

ALESSANDRO MARQUES DA ROSA

DIMENSIONAMENTO E PROGRAMAÇÃO DE LOTES NA PRODUÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA NA INDÚSTRIA DE BENS DE CONSUMO

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

São Paulo

2012

ALESSANDRO MARQUES DA ROSA

DIMENSIONAMENTO E PROGRAMAÇÃO DE LOTES NA PRODUÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA NA INDÚSTRIA DE BENS DE CONSUMO

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

Orientadora:
Profª Drª Débora Pretti Ronconi

São Paulo
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Rosa, Alessandro Marques da
Dimensionamento e programação de lotes na produção
semi-automática na indústria de bens de consumo / A.M. da Rosa. --
São Paulo, 2012.
98 p.

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

1.Programação da produção 2.Indústria de bens de consumo
(Produção; Dimensionamento) I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

RESUMO

Este trabalho de formatura tem como objetivo analisar a produção semi-automática de produtos customizados no setor de bens de consumo, em uma empresa de grande porte. No problema considerado, linhas de produção paralelas e diferentes entre si são utilizadas para produzir um grande número de produtos. Atualmente, os métodos adotados para o planejamento da produção envolvem critérios subjetivos. Será proposta uma solução para o dimensionamento e programação dos lotes de produção com uma abordagem científica. Um estudo da literatura existente sobre o tema proporcionou uma base para elaboração do modelo que representa o problema enfrentado pela empresa. Foram utilizadas técnicas de Pesquisa Operacional para a resolução desse modelo com o intuito de testar se os tempos computacionais seriam aceitáveis. Através de testes com cenários reais, detectou-se que seria necessário adotar medidas para controlar o tempo de processamento. Uma abordagem heurística com base no modelo relaxado foi proposta. O *software* utilizado foi o *What'sBest!*, que é integrado ao Excel. O *software* permite ajustes que reduzem o tempo computacional; alguns foram empregados dada a escala e complexidade do problema. Chegou-se a um tempo médio de computação bem abaixo do máximo aceitável. A interface do *software* é intuitiva, permitindo a qualquer colaborador da empresa que seja familiarizado com o Excel o uso do modelo para planejamento da produção. Os resultados obtidos demonstraram que o uso de métodos científicos na otimização do dimensionamento e sequenciamento dos lotes de produção consistentemente apresenta diminuição de riscos de não-atendimento da demanda quando comparado com o método atual, através da redução da utilização da capacidade produtiva disponível. Em cenários onde toda a capacidade produtiva foi utilizada, a demanda não-atendida foi menor quando o modelo proposto foi aplicado. A abordagem científica adotada foge da forma com que é feito atualmente o planejamento da produção, que depende de critérios subjetivos e da experiência dos planejadores.

Palavras-chave: Planejamento da produção, dimensionamento e sequenciamento

ABSTRACT

The objective of this graduate work is to analyze the semi-automatic production of customized products in the consumer goods industry, in a large-scale company. In the considered problem, parallel, distinct production lines are used to produce a wide number of products. Currently, the adopted methods for production planning involve subjective criteria. A solution for the simultaneous lot-sizing and scheduling of production lots will be proposed, following a scientific approach. The existing literature surrounding this theme offered a solid base for the creation of a model that represents the problem faced by the company. Operations Research techniques were used in the resolution of this problem in order to test if computation times would be acceptable. Through testing with real scenarios, the need for adopting measures to control processing times was detected. A heuristic approach based on the relaxed model was proposed. The model was created in the *What'sBest!* software, which is integrated into Excel. The software allows adjustments that reduce computation times; some were used, given the scale and complexity of the problem. The average processing time achieved is well below the maximum time allowed. *What'sBest!* has an intuitive interface, allowing any employee that is familiar with Excel to use the model for production planning. The obtained results demonstrate that the use of scientific methods in the optimization of simultaneous lot-sizing and scheduling of production lots consistently shows reductions in the risk of not meeting demand requirements when compared to the method presently used by the company, by lowering the available productive capacity utilization. In scenarios where all the productive capacity was utilized, the unmet demand was lower when the proposed model was applied. The scientific approach adopted differs from the current methods employed for production planning, which depend on subjective criteria and individual experience.

Key words: Production Planning, Lot-Sizing and Scheduling

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de plano de produção	30
Tabela 2 - Parâmetros do problema-exemplo.....	48
Tabela 3 - Lotes de produção do problema-exemplo (q_{ils})	49
Tabela 4 - Parâmetros do cenário 1 com demanda não-atendida	65
Tabela 5 - Tempo de produção + <i>setup</i> (minutos) no cenário 1 com demanda não-atendida, no modelo proposto	66
Tabela 6 - Demandas não-atendidas por produto e por período, no modelo proposto.....	66
Tabela 7 - Tempos de <i>setup</i> no cenário 1 com demanda não-atendida, no modelo proposto ..	66
Tabela 8 - Tempo de produção + <i>setup</i> (minutos) no cenário 1 com demanda não-atendida, na solução atual	66
Tabela 9 - Tempos de <i>setup</i> no cenário 1 com demanda não-atendida, na solução atual	67
Tabela 10 - Demandas não-atendidas por produto e por período, na solução atual	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Receita líquida por categoria. Fonte: Relatório Anual da EX, 2011.....	16
Figura 2 - Receita líquida por região geográfica. Fonte: Relatório Anual da EX, 2011.....	16
Figura 3 - Receita Líquida por maturidade do mercado. Fonte: Relatório Anual da EX, 2011.....	17
Figura 4 - Mapa das fábricas	18
Figura 5 - Distribuição dos produtos até o consumidor final	19
Figura 6 - Exemplo de estrutura organizacional.....	20
Figura 7 - Tipos de linha semi-automática	23
Figura 8 - Períodos e sub-períodos	43
Figura 9 - Gráfico do tempo de processamento.....	61
Figura 10 - Gráfico da capacidade produtiva utilizada (%).....	63
Figura 11 - Influência do tempo de <i>setup</i> no modelo proposto	63
Figura 12 - Influência do tempo de <i>setup</i> no processo atual	64
Figura 13 - Função objetivo nos casos de demanda não-atendida	68
Figura 14 – Tempos de <i>setup</i> em relação ao tempo total utilizado, nos casos de demanda não-atendida.....	68

SUMÁRIO

1. A EMPRESA	15
1.1. VISÃO GERAL.....	15
1.2. ESTRUTURA ORGANIZACIONAL.....	19
1.3. CUSTOMIZAÇÃO.....	21
1.4. ESTÁGIO	24
2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	29
2.1. CONTEXTO	29
2.2. OBJETIVO	30
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
3.1. HISTÓRICO	35
3.2. PROBLEMA-BASE	37
3.3. ESTRATÉGIA PARA SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA CONSIDERADO	38
4. MODELO MATEMÁTICO.....	43
4.1. DESCRIÇÃO.....	43
4.2. FORMULAÇÃO	44
4.3. VALIDAÇÃO.....	48
5. OBTENÇÃO DE DADOS E EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	53
5.1. LEVANTAMENTO DE DADOS	53
5.2. RESULTADOS PRELIMINARES	55
5.3. ADAPTAÇÃO DO MODELO	56
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	61
6.1. RESULTADOS OBTIDOS	61
6.2. COMPARAÇÃO COM A SOLUÇÃO ATUAL.....	62
7. CONCLUSÃO	73
BIBLIOGRAFIA	77
ANEXO 1 – SAÍDAS DO SOFTWARE WHAT'SBEST! PARA O EXEMPLO	81

ANEXO 2 – SAÍDAS DO SOFTWARE WHAT'SBEST! PARA O MODELO EXPANDIDO, SEM RELAXAMENTO	82
ANEXO 3 – SAÍDAS DO SOFTWARE WHAT'SBEST! PARA O MODELO EXPANDIDO E RELAXADO, PARA OS CASOS DE DEMANDA ATENDIDA	83
ANEXO 4 – SAÍDAS DO SOFTWARE WHAT'SBEST! PARA O MODELO EXPANDIDO E RELAXADO, PARA OS CASOS DE DEMANDA NÃO-ATENDIDA	95
ANEXO 5 - PARÂMETROS PARA OS CASOS DE DEMANDA NÃO ATENDIDA ...	98

Introdução

INTRODUÇÃO

A boa utilização dos recursos que uma empresa possui é uma das chaves para seu sucesso. Muitas vezes esses recursos são governados por sistemas sustentados por métodos científicos comprovados. No entanto, mesmo em empresas consolidadas, é possível encontrar subsistemas que são baseados nas decisões subjetivas dos indivíduos responsáveis.

Este trabalho foi realizado em uma multinacional do setor de bens de consumo. Seu portfólio inclui marcas de setores muito diversos entre si, como fraldas, absorventes, sabão em pó, baterias, cosméticos, entre outros. A empresa gerencia não só as marcas, mas também a produção e distribuição.

Uma característica comum ao longo da história da empresa foi a capacidade de lançar produtos inovadores. Uma forma de atrair os consumidores a experimentar algo novo é através da venda de produtos promocionais. Segundo Kotler (2000), a veiculação de propagandas oferece um *motivo* para o consumo, enquanto a venda de produtos promocionais oferece um *incentivo* ao consumo.

Esse tipo de produto é vendido no mercado durante um curto espaço de tempo, e em volume menor do que o produto não-promocional; além disso, produtos promocionais tem de ser desenvolvidos e lançados rapidamente para responder à eventos no mercado e mudanças de comportamento do consumidor. Assim sendo, é tecnicamente inviável que sejam produzidos diretamente nas linhas de produção.

A solução encontrada foi de contratar empresas terceiras especializadas na montagem de produtos promocionais.

As decisões a respeito da utilização dos recursos produtivos na empresa analisada são feitas sem um método bem-definido. Cada indivíduo utiliza critérios que julga serem os mais relevantes. Como consequência, surgem dois problemas: *i)* as quantidades planejadas de produção nem sempre atendem à demanda, e *ii)* a produção real nem sempre corresponde à produção planejada. Um processo estruturado de decisão torna-se necessário para atuar nessas duas frentes. Através do estabelecimento de critérios objetivos e da utilização de ferramentas de Pesquisa Operacional, pretende-se chegar a um planejamento mais eficiente que reduza o não-atendimento da demanda e que dê mais agilidade à empresa para responder a imprevistos na produção.

Tendo em vista esse contexto, e somando o fato de que a venda de produtos promocionais corresponde a mais de 10% das vendas totais da empresa, a realização de um projeto de planejamento de produção torna-se relevante para o resultado da empresa.

O trabalho está dividido em sete capítulos. O primeiro apresenta uma visão geral da empresa analisada e o departamento onde o autor realizou seu estágio. O segundo capítulo contém a descrição do problema estudado. O capítulo 3 traz uma revisão bibliográfica do tema. O capítulo 4 é dedicado ao modelo matemático que irá representar o problema. No capítulo 5 mostra-se como os dados do problema foram obtidos e os resultados dos experimentos computacionais preliminares. No capítulo 6 são apresentados os resultados finais, assim como sua análise. O último capítulo é destinado à conclusão e sugestões de melhoria.

Capítulo 1

1. A EMPRESA

Esse capítulo fornece uma visão geral da empresa onde o trabalho foi realizado, sua estrutura hierárquica e principais características e uma breve descrição do estágio realizado pelo autor.

1.1. VISÃO GERAL

O trabalho baseou-se em uma multinacional que produz e comercializa bens de consumo. Será denominada “Empresa X” (EX) ao longo do texto. Para proteger as informações críticas da empresa, qualquer custo, *lead time* ou outro dado sigiloso será multiplicado por um fator pré-determinado, de forma que a relação entre os números continue a mesma.

A EX foi fundada em 1837 nos Estados Unidos. Na década de 60, durante a guerra civil americana, fechou contratos com o Exército da União para o fornecimento de sabonetes e velas. A partir daí, começou a aumentar seus lucros consistentemente.

Em 1930, tornou-se internacional ao adquirir a Empresa Y. Iniciou suas operações no Brasil em 1988, e vem gradualmente expandido o seu portfólio de produtos no país unindo o lançamento de produtos de marcas globais da EX com a aquisição de empresas. Há cerca de 4.200 funcionários atualmente no Brasil.

Hoje, a empresa tem 129 mil colaboradores e uma receita anual de US\$83 bilhões. É uma empresa de capital aberto e faz parte das *Fortune 500*. Suas ações são negociadas na bolsa de Nova Iorque (NYSE). Os produtos podem ser divididos nas seguinte categorias:

- Beleza: inclui desodorantes e anti-transpirantes, cosméticos, produtos para o cabelo, perfumes e produtos para a pele.
- Cuidados do Homem: inclui lâminas, máquinas e cremes de barbear.
- Saúde: inclui remédios, pastilhas, enxaguantes bucais, absorventes femininos, escovas e pastas de dente.
- Cuidados da Casa e Cuidados com a Roupa: inclui amaciante, sabão em pó e líquido, purificadores de ar, alvejantes, pilhas e baterias, detergentes e ração para animais de estimação.
- Cuidados do Bebê e Cuidados da Família: inclui lenços umedecidos, fraldas, papel higiênico e papel toalha.

A distribuição das receitas líquidas obtidas com a venda mundial dos produtos, por categoria, são ilustradas na Figura 1.



Figura 1 - Receita líquida por categoria. Fonte: Relatório Anual da EX, 2011.

Por ser uma empresa global, é relevante que se apresente como as vendas são distribuídas por região geográfica (veja Figura 2). A fatia norte-americana de quase 40% da receita líquida total explica-se tanto pelo tamanho do mercado, como pelo fato de a empresa ter sido criada nos Estados Unidos e atuar no país há mais de cem anos.

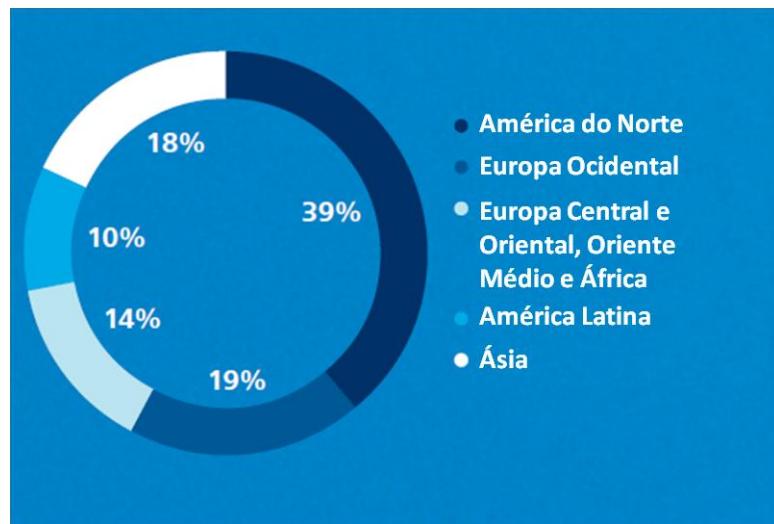


Figura 2 - Receita líquida por região geográfica. Fonte: Relatório Anual da EX, 2011.

Como está consolidada nos países desenvolvidos, a EX encontra dificuldades para manter altas taxas de crescimento nesses países. Os países em desenvolvimento apresentam maior crescimento percentual, mas representam uma parcela menor da receita líquida total:

38%. A maior taxa de crescimento nos emergentes ocorre por dois principais motivos: estão sendo lançadas novas categorias de produtos nesses países, o que aumenta a receita em saltos; os consumidores ainda estão conhecendo as marcas que já foram lançadas, portanto existe um potencial ainda não explorado.

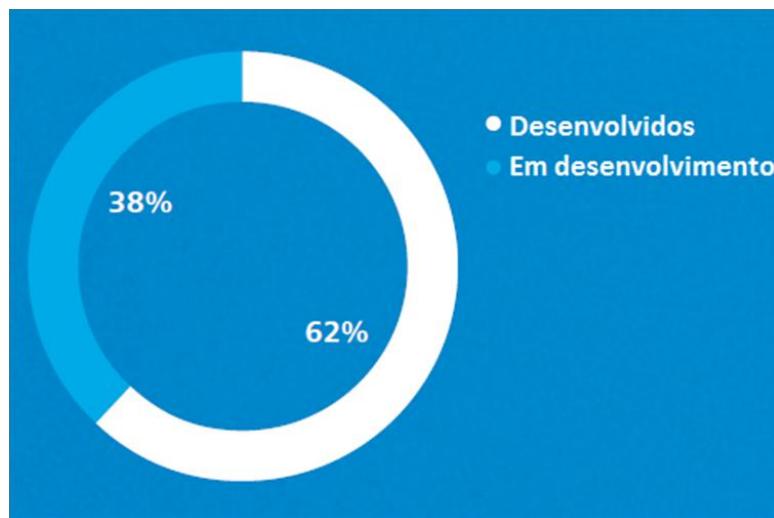


Figura 3 - Receita Líquida por maturidade do mercado. Fonte: Relatório Anual da EX, 2011.

Uma estratégia para atingir um maior número de consumidores nos países em desenvolvimento é o alto investimento em marketing, com objetivo de aumentar o conhecimento que os consumidores tem dos produtos e criar fidelidade, assim como criar associação entre marcas de categorias diferentes.

Essa estratégia é aplicada no Brasil. Nota-se que em pontos de venda onde as marcas da EX estão presentes, a participação de mercado atinge as metas esperadas. No entanto, o aumento de vendas especificamente através de marketing tem suas limitações.

Uma dessas limitações é a distribuição física dos produtos. Está sendo desenvolvida uma estratégia paralela para atingir mais consumidores por meio da presença da EX em um número maior de pontos de venda, através do Brasil inteiro.

A produção no Brasil é realizada em seis fábricas: duas em São Paulo, duas no Rio de Janeiro, uma na Bahia e uma no Amazonas. A Figura 4 apresenta o mapa das fábricas no país. Cada categoria de produtos é produzida em apenas uma região geográfica, sendo que alguns produtos vendidos no Brasil são fabricados no exterior. Por exemplo, a produção de todas as fraldas só ocorre em São Paulo, com exceção de uma linha de produtos, que vem do México.



Figura 4 - Mapa das fábricas

Os clientes são divididos em dois grandes grupos. Os clientes globais, que tem maior porte, recebem os produtos em seus centros de distribuição e de lá capilarizam para seus diversos locais de venda. São exemplos de clientes globais: Walmart, Lojas Americanas, Carrefour. Além de esses clientes representarem um volume significativo, possuem uma relação de parceria com a EX em escala mundial.

Já para a venda para clientes menores, para reduzir custos logísticos, há um intermediário, geralmente sendo um atacado local. Este adquire os produtos em grandes quantidades e é responsável pela distribuição para farmácias independentes, pequenos mercados, etc.

A Figura 5 apresenta o caminho básico percorrido pelos produtos desde sua manufatura até o consumidor final.

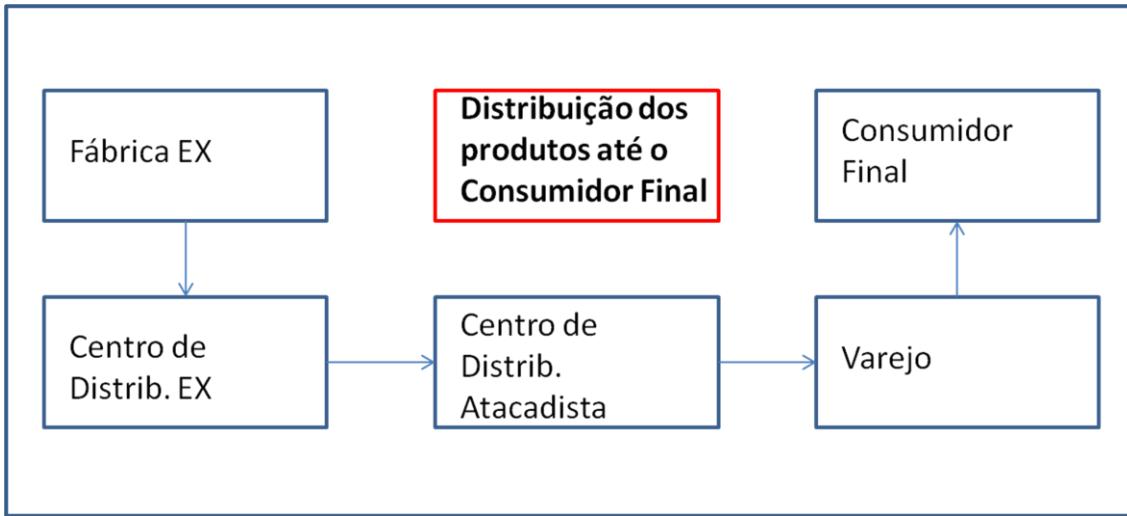


Figura 5 - Distribuição dos produtos até o consumidor final

1.2. ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

Um desafio constante para empresas de grande porte é manter uma estrutura organizacional eficiente. As características do mercado de bens de consumo e a escala da EX levaram-na a adotar uma estrutura que facilitasse tanto o posicionamento das marcas em nível global quanto a competição nos mercados em nível nacional e regional.

A EX tem três pilares organizacionais. As Unidades Globais (UGs) são responsáveis pelo desenvolvimento de produtos, manufatura e marketing. Estão separadas por categorias de produto. As categorias atuais são: Beleza; Cuidados do Homem; Saúde; Cuidados da Casa e Cuidados com a Roupa; Cuidados do Bebê e Cuidados da Família.

Cada UG gerencia um portfólio de marcas e estratégias específicas para cada marca. Essa pode ser considerada a função principal das UGs. No entanto, como o resultado econômico é atribuído às UGs, todas as demais funções também são gerenciadas de forma integrada. Ou seja, a estratégia da cadeia de suprimentos e a manufatura tem de estar alinhada com as estratégias de marketing. As UGs devem definir, por exemplo, onde estarão localizadas as fábricas dos produtos de cada categoria, e de onde os países devem exportar caso não haja produção interna.

No entanto, as estratégias globais não podem ser aplicadas em todos os mercados da mesma forma. As características culturais, sociais e econômicas de cada país devem ser levadas em conta.

O segundo pilar organizacional atende a mercados específicos. A unidade responsável pela implementação e adaptação da estratégia global é a Unidade Local (UL). As ULs são divididas por região geográfica. Atualmente, as ULs são: América do Norte; Europa Ocidental; Europa Oriental e Central, África e Oriente Médio; América Latina; Ásia e Oceania. Cada região possui um Presidente e está sediada em um país da região.

As ULs estudam os consumidores e clientes de suas regiões e implementam as estratégias globais com base nas peculiaridades regionais. Essa unidade cria parcerias com o mercado de varejo para criar canais específicos para a venda de cada produto.

A Figura 6 exemplifica a estrutura organizacional. Cada Unidade Global é responsável por um portfólio de marcas. As Unidades Locais verificam se os mercados locais receberiam essas marcas da forma esperada e adaptam a estratégia global, tendo em mente as características dos consumidores.

		Unidades Locais			
		1	2	3	4
Unidade Global 1	Marca A	-	✓	-	✓
	Marca B	✓	-	-	-
Unidade Global 2	Marca C	-	✓	✓	-
	Marca D	-	-	✓	-

Figura 6 - Exemplo de estrutura organizacional

No exemplo da Figura 6, a Unidade Global 1 gerencia as marcas A e B, enquanto a Unidade Global 2 gerencia outras duas marcas, C e D. As Unidades Locais 2 e 4 do exemplo consideram que a marca A irá apresentar resultados positivos se for adaptada ao mercado local, enquanto as Unidades Locais 1 e 3 não comercializam essa marca.

O último pilar organizacional é a Unidade de Suporte (US). Esta unidade é responsável por prover tecnologias, processos e ferramentas que permitam às UGs e ULs desempenharem seus papéis da melhor forma possível. Por ser uma unidade global, encontra soluções a custos baixos, com economia de escala.

1.3. CUSTOMIZAÇÃO

Ao longo de 2011 e 2012, foi estudado o departamento de customização, que está inserido na área de logística, sob a Unidade Local da América Latina. Sua principal função é desenvolver produtos promocionais e gerenciar sua produção.

Exemplos de produtos promocionais são:

- Leve 3, Pague 2 (três produtos em uma mesma embalagem pelo preço de dois)
- Conjunto Shampoo + Condicionador grátis
- Conjunto com quatro pacotes de fralda em uma caixa (preço com desconto)
- Conjunto com uma unidade de fralda + um brinde

O departamento realiza também outras operações, como correção na embalagem de produtos, nacionalização (devido à língua impressa na embalagem do produto ser diferente da língua do país onde será vendida, requerimentos do ministério da saúde, informações que só são necessárias no Brasil, etc), retrabalhos, mudanças diversas na embalagem, entre outros.

Através da venda de produtos customizados, a EX consegue aumentar a sua participação no mercado e o conhecimento que o público tem da marca, criar lealdade entre o consumidor e o produto e encorajar a experimentação de novos produtos (*trial*). Mais de 10% do volume vendido no país pela EX é advindo da customização, o que reflete a relevância do departamento no resultado da empresa.

Os fornecedores de customização não são os mesmos fornecedores que suprem as necessidades das demais atividades da empresa. O departamento de compras da EX negocia separadamente com esses fornecedores. Isso ocorre por que a customização requer maior flexibilidade e menor tempo de resposta dos fornecedores, e muitas vezes para volumes pequenos e em maior variedade.

Os clientes globais frequentemente solicitam produtos customizados exclusivos para se diferenciarem dos demais locais onde os produtos da EX são comercializados. É incomum encontrar produtos customizados em pequenos mercados e em drogarias menores.

Alguns termos utilizados no decorrer do trabalho serão explicados a seguir:

- Customizado: Produto desenvolvido e gerenciado pelo departamento de customização. Pode ter data de início e fim de produção já definidos, ou ser produzido indefinidamente. Cada customizado é visto como um SKU pela EX.
- Semi-acabado: Produto não-promocional produzido pela empresa que irá compor um customizado.

- Material de embalagem: Embalagem que irá compor um customizado ou que irá servir como forma de agrupar e proteger durante o transporte. As tecnologias utilizadas mais comuns são: saco plástico, corrugado (caixas pardas, geralmente apenas para transporte, ou coloridas, geralmente utilizadas tanto para transporte quanto no ponto de venda), etiqueta, cartuchos (embalagens de papel) e filme termo-encolhível (*shrink*).
- Brinde: Um item geralmente grátis que irá compor o customizado.
- Fator SU: valor atribuído a cada customizado, que é a soma dos fatores SU dos semi-acabados que o compõe. O fator SU representa a frequência com que um americano médio utiliza cada produto. Essa unidade é utilizada por toda a empresa para poder comparar resultados de categorias diferentes de produtos. Sua unidade é: SU / unidade de customizado.

Para desempenhar suas tarefas, o departamento de customização está dividido em dois setores: desenvolvimento de iniciativas e planejamento de produção. O setor de iniciativas gerencia a criação de produtos novos até o momento em que a primeira caixa é produzida. Já o setor de produção coordena com os fornecedores os cronogramas de produção e entrega dos materiais, monitora a produção de semi-acabados nas fábricas da EX e avalia qual é a capacidade produtiva das empresas contratadas. Assim, pode-se ajustar as linhas e atender da melhor forma a demanda.

Produtos promocionais têm grande variedade e baixo volume. Por esse motivo, é economicamente e tecnicamente inviável que a produção seja feita de forma automatizada como os demais produtos da EX. A produção é realizada ou em linhas semi-automáticas internas à empresa ou em empresas contratadas que são especialistas nesse tipo de produção. A produção envolve diversas etapas manuais, com auxílio de máquinas ou módulos semi-automáticos que necessitam de operação direta. Cada linha de produção manual tem capacidade de agregar módulos para atender a tecnologias de embalagem diferentes. Essas linhas operam em paralelo e têm possibilidade de se modificar, caso certos módulos sejam agregados. Cada configuração de linha possui uma denominação informal própria. Na configuração padrão, as linhas são denominadas linhas de “esteira”, onde não há nenhum módulo agregado. A linha de “esteira” é composta por uma mesa de cinco a quinze metros de comprimento, que contém uma esteira em toda a sua extensão. No exemplo da figura 7, uma

linha de “esteira” pode se transformar em uma linha de “saco plástico”, caso o módulo da seladora seja agregado a ela, ou em uma linha de “filme termo-encolhível”, caso o módulo do túnel de aquecimento seja agregado a ela. Nem todas as linhas podem produzir todos os tipos de produto.

Existe um número limitado de cada módulo em cada empresa. Como as empresas podem ter outros clientes, não cabe à EX definir como cada empresa contratada deve dispor seus módulos.

Quando a produção de produtos promocionais é feita pela própria EX, o planejamento de materiais e a programação da produção não são realizados pelo departamento de customização da EX. O presente trabalho se aplica quando a produção é feita em empresas contratadas apenas.

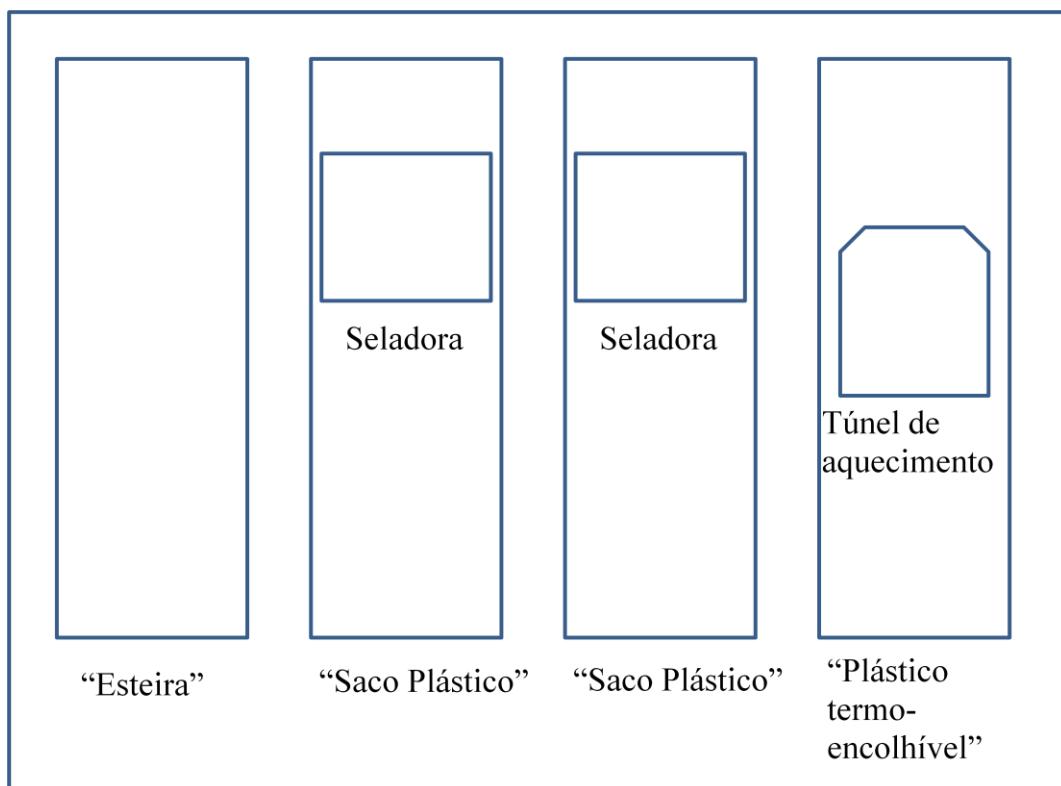


Figura 7 - Tipos de linha semi-automática

1.4. ESTÁGIO

O programa de estágio na EX permite que o estagiário conheça diversos departamentos dentro da área escolhida, para que se compreenda melhor as interfaces entre as áreas. Além disso, é importante para que seja conhecida a cultura da empresa, o que se espera de um colaborador contratado e para que o estagiário realize treinamentos de desenvolvimento pessoal e profissional.

O estágio foi realizado durante 2011 e 2012, no departamento de customização. No cargo de desenvolvedor de iniciativas, o autor gerenciou duas categorias de produtos customizados: Cuidados do Bebê e Cuidados Femininos. Além de administrar a criação de novos produtos nessas categorias, foram realizados projetos de redução de custos, melhoria na produtividade dos produtos, melhoria na eficiência de armazenagem dos produtos e criação de ferramentas automáticas em Excel (VBA) para diversas finalidades.

As informações e resultados apresentados neste trabalho tem o consentimento do supervisor imediato do autor, e estão de acordo com as políticas da empresa.

Capítulo 2

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Nesse capítulo será aprofundado o estudo sobre o departamento de customização, especificamente no planejamento da produção. O contexto do setor analisado será apresentado, assim como o objetivo do trabalho e sua relevância.

2.1. CONTEXTO

Para que os objetivos do trabalho fiquem claros, é necessário que seja analisado com mais detalhe o processo seguido pelos planejadores de produção. Além de acompanhar a produção diária e semanal, os planejadores devem traçar planos mensais e analisar a necessidade de expansão de capacidade produtiva para os próximos meses.

A primeira etapa é obter dados sobre quais produtos devem ser produzidos, suas demandas, qual tecnologia de embalagem será utilizada para cada produto e quais serão os fornecedores.

A partir da demanda dos produtos customizados, os fornecedores são acionados, respeitando seus prazos de produção, para que entreguem os materiais de embalagem. É necessário um monitoramento contínuo dos fornecedores, o que permite ao planejador entender quando poderá iniciar a produção de cada customizado, uma vez que os materiais de embalagem são os insumos básicos da produção.

Paralelamente, o planejador de produção deve monitorar a disponibilidade de produtos não-promocionais produzidos pela EX e que irão compor o customizado.

As etapas descritas acima são feitas diariamente. Para que as empresas contratadas para a produção tenham visibilidade da demanda futura, no entanto, deve ser realizado um plano de produção para o mês seguinte e uma previsão para os próximos meses. Esse plano é revisado algumas vezes por semana e contém os produtos que serão produzidos em cada empresa contratada, além da quantidade de cada produto, a data e ordem de produção e a tecnologia de embalagem.

O plano de produção permite à empresa contratada entender quantas linhas deve dedicar exclusivamente à EX, uma vez que muitas dessas empresas possuem outros clientes, e podem não ter capacidade produtiva reservada. Por esse motivo, é necessário que a EX informe com a maior antecedência possível qual deve ser o plano de produção mensal.

Para fazer o plano de produção do mês seguinte, o planejamento de produção informa a demanda mensal para as empresas produtoras dos customizados, para saber se existe capacidade de produzir o volume inteiro alocado a elas. Caso não haja capacidade produtiva, cabe ao planejador entender se existe capacidade em outra empresa (a disponibilidade de empresas parceiras é limitada), se há possibilidade de pagar por horas extras na empresa original ou se existe possibilidade de a empresa contratar mais pessoas.

Após a revisão da capacidade produtiva, caso ainda não seja possível produzir toda a demanda, o planejador deve adotar algum critério para decidir como montar o plano de produção.

A Tabela 1 ilustra um exemplo de plano de produção com horizonte de 1 semana. O volume a ser produzido de cada produto, por cada linha e em cada dia. No exemplo, 500 unidades do Produto 1 serão produzidas na Linha 1 no dia 1 de janeiro.

Esse plano é montado pelo planejador de produção e é enviado à empresa contratada para verificação da capacidade produtiva.

Linha 1							
Produto	01/jan	02/jan	03/jan	04/jan	05/jan	06/jan	07/jan
1	500			500	300		
2	200	400	600		300		
3							
4							
Linha 2							
Produto	01/jan	02/jan	03/jan	04/jan	05/jan	06/jan	07/jan
1							
2							
3	100	500	400	300	200		
4	300			200	200		

Tabela 1 - Exemplo de plano de produção

2.2. OBJETIVO

O tempo estimado para montagem do plano de produção mensal é de quatro horas para o plano principal e trinta minutos diários para revisão.

Isso leva em conta a montagem de *um* cenário, que dependeu da lógica empregada pelo planejador e de informações de Marketing e Vendas sobre os produtos com maior

prioridade. O foco principal é atender à demanda inteira, priorizando os produtos identificadas.

O planejador utiliza critérios subjetivos e que variam de um planejador para outro. Com isso, os resultados dependerão da experiência do planejador e dos critérios escolhidos. Assim, se um planejador for substituído por outro colaborador, a experiência adquirida é perdida.

Além disso, por não ter uma ferramenta simples, o planejador monta as planilhas manualmente, contendo a sequência e quantidade de cada produto a produzir, geralmente com horizonte de um mês.

O objetivo desse trabalho é solucionar o problema do planejamento de produção em uma empresa multinacional do setor de bens de consumo. Para tal, será criado um modelo matemático que calcule a sequência de produção, assim como as quantidades de cada lote produtivo, buscando minimizar o não-atendimento de demanda e respeitando as restrições impostas. Além disso, será avaliado como o modelo se comporta nas condições reais encontradas na EX através de resultados computacionais de cenários práticos.

O resultado é a quantidade de cada produto e a ordem em que eles devem ser colocados em cada linha de produção.

Além de economizar o tempo do planejador de produção com a montagem do cenário de produção e chegar a uma sequência de produção mais próxima do ideal, o modelo permitirá a comparação entre diversos cenários e reduzirá o impacto causado quando ocorre troca de um planejador de produção, uma vez que a experiência dos planejadores atualmente tem grande impacto nas considerações feitas na montagem do cenário.

Capítulo 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo apresenta-se uma breve revisão da literatura existente que aborda o problema de dimensionamento e sequenciamento simultâneo em linhas de produção paralelas. Contém um histórico da evolução dos problemas estudados na literatura, até chegar ao problema-base da formulação que será apresentada no capítulo 4 deste trabalho.

3.1. HISTÓRICO

Considere uma situação em que exista uma demanda determinística para uma variedade de produtos. Esses produtos serão produzidos em linhas que operam em paralelo. Cada linha poderá possuir características específicas, sendo capaz de produzir um certo número de produtos.

Deve ser tomada uma decisão com relação à ordem em que esses produtos devem ser produzidos, assim como o tamanho dos lotes de produção.

As soluções encontradas para problemas como esse evoluíram do modelo do Lote Econômico de Compra (LEC ou EOQ em inglês), segundo Drexel (1997). Esse modelo assume apenas um tipo de produto, que tem uma demanda conhecida e constante. Não há restrições de capacidade produtiva. O tempo é contínuo e o horizonte de tempo é infinito. A solução ótima, considerando essas hipóteses, é facilmente encontrada.

Como as hipóteses do LEC não são verificadas na maioria dos casos reais, era necessário que se criasse um modelo que contemplasse restrições de capacidade. Ainda considerando demanda constante, tempo contínuo e horizonte de tempo infinito, o ELSP (*Economic Lot Scheduling Problem*) é um problema de máquina única, mas com N produtos. Esse problema foi formulado em por Rogers (1958 apud Drexel, 1997). Elmaghraby (1978 apud Drexel, 1997) faz uma análise aprofundada do modelo, para solucionar os casos de infactibilidade.

O EOQ evoluiu também em outra direção. O Problema Wagner-Whitin considera um horizonte de planejamento finito, que é dividido em diversos períodos discretos. A demanda é definida por período. Esse problema vai em direção a uma demanda dinâmica. No entanto, como não supõe restrição de capacidade, pode ser decomposto em vários problemas de produto único. As soluções para esse modelo foram estudadas posteriormente por Aggarwal e

Park (1993, apud Drexl 1997), Federgruen e Tzur (1991, apud Drexl 1997) e Wagelmans, van Hoesel e Kolen (1992, apud Drexl 1997).

A próxima geração de modelos integrou dimensionamento de lotes com sequenciamento. O CLSP (*Capacitated Lot-Sizing Problem*) é uma extensão do Problema Wagner-Whitin, pois adiciona restrições de capacidade. É um problema de produtos múltiplos. O CLSP é um problema NP-difícil, pois já torna-se muito mais complexo de solucionar. No entanto, essa solução não conteria o elemento do sequenciamento. O procedimento usual, segundo Drexl (1997), era resolver o CLSP e então aplicar algum método de sequenciamento de forma separada.

Uma forma de possibilitar o sequenciamento no modelo CLSP era sub-dividir cada período em micro-períodos. Essa estratégia levou ao DLSP (*Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem*). A hipótese fundamental do DLSP, segundo Drexl, era assumir uma produção “tudo ou nada”. Somente um item pode ser produzido por micro-período e, se houver produção, ela deve ocupar toda a capacidade produtiva. Para aplicação prática, cada período representaria uma hora ou um turno.

Quadt (2008) propõe o modelo CLSPL-BOPM (*Capacitated Lot-Sizing Problem with Linked lot-sizes, Back-Orders and Parallel Machines*). Esse problema é de Programação Inteira Mista. São consideradas máquinas idênticas, que operam em paralelo. Determina-se apenas o primeiro e último produto a entrar em produção em cada linha e em cada período. A sequência dos demais produtos não é considerada.

Todos os problemas apresentados até aqui consideram hipóteses que fogem da realidade de muitas das indústrias de grande porte. Simplificações foram feitas não apenas para controlar o tempo de computação de soluções, mas pela dificuldade de modelar problemas reais. Torna-se necessária a formulação de um problema genérico abrangente, que possa ser adaptado para aplicação prática.

Meyr (2000) sugere um problema que integra dimensionamento e sequenciamento de lotes, o GLPST (*General Lot-Sizing and Scheduling Problem with sequence-dependent Setup Times*). Esse problema se aproxima do problema enfrentado pela EX, mas com algumas simplificações. O GLPST considera que existe apenas uma linha de produção, que possui uma restrição de capacidade produtiva. Essa capacidade é reduzida ainda pela transição entre produtos, devido ao tempo de *setup* das linhas. Assim, o tempo de *setup* depende da ordem dos produtos. O GLPST considera que o número de produtos e lotes por período de tempo pode variar sem restrições. Para tal, divide o horizonte de planejamento em macro-períodos de duração definida. Cada macro-período é composto por um número pré-definido de micro-

períodos que não se sobrepõem. Segundo a formulação de Meyr, a duração de um micro-período será uma variável de decisão, expressa pela quantidade produzida naquele micro-período. Um “lote” de produção é definido por uma sequência de micro-períodos com o mesmo produto, mesmo que esses micro-períodos estejam em macro-períodos distintos. Um macro-período pode conter micro-períodos ociosos. Portanto, os micro-períodos ditam a ordem de produção, assim como o tamanho dos lotes produtivos.

O modelo proposto por Meyr tem como função objetivo minimizar os custos de estoque e os custos de *setup*. As restrições impedem que demanda não atendida de um macro-período seja acumulada para o macro-período seguinte.

Em 2001, um ano após formular o GLSPST, Meyr propõe uma extensão do problema para diversas linhas que trabalham em paralelo. Os períodos ainda são divididos em micro-períodos de duração variável, que indicam a sequência e dimensão de cada lote, mas cada linha possui sua própria configuração de produção, uma vez que um produto pode ser produzido em mais de uma linha. O “lote” de produção tem a mesma definição que no problema anterior, mas vale notar que o lote tem que ser produzido em uma mesma linha. Ou seja, mesmo que haja produção simultânea de um mesmo produto em linhas diferentes, o lote depende da produção contínua de um mesmo produto em uma mesma linha. Essa formulação denomina-se GLSPLL (*General Lot-Sizing and Scheduling Problem for Parallel Production Lines*).

No modelo de Meyr, como a demanda deve ser atendida para todos os produtos em todos os períodos, em situações reais existe a possibilidade de não haver soluções factíveis.

3.2. PROBLEMA-BASE

Kawamura (2011) propõe uma adaptação do modelo GLSPLL para adicionar a permissão de atrasos de entrega e a restrição de armazenagem. Assim, caso haja demanda não-atendida em algum período, deve-se pagar um custo, e a demanda é transferida para o período seguinte, podendo ser atendida posteriormente. Essas modificações foram necessárias para que a situação real estudada por Kawamura fosse representada de forma mais fiel pelo modelo. O modelo modificado é o GLSPLL_W.

Uma vantagem do modelo de Kawamura é que caso não seja possível atender a toda a demanda, não haverá infactibilidade. No modelo GLSPLL, como existe um conjunto de

restrições que impõem que a demanda sempre seja atendida, não existe necessariamente uma solução factível.

Na EX, as linhas podem ser diferentes entre si. Cada linha tem a possibilidade de produzir certos tipos de produto, dependendo da tecnologia de embalagem dos produtos e dos módulos que são agregados à linha. Meyr considera linhas diferentes, mas apenas em relação à custos de produção. Ou seja, todas as linhas poderiam produzir todos os produtos, mas com custos diferentes. Já Kawamura considera famílias de produto distintas, sendo que cada linha pode produzir apenas os produtos de determinada família. Além disso, Kawamura considera que máquinas que produzem produtos de uma mesma família podem ter diferenças técnicas entre si, representando custos de produção diferentes.

O problema descrito por Kawamura assemelha-se ao problema estudado nesse trabalho e será utilizado como base.

A empresa contratada pela EX para realizar a produção define um preço fixo unitário para cada produto. Portanto, o espaço ocupado com armazenagem e os custos associados, assim como os custos de produção e *setup*, não influenciam diretamente no valor que a EX irá pagar. No entanto, Kawamura considera esses custos em sua formulação. Dessa forma, o modelo de Kawamura foi modificado para representar essa realidade.

O problema estudado por Kawamura é NP-difícil, segundo Wolsey (1998). Problemas desse tipo geralmente são tratados por heurísticas.

3.3. ESTRATÉGIA PARA SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA CONSIDERADO

O modelo utilizado para descrever o problema considerado será uma adaptação do modelo de Programação Inteira Mista de Kawamura (2011). Por se tratar de um trabalho voltado a um ambiente real é necessário que se verifique se as soluções de cenários com as dimensões reais encontradas na EX possam ser encontradas em um tempo razoável. Para tal, serão utilizadas técnicas da Pesquisa Operacional.

A Pesquisa Operacional (PO) é uma área de conhecimento que utiliza-se da aplicação de métodos analíticos para auxiliar no processo decisório. Sua utilização na solução de problemas complexos está ligada ao uso da tecnologia. O modelo proposto é de alta complexidade, e, assim, sua solução irá depender do poder computacional disponível e dos *softwares* utilizados. Utilizou-se o software *What'sBest!* na versão 11.0 em conjunto com o *Microsoft Windows 7*.

Os problemas de Programação Inteira Mista podem ser resolvidos de diversas formas. O *Branch-and-Bound* é um dos métodos mais comuns, e segue o princípio de “dividir e conquistar”, segundo Wolsey (1998). As restrições de integralidade das variáveis são removidas, e o problema é resolvido como se fosse um problema de Programação Linear (PL). Sabe-se que a solução do problema de PL será melhor ou igual à solução considerando a integralidade. Essa solução será o limite superior da solução com variáveis inteiras. O problema de Programação Linear é então sub-dividido em outros problemas de PL, até que obtenha-se soluções inteiras para o problema. A melhor solução inteira factível encontrada até o momento será o limite inferior. A melhor solução inteira encontrada no fim das iterações será o ótimo global do problema original de Programação Inteira Mista.

O *software* utilizado irá utilizar o método *Branch-and-Bound* para solução do problema considerado, que será modelado no capítulo 4.

Capítulo 4

4. MODELO MATEMÁTICO

Nesse capítulo, será apresentado o modelo de Programação Inteira Mista que representa o problema encontrado. A função objetivo e as restrições do modelo serão explicadas em detalhe, assim como as considerações que foram tomadas.

4.1. DESCRIÇÃO

A produção dos produtos customizados é feita em L linhas paralelas que podem agregar diversos módulos, de forma a estarem preparadas para a tecnologia de embalagem necessária. Como os tempos de *setup* dependem da ordem em que os produtos entrarão em linha, não basta que sejam definidos os tamanhos de cada lote de produto em cada linha; é necessário que se defina a sequência.

Para que o modelo conte com o sequenciamento, além do dimensionamento dos lotes, o tempo será dividido em períodos de duração pré-definida e sub-períodos de duração indefinida, contidos nos períodos. Dentro de cada sub-período, apenas um produto pode ser produzido. É permitido que um sub-período seja ocioso, ou seja, sem produção. Cada linha terá sua própria configuração de produção, com sub-períodos diferentes das demais linhas, ou seja, cada linha terá uma sequência de produção e tamanhos de lotes diferentes. Dessa forma, o modelo irá definir a sequência e dimensão de lotes de produção em todas as linhas.

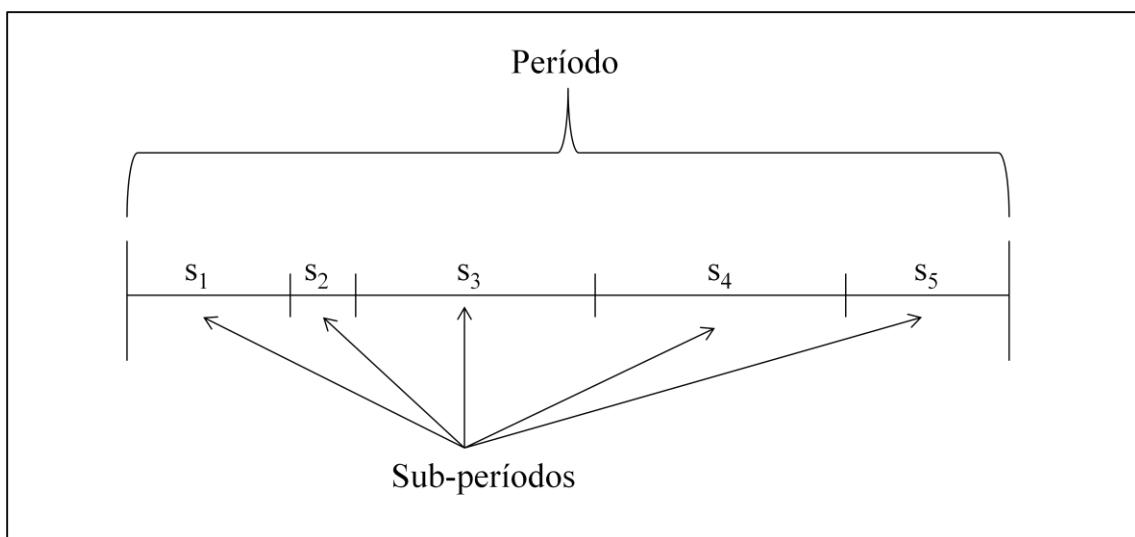


Figura 8 - Períodos e sub-períodos

Cada um dos N produtos possui uma demanda definida por período. Caso a demanda de um determinado produto não seja atendida em um período, a venda não é considerada perdida; o produto será entregue assim que estiver disponível. No entanto, há um custo para o não-atendimento da demanda. Cada produto possui um custo diferente por unidade de demanda não-atendida.

Os custos da produção em si, assim como os custos de *setup* e armazenagem, não serão levados em consideração, devido à natureza do negócio. No momento em que está sendo montado o plano de produção, já foi aprovado um orçamento para aquele produto, que é independente do atendimento da demanda, espaço ocupado com armazenagem e *setups*. A empresa contratada para a produção cobra da EX um valor pré-fixado por produto, que também não depende de quando será produzido cada produto. Assim, não há sentido em considerar esses custos.

A função objetivo, portanto, procura minimizar a soma total das penalidades associadas ao não-atendimento da demanda. Não existe uma restrição que garanta que o modelo não apontará um *setup* quando ele não ocorre. Por esse motivo, foi incluído na função objetivo um termo que minimiza a soma das ocorrências de *setup*. A soma é dividida pelo parâmetro M para garantir que a razão será menor do que 1.

4.2. FORMULAÇÃO

Considere um ambiente onde N produtos serão produzidos em L linhas paralelas, durante T períodos de duração pré-definida. Os períodos serão divididos em S sub-períodos. Em cada sub-período, no máximo um produto poderá ser produzido na linha l . A variável q_{ils} indica a quantidade que será produzida do produto i na linha l durante o sub-período s .

A variável binária x_{ils} indica se a linha l está preparada para produzir o produto i durante o sub-período s . Cada linha estará preparada para apenas um produto em cada sub-período.

Todas as linhas tem o mesmo tempo útil para produção durante cada período t . Esse tempo útil dependerá do número U_t de turnos disponíveis, que pode variar de um período para outro, e do tempo disponível por turno, TR .

A demanda d_{it} de cada produto i foi pré-determinada para cada período t .

O tempo de *setup* st_{ij} depende das tecnologias de embalagem dos produtos i e j .

Quando há troca de tecnologia de embalagem, a linha deverá ser fisicamente modificada, com

adição ou remoção de um módulo, e portanto, o tempo de *setup* será maior. No problema estudado, a variável st_{ij} só poderá assumir o valor de TS1 e TS2. TS1 é o tempo de *setup* quando não há troca de tecnologia e TS2 é o tempo de *setup* quando há troca de tecnologia. A variável y_{ijls} indica se haverá *setup* na linha l , no sub-período s , do produto i para o produto j .

O modelo é apresentado a seguir:

Índices

i, j : Produtos

l : Linhas

s : Sub-períodos

t : Períodos

Variáveis

q_{ils} : quantidade produzida do produto i na linha l no sub-período s

x_{ils} : 1, se a linha l está preparada para produzir o produto i no subperíodo s ; 0, caso contrário

y_{ijls} : 1, se há tempo de *setup* do produto i para o produto j na linha l no sub-período s ; 0, caso contrário

I_{it}^+ : quantidade de produto i em estoque no final do período t

I_{it}^- : quantidade de produto i com demanda não atendida no final do período t

Parâmetros

d_{it} : demanda do produto i que deve ser atendida até o fim do período t

V_i : custo de atraso do produto i

p_{il} : tempo consumido para produzir uma unidade do produto i na linha l

S_{lt} : conjunto de sub-períodos contidos no período t na linha l

SP_l : conjunto de produtos que podem ser produzidos na linha l

$TS1$: tempo de *setup* quando não há troca de tecnologia

$TS2$: tempo de *setup* quando há troca de tecnologia

TR : tempo real médio de produção de um turno

U_t : número de turnos úteis do período t

st_{ij} : tempo de *setup* para produção do produto j imediatamente após o produto i

I_{i0}^+ : quantidade de produto i em estoque no início do planejamento

I_{i0}^- : quantidade de produto i com demanda não-atendida no início do planejamento

X_{il0} : 1, se a linha l está preparada para produzir o produto i no início do planejamento; 0, caso contrário

M : adimensional para controle do tempo total de *setup*

Modelo:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T I_{it}^- \cdot V_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S y_{ijls} / M \quad (1)$$

Sujeito a:

$$I_{i,t-1}^+ - I_{it}^+ - I_{i,t-1}^- + I_{it}^- + \sum_{l=1}^L \sum_{s \in S_{lt}} q_{ils} = d_{it} \quad i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in SP_l} \sum_{s \in S_{lt}} p_{il} \cdot q_{ils} + \sum_{i \in SP_l} \sum_{j \in SP_l} \sum_{s \in S_{lt}} s t_{ij} \cdot y_{ijls} \leq TR \cdot U_t \quad l = 1, \dots, L; t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$p_{il} \cdot q_{ils} \leq TR \cdot U_t \cdot x_{ils} \quad i \in SP_l; l = 1, \dots, L; t = 1, \dots, T; s \in S_{lt} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in SP_l} x_{ils} = 1 \quad l = 1, \dots, L; s = 1, \dots, S \quad (5)$$

$$y_{ijls} \geq x_{il,s-1} + x_{jls} - 1 \quad i, j \in SP_l; l = 1, \dots, L; s = 1, \dots, S \quad (6)$$

$$x_{il0} = 0 \quad i = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L \quad (7)$$

$$x_{ils} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L; s = 1, \dots, S \quad (8)$$

$$I_{it}^+, I_{it}^-, y_{ijls} \geq 0 \quad i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L; t = 1, \dots, T; s = 1, \dots, S \quad (9)$$

$$q_{ils} \geq 0, \text{ inteiro} \quad i = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L; s = 1, \dots, S \quad (10)$$

A função objetivo (1) procura minimizar a demanda não-atendida. No entanto, caso toda a demanda seja atendida, não existe restrição que limite o tempo total de *setup*. Para tal, criou-se o segundo termo da função objetivo, onde o somatório de y deve ser minimizado. Para que esse termo não tenha ordem de grandeza semelhante ao primeiro, onde procura-se minimizar a demanda não-atendida, o somatório de y é dividido por M , sendo M um parâmetro que transforme o termo em um número entre 0 e 1. Para tal, M deve ser o valor máximo que o somatório de y pode atingir. Como y assumirá sempre os valores 0 ou 1, M será o produto de N , $(N-1)$, L e S . O primeiro termo da função objetivo será um número inteiro, portanto, não haverá interferência entre os dois termos da função objetivo.

O conjunto de restrições (2) faz o equilíbrio entre a demanda, a produção, os estoques e a demanda não-atendida. O conjunto de restrições (3) garante que o tempo gasto com a produção mais os *setups* não vai exceder o tempo disponível em cada linha. O conjunto de restrições (4) garante que uma linha só irá produzir o produto i no sub-período s se estiver preparada para tal. O conjunto de restrições (5) estipula que a linha l estará preparada para a produção de somente um produto durante o sub-período s .

O conjunto de restrições (6) indica se haverá tempo de *setup* na linha l quando houver troca do produto i para o produto j . Não há necessidade de fixar a variável y como binária, uma vez que a soma de $x_{il,s-1} + x_{jls} - 1$ terá como resultado zero ou um, conforme a tabela abaixo, contendo as combinações possíveis da variável x_{ils} :

$x_{il,s-1}$	x_{jls}	$x_{il,s-1} + x_{jls} - 1$	$y_{ijls} \geq x_{il,s-1} + x_{jls} - 1$
0	0	-1	0 ou 1
0	1	0	0 ou 1
1	0	0	0 ou 1
1	1	1	1

Como na função objetivo procura-se minimizar a somatória de y , quando y puder ser 0 ou 1 pelo conjunto de restrições (6), deverá assumir o valor de 0. Portanto, só haverá *setup* se, em uma mesma linha, houver produção do produto j no sub-período seguinte à produção do produto i . Caso contrário, y assumirá o valor de 0.

O conjunto de restrições (7) estabelece que nenhuma linha está preparada para a produção no início do primeiro período. O conjunto de restrições (8) determina que a variável

x_{ils} é binária. O conjunto de restrições (9) indica que as variáveis I_{it}^+, I_{it}^- e y_{jils} são não-negativas. O conjunto de restrições (10) determina que a variável q_{ils} é inteira e não-negativa.

4.3. VALIDAÇÃO

Para que o modelo seja validado, um exemplo com um número reduzido de variáveis em relação a um cenário real será apresentado. Como cenários menores são mais simples de interpretar, os resultados são mais intuitivos. Caso houvesse algum erro no modelo, seria mais fácil captá-lo através da aplicação do modelo para um caso reduzido.

Para o exemplo, foram consideradas duas linhas produtivas, que produzem três produtos diferentes em paralelo. O cenário contempla apenas dois períodos, com cinco sub-períodos cada. Todos os parâmetros foram inseridos em tabelas utilizando-se o Microsoft Excel 2007 em conjunto com o *software* de otimização *What'sBest!* 11.0. Como o Excel é utilizado amplamente no meio empresarial, a escolha por essa ferramenta é justificada.

Para o problema em questão, considerou-se os parâmetros da Tabela 2.

Demand	Produto		
Período	1	2	3
1	110	110	120
2	40	40	40

Custo do Atraso	Produto		
	1	2	3
Custo	1.2	1.5	0.8

Tempo de prod.	Produto		
	1	2	3
Tempo (min)	1	0.7	0.9

Estoque inicial	Produto		
	1	2	3
Estoque	10	15	30

Tabela 2 - Parâmetros do problema-exemplo

Além disso, considerou-se que ambas as linhas podem produzir todos os produtos e que não há demanda não-atendida no início do horizonte de planejamento. Os tempos de *setup* são de 15 minutos para preparar a linha do produto 1 para o 2 e vice-versa, e 30 minutos para

demais *setups*. Cada linha tem 300 unidades de tempo como capacidade produtiva por período.

O número de sub-períodos considerados foi de cinco por período, apesar de haver apenas três produtos. Como o objetivo desse exemplo era validar o modelo, optou-se por considerar um número maior de sub-períodos para verificar como o modelo iria se comportar.

A solução ótima foi calculada em menos de 1 segundo, e expressa a quantidade que é produzida de cada produto, em cada linha, por sub-período.

Linha 1	Produto		
Sub-período	1	2	3
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	130
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
Linha 2	Produto		
Sub-período	1	2	3
1	0	135	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	100	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	40	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0

Tabela 3 - Lotes de produção do problema-exemplo (q_{ils})

Como não existe custo para armazenagem, pode-se notar que na solução apresentada na Tabela 3, a demanda somada do produto 2 dos períodos 1 e 2 é inteiramente atendida pela produção do período 1, considerando o estoque inicial existente. A vantagem dessa solução é que a produção termina o mais cedo possível. Na prática, isso representa menor risco, uma vez que podem ocorrer imprevistos na produção. A demanda inteira também foi atendida para os produtos 1 e 3.

O relatório de saída do *software* está no ANEXO 1.

Capítulo 5

5. OBTENÇÃO DE DADOS E EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Esse capítulo descreve como foram coletados os dados utilizados para a representação do problema. Em seguida, é realizado um teste considerando um cenário de dimensões encontradas na prática, para verificação do tempo computacional. São apresentadas as medidas tomadas para redução do tempo computacional.

5.1. LEVANTAMENTO DE DADOS

A EX mantém um histórico da demanda mensal de todos os seus produtos. Essa demanda é dividida entre diversos clientes, cada qual com um *mix* de produtos e demandas e datas para entrega. Essa demanda é obtida através de previsões e não representa os pedidos dos clientes. O departamento de customização recebe as informações já consolidadas de demanda de cada produto por período. Portanto, o parâmetro d_{it} é facilmente obtido. O custo do atraso de cada produto promocional (V_i) é dado pela soma dos custos de atraso dos produtos não-promocionais que o compõem.

Os seguintes parâmetros também são obtidos facilmente no sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*, ou Sistemas Integrados de Gestão Empresarial) da EX:

- Estoques iniciais – I_{io}^+
- Demanda não-atendida no início do planejamento – I_{io}^-
- Conjunto de produtos que podem ser produzidos em cada linha – SP_l

Os demais parâmetros serão obtidos a partir de informações fornecidas pelas empresas contratadas para produção:

- Tempos de produção – p_{il}
- Tempos de *setup* – $TS1$, $TS2$ e st_{ij}
- Tempo de produção útil por turno – TR
- Número de turnos disponíveis por período – U_t

O tempo total de produção de uma linha, durante um determinado período, é o produto do número de turnos disponíveis naquele período pelo tempo de produção útil por turno. Como nenhum desses dois parâmetros dependem da linha, pode-se concluir que todas as linhas tem o mesmo tempo útil para produção.

O parâmetro S , que indica o conjunto de sub-períodos contidos em cada período para cada linha, foi fixado para todos os cenários, ou seja, independentemente do período, todas as linhas terão o mesmo número de sub-períodos.

O número de sub-períodos considerado foi três. Para os cenários analisados, essa quantia de sub-períodos por período supre as necessidades. Caso o número de sub-períodos fosse aumentado, o número de variáveis do modelo iria aumentar significativamente, o que impactaria o tempo computacional.

Considerando o horizonte de planejamento utilizado, considerou-se que um período terá duração de uma semana. Todos os cenários considerados terão quatro períodos.

Para chegar ao número de sub-períodos por período, foi realizada uma análise do histórico produtivo de todas as empresas contratadas. O maior número de produtos distintos já produzidos durante quatro semanas (ou períodos) consecutivas, em uma mesma empresa, foi levantado, assim como o maior número de linhas simultâneas utilizadas pela EX em uma mesma empresa. Com isso, chegou-se a um número de sub-períodos por período que atendesse a maior empresa em seu mês mais movimentado, considerando ainda espaço para crescimento.

Para que o modelo proposto possa ser validado com exemplos de dimensão real, deve ser comparado com as soluções já encontradas pelos métodos atuais empregados pela EX. Para que possa haver comparação, deve-se verificar qual seria o valor da função objetivo do modelo proposto com a solução fornecida pelo método atual. Não deve-se comparar a produção real com a demanda, uma vez que a produção real sofre influências imprevisíveis, como quebras de máquina, falta de luz, sobre, etc. Será considerada a relação entre a demanda e a produção planejada.

Os dados foram levantados para 12 meses seguidos, de outubro de 2011 até setembro de 2012, na empresa contratada onde foi alocado o maior número de produtos diferentes por mês. Os tempos computacionais serão os mais elevados para essa empresa, uma vez que o número de variáveis será maior. Portanto, caso os tempos para cálculo sejam razoáveis, também o serão nos cenários das outras empresas.

A variável q_{ils} , que indica as quantidades produzidas, foi tomado como inteiro, enquanto a variável x_{ils} , que indica se a linha está preparada para produção de determinado produto, foi tomado como binário. As demais variáveis foram consideradas reais. Portanto, é um problema de Programação Inteira Mista.

O método utilizado pelo *software* para Programação Inteira Mista, *Branch-and-Bound*, tem seu tempo aumentado exponencialmente quando há grandes quantidades de variáveis

inteiras. Nota-se que no cenário-exemplo, como existem apenas 72 variáveis inteiras e 60 binárias, o tempo de processamento é baixo – menos de um segundo.

5.2. RESULTADOS PRELIMINARES

Para verificar se o tempo computacional iria elevar-se a valores inaceitáveis, considerando ainda a variável q_{ils} como inteira, o modelo foi expandido para contemplar a dimensão real encontrada na EX.

O teste foi realizado com os dados reais de outubro de 2011. As quantidades (q_{ils}) a serem produzidas foram restritas a números inteiros, enquanto a variável x_{ils} foi considerada binária. Nesse mês, havia 30 produtos distintos, a serem produzidos em três linhas.

Considerando a complexidade do problema, chegar a uma solução que esteja a 10% da solução ótima em um tempo razoável seria aceitável. Para reduzir o tempo computacional, mesmo no teste preliminar, o *software* possibilita que o usuário determine quando deve-se parar de investigar um sub-problema do *Branch-and-Bound*. Uma das restrições possíveis é a *Relative Optimality*, que define como critério de parada para investigação de um conjunto de nósulos uma diferença percentual entre a melhor solução inteira atual e a melhor solução possível do problema de Programação Linear daquele conjunto de nósulos. Nesse teste preliminar foi considerado 7% como aceitável.

O tempo computacional máximo aceitável seria de duas horas para cada cenário. No entanto, após 4h36m, a solução ótima ainda não havia sido encontrada, apesar de haver uma solução factível a partir da primeira hora de processamento. Considerando que em outros meses a quantidade de produtos e linhas poderia ser maior, o tempo de processamento ficou fora do esperado.

Esse tempo pode ser explicado pelo alto número de variáveis inteiras. Nesse teste, existiam ao todo 3000 variáveis inteiras, e outras 3000 binárias.

O relatório de saída do teste está no ANEXO 2.

5.3. ADAPTAÇÃO DO MODELO

Como o alto número de variáveis inteiras causou aumento exagerado do tempo de processamento, uma possível solução seria relaxar a variável inteira q_{ils} , permitindo que assumisse qualquer valor real positivo. Em seguida, a variável q_{ils} deve ser arredondada seguindo alguma técnica. O uso do relaxamento pode, em alguns casos, gerar uma solução inviável, uma vez que a região factível do problema relaxado é maior que a região factível do problema considerando as condições de integralidade.

No entanto, nos cenários considerados, essa técnica pode ser aplicada. Como as quantidades a serem produzidas são em geral valores com no mínimo quatro dígitos, o arredondamento para baixo das quantidades não afetará significativamente a função objetivo.

Além disso, considerando os produtos da EX e a natureza da produção semi-automática – os turnos de produção não são controlados com rigor absoluto, há tempo para descanso, almoço, etc. – a produção de uma unidade de qualquer produto consome um tempo irrelevante. Ou seja, caso fosse desejado, as variáveis de quantidade poderiam ser arredondadas para cima.

Há de se considerar ainda que a demanda é prevista, e não real. Os pedidos dos clientes não vão corresponder exatamente ao que foi previsto e, portanto, a falta de uma unidade de qualquer produto não causará impacto.

Como as quantidades serão número inteiros, os valores para estoques e demandas não-atendidas passarão a ser inteiros também, uma vez que o conjunto de restrições (2) faz o balanço entre essas variáveis. Pelos mesmos motivos citados acima, isso não fará com que a solução torne-se inviável.

A variável x_{ils} continua sendo binária. Assim, o problema ainda será de Programação Inteira Mista, mas deverá ter um tempo computacional muito reduzido.

Capítulo 6

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos após relaxamento do modelo para o horizonte de um ano, dividido em doze cenários mensais. Em seguida, as soluções encontradas são analisadas e comparadas com o planejamento feito seguindo o processo atual da empresa.

6.1. RESULTADOS OBTIDOS

O mesmo cenário de outubro de 2011 foi considerado, utilizando-se agora o modelo relaxado. O tempo de processamento, que era de mais de 4 horas, mas sem achar a solução ótima, passou para 55 segundos e com solução ótima. Portanto, o relaxamento reduziu o tempo de computação para um valor bem abaixo do máximo aceitável. Esses resultados estão ilustrados na Figura 9.

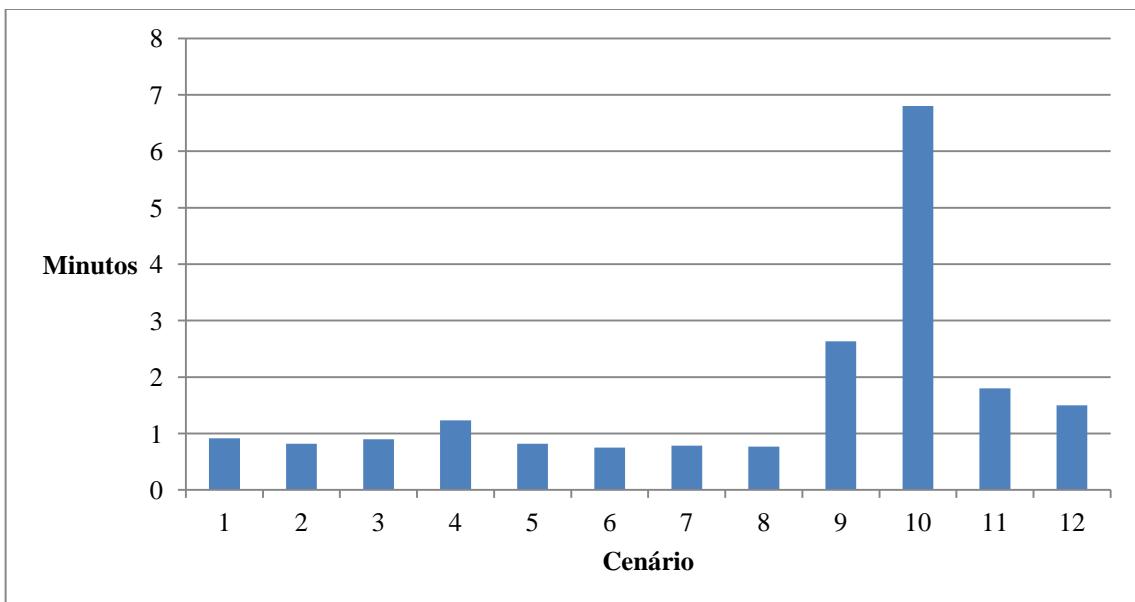


Figura 9 - Gráfico do tempo de processamento

O arredondamento para baixo do conjunto de variáveis que indicam a quantidade a ser produzida de cada produto não causou nenhum impacto na função objetivo. Isso pode ser explicado pelo fato de a demanda, que é um parâmetro de entrada, ser representada por um conjunto de números inteiros. Caso a quantidade de algum produto tenha uma parcela fracionária, como a demanda é inteira, o estoque do último período fará o balanceamento,

contendo a parte fracionária da quantidade a ser produzida. Os estoques não representam custo direto para a EX, e, portanto, não exercem influência sobre a função objetivo diretamente.

Com o modelo relaxado, foram solucionados todos os cenários de outubro de 2011 até setembro de 2012. Em 100% dos casos, a demanda foi inteiramente atendida para todos os produtos, portanto a função objetivo atingiu valores entre 0 e 1, uma vez que a ocorrência de *setups* está representada na parte decimal da função objetivo. Os relatórios de saída do *software* encontram-se no ANEXO 2.

6.2. COMPARAÇÃO COM A SOLUÇÃO ATUAL

A EX tem uma relação de parceria com as empresas que contrata para produzir seus itens promocionais. Essas empresas possuem diversas linhas, que nem sempre são dedicadas apenas para a EX. Elas podem ter outros clientes e distribuir as linhas como for melhor para atender ao conjunto dos clientes. No entanto, as empresas contratadas informam quantas linhas e turnos por período a EX pode considerar quando fizer seu planejamento.

Para evitar desgaste com as empresas contratadas e diminuir riscos, a EX adota uma política de conservadorismo para o planejamento de produção. A EX considera um indicador denominado C/D, que representa a razão entre a capacidade disponível de produção e a demanda. Esse indicador deve sempre estar acima de 1.3.

A razão inversa, D/C, indica qual percentagem do tempo disponível pode ser ocupado. Se C/D deve estar acima de 1.3, D/C deve estar abaixo de 77%.

O planejamento da produção seguindo os processos atuais da EX, para a empresa produtora contratada, nos meses considerados, também resultou em função objetivo entre 0 e 1 para os 12 cenários. No entanto, foi consumido um tempo menor da capacidade das linhas, devido ao sequenciamento ter sido feito de forma diferente. Assim, o indicador C/D será maior no modelo proposto. O gráfico abaixo demonstra quanto da capacidade total das linhas foi necessária para atender a demanda mensal.

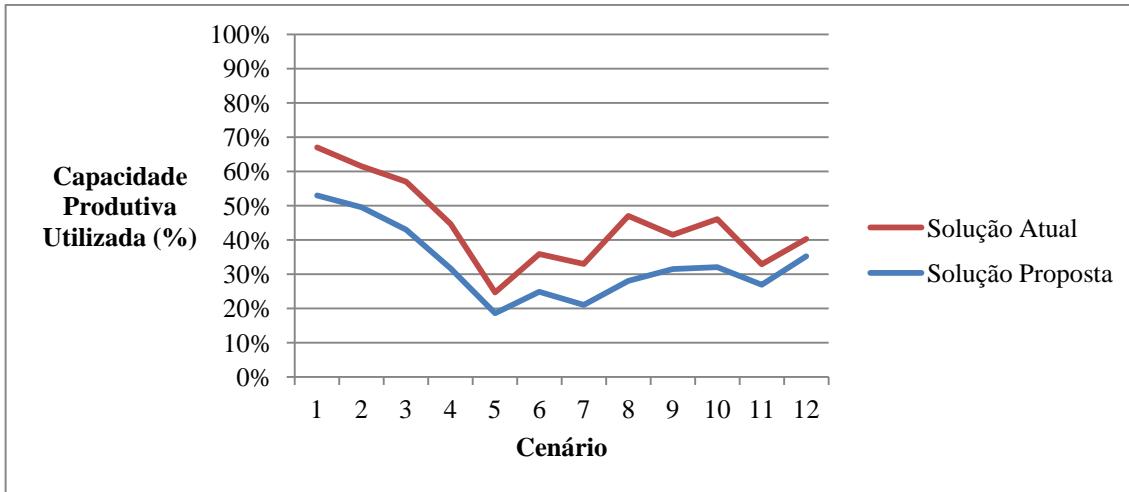


Figura 10 - Gráfico da capacidade produtiva utilizada (%)

Essa diferença explica-se pelo peso que os tempos de *setup* têm sobre o tempo total de utilização das linhas. O gráfico abaixo indica o impacto do *setup* em cada cenário, no modelo proposto.

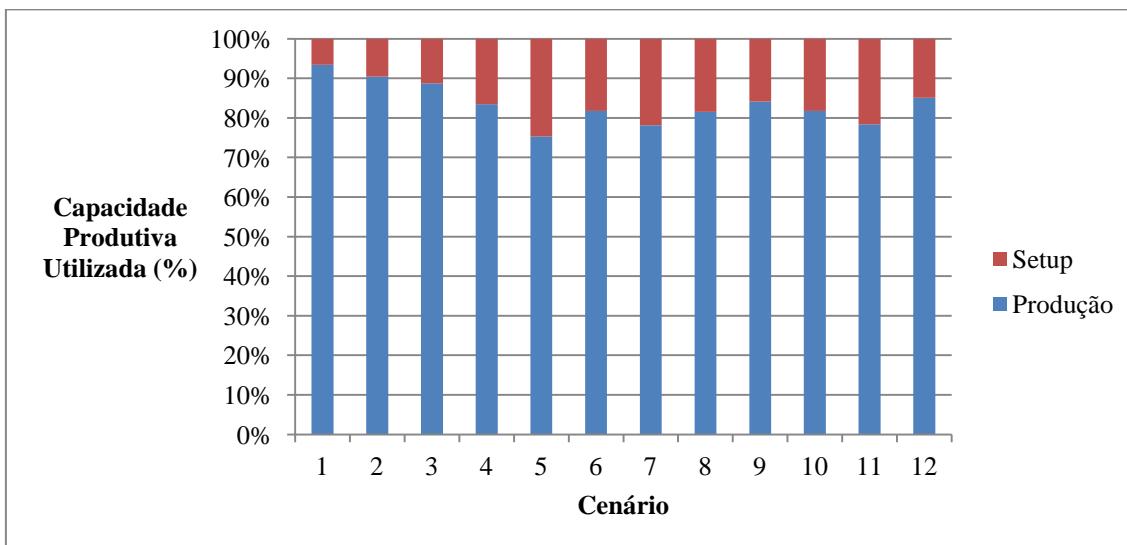


Figura 11 - Influência do tempo de *setup* no modelo proposto

Os *setups* ocuparam uma faixa de 6,6% a 24,7% do tempo total utilizado, considerando todas as linhas e períodos em conjunto, no modelo proposto. A média foi de 14,9%. O processo atual, por não levar em consideração o tempo de *setup*, apresenta tempos de *setup* mais impactantes sobre o tempo total utilizado.

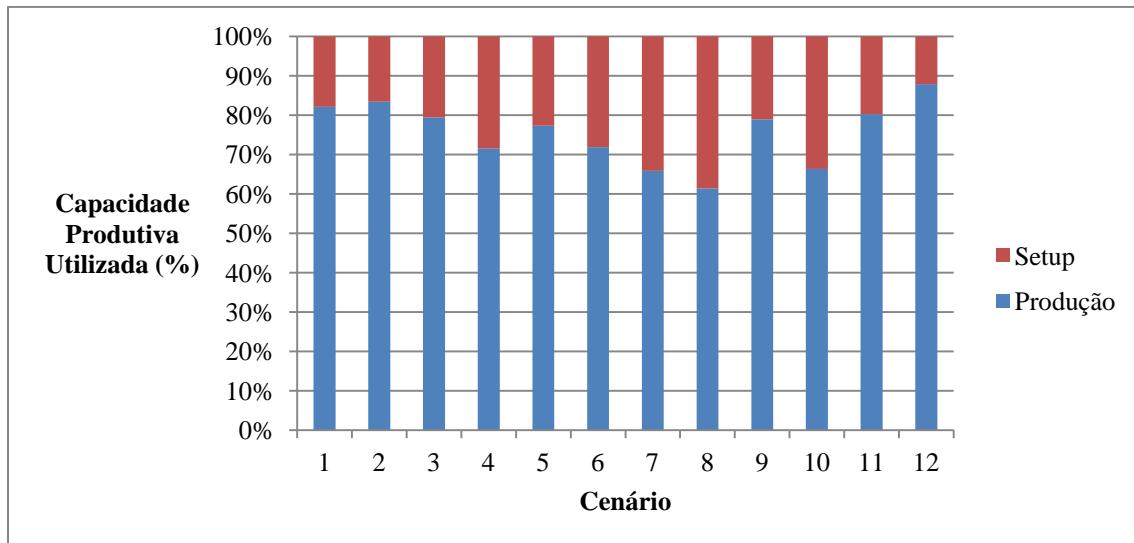


Figura 12 - Influência do tempo de *setup* no processo atual

No processo atual, os *setups* ocuparam uma faixa entre 12,1% e 38,7%, com uma média de 23,7%. Esse valor é considerável, mas explicado pelo número elevado de produtos distintos que a empresa produziu em um mês.

Existem alguns benefícios em diminuir o tempo total de produção e *setups*. Como existe uma frequência alta de ocorrências de falta de entrega de insumos de produção, muitas vezes o plano de produção sofre alterações ao longo do mês. Para tal, é interessante que se tenha uma folga para absorver esses eventuais imprevistos.

Além disso, como a demanda considerada é obtida através de previsão, não representando pedidos dos clientes, pode ocorrer de haver mais pedidos do que havia sido previsto, ou até a necessidade de desenvolver e produzir itens promocionais que não haviam sido inicialmente planejados. Nesses casos, se houver capacidade produtiva, a EX poderá optar por ocupar essa capacidade como resposta ao mercado.

Os cenários considerados foram todos obtidos com dados da empresa contratada que possuía o maior número de produtos, para que o tempo computacional fosse o maior entre todas as empresas possíveis. No entanto, existem outros cenários, com um número menor de produtos, onde a demanda não foi inteiramente atendida. O estudo desses cenários poderá demonstrar como o modelo proposto se comportará quando comparado com o processo atual. Serão analisados três cenários distintos onde a demanda não foi inteiramente atendida. Todos serão na mesma empresa, com dados de janeiro a abril de 2012.

Os três cenários irão contemplar 10 produtos diferentes, sendo produzidos em 3 linhas com 5 turnos por período - um turno por dia útil da semana. A demanda nessa empresa é

dividida da seguinte forma: 50% deve ser atendida até o final do 2º período e 50% deve ser atendida até o final do 4º período.

A análise do primeiro cenário será detalhada; em seguida serão apresentados os dados dos três cenários em conjunto para comparação com os métodos atuais da EX.

Os parâmetros do primeiro cenário são apresentados na Tabela 4.

Código do Produto	Demanda (itens)	Tempo de Produção de 1 item (minutos)	Custo do Atraso
80659062	7051	0,450	762
80659063	7811	0,450	762
80658671	10576	0,400	1051
80652672	114318	0,060	611
13271325	8939	0,008	28
13271309	11985	0,008	28
13272095	66415	0,003	32
13271308	11291	0,008	28
80654730	54054	0,075	111
80659043	27027	0,075	111

Tabela 4 - Parâmetros do cenário 1 com demanda não-atendida

O tempo disponível total para produção nessa empresa em um mês é obtido através dos parâmetros: número de turnos por período; número de linhas disponíveis; tempo disponível em uma linha em um período; número de períodos em um mês. No cenário considerado, o tempo total é de 18.000 minutos – considerando 3 linhas, 5 turnos / período, 4 períodos no mês e 300 minutos por turno em uma linha. No entanto, o tempo total necessário somente para produção da demanda, sem considerar *setups*, é de 24.280 minutos. Assim, uma análise prévia já indica que o modelo não atingirá uma função objetivo entre 0 e 1, como ocorreu anteriormente, uma vez que haverá demanda não-atendida.

A solução obtida apresentou como função objetivo o valor de 16.867.173. Os tempos totais utilizados em cada linha estão na Tabela 6. Na Tabela 7 apresenta-se as demandas não-atendidas.

Linha	Período			
	1	2	3	4
1	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0
2	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0
3	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0

Tabela 5 - Tempo de produção + setup (minutos) no cenário 1 com demanda não-atendida, no modelo proposto

Período	Produto											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1792	0	0	0	0	0	0	0	21406	13514	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	3526	3906	1392	0	0	0	0	0	27027	13514	0	0

Tabela 6 - Demandas não-atendidas por produto e por período, no modelo proposto

Pode-se notar que o tempo máximo permitido foi inteiramente consumido com produção e *setup*. O tempo total utilizado foi de exatamente 18.000 minutos. Os tempos de *setup* encontram-se na Tabela 8.

Tempo de Setup	Período			
	Linha	1	2	3
1	45	45	60	60
2	45	45	60	60
3	45	60	75	60

Tabela 7 - Tempos de setup no cenário 1 com demanda não-atendida, no modelo proposto

O tempo total de *setups* representa 3,7% do tempo total utilizado. Esse valor é significativamente inferior aos valores obtidos nos cenários com demanda inteiramente atendida e um número elevado de produtos distintos, o que é esperado.

A solução oferecida pela EX foi manualmente inserida no modelo, para comparação.

Linha	Período			
	1	2	3	4
1	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0
2	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0
3	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0

Tabela 8 - Tempo de produção + setup (minutos) no cenário 1 com demanda não-atendida, no solução atual

O tempo total disponível foi utilizado também segundo a solução atual, o que era esperado (Tabela 9). No entanto, o tempo gasto com *setup* das linhas foi maior, como pode ser observado na Tabela 10.

Tempo de Setup	Período			
	1	2	3	4
Linha				
1	60	60	60	60
2	40	80	120	60
3	80	100	100	100

Tabela 9 - Tempos de *setup* no cenário 1 com demanda não-atendida, na solução atual

Os tempos de *setup* da tabela acima representam 5,1% do tempo total utilizado no conjunto das linhas e períodos, sendo significativamente maior do que os 3,7% obtidos pelo modelo proposto.

A função objetivo apresentou o valor de 17.691.756. Portanto, a solução proposta, com função objetivo 16.867.173, foi 4,7% mais eficiente.

A Tabela 11 apresenta as demandas não-atendidas na solução atual, para esse cenário.

Período	Produto									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1156	0	0	0	0	0	0	27027	13514
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	3526	3906	2044	0	0	0	0	0	27027	13514

Tabela 10 - Demandas não-atendidas por produto e por período, na solução atual

Quando os três cenários são considerados, pode-se dizer que o não-atendimento da demanda foi reduzido com consistência. Isso se deve ao fato de os tempos de *setup* totais seguindo o modelo proposto são menores do que os tempos quando o planejamento é feito seguindo os processos atuais. As funções objetivo são apresentadas na Figura 13, enquanto os tempos de *setup* estão apresentados na Figura 14.

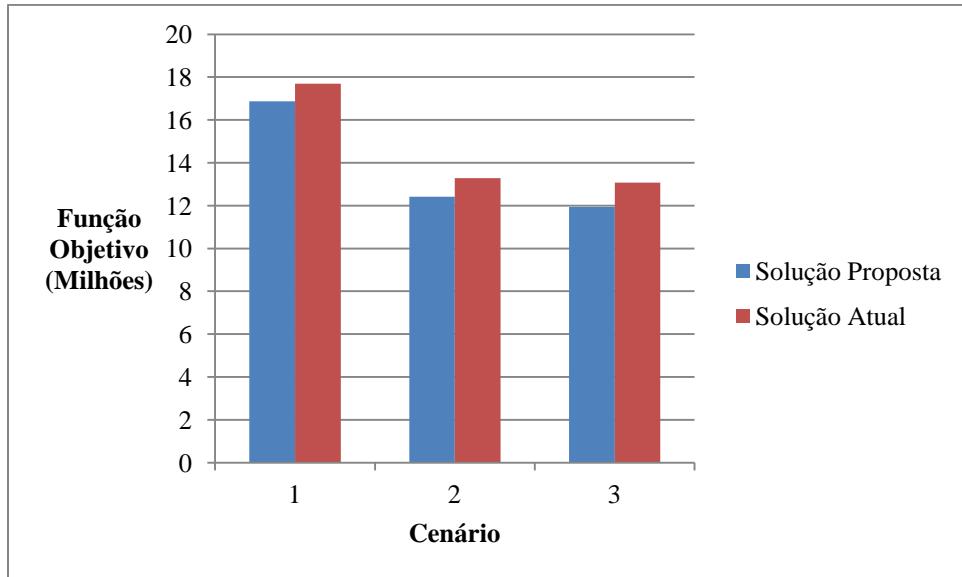


Figura 13 - Função objetivo nos casos de demanda não-atendida

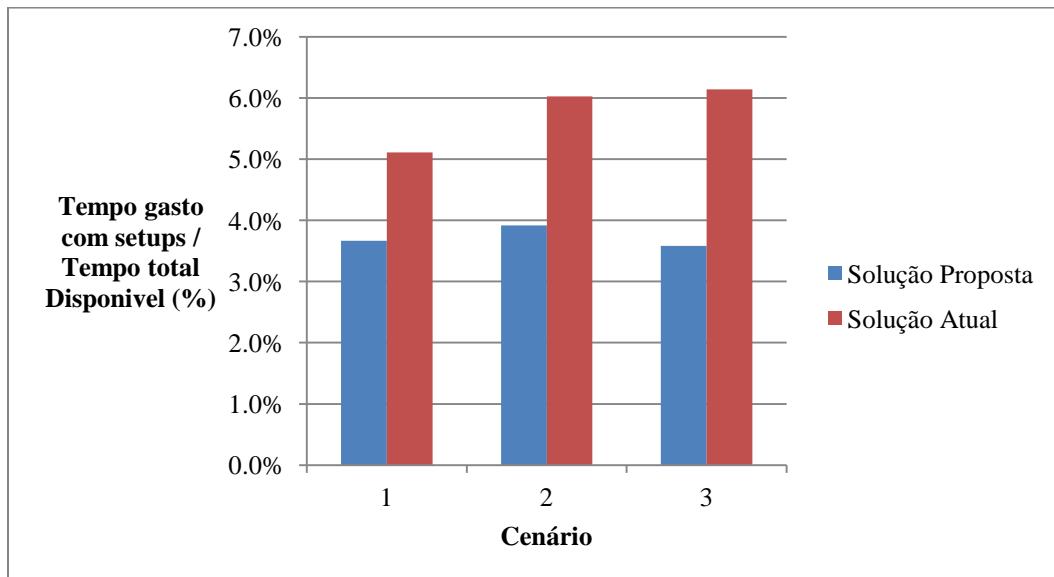


Figura 14 – Tempos de *setup* em relação ao tempo total utilizado, nos casos de demanda não-atendida

A função objetivo foi reduzida, em média, 6,6%. Já os tempos de *setup* foram reduzidos de uma média de 5,8% do tempo total utilizado, para 3,7%. Considerando o porte da empresa e a relevância da produção de itens customizados para a EX, os resultados obtidos foram positivos.

Capítulo 7

7. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo apresentar um modelo de dimensionamento e programação de lotes de produção na indústria de bens de consumo. Como o modelo utilizado baseia-se em princípios científicos, pode ser aplicado por qualquer colaborador da área de customização, não dependendo de experiência individual.

Tratou-se de um caso não encontrado na literatura existente sobre o tema. Além da formulação teórica, foram feitos exercícios computacionais com situações reais que indicam que o modelo torna-se complexo de solucionar de forma exponencial conforme o número de variáveis aumenta. Essa é uma característica das técnicas de solução de grande parte dos problemas de Programação Inteira Mista. Para resolver essa questão, as variáveis inteiras foram relaxadas, podendo assumir qualquer valor real. Em seguida, foi utilizada uma técnica de arredondamento, o que não tornou a solução inviável devido à natureza da produção semi-automática.

Com um tempo médio de processamento abaixo de 2 minutos, nos casos de demanda totalmente atendida, foram alcançadas soluções que apresentam um ganho significativo sobre os métodos atualmente empregados pela empresa. Apesar de a função objetivo de 100% dos cenários onde toda a demanda foi atendida ficar muito próxima de 0 tanto no modelo proposto quanto seguindo o processo atual, o tempo utilizado com a produção e *setups* foi reduzido, em média, 11%. Com isso, eventuais imprevistos na produção, que ocorrem com certa frequência, podem ser absorvidos, diminuindo o risco de não-atendimento da demanda.

Em casos onde a demanda não foi inteiramente atendida, a redução na função objetivo foi em média 6,6%.

A utilização do *software* para entrada de cenários novos não requer nenhum conhecimento adicional do usuário que já tiver certo domínio sobre o Excel. Com modificações simples, o modelo permite alguma flexibilidade quanto à número de linhas disponíveis, número de turnos por período, número de sub-períodos por período, além dos demais parâmetros que variam de cenário para cenário, como demanda, tecnologia de embalagem de cada produto, compatibilidade linha-produto, etc.

A interpretação dos dados torna-se menos visual e intuitiva na medida em que o número de produtos e o número de linhas aumenta. No entanto, para os cenários reais

considerados, quando comparado às planilhas utilizadas atualmente, não há grandes diferenças em interface.

Outro benefício do uso do modelo proposto é que o tempo despendido com a montagem dos planos de produção iria reduzir significativamente. Cada planejador de produção gasta, em média, de seis a dez horas mensais para montar e atualizar o plano de produção. Considerando tempos de processamento de 2 minutos por cenário e o número de cenários que cada planejador teria que planejar, estima-se que o uso do modelo economizaria de três a quatro horas mensais de cada planejador.

Uma sugestão para aprofundamento do modelo seria a análise de como a produtividade de cada produto é afetada pelo tamanho dos lotes de produção. A curva de aprendizado é geralmente representada por uma curva exponencial, o que não é possível em problemas de Programação Linear.

BIBLIOGRAFIA

DREXL, A.; KIMMS, A. **Lot sizing and scheduling – Survey and extensions.** European Journal of Operational Research 99 (1997), p.221-235

KAWAMURA, M. S. **Dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção na indústria de bens de consumo de higiene pessoal.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011

KOTLER, P. **Marketing Management Millennium Edition.** 10th edition, New Jersey: Prentice-Hall, 2000.

MEYR, H. **Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization.** European Journal of Operational Research 120 (2) (2000), p. 311–326.

MEYR, H. **Simultaneous lotsizing and scheduling on parallel machines.** European Journal of Operational Research 139 (2002), p. 277–292.

QUADT, D.; KUHN, H. **Capacitated Lot-Sizing and Scheduling with Parallel Machines, Back-Orders, and Setup Carry-Over.** Naval Research Logistics Volume 56, Issue 4, p.293-387

What'sBest! 11.0 User Manual. LINDO Systems, Inc., 2011

WINSTON, W. L.; GOLDBERG, J. B. **Operations Research: Applications and Algorithms.** International Student Edition, Australia: Thomson Brooks/Cole, 2004.

WOLSEY, L. A.; **Integer Programming.** 1st edition, New York: John Wiley and Sons, 1998.

Anexos

ANEXO 1 – SAÍDAS DO SOFTWARE WHAT'SBEST! PARA O EXEMPLO

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -
```

DATE GENERATED: set 20, 2012 06:54 PM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	737		
Numerics	515		
Adjustables	252		Unlimited
Continuous	120		
Free	0		
Integers/Binaries	72/60		Unlimited
Constants	246		
Formulas	17		
Strings	0		
Constraints	222		Unlimited
Nonlinears	0		Unlimited
Coefficients	1131		

Minimum coefficient value: 0.008333333333333 on Variáveis!U26

Minimum coefficient in formula: Variáveis!T29

Maximum coefficient value: 1500 on Variáveis!G3

Maximum coefficient in formula: Variáveis!X8

MODEL TYPE: Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS: GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE: 0.008333333333333

DIRECTION: Minimize

SOLVER TYPE: Branch-and-Bound

TRIES: 15

INFEASIBILITY: 1.6653345369377e-013

BEST OBJECTIVE BOUND: 0

STEPS: 0

ACTIVE: 0

SOLUTION TIME: 0 Hours 0 Minutes 0 Seconds

End of Report

ANEXO 2 – SAÍDAS DO SOFTWARE WHAT'SBEST! PARA O MODELO EXPANDIDO, SEM RELAXAMENTO

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -

DATE GENERATED:       out 17, 2012          01:01 PM

*****
* INTERRUPTED *
*****
```

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	310650		
Numerics	169470		
Adjustables	153400		Unlimited
Continuous	147400		
Free	0		
Integers/Binaries	3000/3000		Unlimited
Constants	14004		
Formulas	2066		
Strings	0		
Constraints	141180		Unlimited
Nonlinear	0		Unlimited
Coefficients	862321		

Minimum coefficient value: 6.8027210884354e-006 on Variáveis!CH106
 Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
 Maximum coefficient value: 53226 on <RHS>
 Maximum coefficient in formula: Variáveis!CJ100

MODEL TYPE: Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS: FEASIBLE

OBJECTIVE VALUE: 82095.286774131

DIRECTION: Minimize

SOLVER TYPE: Branch-and-Bound

TRIES: 1800068

INFEASIBILITY: 3.6816345527768e-009

BEST OBJECTIVE BOUND: 0.00036468504281129

STEPS: 5139

ACTIVE: 104

SOLUTION TIME: 4 Hours 36 Minutes 38 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

```
Integer Solver Options / Optimality / Relative: 7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative: 2
```

ANEXO 3 – SAÍDAS DO SOFTWARE WHAT'SBEST! PARA O MODELO EXPANDIDO E RELAXADO, PARA OS CASOS DE DEMANDA ATENDIDA

Cenário 1: Outubro/2011

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -

DATE GENERATED:          out 18, 2012           01:52 PM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA      Current   Capacity Limits
-----
Total Cells                310995
Numerics                  169565
Adjustables               153400      Unlimited
Continuous                150400
Free                      0
Integers/Binaries         0/3000      Unlimited
Constants                 14099
Formulas                  2066
Strings                   0
Constraints               141430      Unlimited
Nonlinears                0          Unlimited
Coefficients              862331

Minimum coefficient value:    6.8027210884354e-006  on Variáveis!CH106
Minimum coefficient in formula:  Variáveis!BW106
Maximum coefficient value:    37025  on <RHS>
Maximum coefficient in formula:  Variáveis!BS102

MODEL TYPE:            Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS:        GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE:        0.00037414965986395

DIRECTION:              Minimize

SOLVER TYPE:            Branch-and-Bound

TRIES:                  7187

INFEASIBILITY:          3.6379788070917e-012

BEST OBJECTIVE BOUND:    0

STEPS:                  0

ACTIVE:                 0

SOLUTION TIME:          0 Hours  0 Minutes 55 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

Integer Solver Options / Optimality / Relative:    7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative:    2

End of Report
```

Cenário 2: Novembro/2011

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -
```

DATE GENERATED: out 18, 2012 02:02 PM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	311150		
Numerics	169720		
Adjustables	153400		Unlimited
Continuous	150400		
Free	0		
Integers/Binaries	0/3000		Unlimited
Constants	14254		
Formulas	2066		
Strings	0		
Constraints	141430		Unlimited
Nonlinear	0		Unlimited
Coefficients	862331		

Minimum coefficient value: 6.8027210884354e-006 on Variáveis!CH106
 Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
 Maximum coefficient value: 48589 on <RHS>
 Maximum coefficient in formula: Variáveis!BD102

MODEL TYPE: Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS: GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE: 0.00037414965986395

DIRECTION: Minimize

SOLVER TYPE: Branch-and-Bound

TRIES: 5664

INFEASIBILITY: 7.2759576141834e-012

BEST OBJECTIVE BOUND: 0

STEPS: 0

ACTIVE: 0

SOLUTION TIME: 0 Hours 0 Minutes 49 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

```
Integer Solver Options / Optimality / Relative: 7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative: 2
```

End of Report

Cenário 3: Dezembro/2011

What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -

DATE GENERATED: out 18, 2012 02:34 PM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	311150		
Numerics	169720		
Adjustables	153400		Unlimited
Continuous	150400		
Free	0		
Integers/Binaries	0/3000		Unlimited
Constants	14254		
Formulas	2066		
Strings	0		
Constraints	141430		Unlimited
Nonlinears	0		Unlimited
Coefficients	862331		

Minimum coefficient value: 6.8027210884354e-006 on Variáveis!CH106
 Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
 Maximum coefficient value: 32473 on <RHS>
 Maximum coefficient in formula: Variáveis!BD102

MODEL TYPE: Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS: GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE: 0.00037414965986395

DIRECTION: Minimize

SOLVER TYPE: Branch-and-Bound

TRIES: 6573

INFEASIBILITY: 3.6379788070917e-012

BEST OBJECTIVE BOUND: 0

STEPS: 0

ACTIVE: 0

SOLUTION TIME: 0 Hours 0 Minutes 54 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

Integer Solver Options / Optimality / Relative: 7.000000e-002
 Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative: 2

End of Report

Cenário 4: Janeiro/2012

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -
```

DATE GENERATED: out 18, 2012 02:41 PM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	311150		
Numerics	169720		
Adjustables	153400		Unlimited
Continuous	150400		
Free	0		
Integers/Binaries	0/3000		Unlimited
Constants	14254		
Formulas	2066		
Strings	0		
Constraints	141430		Unlimited
Nonlinear	0		Unlimited
Coefficients	862331		

Minimum coefficient value: 6.8027210884354e-006 on Variáveis!CH106
 Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
 Maximum coefficient value: 25980 on <RHS>
 Maximum coefficient in formula: Variáveis!BS102

MODEL TYPE: Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS: GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE: 0.00037414965986395

DIRECTION: Minimize

SOLVER TYPE: Branch-and-Bound

TRIES: 14581

INFEASIBILITY: 3.6379788070917e-012

BEST OBJECTIVE BOUND: 0

STEPS: 0

ACTIVE: 0

SOLUTION TIME: 0 Hours 1 Minutes 14 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

```
Integer Solver Options / Optimality / Relative: 7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative: 2
```

End of Report

Cenário 5: Fevereiro/2012

```

What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -

DATE GENERATED:       out 18, 2012          02:55 PM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA           Current   Capacity Limits
-----
Total Cells                   311150
Numerics                      169720
Adjustables                   153400      Unlimited
Continuous                     150400
Free                           0
Integers/Binaries             0/3000      Unlimited
Constants                      14254
Formulas                       2066
Strings                        0
Constraints                    141430      Unlimited
Nonlinears                     0          Unlimited
Coefficients                  861323

Minimum coefficient value:    6.8027210884354e-006  on Variáveis!CH106
Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
Maximum coefficient value:    2400  on Variáveis!BS86
Maximum coefficient in formula: Variáveis!BP106

MODEL TYPE:                  Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS:             GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE:              0.00037414965986395

DIRECTION:                   Minimize

SOLVER TYPE:                 Branch-and-Bound

TRIES:                        6460

INFEASIBILITY:               5.6843418860808e-014

BEST OBJECTIVE BOUND:         0

STEPS:                        0

ACTIVE:                       0

SOLUTION TIME:                0 Hours 0 Minutes 49 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  Integer Solver Options / Optimality / Relative:  7.000000e-002
  Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative:  2

End of Report

```

Cenário 6: Março/2012

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -
```

DATE GENERATED: out 18, 2012 08:50 PM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	311150		
Numerics	169720		
Adjustables	153400		Unlimited
Continuous	150400		
Free	0		
Integers/Binaries	0/3000		Unlimited
Constants	14254		
Formulas	2066		
Strings	0		
Constraints	141430		Unlimited
Nonlinear	0		Unlimited
Coefficients	861323		

Minimum coefficient value: 6.8027210884354e-006 on Variáveis!CH106
 Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
 Maximum coefficient value: 2400 on Variáveis!BS86
 Maximum coefficient in formula: Variáveis!BP106

MODEL TYPE: Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS: GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE: 0.00037414965986395

DIRECTION: Minimize

SOLVER TYPE: Branch-and-Bound

TRIES: 5015

INFEASIBILITY: 1.1368683772162e-013

BEST OBJECTIVE BOUND: 0

STEPS: 0

ACTIVE: 0

SOLUTION TIME: 0 Hours 0 Minutes 45 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

```
Integer Solver Options / Optimality / Relative: 7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative: 2
```

End of Report

Cenário 7: Abril/2012

What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -

DATE GENERATED: out 18, 2012 08:54 PM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	311150		
Numerics	169720		
Adjustables	153400		Unlimited
Continuous	150400		
Free	0		
Integers/Binaries	0/3000		Unlimited
Constants	14254		
Formulas	2066		
Strings	0		
Constraints	141430		Unlimited
Nonlinears	0		Unlimited
Coefficients	861323		

Minimum coefficient value: 6.8027210884354e-006 on Variáveis!CH106
 Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
 Maximum coefficient value: 2400 on Variáveis!BS86
 Maximum coefficient in formula: Variáveis!BP106

MODEL TYPE: Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS: GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE: 0.00037414965986395

DIRECTION: Minimize

SOLVER TYPE: Branch-and-Bound

TRIES: 6203

INFEASIBILITY: 5.6843418860808e-014

BEST OBJECTIVE BOUND: 0

STEPS: 0

ACTIVE: 0

SOLUTION TIME: 0 Hours 0 Minutes 47 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

Integer Solver Options / Optimality / Relative: 7.000000e-002
 Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative: 2

End of Report

Cenário 8: Maio/2012

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -
```

```
DATE GENERATED:       out 18, 2012          09:01 PM
```

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	311150		
Numerics	169720		
Adjustables	153400		Unlimited
Continuous	150400		
Free	0		
Integers/Binaries	0/3000		Unlimited
Constants	14254		
Formulas	2066		
Strings	0		
Constraints	141430		Unlimited
Nonlinear	0		Unlimited
Coefficients	861323		

```
Minimum coefficient value:      6.8027210884354e-006  on Variáveis!CH106
```

```
Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
```

```
Maximum coefficient value:      2400  on Variáveis!BS86
```

```
Maximum coefficient in formula: Variáveis!BP106
```

```
MODEL TYPE:           Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)
```

```
SOLUTION STATUS:      GLOBALLY OPTIMAL
```

```
OBJECTIVE VALUE:      0.00037414965986395
```

```
DIRECTION:            Minimize
```

```
SOLVER TYPE:          Branch-and-Bound
```

```
TRIES:                6032
```

```
INFEASIBILITY:        1.1368683772162e-013
```

```
BEST OBJECTIVE BOUND: 0
```

```
STEPS:                0
```

```
ACTIVE:                0
```

```
SOLUTION TIME:        0 Hours  0 Minutes 46 Seconds
```

NON-DEFAULT SETTINGS:

```
Integer Solver Options / Optimality / Relative:    7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative:    2
```

```
End of Report
```

Cenário 9: Junho/2012

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -
```

DATE GENERATED: out 18, 2012 09:07 PM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	311150		
Numerics	169720		
Adjustables	153400		Unlimited
Continuous	150400		
Free	0		
Integers/Binaries	0/3000		Unlimited
Constants	14254		
Formulas	2066		
Strings	0		
Constraints	141430		Unlimited
Nonlinears	0		Unlimited
Coefficients	862583		

Minimum coefficient value: 6.8027210884354e-006 on Variáveis!CH106
 Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
 Maximum coefficient value: 5915 on <RHS>
 Maximum coefficient in formula: Variáveis!BX102

MODEL TYPE: Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS: GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE: 0.00037414965986395

DIRECTION: Minimize

SOLVER TYPE: Branch-and-Bound

TRIES: 45688

INFEASIBILITY: 1.7956747200287e-012

BEST OBJECTIVE BOUND: 0

STEPS: 0

ACTIVE: 0

SOLUTION TIME: 0 Hours 2 Minutes 38 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

```
Integer Solver Options / Optimality / Relative: 7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative: 150
```

End of Report

Cenário 10: Julho/2012

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -
```

```
DATE GENERATED:       out 18, 2012          09:19 PM
```

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	311150		
Numerics	169720		
Adjustables	153400		Unlimited
Continuous	150400		
Free	0		
Integers/Binaries	0/3000		Unlimited
Constants	14254		
Formulas	2066		
Strings	0		
Constraints	141430		Unlimited
Nonlinear	0		Unlimited
Coefficients	861071		

```
Minimum coefficient value:      6.8027210884354e-006  on Variáveis!CH106
```

```
Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
```

```
Maximum coefficient value:      38973  on <RHS>
```

```
Maximum coefficient in formula: Variáveis!BD102
```

```
MODEL TYPE:           Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)
```

```
SOLUTION STATUS:      GLOBALLY OPTIMAL
```

```
OBJECTIVE VALUE:      0.00037414965986389
```

```
DIRECTION:            Minimize
```

```
SOLVER TYPE:          Branch-and-Bound
```

```
TRIES:                161133
```

```
INFEASIBILITY:        9.0681348447945e-009
```

```
BEST OBJECTIVE BOUND: 0
```

```
STEPS:                0
```

```
ACTIVE:                0
```

```
SOLUTION TIME:        0 Hours  6 Minutes 48 Seconds
```

NON-DEFAULT SETTINGS:

```
Integer Solver Options / Optimality / Relative:    7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative:    400
```

```
End of Report
```

Cenário 11: Agosto/2012

```

What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -

DATE GENERATED:       out 19, 2012           12:03 AM

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA          Current   Capacity Limits
-----
Total Cells                   311150
Numerics                      169720
Adjustables                  153400      Unlimited
Continuous                    150400
Free                           0
Integers/Binaries            0/3000      Unlimited
Constants                     14254
Formulas                      2066
Strings                        0
Constraints                   141430      Unlimited
Nonlinears                     0      Unlimited
Coefficients                 861071

Minimum coefficient value:    6.8027210884354e-006  on Variáveis!CH106
Minimum coefficient in formula:  Variáveis!BW106
Maximum coefficient value:    25982  on <RHS>
Maximum coefficient in formula:  Variáveis!BD102

MODEL TYPE:                  Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS:             GLOBALLY OPTIMAL

OBJECTIVE VALUE:              0.00037414965986395

DIRECTION:                   Minimize

SOLVER TYPE:                 Branch-and-Bound

TRIES:                        29467

INFEASIBILITY:                8.5931262105987e-012

BEST OBJECTIVE BOUND:         0

STEPS:                         0

ACTIVE:                        0

SOLUTION TIME:                0 Hours 1 Minutes 43 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

    Integer Solver Options / Optimality / Relative:  7.000000e-002

End of Report

```

Cenário 12: Setembro/2012

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -
```

```
DATE GENERATED:       out 18, 2012          09:44 PM
```

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity	Limits
Total Cells	311150		
Numerics	169720		
Adjustables	153400		Unlimited
Continuous	150400		
Free	0		
Integers/Binaries	0/3000		Unlimited
Constants	14254		
Formulas	2066		
Strings	0		
Constraints	141430		Unlimited
Nonlinear	0		Unlimited
Coefficients	862331		

```
Minimum coefficient value:      6.8027210884354e-006  on Variáveis!CH106
Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
Maximum coefficient value:     19485   on <RHS>
Maximum coefficient in formula: Variáveis!BD102
```

```
MODEL TYPE:           Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)
```

```
SOLUTION STATUS:      GLOBALLY OPTIMAL
```

```
OBJECTIVE VALUE:      0.00037414965986395
```

```
DIRECTION:            Minimize
```

```
SOLVER TYPE:          Branch-and-Bound
```

```
TRIES:                22317
```

```
INFEASIBILITY:        1.8189894035459e-012
```

```
BEST OBJECTIVE BOUND: 0
```

```
STEPS:                0
```

```
ACTIVE:                0
```

```
SOLUTION TIME:        0 Hours  1 Minutes 30 Seconds
```

NON-DEFAULT SETTINGS:

```
Integer Solver Options / Optimality / Relative:    7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative:    82
```

```
End of Report
```

ANEXO 4 – SAÍDAS DO SOFTWARE WHAT'SBEST! PARA O MODELO EXPANDIDO E RELAXADO, PARA OS CASOS DE DEMANDA NÃO-ATENDIDA

Cenário 1:

```
What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -

DATE GENERATED:      out 29, 2012          09:16 AM

*****
* INTERRUPTED *
*****


MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA           Current   Capacity Limits
-----
Total Cells                   311150
Numerics                      169720
Adjustables                  153400      Unlimited
Continuous                    150400
Free                           0
Integers/Binaries            0/3000      Unlimited
Constants                     14254
Formulas                      2066
Strings                        0
Constraints                   141430      Unlimited
Nonlinears                     0      Unlimited
Coefficients                 860651

Minimum coefficient value:    6.8027210884354e-006 on Variáveis!CH106
Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
Maximum coefficient value:    57159 on <RHS>
Maximum coefficient in formula: Variáveis!BE100

MODEL TYPE:      Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS:  FEASIBLE

OBJECTIVE VALUE:  16867173.207837

DIRECTION:       Minimize

SOLVER TYPE:     Branch-and-Bound

TRIES:            2973262

INFEASIBILITY:   1.862645149231e-009

BEST OBJECTIVE BOUND: 14656090.906663

STEPS:            68631

ACTIVE:           92

SOLUTION TIME:   0 Hours 46 Minutes 41 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

  Integer Solver Options / Optimality / Relative:  7.000000e-002
  Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative:  2
```

Cenário 2:

```

What'sBest!® 11.1.0.5 (Jul 19, 2012) - Library 7.0.1.489 - 32-bit - Status Report -

DATE GENERATED:      out 29, 2012          11:04 AM

*****
* INTERRUPTED *
*****


MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA          Current Capacity Limits
-----
Total Cells                  311150
Numerics                     169720
Adjustables                 153400      Unlimited
Continuous                   150400
Free                         0
Integers/Binaries           0/3000      Unlimited
Constants                    14254
Formulas                     2066
Strings                      0
Constraints                  141430      Unlimited
Nonlinears                   0      Unlimited
Coefficients                860651

Minimum coefficient value:   6.8027210884354e-006  on Variáveis!CH106
Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
Maximum coefficient value:   54054  on <RHS>
Maximum coefficient in formula: Variáveis!BJ100

MODEL TYPE:      Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS: FEASIBLE

OBJECTIVE VALUE: 12412697.158709

DIRECTION:      Minimize

SOLVER TYPE:    Branch-and-Bound

TRIES:          2081514

INFEASIBILITY:  9.3132257461548e-010

BEST OBJECTIVE BOUND: 10765161.764974

STEPS:          52173

ACTIVE:         0

SOLUTION TIME: 0 Hours 31 Minutes 44 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

Integer Solver Options / Optimality / Relative: 7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative: 2

```

Cenário 3:

```

DATE GENERATED:      out 29, 2012          12:34 PM

*****
*     INTERRUPTED   *
*****


MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA          Current    Capacity Limits
-----
Total Cells                  311150
Numerics                     169720
Adjustables                  153400      Unlimited
Continuous                   150400
Free                         0
Integers/Binaries           0/3000      Unlimited
Constants                    14254
Formulas                     2066
Strings                      0
Constraints                  141430      Unlimited
Nonlinears                   0          Unlimited
Coefficients                 860651

Minimum coefficient value:   6.8027210884354e-006  on Variáveis!CH106
Minimum coefficient in formula: Variáveis!BW106
Maximum coefficient value:   40541   on <RHS>
Maximum coefficient in formula: Variáveis!BJ100

MODEL TYPE:      Mixed Integer / Linear (Mixed Integer Linear Program)

SOLUTION STATUS:      FEASIBLE

OBJECTIVE VALUE:      11936192.496945

DIRECTION:          Minimize

SOLVER TYPE:         Branch-and-Bound

TRIES:               2102430

INFEASIBILITY:       9.0949470177293e-013

BEST OBJECTIVE BOUND: 10421646.396571

STEPS:               52388

ACTIVE:              113

SOLUTION TIME:       0 Hours 33 Minutes 32 Seconds

NON-DEFAULT SETTINGS:

Integer Solver Options / Optimality / Relative:  7.000000e-002
Integer Solver Options / Optimality / Time to Relative:  2

```

ANEXO 5 - PARÂMETROS PARA OS CASOS DE DEMANDA NÃO ATENDIDA

Código do Produto	DEMANDA			Produtividade - Itens / dia	Tempo de Produção de 1 item (minutos)		Custo do Atraso
	jan/12	fev/12	mar/12				
80659062	7051	5857	7874	667	0.450		762
80659063	7811	6217	6299	667	0.450		762
80658671	10576	10026	12216	750	0.400		1051
80652672	114318	46641	56746	5000	0.060		611
13271325	8939	13986	17680	38400	0.008		28
13271309	11985	13246	7152	38400	0.008		28
13272095	66415	64849	76643	115200	0.003		32
13271308	11291	11768	14847	38400	0.008		28
80654730	54054	108108	81081	4000	0.075		111
80659043	27027	27027	18018	4000	0.075		111

Tempo disponível para produção / turno:	300
Número de turnos / período:	5
Número total de linhas:	3