações, optou-se por testar um modelo em um horizonte de tempo HP2, no qual houve um desbalancamento de estoques, acuracidade não tão boa da previsão de demanda, e possíveis paradas de linhas de produção.

O segundo conjunto de testes, procurará validar a hipótese levantada no início deste trabalho quanto a necessidade de se contratar mais equipes de supervisão da produção. Assim, para cada um dos meses HP1 e HP2 variou-se o número de equipes e estudou o comportamento da heurística e de seus resultados.

### 7.4.1 Diferente cenário de operação da fábrica

Além de aplicar o modelo em um mês no qual a empresa estava inserida em um cenário mais estável e confiável, também aplicou-se o modelo em um mês no qual este cenário envolveu incertezas da demanda e estoques desbalanceados e muito altos para um nível comumente trabalho pela empresa. Dessa forma, testou-se o modelo para um problema real, chamado de HP2. Este mês é referente ao segundo semestre de 2010 e envolve a produção de 53 itens em 13 máquinas. Os dados de entrada para HP2 podem ser encontrados no apêndice F.

Basicamente esse período foi marcado por uma demanda excessiva e não prevista, que acarretou uma alta quantidade de pedidos entregues fora do prazo, além, conforme dito, de estoques desbalanceados e linhas de produção paradas devido ao excesso de produtos em estoque. Devido a tais incertezas da demanda, o estoque final que se desejava obter no final do horizonte de planejamento era maior ou igual ao que se tinha no início.

O *software* rodou durante 15 minutos para cada um dos quatro subproblemas, totalizando 1 hora de execução da heurística. Foi possível encontrar uma solução viável dentro do limite de tempo estabelecido. Quando essa solução é comparada com o problema relaxado, ou seja, deixando todas as variáveis inteiras ou binárias livres para variar no conjunto dos números reais positivos, obtém-se um *gap* de no máximo 3,36%, indicando que a solução obtida pela heurística embora não seja a ótima, é de boa qualidade.

A saída obtida pela heurística para HP2 (balanço de quantidades, plano de produção obtido e saídas das variáveis  $y_{jiks}$ ,  $w_{iks}$  e  $z_{iks}$ ), pode ser encontrada no apêndice G. A tabela 15 apresenta os custos obtidos pela heurística em HP1 e os custos realmente obtidos pela empresa nesse mesmo horizonte de planejamento. Já a tabela 16 apresenta os resultados em volume de caixas.

Assim como obtido com os resultados de HP1, comparando os custos obtidos para HP2, percebe-se que o modelo obtém significativas melhorias para todos os custos considerados, exceto para o custo de *setup*, por motivo já mencionado.

Tabela 15 - Comparação de custos obtidos para HP2

<b>Custos</b>	<b>Modelo</b>	<b>Empresa</b>	<b>Diferença</b>	<b>Diferença %</b>
<b>(R\$)</b>	<b>(Heurística)</b>	<b>(Realizado)</b>	<b>absoluta</b>	
Estoque	71.579	90.138	18.559	21%
Produção	7.393.952	9.532.082	2.138.131	22%
<i>Backorders</i>	1.521.958	2.096.026	574.069	27%
<i>Setup</i>	167.416	90.379	-77.037	-85%
<b>Total</b>	<b>9.154.904</b>	<b>11.808.625</b>	<b>2.653.722</b>	<b>22%</b>

Tabela 16 - Comparação de volume em caixas obtidos para HP2

Volume (caixas)	Modelo (Heurística)	Empresa (Realizado)	Diferença absoluta	Diferença %
Estoque inicial	240.615	240.615	-	0%
Produção	319.972	427.835	107.863	25%
Demanda	377.240	377.240	-	0%
<i>Backorders</i>	60.396	71.112	10.716	15%
Estoque final	240.615	317.581	76.966	24%

Embora haja uma economia de R\$ 2.138.131 por se produzir menos, sendo essa economia responsável por 78% da economia total sugerida, conforme mostra o gráfico da figura 20, não se pode desconsiderar os custos reduzidos por atender uma maior parcela da demanda do que a empresa atendeu. Os custos de economia com *backorders* correspondem a 21% da economia total sugerida e um montante de R\$574.069. Como estoques, demanda, produção, *backorders* e *setup* estão todos encadeados entre si, pode-se dizer que houve uma melhoria, já que se produziu menos, se estocou menos, se atendeu mais e, uma vez, que o modelo sugere uma performance melhor que a da empresa.

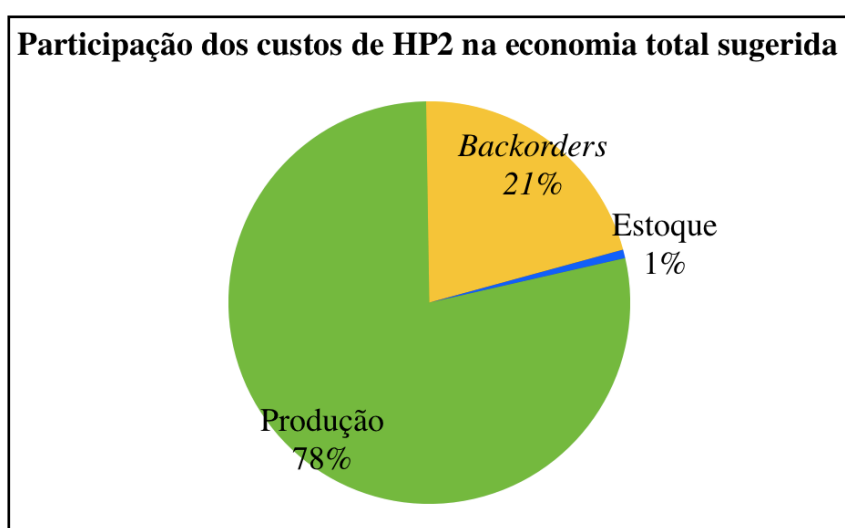


Figura 20 - Participação dos custos de HP2 na economia total sugerida

É importante enfatizar que enquanto HP1 envolveu a produção de 46 produtos em 12 máquinas, HP2 envolveu a produção de 53 produtos em 13 máquinas, aumentando o número de possibilidades de combinação produto-máquina, aumentando a complexidade

computacional do problema resultando em um *gap* máximo maior para HP2. O aumento de capacidade devido ao uso de uma máquina a mais não é suficiente para fazer com que o modelo decida mais rapidamente qual a melhor solução, já que a máquina extra somente pode produzir alguns produtos e não é capaz de aumentar a capacidade produtiva para os itens que ela não pode produzir. A tabela 17 sintetiza as características de cada problema abordado e seu *gap* máximo. O gráfico da figura 21 faz a comparação entre os custos de cada problema.

Tabela 17 - Comparação das características dos problemas HP1 e HP2

Problema	Número de produtos	Número de Máquinas	<i>Gap</i> máximo
HP1	46	12	1,99%
HP2	53	13	3,34%

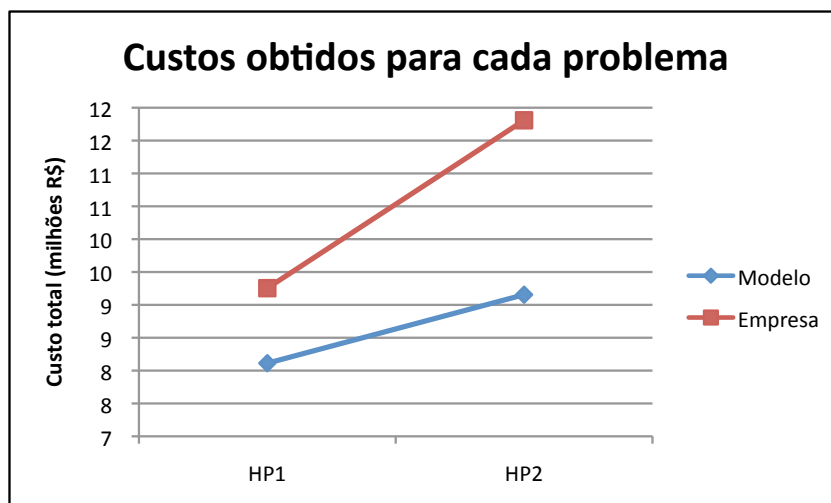


Figura 21 - Comparação dos custos obtidos

Através de todos os argumentos, gráficos e tabelas expostos, pode-se dizer que o modelo sugeriu um planejamento da produção que envolve custos de operações menores que os atualmente praticados pela empresa. Essa melhoria se mostrou válida não somente para um horizonte cujas operações estavam mais equilibradas e a previsão de demanda mais acertiva, mas também para um horizonte com problemas de balanceamento de estoques e menor acuracidade da previsão de vendas.

#### 7.4.2 Variação do número de equipes de supervisão da produção

O segundo teste que foi realizado variou o número de equipes de supervisão da produção para cada um dos horizontes HP1 e HP2 resolvidos anteriormente. O enfoque nas equipes se deu pelo fato de se tratar de uma característica abordada no presente estudo que não apresenta material disponível na literatura.

O principal objetivo do teste é determinar se há necessidade ou não de contratar mais equipes. No início do presente trabalho realizou-se um estudo sobre haver tal necessidade ou não e se concluiu que não havia. Ou seja, com as equipes existentes atualmente na empresa o atendimento da demanda, ou de parte dela que se deseja atender é respeitado.

O período utilizado para tal análise foi um mês do primeiro semestre de 2010, como HP1. Assim, é de se esperar que para um cenário mais estável não haja necessidade. Talvez para HP2, um mês inserido em um cenário mais conturbado, haja tal necessidade.

Essa primeira hipótese pode ser sustentada pela utilização de máquina de cada um dos problemas HP1 e HP2. A tabela 18 mostra a saída de quantidade total de equipes alocadas em cada subperíodo do horizonte de planejamento HP1 e a tabela 19 mostra o mesmo dado para HP2.

Tabela 18 - Quantidade de equipes alocadas em cada subperíodo para HP1

<i>s</i>	Número de equipes alocadas	<i>s</i>	Número de equipes alocadas	<i>s</i>	Número de equipes alocadas	<i>s</i>	Número de equipes alocadas
1	11	8	12	15	12	22	12
2	10	9	12	16	12	23	12
3	12	10	12	17	12	24	12
4	12	11	12	18	12	25	12
5	10	12	12	19	11	26	12
6	10	13	12	20	12	27	12
7	11	14	12	21	12	28	11

Tabela 19 - Quantidade de equipes alocadas em cada subperíodo para HP2

$s$	Número de equipes alocadas	$s$	Número de equipes alocadas	$s$	Número de equipes alocadas	$s$	Número de equipes alocadas
1	13	8	13	15	13	22	13
2	13	9	13	16	13	23	13
3	13	10	13	17	13	24	13
4	13	11	13	18	13	25	13
5	13	12	13	19	13	26	13
6	13	13	13	20	13	27	13
7	13	14	13	21	13	28	13

Analisando as tabelas 18 e 19, pode-se supor que pelo fato de, em determinados subperíodos, HP1 utilizar menos equipes que o limite disponível (12 equipes) talvez exista a possibilidade de utilizar 11 equipes ou 10 equipes durante todo o horizonte. No entanto, ao contrário de HP1, HP2 utiliza a capacidade de equipes no limite (13 equipes) e provavelmente haja a necessidade de se ter mais equipes supervisionando a operação.

Os testes que foram feitos para validar a hipótese proposta consistiram em variar o número de equipes disponíveis para cada problema HP1 e HP2, sem variar o número de máquinas. Além disso, os demais dados de entrada presentes nos apêndices D e F também foram mantidos constantes.

Tanto a tabela 20, como os gráficos das figuras 22 e 23 mostram como se comportou o custo total da função objetivo para uma variação do número de equipes para cada problema HP1 e HP2. Os campos que apresentam asterisco (\*) na tabela indicam que a heurística não conseguiu encontrar nenhuma solução no tempo estipulado de uma hora.



Tabela 20 - Custo total (R\$) obtido com a variação do número de equipes

HP1		HP2	
Num. Equipes	Custo total	Num. Equipes	Custo total
11	*	11	*
12	8.112.588	12	*
13	8.101.738	13	9.154.904
14	8.092.638	14	9.110.421
15	8.078.596	15	9.031.444
16	8.072.127	16	8.973.264
17	8.056.209	17	8.945.864
18	8.042.839	18	8.901.823
19	8.035.503	19	8.866.749
20	8.021.150	20	8.858.080
21	8.016.066	21	8.858.361
22	8.012.742	22	8.857.172
23	8.009.947	23	8.857.937
24	8.006.389	24	8.858.025
25	8.006.538	25	8.857.039
26	8.005.474	26	8.857.003

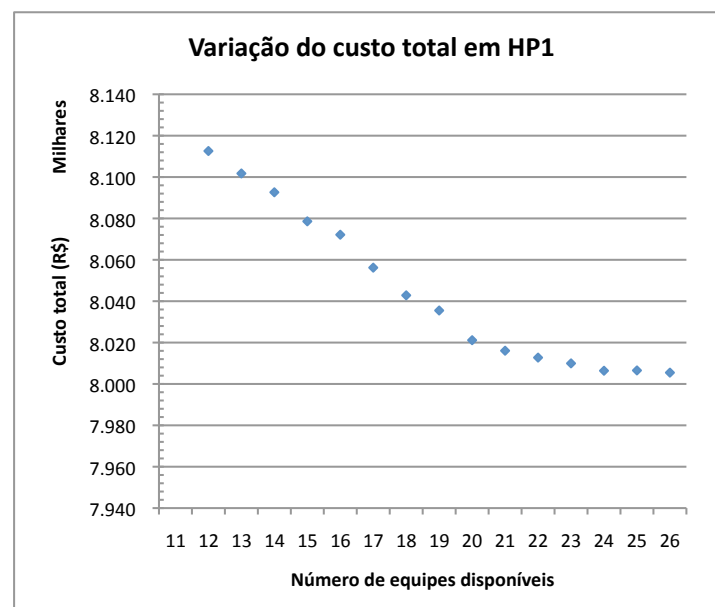


Figura 22 - Custo total obtido para a variação no número de equipes para HP1

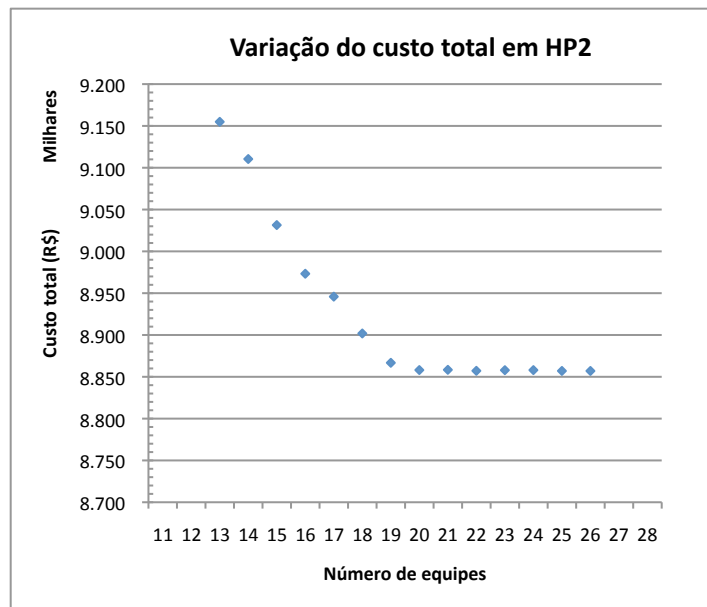


Figura 23 - Custo total obtido para a variação no número de equipes para HP2

Analisando a tabela 20 juntamente com o gráfico da figura 22, o primeiro ponto interessante de se notar é que embora em alguns subperíodos de HP1 haja a alocação de menos de 12 equipes, isso não significa que a fábrica consiga operar com 11 equipes durante todo o mês. Isso decorre principalmente pelo fato de que 25% e 40% do volume da demanda ocorre na terceira e quarta semanas do mês, respectivamente. Ou seja, são nessas semanas que os recursos são utilizados quase na sua capacidade máxima, inclusive o número de equipes. Assim, o ideal é que o número de equipes disponíveis acompanhe esse incremento de demanda ao longo do mês para não haver mais *backorders* que o aceitável pela empresa.

Outro ponto que se pode perceber analisando os gráficos da figura 22 e 23 é que o custo total da operação diminui conforme há um aumento do número de equipes disponíveis. Além do fato de que o número de equipes não constar na função objetivo do modelo, esse aumento se deve porque as equipes constituem um recurso do processo de operação e, como qualquer outro recurso, ao ter sua capacidade aumentada ele consegue produzir mais do que antes.

No entanto, essa melhoria no custo tende a se estabilizar quando o número de equipes atinge valores próximos ao dobro do número de equipes disponíveis, indicando que o incremento de capacidade decorrente do aumento das equipes já não traz economias significativas para a empresa.

Embora o custo total diminua conforme há maior disponibilidade de equipes, isso não significa que o indicado é ter mais equipes supervisionando a produção da fábrica. Pode-se perceber que a diferença entre os custos obtidos para HP1 com 12 equipes e com 26 equipes corresponde a um montante de R\$ 107.114 equivalentes a 1,3% do custo com 12 equipes. Da mesma forma, a economia feita em HP2 é de R\$ 297.901 ou 3,25%.

É claro que esta economia mensal pode ser utilizada para a contratação de mais pessoas para comporem mais equipes. No entanto, tal contratação exigiria treinamentos e desenvolvimento de pessoal, além das dificuldades gerenciais envolvendo mais equipes. Dessa forma, a análise exposta é válida para a gerência do chão de fábrica avaliar a necessidade ou não de contratação de mais equipes de acordo com os interesses e preocupações da empresa.

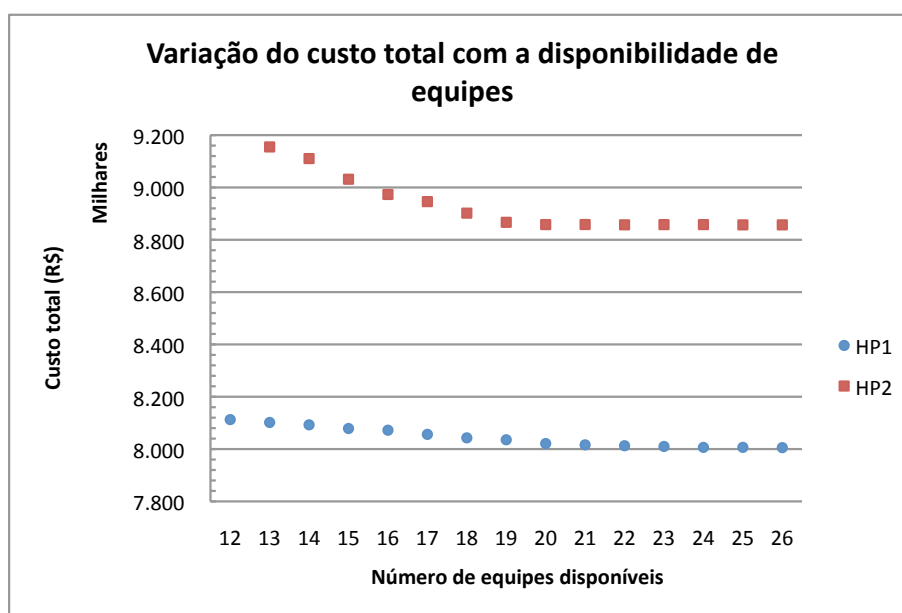


Figura 24 - Custos totais para HP1 e HP2

Outro ponto importante de se mencionar é que, conforme inicialmente proposto, uma provável necessidade de mais equipes em HP2 se mostra mais significativa do que em HP1, uma vez que tanto os valores absoluto e percentual economizado com o aumento de mais equipes é maior em HP2. O gráfico da figura 24 representa uma junção das figuras 22 e 23 para avaliar a estabilização de cada curva. Ou seja, o decaimento do custo total é mais rápido em HP2 do que em HP1. Isso acontece justamente pelos diferentes cenários que cada um dos meses estava inserido. Enquanto em HP1 houve uma melhor previsão de demanda, estoque balanceados e menos atraso de entrega de produtos, em HP2 a previsão foi menos assertiva os estoques estavam altos e desbalanceados e houve uma alta entrega atrasada de produtos.



## Capítulo 8

# Conclusões



## 8 CONCLUSÕES

O presente estudo visou melhorar o planejamento e programação da produção em uma fábrica de uma empresa de bens de consumos descartáveis do setor de higiene pessoal e limpeza doméstica através da resolução de um problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção utilizando técnicas de pesquisa operacional. Efetuou-se um estudo sobre o processo atual e quais suas possíveis oportunidades de melhorias que deram abertura para o desenvolvimento deste trabalho.

O problema resolvido envolveu a minimização dos custos operacionais, ou seja, de produção, de *setup*, de atraso na entrega de produtos e de estocagem. As características da operação incluíam máquinas distintas operando em paralelo, tempos e custos de *setup* dependentes da sequência de produção, permissão de atraso ou de não entrega de produtos e número limitado de equipes de supervisão da produção.

Esta última característica em particular pode ser encarada como um elemento de inovação em problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção, já que não foi encontrado material na literatura que envolvesse uma característica desse tipo na formulação matemática.

Pôde-se comprovar na prática que problemas integrados de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção são de difícil resolução por métodos exatos, dada sua forte natureza combinatória. No entanto, tais problemas podem ser resolvidos aplicando-se heurísticas obtendo soluções de boa qualidade a tempos computacionais razoáveis.

Este trabalho apresenta a resolução de um problema através de estratégias de heurística *relax-and-fix*. Trata-se de um método tradicionalmente aplicado a problemas desse tipo na literatura.

Os resultados obtidos com a aplicação da heurística se mostraram bons, ou seja, o *gap* entre as soluções obtidas e sua otimalidade foi pequeno. Além disso, tais resultados comprovaram a melhoria que se pretendia fazer no planejamento e programação da produção na empresa considerada. Acompanhou ainda este trabalho uma análise a cerca dos custos totais obtidos ao variar a disponibilidade de equipes de supervisão da produção. Tal análise se mostra de grande importância para as operações no chão de fábrica por constituir um instrumento de apoio à gerência da fábrica no que tange a decisão de contratar ou não mais equipes.

Pode-se dizer, portanto, que o objetivo do trabalho foi alcançado. O problema identificado na empresa foi resolvido através de métodos e técnicas científicas. Uma futura implementação do presente estudo trará contribuições com relação a forma como se planeja e programa a produção atualmente na empresa.

Num âmbito mais teórico, como estudos futuros sugere-se a implementação de um outro tipo de formulação matemática considerando a restrição das equipes que processe o modelo mais rapidamente que o GLSPPL (*General Lot Sizing and Scheduling Problem With Parallel Machines*) proposto por Meyr (2002), abordado neste trabalho. Há trabalhos na literatura, como o proposto por Toso, Morabito e Clark (2008), que utilizam um modelo matemático chamado de ATSP (*Asymmetric Travelling Salesman Problem*). Tal modelo é baseado no problema clássico do caixeiro viajante e é normalmente utilizado em problemas envolvendo roteirização de veículos.

Por fim, um outro estudo futuro interessante, de cunho mais prático e focado na empresa onde o presente trabalho foi desenvolvido é a aplicação da formulação apresentada no capítulo 5 em outras fábricas da empresa. Dessa forma, poder-se-ia aplicar o modelo nas demais plantas que processam famílias diferentes de produtos e testar a viabilidade de implementação da formulação nessas unidades fabris.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, S., ARENALES, M. **Problema de dimensionamento de lotes monoestágio com restrição de capacidade**. São Carlos, 2000.

ARENALES, M. ARMENTANO, V., MORABITO, R., YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2007.

BERALDI, P., GHIANI, G., GRIECO, A., GUERRIERO, E. **Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the parallel machine lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent set-up costs**. Computers and Operations Research, 35, pp. 3644-3656, 2008.

DREXL, A., KIMMS, A. **Lot Sizing and Scheduling – Survey and Extensions**. European Journal of Operational Research, 99, pp. 221-235, 1997.

FERREIRA, D., MORABITO, R., RANGEL, S. **Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem**. European Journal of Operational Research, doi:10.1016/j.ejor.2008.03.035, 2008.

HAX, A., CANDEA, D. **Production and Inventory Management**. New Jersey: Prentice Hall, 1984.

KARIMI, B., FATEMI G., S.M.T., WILSON, J.M. **The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms**. Omega – The International Journal of Management Science, 31, pp. 365-378, 2003.

KAWAMURA, M. S., RONCONI, D. P. **Aplicação da Heurística Relax-and-Fix no Problema de Dimensionamento e Sequenciamento de Lotes de Produção em Máquinas Distintas em Paralelo**. XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2010, Bento Gonçalves. Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2010. v1. p 1-12

MATEUS, G., RAVETTI, M., SOUZA, M., VALERIANO, T. **Capacitated lot sizing and sequence dependent setup scheduling: an iterative approach for integration**. Springer Science+Business Media, 2009. doi: 10.1007/s10951-009-0156-2.

MEYR, H. **Simutaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization**. European Journal of Operational Research, 120, pp. 311-326, 2000.

MEYR, H., **Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines**. European Journal of Operational Research, 139, pp. 277-292, 2002.

PINEDO, M., **Scheduling Theory, Algorithms and Systems**. 2a edição. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

POCHET, Y., WOLSEY, L. **Production Planning by Mixed Integer Programming**. New York: Springer, 2006.

QUADT, D., KUHN, H. **Capacitated lot-sizing with extensions: a review**. 4OR – A Quarterly Journal of Operations Research, 6-1, pp. 61-83, 2009.

SLACK, N. **Administração da Produção**. São Paulo: Editora Atlas, 1997.

TOSO, E., MORABITO, R. **Otimização no dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção: estudo de caso numa fábrica de rações**. Gestão & Produção, 12-2, pp. 203-217, 2005.

TOSO, E., MORABITO, R., CLARK, A. **Combinação de abordagens GLSP e ATSP para o problema de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção de suplementos para nutrição animal**. Pesquisa Operacional, 28-3, pp. 423-450, 2008.

TOSO, E., MORABITO, R., CLARK, A. **Lot-sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant**. Computers and Industrial Engineering (2009), doi: 10.1016/j.cie.2009.02.011.

WOLSEY, L.A. **Integer Programming**. Wiley-Interscience. New York, 1998.

ZANAKIS, S., EVANS, J., VAZACOPOULOS, A. **Heuristic methods and applications: A categorized survey**. Elsevier Science Publishers, pp. 88 - 110, 1989.

ZHU, X., WILHELM, W.E. **Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review**. IIE Transactions, 38, pp. 987-1007, 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Cálculo de demanda das equipes supervisoras de máquina

A tabela a seguir mostra o raciocínio e os cálculos utilizados para se obter a necessidade de ocupação de máquina e determinar se haveria a necessidade ou não de se contratar mais equipes supervisoras de máquinas.

Tabela A.1 - Cálculo da necessidade de contratação de mais equipes

Codigo	Máquina															Taxa de Produção		Demanda	Dias pra atender demanda	
	AF-14	AF-15	AF-4	AF-5	AF-6	AF-10	AF-11	AF-12	AF-13	AF-14	AF-8	AF-9	E1	E2	Total	Mínima	Máxima		Tempo mínimo	Tempo máximo
30193470	912														912	912	912	4.065	4.46	4.46
30193473	888											1224			888	768	1392	58.027	75.56	41.69
30193474															1320	1320	1320	12.837	9.73	9.73
30193475			1104												2424	1104	1320	26.439	23.95	20.03
30193476															1320	1320	1320	7.207	5.46	5.46
30193477					1056							1056			2112	1056	1056	22.474	21.28	21.28
30193478			1104												1104	1104	1104	15.366	13.92	13.92
30193479					1848							2376			8424	1488	2712	13.910	9.35	5.13
30193480					2640										5328	2640	2688	18.864	7.15	7.02
30193481															1296	1296	1296	12.477	9.63	9.63
30193482															2712	1296	1416	8.397	6.48	5.93
30193483						1104									1704	600	1104	25.856	43.09	23.42
30193490											600				5280	1224	1392	10.173	8.31	7.31
30193491												1176			5112	1176	1368	9.348	7.95	6.83
30193493			1104												2424	1104	1320	5.305	4.81	4.02
30193494															2424	1104	1320	8.027	7.27	6.08
30193496															960	960	960	3.307	3.45	3.45
30193497					1032						1049				2081	1032	1049	1.938	1.88	1.85
30193498			1104												1104	1104	1104	2.409	2.18	2.18
30193503															2712	1296	1416	950	0.73	0.67
30193504						1104					600				1704	600	1104	3.393	5.66	3.07
30193519					1056										1056	1056	1056	2.442	2.31	2.31
30200181		792													792	792	792	3.052	3.85	3.85
30203145													936	936	936	936	936	3.734	3.99	3.99
30203146													936	936	1872	936	936	9.084	9.70	9.70
30203147													936	936	1872	936	936	6.686	7.14	7.14
30203148													936	936	1872	936	936	230	0.25	0.25
30203149													936	936	1872	936	936	574	0.61	0.61
30203150													936	936	1872	936	936	420	0.45	0.45
30205324	4512														4512	4512	4512	2.330	0.52	0.52
30205325	4512														4512	4512	4512	9.058	2.01	2.01
30207081						1104					600				1704	600	1104	3.343	5.57	3.03
30207201						1056									1056	1056	1056	5.983	5.65	5.65
30207203						1104									1104	1104	1104	1.833	1.66	1.66
30207568												864			864	864	864	12.824	14.84	14.84
30207569											984				984	984	984	11.114	11.29	11.29
																			342	270
																			Disponibilidade	413
																			83%	55%
																			17%	35%

Maq paradas  
Ociosidade

## APÊNDICE B - Código do problema em linguagem OPL

O código do programa desenvolvido utilizando o *software* da IBM, OPL IDE versão 6.3 que serve de interface para o CPLEX, também da IBM, está apresentado abaixo:

```

{string} Produtos      = ...;
{string} Maquinas      = ...;
int G                  = 1000000;
int NbEquipes          = ...;
int NbPeriodos         = ...;
range Periodos         = 1..NbPeriodos;
int NbS                 = ...;
range Subperiodos      = 1..NbS;
int NbTamPer           = ...;
range TamPer = 1..NbTamPer;
tuple Tpl_PPM          {string ProdA;
                        string ProdB;
                        string Maq;}
{Tpl_PPM} PPM          = ...;
float Tsetup            [PPM] =...;
float Csetup            [PPM] =...;
int S                   [Periodos][TamPer] =...;
float Demanda           [Produtos][Periodos]=...;
float Tprod             [Produtos][Maquinas]=...;
float Capacidade        [Maquinas][Periodos]=...;
float Cap               [Maquinas][Subperiodos]=...;
float Cprod             [Produtos][Maquinas]=...;
float Cest              [Produtos]=...;
float Natend            [Produtos]=...;
int Equipes            [Produtos]=...;
int Podeprod            [Produtos][Maquinas]=...;
float Estoqueinicial    [Produtos]=...;

```

```

float QtdNatendinicial      [Produtos] = ...;
float TargetNatend          [Produtos]=...;
float TargetEstoque         [Produtos]=...;

dvar float+ Quantidade      [Produtos][Maquinas][Subperiodos];
dvar float+ Ordem           [PPM][Subperiodos];
dvar boolean Maqprep        [Produtos][Maquinas][0..NbS];
dvar boolean TimeAtivo      [Produtos][Maquinas][0..NbS];
dvar float+ Estoquefinal    [Produtos][0..NbPeriodos];
dvar float+ QtdNatend       [Produtos][0..NbPeriodos];
dexpr float
CustoEstoque = sum(i in Produtos, t in Periodos) Cest[i] * Estoquefinal[i][t];
dexpr float
CustoNatend = sum(i in Produtos, t in Periodos) Natend[i] * QtdNatend[i][t];
dexpr float
Custosetup = sum(w in PPM, s in Subperiodos) Csetup[w] * Ordem[w][s];
dexpr float
Custoprod = sum(i in Produtos,k in Maquinas,s in Subperiodos) Cprod[i][k] * Quantidade[i]
[k][s];
dexpr float CustoTotal = CustoEstoque + CustoNatend + Custosetup + Custoprod;
minimize CustoTotal;
subject to
{
    forall(i in Produtos)
        ct0: {Estoquefinal[i][0]==Estoqueinicial[i];QtdNatend[i][0]==QtdNatendinicial[i];}

    forall( i in Produtos, t in Periodos)
        ct1: Estoquefinal[i][t] - QtdNatend[i][t] - Estoquefinal[i][t-1] + QtdNatend[i][t-1] +
        Demanda[i][t] - sum (k in Maquinas, p in TamPer) Quantidade[i][k][S[t][p]] == 0;

    forall(k in Maquinas, s in Subperiodos)
        ct2: sum( i in Produtos) Tprod[i][k] * Quantidade [i][k][s] + sum(<j,i,k> in PPM)
        Tsetup [<j,i,k>] * Ordem [<j,i,k>][s] <= Cap[k][s];
}

```

forall( i in Produtos, k in Maquinas, s in Subperiodos)

ct3: Tprod[i][k] \* Quantidade[i][k][s] <= Cap[k][s] \* Maqprep[i][k][s];

forall( k in Maquinas, s in Subperiodos)

ct4: sum( i in Produtos) Maqprep[i][k][s] == 1;

forall(<j,i,k> in PPM, s in Subperiodos)

ct5: Ordem[<j,i,k>][s] >= Maqprep[j][k][s-1] + Maqprep[i][k][s] - 1;

forall( i in Produtos, k in Maquinas, s in Subperiodos)

ct6: Maqprep[i][k][s] <= Podeprod[i][k];

forall( i in Produtos, k in Maquinas)

ct7: Maqprep[i][k][0] == 0;

forall(s in Subperiodos)

ct8: sum(i in Produtos, k in Maquinas)( Equipes[i] \* TimeAtivo[i][k][s]) <= NbEquipes;

forall(i in Produtos, k in Maquinas, s in Subperiodos)

ct9: Quantidade[i][k][s] - G \* TimeAtivo[i][k][s] <= 0;

forall(i in Produtos, k in Maquinas)

ct10: TimeAtivo[i][k][0]==0;

forall(i in Produtos)

ct11: {Estoquefinal[i][4]>=TargetEstoque[i];

QtdNatend[i][4]<=TargetNatend[i];}

}

## APÊNDICE C - Dados de entrada para o problema piloto

Neste apêndice estão apresentados os dados de entrada para o problema piloto que foi usado para a validação do modelo matemático proposto no capítulo 5. É importante ressaltar que alguns valores são bem próximos entre si, sendo, por vezes, diferentes apenas na terceira ou quarta casa decimal. Os dados de entrada foram considerados com todas as casas decimais, mas a título de simplificação os números aparecem arredondados nas tabelas.

O escrito N/D nas tabelas C.3, C.4, C.5 e C.6 indicam que os números não estão disponíveis já que o produto P4 pode somente ser processado na M1.

Na tabela C.4, embora a variável  $st_{jik}$  dependa da máquina na qual a troca de produção ocorre, no caso do problema piloto a matriz de tempos de *setup* para as máquinas são iguais, por esse motivo somente está apresentada uma matriz aplicável a qualquer uma das máquinas consideradas no problema.

Tabela C.1 - Dados que somente dependem dos produtos para o problema piloto

Parâmetro	$ce_i$	$a_i$	$I_{i0}$	$F_{i0}$	$E_i$	$V_i$	$A_i$
Unidade	R\$/caixa/ semana	R\$/ caixa	caixas	caixas	equipes	caixas	caixas
<b>P1</b>	0,073	29	53.696	0	1	30.696	5.288
<b>P2</b>	0,073	21	3.979	0	2	2.346	2.191
<b>P3</b>	0,074	24	4.898	0	2	6.551	2.518
<b>P4</b>	0,066	26	2.903	0	1	9.610	2.750

Tabela C.2 - Relação de quais produtos cada máquina pode processar

$p_{ik}$	<b>M1</b>	<b>M2</b>
<b>P1</b>	1	1
<b>P2</b>	1	1
<b>P3</b>	1	1
<b>P4</b>	1	0

Tabela C.3 - Tempo de produção para o problema piloto (horas/caixa)

$tp_{ik}$	<b>M1</b>	<b>M2</b>
<b>P1</b>	0,018	0,016
<b>P2</b>	0,017	0,016
<b>P3</b>	0,017	0,016
<b>P4</b>	0,017	N/D

Tabela C.4 - Custos de produção para o problema piloto (R\$/caixa)

$cp_{ik}$	<b>M1</b>	<b>M2</b>
<b>P1</b>	23,8	22,5
<b>P2</b>	22,5	22,7
<b>P3</b>	18,9	23,6
<b>P4</b>	23,11	N/D

Tabela C.5 - Tempos de preparação de máquina para o problema piloto (horas)

$st_{jiks}$	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>
<b>P1</b>	0	0,25	0,25	3
<b>P2</b>	0,25	0	0,25	3
<b>P3</b>	0,25	0,25	0	3
<b>P4</b>	3	3	3	0



Tabela C.6 - Custos de preparação de máquina para o problema piloto (R\$)

<i>i</i>	<i>j \ k</i>	<b>M1</b>	<b>M2</b>
<b>P1</b>	<b>P1</b>	0	0
<b>P1</b>	<b>P2</b>	240	269
<b>P1</b>	<b>P3</b>	226	254
<b>P1</b>	<b>P4</b>	2926	N/D
<b>P2</b>	<b>P1</b>	217	251
<b>P2</b>	<b>P2</b>	0	0
<b>P2</b>	<b>P3</b>	226	254
<b>P2</b>	<b>P4</b>	2926	N/D
<b>P3</b>	<b>P1</b>	217	251
<b>P3</b>	<b>P2</b>	204	269
<b>P3</b>	<b>P3</b>	0	0
<b>P3</b>	<b>P4</b>	2926	N/D
<b>P4</b>	<b>P1</b>	2629	N/D
<b>P4</b>	<b>P2</b>	2876	N/D
<b>P4</b>	<b>P3</b>	2713	N/D
<b>P4</b>	<b>P4</b>	0	N/D

Tabela C.7 - Demanda para cada produto em cada período (caixas)

	<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>t3</b>	<b>t4</b>
<b>P1</b>	4736	13046	10425	16987
<b>P2</b>	1	880	1426	9226
<b>P3</b>	2464	5306	2562	3226
<b>P4</b>	412	4700	2835	2270

## APÊNDICE D - Dados de entrada para o problema real HP1

Tabela D.1 - Dados dos produtos para HP1

Produto	Custos		Número de Equipes	Demanda (caixas)				Produto	Estoque inicial caixas	Backorder inicial caixas	Estoque final caixas	Backorder final caixas
	Estoque	Backorder		t1	t2	t3	t4					
Código	RS/caixa/semana	RS/caixa						Código				
P30200097	0,08301075	38,02	1	553	996	1161	2023	P30200097	3.905	0	2.363	924
P30204073	0,09178468	38,00	1	233	413	312	647	P30204073	1.234	0	1.012	295
P30205326	0,08510440	16,61	2	5	2	0	12	P30205326	219	0	526	70
P30200214	0,09026970	37,87	1	168	401	483	731	P30200214	1.992	0	1.538	308
P30200098	0,08734885	41,87	1	537	1010	1215	1908	P30200098	346	0	2.741	996
P30200185	0,09086753	24,32	2	107	22	21	112	P30200185	687	0	1.368	270
P30206222	0,09138251	28,40	1	339	415	403	951	P30206222	1.063	0	895	329
P30206180	0,09240814	27,97	1	272	432	287	938	P30206180	595	0	1.107	591
P30206859	0,09978984	34,06	1	173	305	285	476	P30206859	791	0	235	290
P30206858	0,10104643	30,76	1	100	175	228	424	P30206858	858	0	1.490	148
P30207346	0,07697083	33,42	1	433	970	652	1121	P30207346	2.763	0	4.395	585
P30207366	0,07790611	31,82	1	175	407	409	530	P30207366	2.761	0	2.546	260
P30207365	0,07917000	31,37	1	156	295	701	908	P30207365	1.727	0	1.738	459
P30207432	0,07714778	26,98	1	370	667	449	1132	P30207432	2.093	0	1.869	707
P30207431	0,07790611	26,52	1	175	766	451	787	P30207431	1.369	0	1.706	813
P30207364	0,09266833	37,64	1	139	295	174	489	P30207364	1.073	0	1.513	222
P30193475	0,06746935	23,43	1	3559	5125	7528	12099	P30193475	4.725	0	145	5.551
P30193494	0,07155001	19,17	2	270	30	134	3636	P30193494	2.230	0	1.365	1.691
P30193493	0,07220219	19,92	2	807	492	2459	2520	P30193493	637	0	1.205	2.632
P30193476	0,07104149	24,93	1	1070	1925	1971	2156	P30193476	1.858	0	353	1.377
P30193478	0,07090436	25,12	1	1746	3638	2909	5361	P30193478	4.327	0	6.552	2.718
P30193498	0,07193906	19,56	2	181	25	350	1630	P30193498	11	0	-	1.648
P30193473	0,07346762	29,29	1	10245	15747	14039	18010	P30193473	3.764	0	5.783	5.829
P30193491	0,07372700	21,31	2	1150	55	279	6090	P30193491	3.135	0	2.757	3.717
P30193490	0,07452326	24,50	2	284	848	2923	3207	P30193490	1.975	0	6.731	2.824
P30193474	0,06597037	26,01	1	1444	2715	1891	2802	P30193474	1.735	0	2.860	6.584
P30193477	0,07993156	25,79	1	5179	7147	7989	11304	P30193477	277	0	-	12.086
P30193497	0,07875582	21,41	2	451	50	185	2055	P30193497	866	0	-	662
P30193496	0,08148619	19,79	2	210	373	1920	1657	P30193496	1.303	0	273	813
P30193519	0,07649213	24,99	1	267	545	497	1199	P30193519	1.153	0	-	489
P30207589	0,08715778	22,96	1	3592	3864	2903	1513	P30207589	4.480	0	1.883	3.020
P30207588	0,09532250	18,74	1	2505	2769	1710	2812	P30207588	5.963	0	4.790	2.224
P30193483	0,08956215	41,08	1	3186	4910	6598	9101	P30193483	9.109	0	2.749	3.141
P30193504	0,09100091	33,44	2	180	75	40	4546	P30193504	1.453	0	799	1.109
P30207081	0,08999394	38,21	2	162	27	260	433	P30207081	578	0	703	55
P30207201	0,10212938	36,39	1	1083	1423	1145	3274	P30207201	2.882	0	3.391	1.224
P30193482	0,07201233	35,21	1	1226	1618	1613	4013	P30193482	6.314	0	7.826	1.513
P30193480	0,03186754	11,62	2	2436	2873	4216	11969	P30193480	6.271	0	2.578	3.084
P30193479	0,03660497	13,32	2	4864	4921	5742	17186	P30193479	14.168	0	14.082	4.700
P30193470	0,08404630	25,79	1	525	957	743	1433	P30193470	4.464	0	2.543	689
P30203145	0,05719572	29,51	1	719	1146	1191	2155	P30203145	1.442	0	1.696	1.041
P30203146	0,05757216	29,07	1	1573	3083	2606	3576	P30203146	4.012	0	-	7.200
P30203147	0,06695432	26,76	1	1300	2488	1297	2246	P30203147	3.437	0	2.051	1.845
P30203148	0,05898799	20,19	2	1	3	6	966	P30203148	116	0	178	5
P30203149	0,05957842	19,58	2	1	18	16	582	P30203149	650	0	737	65
P30203150	0,06854990	17,36	2	0	7	3	608	P30203150	339	0	533	43



Tabela D.3 - Tempos de produção em caixas por hora para HP1

[illegible]



Tabela D.5 - Capacidade disponível das máquinas em horas para HP1

Código	Descrição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
M73213004	AF-4	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8
M73215015	AF-15	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211005	AF-5	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211006	AF-6	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211008	AF-8	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211009	AF-9	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211010	AF-10	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211011	AF-11	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211012	AF-12	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211013	AF-13	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73212014	AF-14	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73214003	Encart I	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24

Tabela D.6 - Matriz dos tempos de *setup* para HP1[illegible]



## APÊNDICE E - Saída para o problema real HP1

Tabela E.1 - Quantidade produzida em cada subperíodo para HP1

Produto	Maquina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P30193475	M73211005	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120	-	-	-	-	-	1.108	1.120	-	-
P30193494	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	534	-	-	-	-
P30193493	M73211005	-	-	-	-	-	1.108	1.120	1.120	373	-	-	-	-	-
P30193478	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.108
P30193498	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	545	-
P30193477	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193496	M73211006	-	-	-	-	-	218	-	1.044	-	-	-	-	-	-
P30193519	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	866	-	-	-	-
P30193483	M73211008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193504	M73211008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211009	-	1.073	1.226	1.226	1.159	1.226	1.226	1.226	1.226	-	1.226	-	-	-
P30193491	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207589	M73211009	922	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	957	1.094	1.094
P30207588	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.081	1.092
P30193504	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	1.080	1.091	1.091	925	-	-
P30207081	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207201	M73211010	786	904	904	904	904	904	904	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	1.144	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	1.328	1.342	1.342	1.342	1.342	1.324
P30193474	M73211011	1.355	1.355	1.355	1.355	452	1.355	1.355	-	-	-	-	-	-	-
P30193482	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211012	1.507	1.507	502	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507	-	-
P30193491	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193482	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193479	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.640	2.834
P30193475	M73211013	-	-	-	-	-	1.150	1.314	1.314	1.314	-	-	-	1.150	-
P30193494	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193493	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193476	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	525	1.314	1.314	-	-
P30193473	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193480	M73211013	2.362	2.628	2.628	2.628	2.628	-	-	-	-	-	-	-	-	2.300
P30193473	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	350	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049
P30193470	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200097	M73213004	692	-	833	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30204073	M73213004	-	-	-	-	550	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30205326	M73213004	-	-	-	-	-	-	256	-	-	-	-	-	-	-
P30200214	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200098	M73213004	-	199	-	-	-	-	-	-	-	-	-	775	886	886
P30200185	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	673	-	-	-	-
P30207365	M73213004	-	-	-	640	-	-	-	-	-	-	640	-	-	-
P30207364	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203145	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	423	-
P30203146	M73214003	-	-	-	-	226	-	-	-	1.050	-	1.200	-	-	-
P30203147	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	849	-	-
P30203148	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	1.038	-	-	-	-	-	-
P30203149	M73214003	-	-	-	704	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203150	M73214003	-	-	769	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206222	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206180	M73215015	-	-	-	754	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206859	M73215015	-	-	683	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206858	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207346	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	104	967	-	-	-	-	-
P30207366	M73215015	349	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	957	-	-
P30207365	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207432	M73215015	-	-	-	-	-	-	730	-	-	-	-	-	-	-
P30207431	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	592	-	-	957





Tabela E.3 - Relação de preparação de máquina para cada subperíodo para HP1

Produto	Maquina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P30193475	M73211005	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
P30193494	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
P30193493	M73211005	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
P30193478	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
P30193498	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
P30193477	M73211006	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
P30193497	M73211006	-	-	-	1	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-
P30193496	M73211006	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30193519	M73211006	1	-	1	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	-
P30193483	M73211008	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
P30193504	M73211008	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211009	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-
P30193491	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207589	M73211009	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1
P30207588	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1
P30193504	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-
P30207081	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30207201	M73211010	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
P30193491	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	-
P30193474	M73211011	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193482	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211012	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-
P30193491	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193482	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193479	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1
P30193475	M73211013	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	1	-	-
P30193494	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193493	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193476	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-
P30193473	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193480	M73211013	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
P30193473	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P30193470	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200097	M73213004	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30204073	M73213004	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-
P30205326	M73213004	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
P30200214	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200098	M73213004	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1
P30200185	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
P30207365	M73213004	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
P30207364	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203145	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
P30203146	M73214003	-	-	-	-	1	1	-	-	1	1	1	-	-	-	-
P30203147	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
P30203148	M73214003	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30203149	M73214003	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
P30203150	M73214003	1	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206222	M73215015	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206180	M73215015	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206859	M73215015	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206858	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207346	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-
P30207366	M73215015	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-
P30207365	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207432	M73215015	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-
P30207431	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1



Tabela E.5 - Relação de equipes alocadas para cada subperíodo para HP1

Produto	Maquina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P30193475	M73211005	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
P30193494	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
P30193493	M73211005	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
P30193478	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
P30193498	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
P30193477	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193496	M73211006	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30193519	M73211006	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
P30193483	M73211008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193504	M73211008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211009	-	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	-	-	-	-
P30193491	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207589	M73211009	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1
P30207588	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1
P30193504	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-
P30207081	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207201	M73211010	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1
P30193491	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	-
P30193474	M73211011	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193482	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211012	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-
P30193491	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193482	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193479	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1
P30193475	M73211013	-	-	-	-	-	1	1	1	1	-	-	-	1	-	-
P30193494	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193493	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193476	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-
P30193473	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193480	M73211013	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
P30193473	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P30193470	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200097	M73213004	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30204073	M73213004	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30205326	M73213004	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200214	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200098	M73213004	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1
P30200185	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
P30207365	M73213004	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
P30207364	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203145	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
P30203146	M73214003	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-
P30203147	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
P30203148	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30203149	M73214003	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203150	M73214003	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206222	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206180	M73215015	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206859	M73215015	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206858	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207346	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-
P30207366	M73215015	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
P30207365	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207432	M73215015	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207431	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1

Tabela E.6 - Relação de equipes alocadas para HP1 (continuação)

[illegible]

Tabela E.7 - Relação de *setups* feitos em cada subperíodo de HP1

	j	i	k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
P30193478	P30193478	P30193478	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193478	P30193478	P30193494	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193498	P30193478	P30193478	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193493	P30193493	P30193493	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193493	P30193493	P30193494	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193494	P30193494	P30193475	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	P30193475	P30193498	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	P30193475	P30193493	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	P30193475	P30193475	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193519	P30193519	P30193519	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193519	P30193519	P30193477	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193519	P30193519	P30193497	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	P30193477	P30193519	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	P30193477	P30193477	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193496	P30193496	P30193496	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193496	P30193496	P30193497	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	P30193497	P30193519	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	P30193497	P30193477	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	P30193497	P30193496	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	P30193497	P30193497	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	P30193483	P30193504	M73211008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193504	P30193483	P30193483	M73211008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193504	P30193504	P30193504	M73211008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	P30193483	P30193483	M73211008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	P30193473	P30193473	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	P30193473	P30207588	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	P30207589	P30207589	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207588	P30207588	P30193491	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207588	P30207588	P30207588	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207589	P30193473	P30193473	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207589	P30207589	P30207589	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	P30193483	P30193483	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	P30207081	P30207081	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193504	P30193504	P30193483	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193504	P30193504	P30193504	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207081	P30193504	P30193504	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207081	P30207081	P30193483	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207081	P30193504	P30193504	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207201	P30207201	P30207081	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207201	P30207201	P30207201	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela E.8 - Relação de *setups* feitos em cada subperíodo de HP1 (continuação)[illegible]

Tabela E.9 - Relação de *setups* feitos em cada subperíodo de HP1 (final)

	$j$	$i$	$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
	P30204073	P30200185	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30205326	P30204073	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30205326	P30205326	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30200097	P30207365	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30200097	P30200214	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30200097	P30204073	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30200097	P30200098	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30200098	P30207365	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30200098	P30200097	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30200098	P30200098	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30200185	P30207365	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203145	P30203145	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203145	P30203146	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203145	P30203147	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203145	P30203149	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203146	P30203145	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203146	P30203146	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203147	P30203147	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203147	P30203146	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203148	P30203146	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203148	P30203150	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203149	P30203145	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203149	P30203146	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203149	P30203149	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203150	P30203148	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30203150	P30203149	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207431	P30207431	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207431	P30207366	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207431	P30206222	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207432	P30207431	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207432	P30207346	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207346	P30207432	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207346	P30207346	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207346	P30207346	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207346	P30206858	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207366	P30207431	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207366	P30207366	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30207366	P30206859	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30206858	P30206858	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30206858	P30206180	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30206859	P30206222	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30206859	P30206180	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30206859	P30206180	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30206222	P30207432	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30206222	P30207346	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30206222	P30206222	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30206180	P30206859	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P30206180	P30206180	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Tabela E.10 - Quantidades estocadas, atendidas em atraso e produzidas em cada período para HP1

Produto	Estoque					Backorder					Produção			
	t0	t1	t2	t3	t4	t0	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4
P30200097	3.905	4.877	3.881	3.553	2.363	-	-	-	-	-	1.525	-	833	833
P30204073	1.234	1.551	1.138	1.659	1.012	-	-	-	-	-	550	-	833	-
P30205326	219	470	468	468	526	-	-	-	-	70	256	-	-	-
P30200214	1.992	1.824	1.423	940	1.538	-	-	-	-	-	-	-	-	1.329
P30200098	346	8	1.545	4.649	2.741	-	-	-	-	-	199	2.547	4.319	-
P30200185	687	580	1.231	1.210	1.368	-	-	-	-	270	-	673	-	-
P30206222	1.063	724	309	1.846	895	-	-	-	-	-	-	-	1.940	-
P30206180	595	1.077	645	358	1.107	-	-	-	-	-	754	-	-	1.688
P30206859	791	1.301	996	711	235	-	-	-	-	-	683	-	-	-
P30206858	858	758	583	355	1.490	-	-	-	-	148	-	-	-	1.411
P30207346	2.763	2.330	2.431	3.592	4.395	-	-	-	-	-	-	1.071	1.813	1.924
P30207366	2.761	2.935	3.485	3.076	2.546	-	-	-	-	-	349	957	-	-
P30207365	1.727	2.211	2.555	1.854	1.738	-	-	-	-	152	640	640	-	640
P30207432	2.093	2.453	1.786	1.337	1.869	-	-	-	-	707	730	-	-	957
P30207431	1.369	1.194	1.977	2.493	1.706	-	-	-	-	-	-	1.549	967	-
P30207364	1.073	934	639	465	1.513	-	-	-	-	-	-	-	-	1.537
P30193475	4.725	9.230	10.111	3.883	145	-	-	-	-	4.983	8.064	6.006	1.300	3.378
P30193494	2.230	1.960	2.464	2.330	1.365	-	-	-	-	1.691	-	534	-	980
P30193493	637	2.058	3.059	1.093	1.205	-	-	-	-	2.632	2.228	1.493	492	-
P30193476	1.858	788	2.016	45	353	-	-	-	-	-	-	3.153	-	2.464
P30193478	4.327	2.581	51	4.982	6.552	-	-	-	-	2.451	-	1.108	7.840	4.480
P30193498	11	-	350	-	-	-	170	-	-	1.630	-	545	-	-
P30193473	3.764	10.199	6.809	4.048	5.783	-	-	-	-	-	16.680	12.357	11.278	19.745
P30193491	3.135	1.985	1.930	4.321	2.757	-	-	-	-	3.717	-	-	2.670	809
P30193490	1.975	1.691	8.863	9.938	6.731	-	-	-	-	-	-	8.020	3.998	-
P30193474	1.735	8.873	6.158	4.267	2.860	-	-	-	-	1.395	8.582	-	-	-
P30193477	277	1.742	1.938	112	-	-	-	-	-	11.192	6.644	7.343	6.163	-
P30193497	866	415	365	180	-	-	-	-	-	662	-	-	-	1.213
P30193496	1.303	1.311	1.982	62	273	-	-	-	-	813	218	1.044	-	1.055
P30193519	1.153	886	1.207	710	-	-	-	-	-	489	-	866	-	-
P30207589	4.480	1.810	1.091	376	1.883	-	-	-	-	3.020	922	3.145	2.188	-
P30207588	5.963	3.458	689	-	4.790	-	-	-	140	2.224	-	-	881	5.518
P30193483	9.109	5.923	3.186	4.232	2.749	-	-	-	-	-	-	2.173	7.644	7.618
P30193504	1.453	1.273	5.385	5.345	799	-	-	-	-	-	-	4.187	-	-
P30207081	578	416	389	129	703	-	-	-	-	-	-	-	-	1.007
P30207201	2.882	8.009	6.586	5.441	3.391	-	-	-	-	1.224	6.210	-	-	-
P30193482	6.314	5.088	3.470	1.857	7.826	-	-	-	-	866	-	-	-	9.116
P30193480	6.271	16.709	16.135	14.547	2.578	-	-	-	-	-	12.874	2.300	2.628	-
P30193479	14.168	9.304	9.857	25.234	14.082	-	-	-	-	-	-	5.474	21.119	6.034
P30193470	4.464	3.939	2.982	2.327	2.543	-	-	-	-	689	-	-	88	960
P30203145	1.442	723	-	1.601	1.696	-	-	-	-	-	-	423	2.792	2.250
P30203146	4.012	2.665	1.832	2.526	-	-	-	-	-	-	226	2.250	3.300	1.050
P30203147	3.437	2.137	498	293	2.051	-	-	-	-	-	-	849	1.092	4.004
P30203148	116	115	1.150	1.144	178	-	-	-	-	-	-	1.038	-	-
P30203149	650	1.353	1.335	1.319	737	-	-	-	-	-	704	-	-	-
P30203150	339	1.108	1.101	1.098	533	-	-	-	-	43	769	-	-	-

## APÊNDICE F - Dados de entrada para o problema real HP2

Tabela F.1 - Dados dos produtos de HP2

Produto	Custos		Número de Equipes	Demanda (caixas)				Produto	Estoque inicial	Backorder inicial	Estoque final	Backorder final
	Estoque	Backorder		t1	t2	t3	t4					
Código	RS/caixa/semana	RS/caixa						Código	caixas	caixas	caixas	caixas
P30200097	0,0830	38,02	1	415	1493	1370	1455	P30200097	3.774	0	3.774	790
P30200186	0,0836	20,53	2	0	0	625	841	P30200186	848	0	848	238
P30204073	0,0918	38,00	1	144	493	924	974	P30204073	502	0	502	357
P30205326	0,0851	16,61	2	0	0	626	10	P30205326	39	0	39	43
P30200214	0,0903	37,87	1	177	405	514	665	P30200214	1.124	0	1.124	276
P30200098	0,0873	41,87	1	957	1182	1263	1118	P30200098	3.154	0	3.154	696
P30200185	0,0909	24,32	2	0	258	91	2026	P30200185	971	0	971	294
P30206222	0,0914	28,40	1	397	878	416	722	P30206222	1.887	0	1.887	306
P30206180	0,0924	27,97	1	289	531	385	680	P30206180	1.495	0	1.495	605
P30206859	0,0998	34,06	1	144	629	304	738	P30206859	965	0	965	437
P30206858	0,1010	30,76	1	116	323	170	803	P30206858	499	0	499	381
P30207346	0,0770	33,42	1	358	912	605	547	P30207346	2.015	0	2.015	1.211
P30207366	0,0779	31,82	1	150	327	335	587	P30207366	1.185	0	1.185	249
P30207365	0,0792	31,37	1	99	401	366	531	P30207365	2.313	0	2.313	359
P30207432	0,0771	26,98	1	649	932	169	689	P30207432	1.767	0	1.767	1.388
P30207431	0,0779	26,52	1	491	635	940	531	P30207431	897	0	897	406
P30207364	0,0927	37,64	1	142	278	414	535	P30207364	523	0	523	212
P30209436	0,0927	15,86	1	313	1319	1050	774	P30209436	3.900	0	3.900	753
P30193475	0,0675	23,43	1	1514	7285	4949	8582	P30193475	10.108	0	10.108	3.525
P30193494	0,0716	19,17	2	17	328	5046	2937	P30193494	2.284	0	2.284	1.056
P30193493	0,0722	19,92	2	41	2304	2002	1743	P30193493	2.298	0	2.298	957
P30193476	0,0710	24,93	1	746	1947	1772	2559	P30193476	4.735	0	4.735	1.620
P30193478	0,0709	25,12	1	1029	3164	4830	5582	P30193478	4.694	0	4.694	2.680
P30193498	0,0719	19,56	2	12	530	1082	130	P30193498	2.501	0	2.501	303
P30193473	0,0735	29,29	1	4736	13046	10425	16987	P30193473	53.969	0	53.969	5.288
P30193491	0,0737	21,31	2	1	880	1426	9226	P30193491	3.979	0	3.979	2.191
P30193490	0,0745	24,50	2	2464	5306	2562	3226	P30193490	4.898	0	4.898	2.518
P30193474	0,0660	26,01	1	412	4700	2835	2270	P30193474	2.903	0	2.903	2.750
P30193477	0,0799	25,79	1	2323	7253	6216	7252	P30193477	5.775	0	5.775	3.546
P30193497	0,0788	21,41	2	24	420	1112	264	P30193497	2.888	0	2.888	589
P30193496	0,0815	19,79	2	250	1451	1702	1156	P30193496	373	0	373	681
P30193519	0,0765	24,99	1	348	763	1184	1378	P30193519	4.634	0	4.634	723
P30207589	0,0872	22,96	1	1334	344	2669	2976	P30207589	4.075	0	4.075	7.776
P30207588	0,0953	18,74	1	1202	249	3330	3870	P30207588	2.256	0	2.256	2.410
P30193483	0,0896	41,08	1	2771	8007	10799	13603	P30193483	5.740	0	5.740	21.706
P30193504	0,0910	33,44	2	0	85	635	4340	P30193504	84	0	84	2.570
P30207081	0,0900	38,21	2	28	287	537	145	P30207081	497	0	497	66
P30209265	0,0896	36,26	1	956	410	1581	3393	P30209265	1.453	0	1.453	3.388
P30207201	0,1021	36,39	1	39	2246	5533	2775	P30207201	47	0	47	5.288
P30193482	0,0720	35,21	1	969	2476	1931	2566	P30193482	4.680	0	4.680	1.324
P30193503	0,0730	30,78	2	84	30	85	700	P30193503	475	0	475	396
P30209240	0,0720	33,37	1	322	1131	873	944	P30209240	5.452	0	5.452	622
P30193480	0,0319	11,62	2	179	575	3996	9983	P30193480	184	0	184	4.763
P30193479	0,0366	13,32	2	131	971	1235	15465	P30193479	519	0	519	2.635
P30193470	0,0840	25,79	1	406	807	864	1095	P30193470	3.553	0	3.553	607
P30205324	0,0199	6,30	1	623	1888	4318	4841	P30205324	1.728	0	1.728	2.702
P30205325	0,0203	6,05	1	168	2210	4178	3396	P30205325	547	0	547	2.524
P30203145	0,0572	29,51	1	535	572	1217	1085	P30203145	26.148	0	26.148	549
P30203146	0,0576	29,07	1	1030	1389	2129	2696	P30203146	24.484	0	24.484	993
P30203147	0,0670	26,76	1	973	1108	1823	2059	P30203147	22.637	0	22.637	757
P30203148	0,0590	20,19	2	0	16	52	334	P30203148	300	0	300	30
P30203149	0,0596	19,58	2	0	25	130	1161	P30203149	1.340	0	1.340	56
P30203150	0,0685	17,36	2	0	22	935	6	P30203150	519	0	519	41



Tabela F.3 - Tempos de produção em caixas por hora para HP2

$TP_{ik}$	M73213004	M73215015	M73211005	M73211006	M73211007	M73211008	M73211009	M73211010	M73211011	M73211012	M73211013	M73212014	M73214003
P30200097	39,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200186	39,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30204073	39,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30205326	39,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200214	38,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200098	36,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200185	36,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206222	-	37,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206180	-	37,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206859	-	33,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206858	-	33,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207346	-	40,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207366	-	40,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207365	30,5	37,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207432	-	40,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207431	-	40,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207364	30,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30209436	-	37,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	-	-	46,7	-	33,0	-	-	-	-	-	54,8	-	-
P30193494	-	-	46,7	-	-	-	-	-	-	-	54,8	-	-
P30193493	-	-	46,7	-	-	-	-	-	-	-	54,8	-	-
P30193476	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54,8	-	-
P30193478	-	-	46,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193498	-	-	46,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	-	-	-	-	-	-	51,1	-	54,5	62,8	51,0	53,2	-
P30193491	-	-	-	-	-	-	51,1	-	55,9	62,8	51,0	53,2	-
P30193490	-	-	-	-	-	-	51,1	-	55,9	62,8	51,0	53,2	-
P30193474	-	-	-	-	-	-	-	-	56,5	-	-	-	-
P30193477	-	-	-	44,0	-	-	45,8	-	-	-	-	43,7	-
P30193497	-	-	-	44,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193496	-	-	-	44,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193519	-	-	-	45,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207589	-	-	-	-	-	-	45,6	-	-	-	-	-	-
P30207588	-	-	-	-	-	-	42,0	-	-	-	-	-	-
P30193483	-	-	-	-	27,0	24,8	-	45,5	-	-	-	-	-
P30193504	-	-	-	-	-	25,9	-	45,5	-	-	-	-	-
P30207081	-	-	-	-	-	-	-	45,5	-	-	-	-	-
P30209265	-	-	-	-	-	-	-	41,7	-	-	-	-	-
P30207201	-	-	-	-	-	-	-	37,7	-	-	-	-	-
P30193482	-	-	-	-	-	-	-	-	55,3	58,6	-	-	-
P30193503	-	-	-	-	-	-	-	-	55,3	58,6	-	-	-
P30209240	-	-	-	-	-	-	45,8	-	-	-	-	45,3	-
P30193480	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	109,5	-	-
P30193479	-	-	-	-	-	-	-	-	-	125,7	-	-	-
P30193470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45,7	-
P30205324	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	142,5	-
P30205325	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	142,5	-
P30203145	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50,0
P30203146	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50,0
P30203147	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52,0
P30203148	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50,0
P30203149	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50,0
P30203150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52,0



Tabela F.5 - Capacidade disponível das máquinas em horas para HP2

Código	Descrição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
M73213004	AF-4	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8
M73215015	AF-15	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211005	AF-5	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211006	AF-6	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211007	AZ-7	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24
M73211008	AZ-8	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211009	AZ-9	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211010	AZ-10	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211011	AZ-11	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211012	AZ-12	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73211013	AZ-13	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73212014	AF-14	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
M73214003	Encart I	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	8	24	24	24	24	24	24

Tabela F.6 - Matriz dos tempos de *setup* para HP2

	P30193470	P30193473	P30193474	P30193475	P30193476	P30193477	P30193478	P30193479	P30193480	P30193482	P30193483	P30193490	P30193491	P30193493	P30193494	P30193496	P30193497	P30193498	P30193503	P30193504	P30193519	P30200097	P30200098	P30200185	P30200186	P30200214
P30193470	0,00	3,00				3,00						3,00	3,00													
P30193473	3,00	0,00	3,00	3,00	3,00	3,00		3,00	3,00	3,00		0,25	0,25	3,00	3,00				3,00							
P30193474		3,00	0,00						3,00			3,00	3,00						3,00							
P30193475		3,00		0,00	3,00		3,00		3,00		3,00	3,00	3,00	0,25	0,25			3,00								
P30193476		3,00		3,00	0,00				3,00			3,00	3,00	3,00	3,00											
P30193477	3,00	3,00				0,00						3,00	3,00			0,25	0,25				3,00					
P30193478				3,00			0,00							3,00	3,00			0,25								
P30193479		3,00						0,00		3,00		3,00	3,00						3,00							
P30193480				3,00	3,00				0,00					3,00	3,00	3,00	3,00									
P30193482		3,00	3,00					3,00		0,00		3,00	3,00						0,25							
P30193483				3,00							0,00									0,25						
P30193490	3,00	0,25	3,00	3,00	3,00	3,00		3,00	3,00	3,00		0,00	0,25	3,00	3,00				3,00							
P30193491	3,00	0,25	3,00	3,00	3,00	3,00		3,00	3,00	3,00		0,25	0,00	3,00	3,00				3,00							
P30193493		3,00		0,25	3,00		3,00		3,00			3,00	3,00	0,00	0,25			3,00		3,00						
P30193494		3,00		0,25	3,00		3,00		3,00			3,00	3,00	0,25	0,00			3,00								
P30193496						0,25										0,00	0,25									
P30193497						0,25										0,25	0,00									
P30193498														3,00	3,00			0,00								
P30193503		3,00	3,00					3,00		0,25		3,00	3,00						0,00							
P30193504											0,25									0,00						
P30193519					3,00											3,00	3,00				0,00					
P30200097																						0,00				
P30200098																						0,00	3,00	3,00	0,25	3,00
P30200185																						3,00	0,00	0,25	3,00	3,00
P30200186																						0,25	3,00	3,00	0,00	3,00
P30200214																						3,00	3,00	3,00	3,00	0,00
P30203145																										
P30203146																										
P30203147																										
P30203148																										
P30203149																										
P30203150																										
P30204073																										
P30205324	3,00	3,00				3,00						3,00	3,00								3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
P30205325	3,00	3,00				3,00						3,00	3,00													
P30205326																										
P30206180																										
P30206222																										
P30206858																										
P30206859																										
P30207081											0,25									0,25						
P30207201											3,00									3,00						
P30207346																										
P30207364																						3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
P30207365											</															

Tabela F.7 - Matriz dos tempos de *setup* para HP2(continuação)

	P30203145	P30203146	P30203147	P30203148	P30203149	P30203150	P30204073	P30205324	P30205325	P30205326	P30206180	P30206222	P30206858	P30206859	P30207081	P30207201	P30207346	P30207364	P30207365	P30207366	P30207431	P30207432	P30207588	P30207589	P30209240	P30209265	P30209436
P30193470								3,00	3,00																3,00		
P30193473								3,00	3,00														3,00	3,00	3,00		
P30193474																											
P30193475																											
P30193476																											
P30193477								3,00	3,00														3,00	3,00	3,00		
P30193478																											
P30193479																											
P30193480																											
P30193482																											
P30193483														0,25	3,00											3,00	
P30193490								3,00	3,00														3,00	3,00	3,00		
P30193491								3,00	3,00														3,00	3,00	3,00		
P30193493																											
P30193494																											
P30193496																											
P30193497																											
P30193498																											
P30193503																											
P30193504														0,25	3,00											3,00	
P30193519																											
P30200097							3,00			3,00								3,00	3,00								
P30200098							3,00			3,00								3,00	3,00								
P30200185							3,00			3,00								3,00	3,00								
P30200186							3,00			3,00								3,00	3,00								
P30200214							3,00			3,00								3,00	3,00								
P30203145	0,00	3,00	3,00	0,25	3,00	3,00																					
P30203146	3,00	0,00	3,00	3,00	0,25	3,00																					
P30203147	3,00	3,00	0,00	3,00	3,00	0,25																					
P30203148	0,25	3,00	3,00	0,00	3,00	3,00																					
P30203149	3,00	0,25	3,00	3,00	0,00	3,00																					
P30203150	3,00	3,00	0,25	3,00	3,00	0,00																					
P30204073							0,00			0,25								3,00	3,00								
P30205324								0,00	3,00																3,00		
P30205325								3,00	0,00																3,00		
P30205326							0,25			0,00								3,00	3,00								
P30206180										0,00	3,00	3,00	3,00				3,00		3,00	3,00	3,00	3,00				3,00	
P30206222										3,00	0,00	3,00	3,00				3,00		3,00	3,00	3,00	3,00				0,25	
P30206858										3,00	3,00	0,00	3,00				3,00		3,00	3,00	3,00	3,00				3,00	
P30206859										3,00	3,00	3,00	0,00				3,00		3,00	3,00	3,00	3,00				3,00	
P30207081														0,00	3,00											3,00	
P30207201														3,00	0,00											3,00	
P30207346											3,00	3,00	3,00	3,00			0,00		3,00	3,00	3,00	0,25				3,00	
P30207364							3,00			3,00								0,00	3,00								
P30207365											3,00	3,00	3,00	3,00			3,00	0,00	3,00	3,00	3,00	3,00				3,00	
P30207366											3,00	3,00	3,00	3,00			3,00	0,00	0,25	3,00						3,00	
P30207431											3,00	3,00	3,00	3,00			3,00	0,25	0,00	3,00						3,00	
P30207432											3,00	3,00	3,00	3,00			0,25		3,00	3,00	0,00					3,00	
P30207588																						0,00	3,00	3,00			
P30207589																						3,00	0,00	3,00			
P30209240								3,00	3,00													3,00	3,00	0,00			
P30209265														3,00	3,00											0,00	
P30209436											3,00	0,25	3,00	3,00			3,00		3,00	3,00	3,00	3,00					0,00

## APÊNDICE G - Saída para o problema real HP2

Tabela G.1 - Quantidade produzida em cada subperíodo para HP2

Produto	Máquina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P30193475	M73211005	1.120	-	-	-	-	-	1.108	-	-	-	-	-	-	-
P30193494	M73211005	-	1.108	-	727	1.120	1.120	-	1.108	-	980	-	-	-	-
P30193493	M73211005	-	-	1.108	-	-	-	-	-	-	-	-	1.108	1.120	1.120
P30193478	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193498	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	M73211006	-	187	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.044	-	-
P30193496	M73211006	-	-	-	-	-	-	735	1.055	-	-	-	-	-	-
P30193519	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	M73211007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	M73211007	-	-	-	-	-	356	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	M73211008	198	594	594	594	594	594	-	588	594	594	594	594	594	594
P30193504	M73211008	-	-	-	-	-	-	581	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211009	-	-	-	-	-	-	1.073	1.226	1.226	-	1.226	1.226	1.226	1.226
P30193491	M73211009	-	-	1.073	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207589	M73211009	272	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207588	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30209240	M73211009	-	-	-	-	587	1.099	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	M73211010	-	-	-	-	956	-	956	364	-	-	-	-	-	-
P30193504	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207081	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	997	-	-	-	-	-
P30209265	M73211010	202	1.000	-	875	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207201	M73211010	-	-	791	-	-	765	-	-	-	-	-	904	904	904
P30193473	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.293	-	-
P30193491	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.328	-	-	-	-
P30193490	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	1.174	-	1.328	-	1.328	-
P30193474	M73211011	1.355	1.355	1.355	1.355	452	1.355	1.355	1.355	-	-	-	-	-	-
P30193482	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193503	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	899
P30193473	M73211012	-	-	-	-	-	-	1.319	1.507	1.507	-	-	1.491	1.507	1.507
P30193491	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.492	1.508	-	-	-
P30193490	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193482	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193503	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193479	M73211012	3.017	3.017	-	2.717	3.017	3.017	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	M73211013	-	-	-	-	-	1.150	1.314	1.314	-	-	1.300	-	1.300	-
P30193494	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193493	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	676	-	-	-	-
P30193476	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	285	-	-	-	-	-
P30193480	M73211013	2.628	2.628	2.628	2.628	2.628	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	-	-	-	-	918	1.049	350	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049
P30209240	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193470	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30205324	M73212014	2.128	3.420	3.420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30205325	M73212014	-	-	-	2.993	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200097	M73213004	-	-	-	-	-	833	-	-	-	833	-	-	833	-
P30200186	M73213004	-	-	-	286	-	-	-	-	-	-	942	-	-	-
P30204073	M73213004	-	760	-	-	-	-	-	942	-	-	-	-	-	-
P30205326	M73213004	-	-	-	-	-	-	593	-	-	-	-	-	-	-
P30200214	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200098	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200185	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	775	-	-	-	-	420
P30207365	M73213004	731	-	-	-	640	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207364	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	640	-	-
P30203145	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.009
P30203146	M73214003	1.157	-	-	-	-	-	-	-	-	1.050	-	1.188	-	-
P30203147	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203148	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	402	-
P30203149	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	266	-	-	-
P30203150	M73214003	-	-	922	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206222	M73215015	-	-	735	-	-	-	-	-	891	-	-	788	-	-
P30206180	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206859	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206858	M73215015	-	-	-	331	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207346	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	488
P30207366	M73215015	442	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207365	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207432	M73215015	-	-	-	-	205	-	-	-	-	846	-	-	-	-
P30207431	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	472	-	-	-
P30209436	M73215015	-	-	-	-	-	125	-	891	-	-	-	-	-	-



Tabela G.2 - Quantidade produzida em cada subperíodo para HP2(continuação)

Produto	Máquina	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
P30193475	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193494	M73211005	1.108	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193493	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193478	M73211005	-	-	1.108	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120	1.120	-
P30193498	M73211005	-	342	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.108
P30193477	M73211006	-	-	-	-	-	-	397	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193496	M73211006	-	-	1.044	-	1.044	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193519	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	963	1.101	-	-	886
P30193475	M73211007	-	-	-	-	-	693	792	792	792	-	792	792	792	-
P30193483	M73211007	-	-	-	648	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193483	M73211008	594	594	594	594	594	594	594	594	594	594	594	594	594	594
P30193504	M73211008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211009	1.226	-	-	-	-	-	-	-	-	1.073	1.226	1.226	1.226	-
P30193491	M73211009	-	1.213	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207589	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207588	M73211009	-	-	199	1.007	1.007	1.007	1.007	1.007	1.007	-	-	-	-	-
P30209240	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	962
P30193483	M73211010	-	-	-	-	-	-	1.081	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	-
P30193504	M73211010	-	-	955	-	-	955	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207081	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30209265	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	875
P30207201	M73211010	904	904	-	791	904	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.293	-	-	-
P30193491	M73211011	-	-	-	-	-	1.174	1.342	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	1.328	1.342	1.342	-	1.328	1.342	-
P30193474	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193482	M73211011	1.312	1.326	1.326	1.326	1.326	-	-	-	-	-	-	-	-	1.160
P30193503	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211012	1.507	-	-	-	1.491	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507	1.507
P30193491	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211012	-	-	-	1.319	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193482	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193503	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193479	M73211012	-	-	3.017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	M73211013	1.300	-	-	274	1.314	1.314	1.314	-	-	-	-	-	-	-
P30193494	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193493	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193476	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.150	1.314	1.314	1.314	1.314
P30193473	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	1.071	1.224	-	-	-	-	-
P30193491	M73211013	-	212	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193480	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	1.049	-	-	-	-	-
P30209240	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193470	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	371	1.097	1.097
P30205324	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30205325	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.016	3.420	-	-	-
P30200097	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	833	952	317
P30200186	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30204073	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	833	-	-	-	-	-
P30205326	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200214	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	803	918	-	-	-
P30200098	M73213004	-	877	886	886	886	886	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200185	M73213004	886	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207365	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207364	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	640	-	-	-	-	-	-
P30203145	M73214003	1.200	1.200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203146	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	250	1.200	1.200	1.200	-	-	-
P30203147	M73214003	-	-	-	1.092	-	-	1.092	-	-	-	-	1.092	1.248	1.248
P30203148	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203149	M73214003	-	-	-	-	1.050	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203150	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206222	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206180	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	788	900	-	-	-
P30206859	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	700	800	-	-	-	-	-
P30206858	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700
P30207346	M73215015	967	967	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207366	M73215015	-	-	-	957	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207365	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207432	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207431	M73215015	-	-	201	-	-	957	967	-	-	-	-	-	-	-
P30209436	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	788	900	-

Tabela G.3 - Relação de preparação de máquina para cada subperíodo para HP2

Produto	Máquina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P30193475	M73211005	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30193494	M73211005	-	1	-	1	1	1	-	1	-	1	1	-	-	-
P30193493	M73211005	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1
P30193478	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193498	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
P30193477	M73211006	-	-	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-	-	1
P30193497	M73211006	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
P30206222	M73211006	1	-	1	1	-	1	1	1	-	-	1	-	1	-
P30206180	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206859	M73211007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206858	M73211007	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P30207346	M73211008	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1
P30207366	M73211008	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30207366	M73211009	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1
P30207366	M73211009	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207432	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207431	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207431	M73211009	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30209436	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	M73211009	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	M73211010	-	-	-	-	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-
P30193475	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193494	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-
P30193494	M73211010	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193493	M73211010	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	1	1	1	1
P30193493	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
P30193476	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
P30193478	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-
P30193498	M73211011	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
P30193473	M73211012	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	1	1	1
P30193473	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
P30193473	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211012	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211013	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	1	-	1	-
P30193491	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	1
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
P30193474	M73211013	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	M73212014	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P30193496	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193519	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207589	M73212014	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207588	M73212014	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200097	M73213004	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	1	-
P30200186	M73213004	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
P30204073	M73213004	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
P30205326	M73213004	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30200214	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200098	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200185	M73213004	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1
P30207365	M73213004	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207364	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
P30207364	M73214003	-	1	-	-	1	-	1	1	1	-	-	-	-	1
P30193503	M73214003	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-
P30193503	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30209240	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
P30209240	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
P30193480	M73214003	-	-	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193479	M73215015	-	1	1	-	-	-	1	-	1	-	-	1	-	-
P30193470	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30205324	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30205325	M73215015	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203145	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
P30203146	M73215015	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203147	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203148	M73215015	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-
P30203149	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
P30203150	M73215015	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-

Tabela G.4 - Relação de preparação de máquina para HP2(continuação)

[illegible]

Tabela G.5 - Relação de equipes alocadas para cada subperíodo para HP2

Produto	Máquina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P30193475	M73211005	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30193494	M73211005	-	1	-	-	1	1	-	1	-	1	-	-	-	-
P30193493	M73211005	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1
P30193478	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193498	M73211005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	M73211006	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
P30206222	M73211006	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-
P30206180	M73211006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206859	M73211007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30206858	M73211007	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207346	M73211008	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1
P30207366	M73211008	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30207366	M73211009	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	1	1	1	1
P30207366	M73211009	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207432	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207431	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207431	M73211009	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30209436	M73211009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	M73211009	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193475	M73211010	-	-	-	-	1	-	1	1	-	-	-	-	-	-
P30193475	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193494	M73211010	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
P30193494	M73211010	1	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193493	M73211010	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	1	1	1
P30193493	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
P30193476	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
P30193478	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-
P30193498	M73211011	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193473	M73211011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
P30193473	M73211012	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	1	1	1
P30193473	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
P30193473	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211012	1	1	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193491	M73211013	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	1	-	1	-
P30193491	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193490	M73211013	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
P30193474	M73211013	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193477	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193497	M73212014	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P30193496	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193519	M73212014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207589	M73212014	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207588	M73212014	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200097	M73213004	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	1	-
P30200186	M73213004	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
P30204073	M73213004	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
P30205326	M73213004	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
P30200214	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200098	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30200185	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1
P30207365	M73213004	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30207364	M73213004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
P30207364	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
P30193503	M73214003	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-
P30193503	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30209240	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
P30209240	M73214003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
P30193480	M73214003	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30193479	M73215015	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-
P30193470	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30205324	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30205325	M73215015	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203145	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
P30203146	M73215015	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203147	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P30203148	M73215015	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-
P30203149	M73215015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
P30203150	M73215015	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-

[illegible]

Tabela G.7 - Relação de *setups* feitos em cada subperíodo de HP2[illegible]

Tabela G.8 - Relação de *setups* feitos em cada subperíodo de HP2(continuação)[illegible]



Tabela G.9 - Relação de *setups* feitos em cada subperíodo de HP2 (final)

[illegible]



Tabela G.10 - Quantidades estocadas, atendidas em atraso e produzidas em cada período para HP2

Produto	Estoque				Backorder				Produção					
	t0	t1	t2	t3	t4	t0	t1	t2	t3	t4	t1	t2	t3	t4
P30200097	3.774	4.192	4.365	2.995	3.774	-	-	-	-	132	833	1.666	-	2.102
P30200186	848	1.134	2.076	1.451	848	-	-	-	-	238	286	942	-	-
P30204073	502	1.118	1.567	643	502	-	-	-	-	-	760	942	-	833
P30205326	39	632	632	6	39	-	-	-	-	43	593	-	-	-
P30200214	1.124	947	542	28	1.124	-	-	-	-	40	-	-	-	1.721
P30200098	3.154	2.197	1.015	4.173	3.154	-	-	-	-	99	-	-	4.421	-
P30200185	971	971	1.908	2.703	971	-	-	-	-	294	-	1.195	886	-
P30206222	1.887	2.225	3.025	2.609	1.887	-	-	-	-	-	735	1.678	-	-
P30206180	1.495	1.206	675	290	1.495	-	-	-	-	198	-	-	-	1.688
P30206859	965	821	192	-	965	-	-	-	112	315	-	-	-	1.500
P30206858	499	714	391	221	499	-	-	-	-	381	331	-	-	700
P30207346	2.015	1.657	1.233	2.562	2.015	-	-	-	-	-	-	488	1.934	-
P30207366	1.185	1.477	1.150	1.772	1.185	-	-	-	-	-	442	-	957	-
P30207365	2.313	3.585	3.184	2.818	2.313	-	-	-	-	26	1.371	-	-	-
P30207432	1.767	1.323	1.237	1.068	1.767	-	-	-	-	1.388	205	846	-	-
P30207431	897	406	243	1.428	897	-	-	-	-	-	-	472	2.125	-
P30207364	523	381	743	329	523	-	-	-	-	90	-	640	-	640
P30209436	3.900	3.712	3.284	2.234	3.900	-	-	-	-	753	125	891	-	1.688
P30193475	10.108	13.286	9.916	11.968	10.108	-	-	-	-	2.762	4.692	3.915	7.001	3.960
P30193494	2.284	6.343	8.103	4.165	2.284	-	-	-	-	1.056	4.076	2.088	1.108	-
P30193493	2.298	3.365	5.086	3.084	2.298	-	-	-	-	957	1.108	4.024	-	-
P30193476	4.735	3.989	2.042	270	4.735	-	-	-	-	618	-	-	-	6.406
P30193478	4.694	3.665	501	1.259	4.694	-	-	-	-	2.297	-	-	5.588	6.720
P30193498	2.501	2.489	1.959	1.220	2.501	-	-	-	-	303	-	342	1.108	-
P30193473	53.969	51.624	54.747	51.560	53.969	-	-	-	-	508	2.391	16.169	7.238	18.888
P30193491	3.979	5.051	8.499	11.014	3.979	-	-	-	-	2.191	1.073	4.328	3.941	-
P30193490	4.898	2.434	1.243	-	4.898	-	-	-	-	1.442	-	4.115	1.319	6.682
P30193474	2.903	11.073	7.728	4.893	2.903	-	-	-	-	280	8.582	1.355	-	-
P30193477	5.775	5.769	5.859	7.383	5.775	-	-	-	-	3.546	2.317	7.343	7.740	2.098
P30193497	2.888	3.051	3.675	2.563	2.888	-	-	-	-	589	187	1.044	-	-
P30193496	373	858	462	848	373	-	-	-	-	723	735	1.055	2.088	-
P30193519	4.634	4.286	3.523	2.339	4.634	-	-	-	-	-	272	-	-	2.950
P30207589	4.075	3.013	2.669	-	4.075	-	-	-	-	7.051	-	-	-	-
P30207588	2.256	1.054	805	1.702	2.256	-	-	-	-	2.410	-	-	4.227	2.014
P30193483	5.740	8.404	4.912	-	5.740	-	-	-	-	8.633	5.435	4.516	5.887	10.710
P30193504	84	665	580	1.854	84	-	-	-	-	2.570	581	-	1.909	-
P30207081	497	469	1.179	642	497	-	-	-	-	-	-	997	-	-
P30209265	1.453	2.574	2.164	583	1.453	-	-	-	-	3.388	2.077	-	-	875
P30207201	47	1.564	2.030	-	47	-	-	-	-	2.822	1.556	2.712	3.503	-
P30193482	4.680	3.711	1.235	5.920	4.680	-	-	-	-	166	-	-	6.616	1.160
P30193503	475	391	1.260	1.175	475	-	-	-	-	-	-	899	-	-
P30209240	5.452	6.816	5.685	4.812	5.452	-	-	-	-	622	1.686	-	-	962
P30193480	184	13.145	12.570	8.574	184	-	-	-	-	1.593	13.140	-	-	-
P30193479	519	15.173	14.202	15.984	519	-	-	-	-	-	14.785	-	3.017	-
P30193470	3.553	3.147	2.340	1.476	3.553	-	-	-	-	607	-	-	-	2.565
P30205324	1.728	10.073	8.185	3.867	1.728	-	-	-	-	2.702	8.968	-	-	-
P30205325	547	3.372	1.162	-	547	-	-	-	3.017	2.524	2.993	-	-	-
P30203145	26.148	25.613	26.050	27.233	26.148	-	-	-	-	-	-	1.009	2.400	-
P30203146	24.484	24.611	25.459	23.330	24.484	-	-	-	-	-	1.157	2.238	-	3.850
P30203147	22.637	21.664	20.556	20.917	22.637	-	-	-	-	191	-	-	2.184	3.588
P30203148	300	300	686	634	300	-	-	-	-	-	-	402	-	-
P30203149	1.340	1.340	1.581	2.501	1.340	-	-	-	-	-	-	266	1.050	-
P30203150	519	1.441	1.419	484	519	-	-	-	-	41	922	-	-	-