

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM AGRONEGÓCIOS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

**MODELAGEM DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA ÁGUA
MINERAL COM O MODELO DE MÚLTIPLOS OBJETIVOS**

LUCIANO MADRUGA LUDWIG

Porto Alegre, 2002

sys: 376634
681.3
L948m

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM AGRONEGÓCIOS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS
CURSO DE MESTRADO

**MODELAGEM DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA ÁGUA MINERAL
COM O MODELO DE MÚLTIPLOS OBJETIVOS**

Dissertação de Mestrado, apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Agronegócios da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul como requisito
parcial para a obtenção do título de
mestre em Agronegócios

UFRGS
Escola de Administração
BIBLIOTECA
R. Washington Luiz, 855
Fone: (51) 316-3840 - Fax: (51) 316-3991
CEP 90010-460 - Porto Alegre - RS - Brasil

LUCIANO MADRUGA LUDWIG

Professor Orientador: Denis Borenstein

Porto Alegre, 2002

Banca Examinadora

Presidente: Prof. Dr. Denis Borenstein (PPGA/UFRGS)

Examinadores:

Prof. Dr. Antônio Domingos Padula (CEPAN/UFRGS)

Prof. Dr. Eduardo Ribas Santos (PPGA/UFRGS)

Prof. Dr. João Luiz Becker (PPGA/CEPAN/UFRGS)

Conceito Final: A

Porto Alegre, 02 de Setembro de 2002

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço aos empresários que me disponibilizaram as informações da cadeia de suprimentos da água mineral, sem as quais não teria sido possível desenvolver este trabalho.

Ao meu orientador, prof. Denis Borenstein, por proporcionar-me um ambiente de pesquisa enriquecedor, por aceitar algumas de minhas idéias e ser contrário a outras em momentos decisivos.

Aos professores Antonio Domingos Padula, Carlos Roberto Vargas Rossi, Carlos Alberto Martins Callegaro, Eugenio Ávila Pedroso, Jaime Evaldo Fensterseifer, João Luiz Becker, Luiz Carlos Federizzi, Luiz Antonio Slongo, Marina Keiko Nakayama, Tânia Nunes da Silva, Walter Meucci Nique e Zilá Pedroso Mesquita que demonstraram dedicação e capacidade em transmitir e coordenar o conhecimento durante as aulas.

Aos meus colegas, pela amizade oferecida; ao secretário, João Jair, pela sua boa vontade em ajudar-nos durante mais de dois anos. Aos meus amigos Marcelo Silveira Badejo e Manuel de Mello Macedo, pela amizade.

Aos meus familiares, por todo o apoio. E, especialmente, às minhas avós (Maria & Maria) e à minha namorada, Márcia, por acreditarem nos meus sonhos e contribuírem para minha felicidade.

RESUMO

A riqueza de situações problemáticas cresce com a análise sistêmica em cadeias de suprimentos. Os diversos fatores envolvidos no ciclo de performance levam a crer que a realidade da cadeia de suprimentos da água mineral não possa ser abordada por um único objetivo.

O presente trabalho apresenta a modelagem de objetivos múltiplos na cadeia de suprimentos da água mineral. Para isso, buscou-se na literatura um modelo que preenchesse esses objetivos para, posteriormente, customizá-lo e validá-lo nesta cadeia de suprimentos. O modelo de múltiplos objetivos é dividido nos submodelos estratégico e operacional. O estratégico provê o desenho da rede de instalações, os custos totais da cadeia de suprimentos e a flexibilidade de volume; o operacional, os níveis de serviço e a flexibilidade de entrega. Esses submodelos são solucionados por meio de programação linear inteira combinada e programação não-linear, respectivamente.

Os resultados da aplicação do modelo confirmaram os aspectos relativos a sua eficiência e eficácia, por meio da construção e análise de cenários. Por fim, foram recomendadas ações de curto e longo-prazos.

ABSTRACT

The range of troublesome situations grows together with the systemic analysis on supply chains. Several factors involved in the performance cycle lead us into believing that the mineral water supply chain situation cannot be approached by only one objective.

The present paper presents a model of multiple objectives in the supply chain of mineral water. Thus, a model based on specialized literature was used to fulfill these objectives and further customize and validate it within this supply chain. The model of multiple objectives is divided into strategic and operational sub models. The strategic one provides for the project of the installation network, total costs of the supply chain, and the flexibility of volume; the operational one covers fill rates and the delivery flexibility. These sub models are designed in an mixed integer linear programming, and non-linear programming respectively.

The results of the application of the model have confirmed aspects regarding its efficiency and effectiveness, which were drawn from building and analyzing research settings. Lastly, short-term and long-term actions were recommended.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1 CONTEXTO DA PESQUISA	16
1.1 O MERCADO DE ÁGUA MINERAL	16
1.2 SITUAÇÃO PROBLEMÁTICA	17
1.3 JUSTIFICATIVA	20
2 CONTEXTO TEÓRICO	22
2.1 A LOGÍSTICA E A VISÃO DE CADEIA DE SUPRIMENTOS	22
2.1.1 A VANTAGEM DA GESTÃO DE FLUXOS	23
2.1.2 A FUNÇÃO DA LOGÍSTICA	23
2.1.2.1 Projeto da Rede de Instalações	23
2.1.2.2 Informações na Cadeia de Suprimentos	24
2.1.2.3 Transporte	25
2.1.2.4 Controle de Estoques	27
2.1.2.5 Armazenamento, Manuseio de Materiais e Embalagem	30
2.1.3 ELEMENTOS DE PERFORMANCE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	31
2.1.3.1 Nível de Serviços Logísticos na Cadeia de Suprimentos	31
2.1.3.2 Custos Totais na Cadeia de Suprimentos	32
2.1.3.3 Repercussão da Incerteza na Cadeia de Suprimentos e Flexibilidade	33
2.2 MODELOS DE CADEIA DE SUPRIMENTOS	35
2.2.1 MODELOS QUE PRIORIZAM QUESTÕES ESTRATÉGICAS	36
2.2.2 MODELOS QUE PRIORIZAM QUESTÕES OPERACIONAIS	37
2.2.3 MODELOS MULTIDIMENSIONAIS	41

3 OBJETIVOS	45
3.1 OBJETIVO GERAL	45
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	45
4 MÉTODO DE PESQUISA	46
4.1 ANÁLISE DO MODELO ORIGINAL	47
4.2 COLETA DE INFORMAÇÕES	47
4.3 CUSTOMIZAÇÃO DO MODELO À CADEIA DE SUPRIMENTOS	47
4.4 APLICAÇÃO DO MODELO CUSTOMIZADO	48
4.5 SOLUÇÃO E RESULTADOS	48
4.6 VALIDAÇÃO	49
5 DESCRIÇÃO DO MODELO CUSTOMIZADO	50
5.1 ALTERAÇÕES FEITAS NO MODELO ORIGINAL	50
5.2 SUBMODELO ESTRATÉGICO	51
5.2.1 CUSTO TOTAL	53
5.2.2 FLEXIBILIDADE DE VOLUME	53
5.2.3 RESTRIÇÕES	54
5.2.4 ESTIMANDO OS PARÂMETROS SUBJETIVOS DO SUBMODELO ESTRATÉGICO	56
5.3 SUBMODELO OPERACIONAL	57
5.3.1 SUBMODELO DE PRODUÇÃO	60
5.3.2 ESTOQUE DE PRODUTOS ACABADOS	62
5.3.2.1 Método do Ponto de Pedido	62
5.3.2.2 Controle de Estoques de Produtos Acabados	63
5.3.2.3 Custo Unitário do Estágio de Produção	63
5.3.2.4 Nível de Serviço Fornecido pelo Estágio de Produção	64
5.3.2.5 Ciclo de Reabastecimento Esperado no Estágio de Produção	64
5.3.2.6 Encontrando a Função de Múltiplos Objetivos	65
5.3.3 ESTÁGIO DE DISTRIBUIÇÃO	66
5.3.3.1 Método do Ponto de Pedido com Custos da Falta de Estoque Conhecidos	66
5.3.3.2 Custo Unitário do Estágio de Distribuição	68

5.3.3.3 Ciclo de Reabastecimento Esperado no Estágio de Distribuição	68
5.3.3.4 Nível de Serviço Fornecido pelo Estágio de Distribuição	69
5.3.4 ESTÁGIO DA ZONA DE CONSUMO	69
5.3.4.1 Custo Unitário do Estágio da Zona de Consumo	70
5.3.4.2 Controle de Estoques na Zona de Consumo	70
5.3.4.3 Nível de Serviço Fornecido pelo Estágio de Zona de Consumo	72
5.4 RESUMO DOS CUSTOS UNITÁRIOS VARIÁVEIS	72
5.5 ALGORITMO DE SABRI & BEAMON (2000)	73
5.6 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	75
5.6.1 RECURSOS DE INFORMÁTICA UTILIZADOS	75
5.6.2 PROCEDIMENTOS DE PROGRAMAÇÃO	75
5.6.2.1 Programação do Submodelo Estratégico	75
5.6.2.2 Programação do Submodelo Operacional	76
<u>6 APLICAÇÃO DO MODELO CUSTOMIZADO</u>	78
6.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	78
6.2 RESULTADOS	80
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	86
6.3.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	86
6.3.1.1 Flexibilidade de Volume	87
6.3.1.2 Fatores-peso das Capacidades de Produção e Distribuição	88
6.3.1.3 Índices dos Níveis de Serviço	88
6.3.1.4 Índices da Flexibilidade de Entrega	89
6.3.2 ANÁLISE GLOBAL DOS CENÁRIOS	90
6.3.2.1 Análise dos Estágios de Produção, de Distribuição e de Zona de Consumo	92
6.3.3 RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS	98
6.3.3.1 Ação de Curto Prazo	99
6.3.3.2 Ação de Longo Prazo	99
6.4 VALIDAÇÃO PARCIAL DO MODELO CUSTOMIZADO	99
6.4.1 ESCOLHA DO CENÁRIO QUE CORRESPONDE À REALIDADE	100
6.4.2 COMPARAÇÃO ENTRE O CENÁRIO SIMULADO E O CENÁRIO REAL	100
6.4.3 COMENTÁRIOS	102

<u>7 CONCLUSÕES</u>	104
<u>8 LIMITAÇÕES E FUTURAS PESQUISAS</u>	106
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	109
<u>ANEXO 1 – MODELO ORIGINAL DE SABRI & BEAMON (2000)</u>	113
<u>ANEXO 2 – VARIÁVEIS DE SAÍDA DO SUBMODELO OPERACIONAL</u>	132
<u>ANEXO 3 – QUESTIONÁRIO / BANCO DE DADOS</u>	142
<u>ANEXO 4 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL</u>	154

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MÉTODO DE PESQUISA	46
FIGURA 2 – RELAÇÃO ENTRE OS SUBMODELOS OPERACIONAIS	57
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE SABRI & BEAMON (2000)	73
FIGURA 4 – DISTÂNCIA (KM) ENTRE ELEMENTOS DA CADEIA DE SUPRIMENTOS DA ÁGUA MINERAL	79

LISTA DE TABELAS E QUADROS

QUADRO 1 – VARIÁVEIS DO SUBMODELO ESTRATÉGICO	51
QUADRO 2 – VARIÁVEIS DO SUBMODELO OPERACIONAL	58
TABELA 1 – VETORES DE PERFORMANCE E CONFIGURAÇÃO 1 DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	82
TABELA 2 – VETORES DE PERFORMANCE E CONFIGURAÇÃO 2 DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	82
TABELA 3 – VETORES DE PERFORMANCE E CONFIGURAÇÃO 3 DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	83
TABELA 4 – VETORES DE PERFORMANCE E CONFIGURAÇÃO 4 DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	83
TABELA 5 – RECURSOS DISPONÍVEIS NO PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO UTILIZADO	106
TABELA 6 – RECURSOS UTILIZADOS PELO MODELO CUSTOMIZADO	107

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. RELAÇÃO ENTRE FLEXIBILIDADE DE VOLUME E CUSTO TOTAL (CAPACIDADE DE DISTRIBUIÇÃO ARTIFICIAL)	84
GRÁFICO 2. RELAÇÃO ENTRE NÍVEL DE SERVIÇO E CUSTO TOTAL	84
GRÁFICO 3. RELAÇÃO ENTRE FLEXIBILIDADE DE ENTREGA E CUSTO TOTAL	85
GRÁFICO 4. RELAÇÃO ENTRE NÍVEL DE SERVIÇO E CUSTO TOTAL (DEMANDA ARTIFICIAL)	85
GRÁFICO 5. RELAÇÃO ENTRE FLEXIBILIDADE DE ENTREGA E CUSTO TOTAL (DEMANDA ARTIFICIAL)	86

INTRODUÇÃO

O cenário agronegocial caracteriza-se pela grande variedade fluxos de bens em cadeias agroalimentares. O aumento da competição na indústria da água mineral tem obrigado as organizações e tomadores de decisão a buscarem, continuamente, formas de obter vantagem sobre os concorrentes. As decisões tomadas neste cenário competitivo tornam-se mais complexas devido à riqueza de situações problemáticas que ocorrem desde a zona de produção até a zona de consumo.

Esses fatores competitivos estão obrigando as empresas não só a mudar suas atividades, mas, principalmente, a oferecer aos clientes produtos e serviços com menor preço e melhor qualidade, tendo como objetivo primordial a satisfação total do cliente (Ching 1999). Assim, sob o foco da logística, possuir transporte eficiente, contar com os níveis mínimos de estoques necessários, levar pouco tempo para processar os pedidos e oferecer serviço de entrega sem nenhuma perda têm impacto positivo sobre a clientela e, conseqüentemente, sobre os negócios. Com isso, conclui-se que esta realidade não deva apenas ser abordada por um único objetivo, mas por uma série de objetivos a serem atingidos que possibilitem o diferencial competitivo.

Esse nível de complexidade torna-se mais óbvio quando tomadores de decisão passam a ver a organização sob a ótica sistêmica. Nessa ótica, a organização é parte de um todo, onde ela influencia e é influenciada por outros elementos do sistema (Simon, 1965 apud Flood, 1988; Morin, 1987; Dornier et al., 2000; Vorst et al., 1998).

O presente trabalho apresenta a modelagem de objetivos múltiplos da cadeia de suprimentos da água mineral, onde serão avaliados os custos totais, os níveis de serviços e as flexibilidades de volume e de entrega. Para isso, buscou-se na literatura um modelo que preenchesse esses objetivos para, posteriormente, customizá-lo à cadeia de suprimentos da água mineral localizada no Estado do Rio Grande do Sul.

Este trabalho está organizado em nove capítulos. O primeiro capítulo apresenta o contexto da pesquisa, onde é feita uma explanação do cenário atual da água mineral envasada, bem com a situação problemática na qual está presente o foco desta pesquisa. O contexto teórico está descrito no segundo capítulo, onde são revisados os principais conceitos e modelos de cadeia de suprimentos. Os objetivos geral e específicos são apresentados no terceiro capítulo. O quarto capítulo traz o método de pesquisa organizado em cinco subitens. Já o quinto capítulo descreve o processo de modelagem customizado à cadeia de suprimentos da água mineral, enquanto a aplicação do modelo customizado à cadeia de suprimentos da água mineral é feita no sexto capítulo. O sétimo capítulo apresenta as conclusões do trabalho através da descrição das principais características e atividades desenvolvidas nesta pesquisa. O oitavo capítulo informa as principais limitações desta pesquisa e traça algumas idéias para futuras pesquisas. Encerra-se o trabalho com as obras consultadas, seguindo-se os anexos um, dois, três e quatro.

1 CONTEXTO DA PESQUISA

1.1 O MERCADO DE ÁGUA MINERAL

A água mineral é um bem natural caracterizado pela sua demanda crescente, com aumento anual de 15% nos últimos 5 anos (Fonte: DPNM - Departamento Nacional de Produção Mineral). Nessa realidade, o mercado da água começa a ser concorrido não apenas por empresas locais, mas também por organizações maiores que vêm nela mais uma oportunidade de negócios.

Segundo o DPNM, órgão do Ministério das Minas e Energia responsável pelo setor, o Brasil possui as maiores reservas de água mineral de todo o Globo Terrestre, e estima que há a crescente tendência de escassez deste recurso natural em outras partes do globo. Isso sinaliza que empresas devem estar preparadas para atenderem aos mercados, atuais e futuro, competitivamente.

Segundo a Abinam (Associação Brasileira de Água Mineral), a indústria da água mineral potável de mesa movimentava cerca de US\$ 600 milhões por ano no País, gerando mais de 300 mil empregos diretos e indiretos. Em 1998, foram envasados mais de 2 bilhões e 437 milhões de litros, de acordo com o DPNM.

Por outro lado, o mercado mundial de água mineral é dominado por grandes empresas. A Nestlé, por exemplo, controla 16% do mercado mundial, seguida pela concorrente francesa Danone. A Nestlé pretende se expandir nos países emergentes onde o consumo, hoje, é de nove litros por habitante ao ano e a principal motivação de compra é a segurança sanitária (Fonte: Gazeta Mercantil – 13 e 14 de abril de 2002).

As cadeias de suprimentos de água mineral de bombonas (20 litros) são caracterizadas por uma configuração tradicional e, em geral, projetadas

empiricamente. Nessas cadeias, o fluxo de bens origina-se nas engarrafadoras localizadas, obrigatoriamente, no mesmo local do poço de captação. Os centros de distribuição são posicionados próximos das zonas de consumo (varejo).

Os sistemas (modelos) utilizados pelos elementos da cadeia limitam-se ao controle de estoques isoladamente, onde há somente a troca de dados relacionados às quantidades de pedidos a montante (Li & O'Brien, 1999). Duas experiências em cadeias de suprimentos de água mineral durante esta pesquisa mostram que a competitividade ocorre, basicamente, pela redução e barganha de custos de aquisição, desconsiderando aspectos relacionados ao tipo de serviço oferecido ao membro localizado a jusante da cadeia de suprimentos.

Nesse panorama constata-se que há a falta de modelos capazes de auxiliarem o processo decisório de gestão e que considerem os fluxos de bens ao longo dos estágios de cadeias de suprimentos de água mineral.

1.2 SITUAÇÃO PROBLEMÁTICA

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas no meio acadêmico através da aplicação do conhecimento na modelagem de sistemas complexos (Flood, 1988). As organizações, por sua vez, recorrem a novos recursos para competir, sendo um deles a utilização de modelos computacionais como ferramenta de auxílio ao processo de tomada de decisão. Entretanto, a equalização das cadeias de suprimentos ainda é dificultada por decisões isoladas que visam otimizar apenas um ou outro membro separadamente.

A complexidade e magnitude de situações problemáticas manuseadas (equacionadas) pela pesquisa operacional têm aumentado, porém a utilidade de modelos torna-se uma séria questão entre modeladores e usuários. Segundo Landry et al. (1983), a dubiedade conflitante ocorre simultaneamente entre a modelagem ser científica e sua aplicabilidade / validade.

Em cada passo do processo logístico da cadeia de suprimentos ocorre o fornecimento de serviço intermediário que contribui, em última instância, para o resultado final (Dornier et al., 2000). A otimização de todos estes processos tem o objetivo de alcançar a performance desejada por meio da minimização dos custos e do atendimento dos níveis adequados de serviço (Sabri e Beamon, 2000).

As cadeias de suprimentos deparam-se com uma série de desafios para atingir a performance desejada. O problema relevante que repercute no desempenho da cadeia de suprimentos diz respeito ao “trade off” entre o fornecimento de serviços logísticos e o controle de custos total. O equilíbrio entre os níveis de serviços logísticos e o custo total da cadeia de suprimentos depara-se com a dificuldade de prever alguns fenômenos, os quais referem-se à incerteza das demandas, diária e sazonal, e à incerteza do ciclo de performance. A incerteza da demanda diária ocorre periodicamente, devido à sua difícil previsibilidade. Por outro lado, a incerteza da demanda sazonal ocorre nas épocas em que o consumo cresce devido ao aumento da temperatura ambiente nos meses de verão. Isso leva a possíveis investimentos em estoques, recursos de transporte ou em centros de distribuição.

A incerteza do ciclo de performance provém das variações que ocorrem entre os tempos de transporte de um a outro membro da cadeia de suprimentos, dos tempos de produção e dos mínimos níveis de serviço requeridos. Essa leva ao aumento do nível de estoque médio em cada um dos elementos da cadeia e também dos recursos de transporte, repercutindo no aumento dos custos totais.

Essas duas formas de incerteza – a da demanda e do ciclo de performance – fazem com que os elementos da cadeia de suprimentos da água mineral (engarrafadora, centros de distribuição, transportadores e varejo) reduzam os custos, individualmente, em razão de desconhecerem os ganhos adquiridos a partir da gestão conjunta da cadeia de suprimentos. Além desse aspecto, a cadeia de suprimentos da água mineral caracteriza-se pelo viés à redução dos custos, sem considerar os níveis de serviço. Por isso, durante épocas em que a demanda média aumenta, cresce a incidência de pedidos incompletos, devido à escassez de produtos.

A bibliografia relevante chama a atenção para o “trade off” existente entre os níveis de serviço e os custos totais incorridos na cadeia de suprimentos. Para um determinado nível de serviço, frente às incertezas da demanda e do ciclo de performance; maiores serão os níveis médios de estoque e recursos de transporte para desenvolver o serviço logístico; quanto maiores forem estas incertezas (Bowersox e Closs, 1996, Sabri e Beamon, 2000; Ballou, 2001). Nesta perspectiva, há a necessidade de respostas rápidas, a partir da flexibilidade dos recursos de produção e distribuição.

Paralelamente a essa abordagem, a cadeia de suprimentos de água mineral depara-se com uma série de restrições de capacidade, referente a aspectos estratégicos e operacionais. Os aspectos estratégicos estão relacionados ao controle de custos totais e ao projeto da rede. Já os aspectos operacionais estão relacionados ao atendimento dos níveis de serviços exigidos, controle de custos em cada um dos estágios, controle de rotas e flexibilidade de entrega.

Tradicionalmente, os modelos de cadeia de suprimentos priorizaram questões estratégicas ou operacionais. Embora, há algum tempo, os modelos de cadeia de suprimentos tenham começado a incorporar a incerteza, grande parte deles centra-se apenas em um estágio, ou seja, no fornecimento, na produção ou na distribuição (Cohen e Lee, 1988). A literatura, porém, tem sinalizado para uma evolução nos modelos de cadeia de suprimentos, em virtude do aumento da complexidade e da magnitude de situações problemáticas encontradas nas suas relações (Ludwig, 2001).

Os modelos contemporâneos passaram a considerar aspectos estratégicos e operacionais sob incerteza. Os modelos anteriores, determinísticos, não consideravam tais contingências (Cohen e Lee, 1988). O custo total, o nível de serviços e o planejamento de todo o processo logístico ao longo da cadeia de suprimentos, por exemplo, exigem um modelo que envolva tanto aspectos estratégicos quanto aspectos operacionais (Sabri e Beamon, 2000).

O desafio abordado nesta pesquisa é referenciado pela modelagem matemática da cadeia de suprimentos de água mineral através de um modelo multiobjetivo e

estocástico. Multibjetivo, por planejar o desenho da rede de instalações e otimizar os custos totais da cadeia de suprimentos atendendo à demanda com flexibilidade de produção e flexibilidade de entrega com os níveis de serviço determinados. Estocástico, por incorporar as incertezas acima citadas (Jacoby e Kowalik, 1980).

1.3 JUSTIFICATIVA

O crescente interesse das escolas de negócios e das organizações pela sistêmica, especificamente abordada em canais de distribuição por meio de estudos desenvolvidos sobre a cadeia de suprimentos, tem apresentado uma série de desafios à implementação de estratégias e controle operacional. Para Cohen e Lee (1988), muitos modelos na literatura estão relacionados com o fornecimento de matéria-prima, ou produção ou distribuição, pois no passado cada estágio da cadeia de suprimentos era tratado como um sistema fechado. Como resultado, muitas das relações complexas que ocorrem na cadeia de suprimentos eram ignoradas. Segundo Korpela et al. (2001), sabe-se que é possível ganhar ainda mais vantagem pelo melhoramento da cadeia logística, em vez de melhorar a performance de um ou outro membro da cadeia isoladamente. Segundo Vorst et al. (1998), a competição entre firmas individuais está sendo substituída pela competição entre cadeias de suprimentos.

A relação existente entre as organizações e elementos da cadeia de suprimentos em questão possui as características da função logística, haja vista que se trata da gestão de fluxos de bens e estoques, sob determinados níveis de serviço. Além disso, as flexibilidades de volume e entrega apresentam o potencial de respostas frente ao ambiente de incerteza (Sabri e Beamon, 2000), proporcionado pela demanda variável e pela variância do ciclo de performance (Bowersox e Closs, 1996) encontrados na cadeia da água mineral.

Para Korpela et al. (2001) e Lehmusvaara (1998), o foco da logística está mudando cada vez mais, em direção ao fornecimento de melhores serviços aos clientes, em lugar de se fixar apenas na minimização dos custos ou na maximização dos lucros do fornecedor.

Há quase duas décadas, Jacoby e Kowalik (1980) já chamavam a atenção para uma grande quantidade de experimentos em modelagem matemática. Ao longo do tempo, esses experimentos têm se intensificado com a adoção e uso de computadores e “softwares”. Segundo Korpela e Lehmusvaara (1999), a pesquisa em logística, desde 1990, tem apresentado muitas publicações de otimização, graças ao poder das ferramentas matemáticas, à maior disponibilidade de recursos da base de dados nas empresas e ao maior interesse dos tomadores de decisão em utilizar os resultados dos modelos matemáticos.

Entretanto, a aplicação de modelos multiobjetivos e estocásticos ainda é escassa em cadeias de suprimentos. Sua utilização contribui como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, uma vez que modelos desta categoria proporcionam a análise sistêmica da cadeia de suprimentos sob a importância de diversos objetivos. Além disso, o controle de custos total possibilita a escolha das melhores alternativas de configuração da rede para atender a determinados níveis de serviços.

De acordo com Mason et al. (1997), a Federal Express Corporation, por exemplo, tem usado a pesquisa operacional para apoiar suas maiores decisões de negócios, desde o início de seu serviço de entrega noturna, já em 1973. Porém, a carência de métodos científicos aplicáveis fez com que somente na última década modelos pudessem ser desenvolvidos no âmbito da logística.

2 CONTEXTO TEÓRICO

O contexto teórico é apresentado em duas partes. A primeira fundamenta-se na bibliografia relevante para abordar os elementos e processos necessários à compreensão da modelagem da cadeia de suprimentos da água mineral. A segunda apresenta uma revisão dos modelos matemáticos de cadeia de suprimentos.

2.1 A LOGÍSTICA E A VISÃO DE CADEIA DE SUPRIMENTOS

Para Dornier et al. (2000), a logística é, primeiramente, um fornecedor de serviços. Bowersox e Closs (1996) estabelecem que a logística é o esforço integrado de criar valor ao cliente a um baixo custo. O desafio é balancear as expectativas de serviço com os custos, de maneira a alcançar a performance desejada.

O ciclo de performance é a primeira unidade de análise na logística integrada, pois ele é a unidade básica do projeto e performance operacional (Bowersox e Closs, 1996). A perspectiva do ciclo de performance é importante para satisfazer os requerimentos logísticos, uma vez que é neste ciclo que fornecedores, produtores, atacadistas, varejistas e clientes unem-se através da comunicação e do transporte. Os ciclos de performance tornam-se dinâmicos ao acomodarem os requerimentos de entrada e saída. As entradas do ciclo de performance são os pedidos com os requerimentos especificados de produtos ou materiais, enquanto as saídas ocorrem a partir das operações logísticas. No momento em que os requerimentos são atendidos, o ciclo de performance é efetivo na sua missão. A eficiência está relacionada aos gastos de recursos necessários para alcançar a eficácia logística, convém ressaltar que a eficácia e a eficiência são conceitos-chave no gerenciamento logístico.

No presente estudo, sob a perspectiva da logística, a eficácia relaciona-se ao fornecimento de níveis adequados de serviço; a eficiência, à otimização dos custos totais na cadeia de suprimentos.

2.1.1 A Vantagem da Gestão de Fluxos

A cadeia de suprimentos, conforme Sabri e Beamon (2000), é o conjunto de instalações, fornecedores, clientes, produtos e métodos de controle de estoque, compras e distribuição. Para Bowersox e Closs (1996), o aumento do foco na performance e na eficácia da cadeia de suprimentos demanda medidas que oferecem uma perspectiva integrada.

As medidas de performance da cadeia de suprimentos envolvem vários elementos ao longo de seu sistema. Os problemas de sistemas de suprimento-distribuição, produção-distribuição e estoques-distribuição vêm sendo estudados por muitos anos (Sabri e Beamon, 2000). Porém, o fato de muitos desses estudos centrarem-se somente em um único componente do sistema de suprimento–produção–distribuição leva a resultados pontuais que muitas vezes não contribuem para os resultados globais da cadeia de suprimentos (Cohen e Lee, 1988). A força competitiva de um produto em um mercado é, conforme Hahn et al. (2000), determinada pelas capacidades combinadas de todos os elementos da cadeia de suprimentos, e não por uma firma de manufatura isoladamente.

2.1.2 A Função da Logística

Segundo Bowersox e Closs (1996), a competência da logística é definida pela coordenação: 1) do projeto da rede de instalações; 2) informação; 3) transporte; 4) estoque; 5) armazenamento, manuseio de materiais e embalagem.

2.1.2.1 Projeto da Rede de Instalações

Para Bowersox e Closs (1996) e Ballou (2001), o projeto da cadeia de suprimentos determina o número de instalações necessárias para melhor desenvolver o

trabalho da logística. Para Ballou (2001), encontrar instalações fixas ao longo da rede logística é um problema que dá formato, estrutura e forma ao sistema logístico inteiro.

O número de artigos científicos de desenho da rede de instalações tem aumentado graças ao poder das ferramentas matemáticas (Korpela e Lehmusvaara, 1999). Segundo Korpela et al. (2001), o projeto da rede de instalações da cadeia de suprimentos tem sido importante parte do processo decisório logístico. A importância do projeto da cadeia de suprimentos tem aumentado quando mais e mais firmas têm realizado a possibilidade de ganhar valor adicional aos clientes por meio de sua reestruturação.

Segundo Herer et al. (1999), o projeto da cadeia de suprimentos deve ser pensado como um processo dinâmico de organizar redes capacitadas a atender as necessidades do trabalho logístico em um determinado momento. Segundo Lee e Billington (1992), o projeto da rede de instalações não deve ser separado das decisões operacionais. Quando as empresas adicionam ou fecham uma fábrica ou centro de distribuição em uma cadeia de suprimentos, a principal consideração deve-se aos custos fixos e custos logísticos. Porém, muitas vezes não é dada a devida importância ao efeito de mudanças da rede de instalações nos fatores de eficiência operacional, tais como investimentos de estoque e tempo de resposta de pedidos.

No projeto do sistema logístico, um sensível balanço deve ser mantido entre os custos de transporte e o nível de serviço (Bowersox e Closs, 1996). Em publicação científica que teve o objetivo de revisar as redes de logística reversa, Fleischmann et al. (2000) citam uma série de trabalhos que utilizam a programação linear inteira para a otimização destes sistemas.

2.1.2.2 Informações na Cadeia de Suprimentos

O fluxo de informações identifica pontos específicos que se relacionam aos pedidos colocados no sistema logístico (Bowersox e Closs, 1996). Para Cooper e Ellram (1993), o fluxo de informação não deve ir apenas de montante a jusante da

cadeia de suprimentos, mas em ambos os sentidos. Para Bowersox e Closs (1996), a informação precisa é essencial para um eficaz projeto, pois a partir dela é possível obter informações sobre o estado do pedido do cliente, disponibilidade de produto, programação de entregas e faturas sem erros, que são elementos necessários para o atendimento das necessidades dos clientes. Segundo Lee e Bilington (1992), quando os clientes colocam os pedidos, eles desejam saber quando seus produtos serão entregues, especialmente quando ocorre atraso na entrega dos mesmos.

Conforme Bowersox e Closs (1996), a tecnologia da informação tem a capacidade de equacionar uma grande quantidade de dados de forma precisa. Entretanto, o processamento incorreto do pedido eleva todos os custos logísticos e normalmente não resulta em vendas, criando distúrbios potenciais na cadeia de suprimentos (Lee e Billington, 1992). Informam, ainda, estes autores que os atrasos retroativos de informação e transmissão dificultam os momentos exatos de carregamento para os clientes.

2.1.2.3 Transporte

Em geral, os custos de transporte são componentes significantes da estrutura de custos global da cadeia de suprimentos e importantes economias podem ser alcançadas, devido à obtenção de vantagem de taxas de transporte diferenciadas (Vroblefski et al. , 2000).

Determinada a rede de instalações logísticas, o transporte é a área operacional da logística que posiciona o inventário. Segundo Bowersox e Closs (1996), sob o foco da logística, três fatores são fundamentais para a performance do transporte: custo, velocidade e consistência.

Para Bowersox e Closs (1996), as economias de custo e o preço de transporte estão relacionados com os fatores e características que determinam os custos e taxas de transporte. As economias de transporte são influenciadas por sete fatores, ou seja,

distância, volume, densidade, formato do produto, manuseio, integridade do produto e valores de mercado.

A segunda dimensão das economias de transporte relaciona-se aos critérios usados para alocar os componentes de custo. Custos de transporte são considerados como uma combinação de categorias. Os principais são os custos fixos e os custos variáveis de transporte (Bowersox e Closs, 1996). Para Ballou (2001) os custos variáveis são aqueles que oscilam de acordo com a distância ou com o volume a ser transportado; os custos fixos não sofrem variação. Conforme Min (1998), na avaliação das opções de transporte, a análise de custos é a primeira restrição, devido ao custo associado com as diversas opções de transporte poderem ter um profundo impacto no custo total da cadeia de suprimentos. Além disso, nem todos os custos da frota variam com a quilometragem. Alguns elementos, como os salários do motorista, não dependem da quilometragem.

Para Vroblefski et al. (2000), muitos transportadores convencionais, em geral, oferecem descontos relativos à relação entre a taxa unitária e a quantidade da carga. Consoante Ballou (2001), as taxas reduzidas de transporte para tamanhos maiores de embarque incentivam embarques em grandes quantidades. Consolidar embarques pequenos em grandes é a maneira preliminar de conseguir um transporte a custos mais baixos por unidade de peso.

Na opinião de Min (1998), a escolha entre transportadores comuns ou privados é uma das mais importantes decisões de transporte, pois ela afeta o serviço ao cliente, o investimento de capital, os gastos operacionais e as responsabilidades gerenciais. Segundo este autor, há muitos outros fatores que fazem com que uma destas duas escolhas seja a mais eficiente. Estes fatores incluem custos de transporte porta-a-porta, entrega a tempo, perda por material danificado durante o transporte, cobertura geográfica, requerimentos de serviços especiais, etc. Hung e Chang (1999) informam que a média dos fluxos de tempo de transporte em um mesmo percurso estabelece o fluxo de tempo médio da rota.

2.1.2.4 Controle de Estoques

O objetivo principal do estoque, segundo Ballou (2001), é garantir que o produto esteja disponível no tempo e nas quantidades desejadas. O gerenciamento de estoques envolve equilibrar a disponibilidade de produto com os custos de fornecimento.

Conforme Bowersox e Closs (1996), os requerimentos de estoque dependem da estrutura da rede de instalações e dos níveis de serviço. Para Ballou (2001), existem razões que favorecem e que contrariam a existência de estoques. Os estoques permitem o atendimento imediato às solicitações do membro a jusante na cadeia de suprimentos. De acordo com Ballou (2001), os estoques fornecem um nível de disponibilidade de produtos e serviços, os quais, quando localizados nas proximidades da clientela, podem satisfazer uma exigência elevada de serviço ao cliente. Embora manter estoques tenha um custo, o estoque pode, indiretamente, reduzir custos operacionais em outras atividades, bem como compensar o custo de sua manutenção. Por outro lado, os críticos desafiam a manutenção de estoques ao longo de diversas linhas (Ballou, 2001). Primeiramente os estoques são considerados desperdícios, pois absorvem capital que poderia ser aplicado em outros fins. Em segundo lugar, os estoques podem ocultar problemas de qualidade. Usar estoques promove uma atitude insular sobre a gestão da cadeia de suprimentos. Com estoques, muitas vezes, é possível isolar um estágio dos outros na cadeia de suprimentos. Sem estoques, no entanto, é difícil evitar o planejamento e a coordenação dos diversos elementos que compõem a cadeia de suprimentos. Segundo Bowersox e Closs (1996), há também o risco do produto tornar-se obsoleto.

O estoque, de acordo com Bowersox e Closs (1996), tem quatro funções. A primeira –a especialização geográfica– ocorre quando uma grande distância separa a base produtiva da zona de consumo. A segunda refere-se à otimização dos lotes produzidos ou montados, a fim de obter eficiência e especialização através de lotes econômicos de produção. A terceira diz respeito ao balanço entre o suprimento e a demanda, onde pode-se encontrar os mais notáveis exemplos durante períodos de

consumo sazonal. Finalmente, os estoques de segurança têm o objetivo de disponibilizar produtos frente às variações de incerteza da demanda e do reabastecimento.

Geralmente, o estoque é avaliado, segundo Ballou (2001), com base na probabilidade de ser capaz de preencher um pedido para um produto do estoque atual. Esta probabilidade, ou a taxa de preenchimento do item (“fill rate”), é chamada de nível de serviço.

Conforme Ballou (2001), os custos de estoque são divididos em três classes gerais, que são: custos de obtenção, custos de manutenção e custos de falta de estoque. Os custos de obtenção podem incluir o custo de produção do produto para vários tamanhos de pedido: o custo de ajustar o processo de produção, o custo de processar um pedido através do departamento de compras, o custo de transmitir o pedido para os pontos de suprimento, o custo de transportar o pedido quando as despesas de transporte não estiverem incluídas no preço das mercadorias compradas e o custo de qualquer manuseio de materiais ou processamento de mercadorias no ponto de recepção.

A estimativa dos custos de manutenção, para Bowersox e Closs (1996), pode ser obtida a partir dos níveis médios de estoque. Tradicionalmente, o cálculo destes custos inclui os custos do capital investido no estoque, taxas de espaço, seguro e obsolescência. Ballou (2001) afirma que os custos de falta de estoque são incorridos quando um pedido é colocado, mas não pode ser preenchido a partir do estoque no qual foi designado.

A quantidade econômica de pedido (Q) é a quantidade do pedido a ser reabastecida, que minimiza os custos do pedido e da manutenção de estoques (Bowersox e Closs, 1996; Ballou, 2001). De acordo com Bowersox e Closs (1996), a identificação de tais quantidades assume que a demanda seja relativamente estável ao longo do ano.

O controle de estoque na cadeia de suprimentos da água mineral é feito através do método de controle avançado de estoque puxado, adotado na literatura por Ballou (2001). Neste controle, significa que há o reconhecimento de que a demanda e o tempo de reabastecimento são incertos (Ballou, 2001). A incerteza de demanda diz respeito às flutuações na taxa de demanda durante o ciclo de performance. As incertezas do ciclo de performance envolvem as variações do ciclo de reabastecimento de estoque (Bowersox e Closs, 1996).

Segundo Ballou (2001), três métodos de controle de estoque formam os alicerces da maioria das filosofias de gerenciamento do tipo puxado com padrões de demandas perpétuas: o método do ponto de pedido (s,Q) , o método de revisão periódica (q,Q) e o método min-max (s,S) . Os sistemas práticos de controle podem estar baseados em um desses métodos ou na sua combinação.

A modelagem da cadeia de suprimentos da água mineral baseia-se em uma política de controle de estoques de revisão periódica (q,Q) na zona de consumo. Já a produção/estoques de produtos e a distribuição adotam o método min-max (s,S) .

O controle de estoques de revisão contínua (s,Q) supõe que a demanda seja perpétua e atue continuamente sobre o estoque para reduzir seu nível. Quando o estoque está esgotado, isto é, quando seu nível é igual ou menor que uma quantidade especificada chamada ponto de pedido (ROP – do inglês “reorder point”), uma quantidade econômica de pedido é colocada ao fornecedor para reabastecer o estoque. A quantidade ótima de pedido (Q^*) chega em um determinado momento contrabalançado pelo tempo de reabastecimento. Entre o tempo de colocação do pedido de reabastecimento no ROP e o da chegada no estoque há o risco de que a demanda exceda a quantidade restante no estoque (Ballou, 2001). O cálculo da probabilidade desta ocorrência eleva ou reduz o ponto de pedido, através do ajuste da quantidade ótima de pedido (Q^*) .

O sistema de controle min-máx (s,S) é provavelmente o mais comum de todos os procedimentos de controle de estoques puxado. Segundo Ballou (2001), este

procedimento é uma variante do modelo de ponto de pedido. Entretanto, o sistema de reabastecimento substitui a quantidade ótima de pedido por um tamanho especificado de lote, determinado pela diferença entre o ponto máximo (S) e o ROP. O ponto máximo existe para garantir um nível máximo de estoque. O nível mínimo é encontrado similarmente ao ROP.

O sistema de revisão periódica (q,Q), segundo Ballou (2001), é muito semelhante ao modelo do ponto de pedido sob condições de demanda incerta. Entretanto, uma diferença importante no modelo de revisão periódica é que as flutuações da demanda durante o ciclo do pedido devem ser protegidas. Por isso, no método (q,Q) não existe nível mínimo de estoques, mas sim uma quantidade a ser pedida, que reflete a diferença da quantidade de produtos entre o nível máximo e o nível em que se encontra o estoque quando da revisão preestabelecida.

2.1.2.5 Armazenamento, Manuseio de Materiais e Embalagem

Assim como as quatro áreas funcionais da logística anteriores, o armazenamento, manuseio de materiais, armazenamento e embalagem também representam parte integral da solução. Quando um armazém é requerido, a firma pode escolher entre um membro especialista controlá-lo ou operar o próprio armazém. Segundo Bowersox e Closs (1996), a decisão depende de aspectos relacionados à capacidade da instalação de armazenar. Dentro do armazém, o manuseio de materiais é uma importante atividade, pois produtos devem ser recebidos, movidos, sortidos, e preparados para atender os requerimentos do cliente. Importante é ressaltar que, quando o manuseio é desenvolvido de forma precária, os custos oriundos das perdas podem ser substanciais (Bowersox e Closs, 1996).

Com o objetivo de facilitar a eficiência, os produtos são manuseados na forma de grandes embalagens (“pallets”) que, segundo Bowersox e Closs (1996), servem para proteger os produtos durante o processo logístico e aumentar a eficiência do carregamento e descarregamento.

2.1.3 Elementos de Performance da Cadeia de Suprimentos

Os elementos de performance apresentados neste item estão relacionados aos aspectos considerados no presente estudo de modelagem da cadeia de suprimentos da água mineral.

De acordo com Herer et al. (1999), a performance da cadeia de suprimentos representa os “trade offs” entre os elementos de custos e serviço. Enquanto o serviço é tipicamente medido em termos de tempo e de preenchimento de taxas (“fill rate”), os custos são equacionados com base nas medidas de estoques médios e custos dos embarques. Estes elementos são apresentados em duas partes. A primeira apresenta os critérios de análise que congregam o nível de serviços do modelo em questão. A segunda parte apresenta o conceito de custo total e como se dá o seu controle a partir das variáveis independentes do modelo de cadeia de suprimentos.

2.1.3.1 Nível de Serviços Logísticos na Cadeia de Suprimentos

Para Lee e Billington (1992), a cadeia de suprimentos deve ser mensurada a partir de suas respostas aos clientes. Segundo Bowersox e Closs (1996), os serviços logísticos básicos são medidos em termos de: 1) disponibilidade; 2) performance operacional; 3) confiabilidade.

Disponibilidade significa ter estoque continuamente para reunir os produtos requeridos pelos clientes. Embora a disponibilidade possa ser alcançada de várias formas, a prática mais comum é possuir bens estocados.

Performance operacional, segundo Ballou (2001), é o lapso de tempo entre o momento em que o pedido do cliente, o pedido de compra ou a requisição de um serviço é colocado e o produto é recebido pelo cliente. A performance operacional envolve entrega rápida e consistente (Bowersox e Closs, 1996). Este aspecto dos serviços logísticos pode ser notado pela capacidade da firma para atender pedidos inesperados.

A confiabilidade do serviço envolve a consistência com que a empresa desenvolve os atributos da logística. Segundo Bowersox e Closs (1996), a chave para obter confiabilidade é a medição precisa da disponibilidade e da performance operacional.

As estratégias JIT (do inglês “just-in-time”) e QR (do inglês “quick response”) podem contribuir à alta responsividade e à diminuição de estoques, conforme Slack et al. (1999). Porém, a alta rotatividade e a variabilidade de volumes e tipos de produtos requeridos pelo cliente a jusante do fluxo logístico e a distância que separa o centro de distribuição da fábrica fazem com que haja estoques de segurança (Fleury et al., 2000).

Segundo Li e O’Brien (1999), estratégias JIT ou QR podem levar a altas respostas do ciclo de performance. Entretanto, quando o ciclo de entrega é mais longo do que o ciclo de pedido, estratégias de produzir para estocar ou fazer a partir do estoque, compensam ser adotadas.

A modelagem da cadeia de suprimentos da água mineral mede o nível de serviços pela taxa de preenchimento ou “fill rate”. A taxa de preenchimento mede a porcentagem de pedidos atendidos imediatamente.

2.1.3.2 Custos Totais na Cadeia de Suprimentos

O conceito de custo total é simples e complementa a noção de rede logística como um sistema de performance integrada (Bowersox e Closs, 1996). Para Ballou (2001), essencial para o escopo e planejamento do projeto logístico é a análise das compensações (“trade off”) que, por sua vez, leva ao conceito de custo total. A compensação de custos é o reconhecimento de que os padrões de custo de várias atividades da empresa apresentam, freqüentemente, características que as põem em conflito entre si. Tal conflito é gerenciado pelo equilíbrio das atividades de forma que elas possam ser otimizadas coletivamente.

Segundo Bowersox e Closs (1996), o custo total fornece a lógica para integrar as operações logísticas ao longo da cadeia de valor. A idéia básica é a de que todas as

firmas que participam da cadeia de valor deveriam cooperar para alcançar performance superior. Isso, para Ballou (2001), leva ao fato de que as decisões tomadas para redução dos custos em uma empresa podem repercutir no aumento dos custos para outras empresas da cadeia de suprimentos. Por isso, Ballou (2001) afirma que a equação de custo total deve ser expandida para além dos limites legais de uma empresa.

Para Sabri e Beamon (2000), o custo total da cadeia de suprimentos é composto por: 1) preço de compra e custo de transporte do fornecedor de matéria-prima até a produção; 2) pelos custos fixos e variáveis associados à produção; 3) pelos custos fixos e variáveis de manusear e armazenar produtos; 4) pelos custos de transporte de deslocar o produto da produção para os centros de distribuição e dos centros de distribuição até a zona de consumo.

2.1.3.3 Repercussão da Incerteza na Cadeia de Suprimentos e Flexibilidade

A incerteza, para Sabri e Beamon (2000), é um dos mais desafiadores e importantes problemas durante o gerenciamento da cadeia de suprimentos. De fato, ela é uma dificuldade primária na análise da performance da cadeia de suprimentos. Na ausência de fatores randômicos, os problemas relacionados ao suprimento de produtos e serviços são eliminados.

De acordo com Lee e Billington (1992), há muitas fontes de incerteza na cadeia de suprimentos: ciclo de tempo do fornecedor e performance de entrega, tempo do processo de manufatura, tempos de transporte e demanda. A incerteza no contexto de cadeia de suprimentos deve-se basicamente a dois fatores: a incerteza da demanda e a incerteza operacional (Cohen e Lee, 1988; Bowersox e Closs, 1996; Ballou, 2001).

Para Bowersox e Closs (1996), o principal objetivo do gerenciamento logístico está no fato e na possibilidade de reduzir as incertezas. Estes autores afirmam que uma das principais funções do gerenciamento do estoques é proteger-se da ocorrência de falta de estoque. O dilema é que a estrutura do ciclo de performance por si mesma, as

condições operacionais e a qualidade das operações logísticas combinam randomicamente para criar a variância. Por outro lado, quando demandas, tempos de produção e transporte são completamente fixados, eles são totalmente previsíveis. Para Cohen e Lee (1988), quando existem inúmeras fontes de incertezas envolvidas na cadeia de suprimentos, os fluxos não são determinísticos. Como resultado, os estoques de segurança existentes são necessários para minimizar os atrasos de produção em virtude da escassez de bens.

A teoria da probabilidade é baseada na mudança randômica de uma determinada ocorrência entre um grande número de ocorrências. Segundo Bowersox e Closs (1996), a probabilidade de ocorrências assume valores próximos das medidas de tendência central. Enquanto números da distribuição de frequência são utilizados no controle de inventário, a básica é a distribuição normal, onde as três medidas de tendência central são idênticas.

A base para a previsão usando a distribuição normal é o desvio padrão das observações que variam em torno das medidas de tendência central. O desvio padrão é a medida de dispersão de eventos dentro da área especificada pela curva normal. Em termos de controle de inventário, o desvio padrão fornece meios de se estimar o estoque de segurança requerido para obter o grau especificado de proteção sobre a demanda média (Ballou, 2001). O estoque de segurança tem o objetivo de proteção contra as faltas de estoques causadas pela incerteza de cada membro da cadeia de suprimentos (Bowersox e Closs, 1996).

Os gastos com estoques de segurança são maiores quanto maiores forem as incertezas, o que afeta a performance operacional da cadeia de suprimentos. Frente a este ambiente de incerteza, com o objetivo de diminuir os estoques de segurança, as firmas podem buscar capacidade de obter respostas rápidas a partir dos recursos de comunicação, transporte e produção. Lembrando que a performance operacional envolve entrega rápida e consistente, para Bowersox e Closs (1996), a capacidade de resposta da cadeia de suprimentos pode ser vista como a flexibilidade.

A flexibilidade, para Stock e Kasarda (1998), pode ter diferentes interpretações. Para Upon (1994), a flexibilidade pode ser vista como um conjunto de capacidades e fontes de vantagem competitiva em um ambiente em particular. Ela é a habilidade de mudar ou adaptar-se em pouco tempo, custo ou esforço de performance. Segundo Slack e Corrêa (1994), a exigência de ser flexível é normalmente atribuída a dois fatores principais: incertezas ambientais e necessidade (dados por condicionantes de mercado) do sistema de manufatura prover variabilidade de saídas.

Na modelagem da cadeia de suprimentos, a flexibilidade adotada refere-se às flexibilidades de volume e de entrega, aplicados por Sabri e Beamon (2000). Estes dois tipos de flexibilidade, já citados na teoria de manufatura por Slack e Corrêa (1994) correspondem, respectivamente, à habilidade de alterar os níveis agregados de produção com eficácia e à habilidade de alterar, de forma eficaz, as datas de entrega prometidas.

Para Gerwin (1993), os sistemas de medida de performance asseguram que as decisões estratégicas e operacionais sejam integradas. A flexibilidade do nível estratégico deve posicionar-se frente à incerteza. No nível operacional, no entanto, ela é relacionada com métodos específicos de entrega. A flexibilidade de volume permite acréscimos ou decréscimos no nível de produção agregado.

2.2 MODELOS DE CADEIA DE SUPRIMENTOS

Este item apresenta uma revisão contextual dos modelos de cadeia de suprimentos. O primeiro subitem apresenta uma revisão dos modelos de cadeia de suprimentos que priorizam questões estratégicas; o segundo subitem apresenta aqueles modelos que priorizam questões operacionais. Por último, são apresentados os modelos de cadeia de suprimentos contemporâneos, que englobam tanto questões estratégicas quanto operacionais. Segundo Li e O'Brien (1999) e Sabri e Beamon (2000), o objetivo de imitar o procedimento de decisão do mundo real tem feito com que os modelos sejam desenvolvidos em dois níveis da cadeia de suprimentos: no nível estratégico e no nível operacional.

Há um consenso na literatura entre pesquisadores relevantes (Li e O'Brien, 1999; Sabri e Beamon, 2000) de que o nível estratégico da cadeia de suprimentos centra-se nos problemas de projeto da rede de instalações e no custo total da cadeia de suprimentos; e o nível operacional centra-se nos problemas de decisão das operações de transporte, de armazenamento e de estocagem, do nível de serviço e flexibilidade para cada um dos componentes da cadeia de suprimentos.

2.2.1 Modelos que Priorizam Questões Estratégicas

Um trabalho inovador de cadeias de suprimentos globais foi desenvolvido por Arntzen et al. (1995) e aplicado a uma corporação de equipamentos digital. O objetivo desses autores neste estudo foi avaliar alternativas de desenho da rede de instalações de cadeia de suprimentos globais através da otimização da rede mundial de manufatura e distribuição. Embora o modelo de Cadeia de Suprimentos Global (MCSG) considere fatores como custos fixos e custos variáveis, estoques, distribuição via multimodal, taxas e impostos, ele é um modelo determinístico que considera apenas aspectos estratégicos.

Em estudo ligado a agronegócios, Lopes e Caixeta-Filho (2000) desenvolveram um modelo que tem o objetivo de encontrar a maneira mais eficiente de organizar as granjas de suínos, bem como os abatedouros no Estado de Goiás, de modo a obter a minimização dos custos de transporte de matéria-prima da ração, de acordo com as previsões de safra, bem como diferentes tamanhos de granjas e abatedouros de suínos. Embora esse modelo tenha trazido contribuições para o meio agronegocial, ele caracteriza-se por priorizar somente questões estratégicas fundamentadas apenas em custos.

Em recente estudo, Korpela et al. (2001) desenvolveram um modelo que propõe que o projeto da rede de instalações da cadeia de suprimentos seja feito em função dos elementos de serviço e da própria estratégia da firma, e não nos tradicionais moldes baseados em custos. O modelo desenvolvido nesse estudo integra o processo hierárquico analítico (AHP – do inglês “analytic hierarchical process”) com a

programação inteira combinada (MIP – do inglês “mixed integer program”). Embora esse trabalho tenha o mérito de relacionar um processo a uma programação de otimização, ele limita-se aos aspectos estratégicos, excluindo aspectos operacionais.

Outro importante trabalho, desenvolvido por Needham e Evers (1998), relaciona-se aos embarques transversais (tradução do inglês “transshipments”). Os autores propõem um modelo como um meio prático de perceber quando os embarques transversais devam ser utilizados. Nesse estudo, os autores definem o embarque transversal como a divisão de bens no estágio mais extremo a jusante da cadeia de suprimentos, o varejo. Não analisam, no entanto, questões ligadas ao nível de serviço e, portanto, limitam-se a considerar aspectos de custo.

Outra importante pesquisa, realizada por Ross (2000), propõe um modelo que acrescenta algo aos tradicionais modelos de alocação de instalações. Para ele, muitos dos modelos que otimizam a rede de facilidades não apresentam resultados empíricos que documentem os “trade offs” entre a eficiência dos recursos, a maximização do lucro e as medidas-chave dos serviços, que relatem a performance dos recursos. Segundo esse autor, há uma problemática quando os recursos da cadeia de suprimentos, muitas vezes modelados como múltiplos objetivos, são transformados em restrições de um único objetivo, abordada nesse artigo como a maximização do lucro. Embora o modelo de Ross (2000) considere alguns aspectos até então inexplorados em cadeias de suprimentos relacionados à maximização do lucro, o mesmo limita-se ao determinismo.

2.2.2 Modelos que Priorizam Questões Operacionais

Cohen e Lee (1988) desenvolveram um modelo estocástico e multiobjetivo. Sua estrutura pode ser usada para prever a performance operacional da firma com respeito aos custos de seus produtos, o nível de serviço fornecido a seus clientes e a agilidade de resposta verificada no sistema de produção–distribuição. O problema de interesse, nesse trabalho, está relacionado com as medidas dos “trade offs” de custos, níveis de serviço e flexibilidade do sistema produção–distribuição. Porém, as decisões

associadas à estratégia, como o desenho da rede de instalações, o planejamento da capacidade e a escolha tecnológica, são consideradas constantes neste problema. Entretanto, o modelo de Cohen e Lee (1988) representa a primeira tentativa de formular, ligar e otimizar o complexo sistema produção–distribuição.

O trabalho de Chandra (1993) apresenta um modelo integrado multiperíodo que enfatiza a coordenação da interdependência que há entre a zona de consumo e as decisões de reabastecimento nos centros de distribuição, frente a situações randômicas geradas com o uso do computador. Nesta perspectiva, para satisfazer à demanda do consumidor, a armazenagem deve estar sendo constantemente suprida pelos fornecedores ou fábricas. Embora o trabalho de Chandra (1993) tenha tido o objetivo de analisar um único aspecto do sistema de distribuição na cadeia de suprimentos, foi um dos precursores, ao analisar a influência dos embarques transversais no custo de distribuição. Para Chandra (1993), a suposição de custos fixos de transporte (sem a consideração das rotas dos veículos) dos trabalhos até então desenvolvidos, não levaram em consideração a interdependência entre lotes de distribuição, rotas e frequência de pedidos. Embora Chandra (1993) cite que esse processo possa aumentar o nível de serviço para os clientes, ele não se detém nessa questão.

Tsouros e Satratzemi (1996) desenvolveram um modelo que encontra o melhor tempo de distribuição para o problema de locação de instalações de fornecimento da cadeia. Nesse estudo, Tsouros e Satratzemi (1996) confrontam o problema de locação de novas instalações com algumas restrições relacionadas a determinados números de produtos de cada fornecedor e os bens requeridos em cada centro de demanda. Embora o modelo de Tsouros e Satratzemi (1996) tenha aspectos relevantes como, por exemplo, as restrições de um conjunto produtos e a possibilidade de relacionar ciclos de tempo ao projeto da rede; ele não considera as incertezas ambiental e operacional.

O problema da perda de vendas devido à falta de estoque é abordado por Bordley et al. (1999). Os autores desenvolveram um modelo estocástico que trata das questões relacionadas à escassez de produtos estocados. Bordley et al. (1999) concluem que este “déficit” de produtos é proporcional ao desvio padrão da variação

da demanda do varejista. Isso implica que a consolidação de produtos nos estoques dos varejistas pode reduzir as perdas de vendas por falta de produto armazenado. A solução encontrada pelos autores é que as perdas das vendas podem ser potencialmente afetadas quando a demanda tem alta variância. Os altos custos de estocagem elevam a probabilidade de falta de estoque e os clientes podem buscar produtos disponíveis em outro varejo sempre que houver falta de produtos em estoque. Porém, diversificar o portfólio de estoques reduz a incerteza global, de forma que, consolidar o varejo reduz a incerteza da demanda, a qual reduz as perdas de vendas. Embora o estudo considere fatores estocásticos da demanda e da escassez de produtos, ele não recorre a aspectos que relacionem os níveis de serviço à disponibilidade de produtos.

Gilbert e Ballou (1999) desenvolveram um modelo que quantifica os benefícios do fornecedor a partir do comprometimento avançado para os clientes a jusante da cadeia de suprimentos. Esse modelo centra-se especificamente nas vantagens que podem ser obtidas a partir do balanço dos tempos de entrega de pedidos com descontos. Segundo Gilbert e Ballou (1999), quando balanceados, os descontos podem levar à redução dos custos para ambos os elementos da cadeia de suprimentos. Embora Gilbert e Ballou (1999) tratem do fornecimento de serviços frente à incerteza, o estudo desses autores limita-se ao estágio localizado na extremidade final da cadeia de suprimentos.

Em artigo, Jassen e Kok (1999) consideraram um sistema de estoque com dois fornecedores. O acordo de fornecimento é feito com um dos fornecedores para entregar uma quantidade fixa durante os períodos de revisão, onde assume-se que o ciclo de tempo é determinístico. Quando a posição do estoque está abaixo do nível mínimo, o pedido é colocado para o segundo fornecedor para que a posição do estoque seja elevada até o nível superior, isso é, os pedidos de reabastecimento feitos para o segundo fornecedor são feitos após o ciclo de tempo determinístico. A principal idéia no estudo de Jassen e Kok (1999) é que a divisão dos pedidos reflita na redução das incertezas do ciclo de tempo pela divisão dos pedidos de mais de um fornecedor, a cada tempo que o reabastecimento é reiniciado. Embora os autores abordem a

problemática da flexibilidade de reabastecimento, não há aspectos ligados à eficácia do fornecimento de tal serviço.

Hung e Chang (1999) validam um modelo de simulação na manufatura de semicondutores. Os autores propõem um método que assegure a entrega do pedido acima do tempo pré-especificado, aumentando a satisfação do cliente. Embora esse estudo tenha determinado seu foco na manufatura, ele detém-se em determinar somente quando e quanto produzir frente às variações do ciclo de tempo de produção, tempo de espera em filas e tempo de atraso de transportes entre as estações de trabalho onde as operações são desenvolvidas. As incertezas abordadas nesse trabalho relacionam-se às incertezas de disponibilidade de maquinário de produção que acarretam incertezas do fluxo de tempo e da incerteza de performance da produção. Embora esse modelo permita simular a performance para os níveis de serviço desejados, ele não considera a integração dos estágios de produção, distribuição e consumo.

Perante a problemática da redução dos custos de distribuição marítima de óleo, Fagerholt e Lindstad (2000) desenvolveram um modelo para avaliar a eficácia da abolição deste serviço e qual operação de suprimentos poderia ser desempenhada mais eficientemente. As embarcações combinavam a entrega programada de produtos, uma vez que elas possuíam compartimentos para transportar os produtos separadamente. Porém, a necessidade de abastecimento de outros produtos antes do óleo fez com que duas das sete instalações costeiras tivessem, há algum tempo, restringido suas operações. A economia de ter as instalações fechadas durante a noite poderia ser facilmente calculada, mas não era sabido como isso afetaria as operações de suprimento. Embora, no referido trabalho, os autores tenham desenvolvido um algoritmo que determina a ótima frota e a programação semanal correspondente, não há considerações a respeito da incerteza dos ciclos de performance.

Em outro artigo, Vroblefski et al. (2000) salientam a relevância dos custos de transporte por serem componentes significantes da estrutura de custos da cadeia de suprimentos.

Os principais elementos considerados do custo do sistema de distribuição são os custos de transporte, os custos de posse e os custos do pedido. Enquanto os custos do pedido são normalmente fixos ao ocorrerem a taxas constantes, os custos de transporte tendem a ser dependentes do volume. Em geral, muitos transportadores oferecem descontos para cargas consolidadas. Frente a esse problema, Vroblefski et al. (2000) propõem um modelo para políticas de carga para um único produto distribuído em um conjunto de centros de distribuição consecutivamente dispersados. O modelo é determinístico, haja vista que a demanda ocorre nos centros de distribuição a uma taxa constante, definida no horizonte de tempo por revisão contínua. Quando a demanda é colocada, o transporte e o reabastecimento são instantâneos. Nesse modelo, o custo unitário de transporte é modelado como uma função decrescente sobre a quantidade embarcada, tendo como resultado uma estrutura de custos convexa.

O modelo desenvolvido por Vroblefski et al. (2000) tem dois níveis. O primeiro é o submodelo de determinação do tamanho de lotes. O segundo submodelo avalia a estrutura de custos da cadeia. É interessante a maneira pela qual o primeiro submodelo foi formulado, considerando a quantidade de pedido como variáveis de decisão, diferentemente do cálculo da quantidade econômica do lote comumente utilizado na literatura, que leva em consideração os intervalos de tempo. Esse modelo, porém, desconsidera aspectos como a flexibilidade e níveis de serviços, limitando-se a uma análise baseada em custos.

2.2.3 Modelos Multidimensionais

Com o objetivo de imitar o procedimento de decisão do mundo real, os modelos têm sido desenvolvidos nos níveis estratégico e operacional. O nível estratégico da cadeia de suprimentos visa os problemas de projeto da rede de instalações e custo total da cadeia de suprimentos; o nível operacional, nos problemas de decisão das operações de transporte, armazenamento e estocagem, nível de serviço e flexibilidade para cada um dos componentes da cadeia de suprimentos.

Li e O'Brien (1999) desenvolveram um trabalho similar ao trabalho desenvolvido por Arntzen et al.(1995) anteriormente citado, onde há a otimização dos custos por meio de um modelo de cadeia de suprimentos integrada. Entretanto, o modelo apresentado por Li e O'Brien (1999) tem por objetivo a análise do impacto de diferentes estratégias de manufatura na performance da cadeia de suprimentos. Primeiramente, atenção é dada aos problemas estratégicos em adicionar valor à cadeia de suprimentos, melhores respostas e eliminação de falhas. Para avaliar a performance, quatro critérios são analisados: lucro, desempenho do ciclo de fornecimento (resposta), pontualidade de entrega e os custos resultantes da manutenção dos bens em estoque para refletir as características relevantes da eficiência da cadeia de suprimentos.

Para maximizar o valor adicionado pelos processos e minimizar as variáveis custo e tempo absorvidos em estoque, Li e O'Brien (1999) citam que a eficiência da cadeia de suprimentos tem sido compensada pela parceria entre seus elementos no processo de decisão. Neste trabalho, fixam-se metas para determinar a performance, com pesos para cada estágio da cadeia de suprimentos. Com o objetivo de modelar um contexto real de cadeia de suprimentos, a incerteza considerada refere-se às variações da demanda dos clientes e às variações dos ciclos de performance. Assim, o modelo possui uma probabilidade estimada que ilustra as possíveis falhas ao disponibilizar produtos.

Sabri e Beamon (2000) apresentam um modelo multiobjetivo de cadeia de suprimentos que avalia os "trade off" entre os custos e os nível de serviço ao cliente, flexibilidade de volume e flexibilidade de entrega. Este modelo é dividido em dois submodelos: submodelo estratégico e submodelo operacional. O submodelo estratégico tem o objetivo de otimizar a rede de instalações da cadeia de suprimentos (fábricas e centros de distribuição) e o fluxo de bens na cadeia de suprimentos perante a flexibilidade de volume. Já o submodelo operacional tem o objetivo de determinar o estoque de segurança para cada produto em cada instalação da rede, o tamanho e a frequência dos lotes reabastecidos, os ciclos de tempo de transporte e produção, os níveis de serviço ao cliente e a flexibilidade de entrega.

O modelo de Sabri e Beamon (2000) é estocástico e absorve as incertezas de demanda e operacionais. As políticas de controles de estoques adotadas são revisão contínua (s,Q) – para a produção – e do método min-max (s,S) nos centros de distribuição. A incerteza é incluída nos submodelos operacionais a partir da demanda e dos ciclos de performance da cadeia de suprimentos. O nível operacional possui quatro sub níveis, que são: (i) subnível do fornecedor, (ii) subnível da produção, (iii) subnível de estoque nos centros de distribuição e (iv) subnível de distribuição.

Esses quatro níveis são integrados no submodelo estratégico através de um algoritmo, para avaliar os custos totais e então determinar o melhor desenho da rede de instalações da cadeia de suprimentos e a flexibilidade de volume. Isto se dá através de programação linear inteira combinada (MILP) e de variáveis binárias $[0,1]$. O submodelo operacional é composto de equações não-lineares. O objetivo desse modelo é encontrar o vetor performance da cadeia de suprimentos (custos totais, flexibilidade de volume, índice de serviço ao cliente e índice de flexibilidade de entrega).

Frente a esses diversos modelos de cadeia de suprimentos, optou-se pelo modelo de Sabri & Beamon, (2000), haja vista que esse adapta-se à problemática pelos seguintes motivos:

- o problema envolve tanto questões estratégicas como operacionais da cadeia de suprimentos. Grande parte dos outros modelos de cadeia de suprimentos considera apenas uma destas dimensões;

- o grande número de variáveis independentes encontradas no problema de pesquisa somente se encontra nos modelos mais complexos como o de Sabri e Beamon (2000);

- o modelo selecionado possibilita a análise de um conjunto de parâmetros de controle que afetam a performance de outros componentes da cadeia de suprimentos;

- o modelo multiobjetivo possibilita a análise de múltiplas medidas de performance nos submodelos estratégico e operacional;

- os problemas de suprimento–produção, produção–distribuição e inventário–distribuição são considerados interativamente neste modelo, ao passo que em outros modelos, as relações consideradas ocorrem entre dois elementos da cadeia de suprimentos, no máximo; e

- grande parte dos modelos pesquisados é composta por modelos determinísticos, por isso não simulam cenários sob condições de incertezas de demanda e de ciclo de performance, como as citadas anteriormente.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a modelagem da cadeia de suprimentos da água mineral, considerando um modelo de múltiplos objetivos que possibilita a avaliação conjunta de variáveis de decisão desta cadeia de suprimentos, através da interação entre os subsistemas estratégico e operacional.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos consistem em:

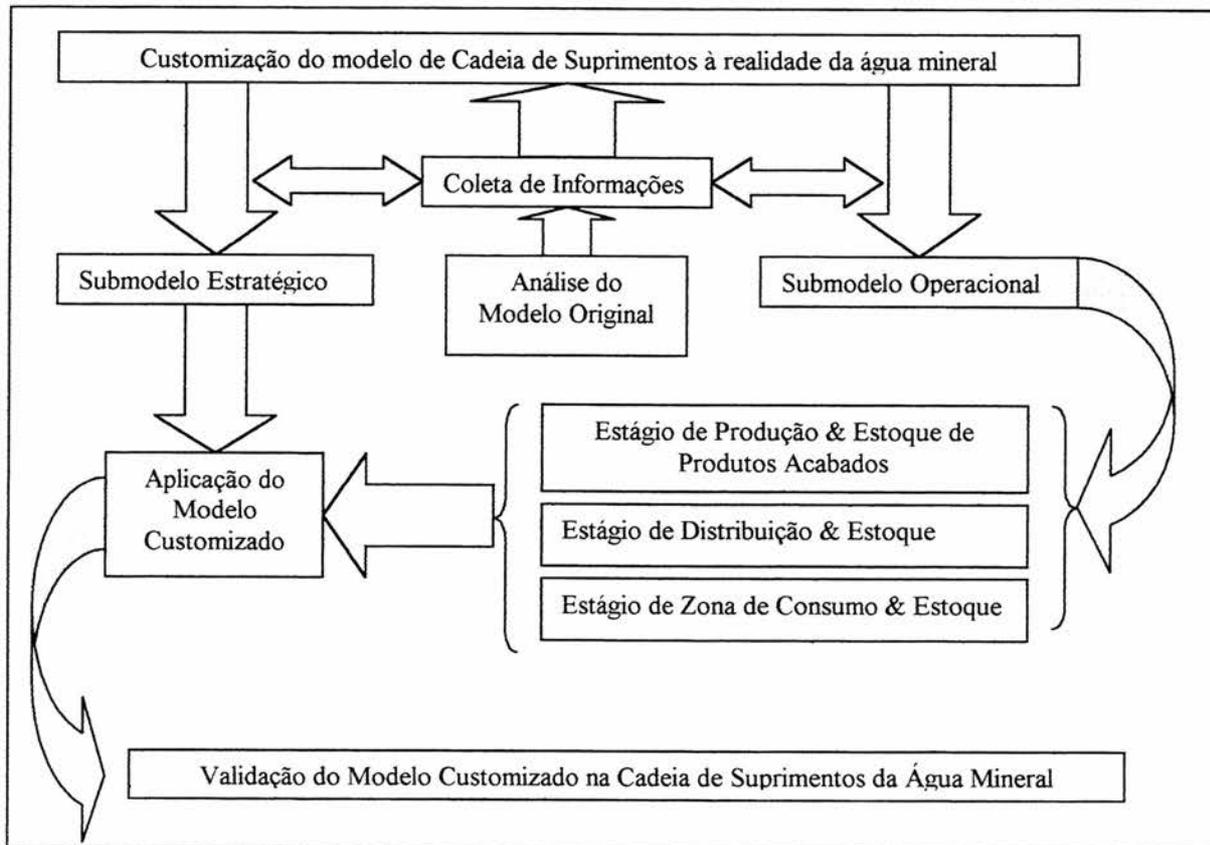
- customizar o modelo apresentado por Sabri & Beamon (2000) utilizando os métodos de controle de estoques adotados na cadeia de suprimentos pesquisada;
- aplicar o modelo customizado à cadeia de suprimentos da água mineral; e
- validar o modelo usando os dados fornecidos por uma empresa de água mineral.

4 MÉTODO DE PESQUISA

O método deste estudo é segmentado em quatro partes. A primeira parte descreve a coleta de informações na cadeia de suprimentos da água mineral. A segunda parte apresenta a customização do modelo de Sabri e Beamon (2000) à cadeia de suprimentos da água mineral.

A terceira parte descreverá a aplicação do modelo customizado à realidade da cadeia de suprimentos da água mineral com os dados levantados na coleta de informações. A última parte refere-se à validação do modelo na cadeia da água mineral de uma empresa de Caxias do Sul – RS. A Figura 1 apresenta um esboço do método de pesquisa desenvolvido neste trabalho.

Figura 1 – Método de Pesquisa



4.1 ANÁLISE DO MODELO ORIGINAL

Esta etapa consistiu no exame detalhado de todos os níveis e subníveis do modelo original de Sabri e Beamon (2000). Posteriormente, foi feita a testagem do modelo original em Excel juntamente com o “software” “What’s Best!” para analisar o comportamento lógico e matemático das ferramentas.

4.2 COLETA DE INFORMAÇÕES

Após a análise do modelo original, foi possível conhecer quais seriam as variáveis de entrada requeridas durante a coleta de informações. Por isso, para a realização dos experimentos propostos necessitou-se que uma série de informações fosse disponibilizada, pois a partir delas foram feitos os equacionamentos necessários a cada um dos estágios da cadeia de suprimentos da água mineral. Algumas destas informações foram disponibilizadas pelos membros-executivos da cadeia de suprimentos a partir dos seus bancos de dados, outras informações, porém, como as variações dos ciclos de tempo (“lead times”), de uma forma geral, foram obtidas através de entrevistas e medições de campo.

Os dados coletados na cadeia de suprimentos foram lançados em uma planilha eletrônica Excel para receberem tratamento estatístico e serem verificados. A mesma planilha serviu como banco de dados aos submodelos, com o intuito de facilitar e assegurar a transferência e as alterações de dados para os mesmos (vide Anexo 3).

4.3 CUSTOMIZAÇÃO DO MODELO À CADEIA DE SUPRIMENTOS

Segundo Jacoby Kowalik (1980), antes de começar a desenvolver o modelo, deve-se reconhecer o problema de pesquisa e as necessidades para a sua solução. Como já citado anteriormente, o modelo foi selecionado, entre muitos outros, por abordar a problemática deste estudo com maior abrangência, proporcionando a integração de todos os elementos que compõem a cadeia de suprimentos.

O modelo original de Sabri e Beamon (2000) foi selecionado por possibilitar o planejamento simultâneo entre os submodelos estratégico e operacional da cadeia de suprimentos. Entretanto, durante o processo de modelagem conceitual (Landry et al., 1983) da cadeia de suprimentos da água mineral, necessitou-se de algumas modificações que vieram a complementar o modelo original, no que tange à obtenção dos custos unitários de transporte, da estrutura de estágios da cadeia de suprimentos e da alteração das políticas de estoques adotadas.

4.4 APLICAÇÃO DO MODELO CUSTOMIZADO

Após a coleta de informações e a customização, os dados coletados foram aplicados ao modelo customizado à cadeia de suprimentos da água mineral. Em geral, todas as informações contidas no banco de dados relacionam-se ao modelo customizado.

4.5 SOLUÇÃO E RESULTADOS

A solução do modelo foi feita através de procedimentos interativos, nos quais o submodelo estratégico otimizado é combinado ao submodelo operacional para determinar o vetor de performance da cadeia de suprimentos da água mineral. Cada um dos vetores de performance gerados foi tratado como um cenário. Foram gerados tantos cenários quantos necessários para simular diferentes configurações e situações da cadeia de suprimentos. Neste trabalho, cada nível da cadeia foi monitorado através do desempenho e das relações de troca entre os parceiros durante o processo logístico para o atendimento dos resultados finais.

Segundo Jacoby e Kowalik (1980), os principais métodos de solução para o problema de modelagem são: 1) convergência para a solução e habilidade para findar o processamento; 2) eficiência computacional; 3) precisão ou, controle de erro.

A ótima solução foi obtida pelo algoritmo que encontrará os melhores resultados por meio de interações entre os submodelos estratégico e operacional. O

modelo será processado em um microcomputador Pentium III, 550 MHz e 64Mram, utilizando o software Microsoft Excel interligado ao programa “What’s Best!”, da LINDO Systems Corporation.

Após, foi realizada uma análise de sensibilidade dos cenários gerados durante a solução do modelo customizado à cadeia de suprimentos da água mineral. A análise de sensibilidade foi feita nos custos totais e na configuração da cadeia de suprimentos mediante algumas variações induzidas nos índices de flexibilidade (flexibilidade de volume e flexibilidade de entrega) e nível de serviço.

A verificação do modelo customizado foi feita a partir da comparação dos resultados obtidos nos submodelos estratégico e operacional com resultados empíricos da cadeia de suprimentos pesquisada.

4.6 VALIDAÇÃO

Para o processo de validação, foi selecionado aquele cenário que contivesse parâmetros estratégicos e operacionais próximos daqueles parâmetros encontrados na cadeia de suprimentos da água mineral. Após a seleção, o cenário foi equiparado com a realidade da cadeia de suprimentos da água mineral. As variáveis utilizadas nesta equiparação foram obtidas a partir dos resultados dos submodelos estratégico e operacional do cenário selecionado.

Os resultados fornecidos pelo submodelo estratégico são a capacidade de produção e distribuição e a configuração (projeto) da rede de instalações. O submodelo operacional forneceu as variáveis de saída de cada um dos estágios da cadeia de suprimentos, como: os níveis médios de estoque (I_{2ij} , I_{3ik} , I_{4im}), os pontos de pedido (s_{2ij} , s_{3ik}), as quantidades ótimas de pedido (Q_{p2} , Q_{p3} e Q_{4im}) e os custos unitários (U_{2ij} , c_{ijk} , U_{3ik} , c_{ikm} e U_{4im}).

5 DESCRIÇÃO DO MODELO CUSTOMIZADO

O modelo customizado é descrito em três partes. A primeira parte apresenta as principais alterações feitas no modelo original de Sabri e Beamon (2000) (vide Anexo 1) para o atendimento das necessidades da pesquisa em questão. A segunda parte apresenta o Submodelo Estratégico e o Submodelo Operacional. A última parte apresenta o algoritmo proposto para a solução do modelo customizado.

5.1 ALTERAÇÕES FEITAS NO MODELO ORIGINAL

Durante o processo de customização da cadeia de suprimentos da água mineral, algumas modificações foram necessárias para complementar ou alterar o modelo original tangentes aos aspectos a seguir descritos.

- A estrutura do modelo proposto por Sabri e Beamon (2000) consiste em quatro estágios (fornecedores, fábricas, estoque de produtos acabados e centros de distribuição). Entretanto, a cadeia de suprimentos da água mineral possui a particularidade do estágio de fornecimento–produção encontrar-se no mesmo local, pois a matéria-prima é obtida na própria engarrafadora, o que acarretou mudanças no modelo original de Sabri e Beamon (2000), no que toca à estruturação dos submodelos estratégico e operacional. Conseqüentemente, a modelagem da cadeia de suprimentos da água mineral adota três estágios: produção (engarrafamento)/estoque de produtos acabados, centro de distribuição e zona de consumo.

- A equação de nível de serviço adotada por Sabri e Beamon (2001) está em função dos custos de falta de estoque e dos custos de manutenção. Neste trabalho, foi adotada uma equação (vide equações 29, 50 e 61) que está em função das distribuições da demanda durante o tempo de reabastecimento e das quantidades requeridas.

- Os métodos de controle de estoques adotados no modelo customizado à cadeia de suprimentos da água mineral são diferentes das políticas de estoques adotadas no modelo original de Sabri e Beamon (2000). O modelo original apresenta o método de revisão contínua (s,Q) nos estágios de fornecimento, produção e estoques de produtos acabados, bem como o método min-max (s,S), no estágio de distribuição. O modelo customizado adota os métodos min-max (s,S) nos estágios de produção/estoques de produtos acabados e distribuição; e o método de revisão periódica (q,Q) no estágio da zona de consumo.

5.2 SUBMODELO ESTRATÉGICO

O submodelo estratégico é composto por duas funções-objetivo: custo total (Z) e flexibilidade de volume (W), ambas adaptadas do modelo original de Sabri e Beamon (2000) (vide Anexo 1). O objetivo do submodelo estratégico é determinar o melhor desenho da rede de instalações da cadeia de suprimentos, de forma a atender à demanda com adequados fluxos de produtos a um menor custo total. A flexibilidade de volume tem o objetivo de fornecer informações dos “trade offs” entre a utilização de rotas alternativas de transporte e a configuração de uma rede com maior número de instalações, dentro da função que minimiza os custos totais (Z). O Quadro 1, a seguir, apresenta as variáveis que compõem as equações do submodelo estratégico.

Quadro 1 – Variáveis do Submodelo Estratégico

Variáveis	Definições
i	Índice de tipo de produto, $i=1,\dots,I$
v	Índice do da fonte de água mineral, $v=1,\dots,V$
j	Índice da engarrafadora, $j=1,\dots,J$
κ	Índice do centro de distribuição CD, $\kappa=1,\dots,K$
m	Índice de zona de consumo ZC, $m=1,\dots,M$
Variáveis de Entrada (valores fixados)	
ε	Índice da performance da flexibilidade de volume
ω_2	Fatores de peso para a capacidade de utilização [0,1]
ω_3	Fatores de peso para a capacidade de utilização [0,1]
f_{2j}	Custos fixos para a fábrica j (\$/período)

f_{3k}	Custos fixos para o CD k (\$/período)
Ψ_{rv}	Capacidade de produção do fornecedor v de matéria-prima r (unid/período)
δ_{2ij}	Perda de eficiência padrão na engarrafadora j por unidade de produto i
δ_{3ik}	Perda de eficiência padrão nos CD k por unidade de produto i
Φ_j	Capacidade de produção da engarrafadora j (unid/período)
τ_{ri}	Taxa de utilização para cada matéria-prima r por unidade de produto i
ξ_{ij}	Mínimo volume de produção para produto i na engarrafadora j (unid/período)
ζ_{ij}	Máximo volume de produção para produto i na engarrafadora j (unid/período)
α_k	Mínimo manuseio e inventário no CD k (unid/período)
β_k	Máximo manuseio e inventário no CD k (unid/período)
α_{rvj}	Custo unitário de oportunidade de matéria-prima r na fonte v (\$/unid)
c_{ijk}	Custo unitário de transporte de produto i da engarrafadora j ao CD k (\$/unid)
d_{ikm}	Custo unitário de transporte de produto i do CD k à ZC m (\$/unid)
λ_{rv}	Custo unitário de imposto ambiental sobre a extração de r (\$/unid)
b_{im}	Custo unitário manuseio e estoque de produto i na zona de consumo m (\$/unid)
U_{2ij}	Custo unitário de produção de i na engarrafadora j (\$/unid)
U_{3ik}	Custo unitário de manuseio e estoque do produto i no CD k (\$/unid)
U_{4im}	Custo unitário de manuseio e estoque de produto i na ZC m (\$/unid)
D_{im}	Demanda média por produto i na ZC m (unid/período)

Variáveis de Saída (Variáveis de decisão)

X_{ij}	Quantidade de produto i produzido na engarrafadora j (unid/período)
C_{ijk}	Quantidade de produto i embarcado da engarrafadora j para CD k (unid/período)
A_{rvj}	Quantidade de matéria-prima r extraída da natureza v para produção j (unid/período)
Z	Custo total (\$/período)
W	Flexibilidade de volume

Variáveis Binárias (Variáveis de decisão)

q_{2j}	1, se a engarrafadora j está aberta; zero, se fechada
q_{3k}	1, se o CD k está aberto; zero, se fechado
y_{km}	1, se CD k serve ZC m ; zero, se não atende

5.2.1 Custo Total

A equação 1 apresenta a primeira função-objetivo, que minimiza o custo total (Z) da cadeia de suprimentos. Ela é solucionada por meio de programação linear inteira combinada (MILP – do inglês “mixed integer linear program”).

$$Z = \left[\sum_j f_{2j} q_{2j} + \sum_{ij} U_{2ij} X_{ij} \right] + \left[\sum_k f_{3k} q_{3k} + \sum_{ikm} U_{3ik} D_{im} y_{km} + \sum_{ijk} c_{ijk} C_{ijk} \right] + \left[\sum_{ikm} d_{ikm} D_{im} y_{km} \right] + \left[\sum_{im} (b_{im} + U_{4im}) D_{im} \right] \quad (1)$$

Entre os custos que compõem o custo total da cadeia de suprimentos incluem-se os custos fixos e os custos variáveis, divididos em quatro componentes: (i) custos fixos e custos variáveis associados com operações na produção j ; (ii) custos fixos e variáveis de manuseio e estoque de produtos i nos centros de distribuição k , e custos de transporte da fábrica j para o centro de distribuição k ; (iii) os custos de transporte de produtos do centro de distribuição k até a zona de consumo m e (iv) os custos fixos e variáveis da zona de consumo m .

5.2.2 Flexibilidade de Volume

A segunda função-objetivo (vide equação 2) representa a flexibilidade de volume (W) que é a soma das seguintes medidas de performance de flexibilidade:

- A flexibilidade de volume de produção é medida pela diferença entre a capacidade da fábrica e a capacidade de utilização, e assim representa a capacidade disponível na produção.

- A flexibilidade de volume de distribuição é calculada como a diferença entre a capacidade de distribuição e os requerimentos da demanda, e assim representa a capacidade de distribuição disponível.

$$W = \left[\sum_j \left(\overbrace{q_{2j} \Phi_j - \sum_i \delta_{2ij} X_{ij}}^{\text{produção}} \right) \right] w_2 + \left[\sum_k \left(\overbrace{q_{3k} \beta_k - \sum_{im} \delta_{3ik} D_{im} y_{km}}^{\text{distribuição}} \right) \right] w_3 \quad (2)$$

Sujeito a minimizar Z (3)

Sujeito a $W \geq \varepsilon$ (4)

Os fatores-peso (w_2 e w_3) estão relacionados à importância que o tomador de decisão atribui às capacidades de produção e distribuição.

5.2.3 Restrições

As equações 5 a 15 do submodelo estratégico representam, respectivamente:

- Equação 5: assegura que as quantidades requeridas de água estejam dentro das capacidades do poço de água mineral.

$$\sum_j A_{rj} \leq \Psi_r \quad \forall r, v \quad (5)$$

- Equação 6: reúne as quantidades de água mineral para os requerimentos de produção.

$$\sum_i \tau_{ri} X_{ij} \leq \sum_v A_{rv} \quad \forall r, j \quad (6)$$

- Equação 7: especifica que as quantidades de produção totais não excedam as capacidades da engarrafadora.

$$\sum_i \delta_{2ij} X_{ij} \leq \Phi_j q_{2j} \quad \forall j \quad (7)$$

- Equação 8: restringe as capacidades mínimas e máximas de produção.

$$\xi_{ij}q_{2j} \leq X_{ij} \leq \zeta_{ij}q_{2j} \quad \forall i, j \quad (8)$$

- Equação 9: restringe as capacidades mínimas e máximas de manuseio e inventário nos centros de distribuição k e assegura que as zonas de consumo m sejam atendidas somente por centros de distribuição k abertos.

$$\alpha_k q_{3k} \leq \sum_{im} \delta_{3ik} D_{im} y_{km} \leq \beta_k q_{3k} \quad \forall k \quad (9)$$

- Equação 10: especifica que cada zona de consumo m deva ser atendida por somente um centro de distribuição

$$\sum_k y_{km} = 1 \quad \forall m \quad (10)$$

- Equação 11: assegura que a quantidade total de produtos carregados na fábrica j seja igual à quantidade disponível nela.

$$X_{ij} = \sum_k C_{ijk} \quad \forall i, j \quad (11)$$

- Equação 12: assegura a satisfação de todos os requerimentos da demanda; isto é, que os carregamentos totais para a zona de consumo sejam exatamente iguais às demandas previstas nele.

$$\sum_{jk} C_{ijk} = \sum_m D_{im} \quad \forall i \quad (12)$$

- Equação 13: assegura que os requerimentos da demanda em cada centro de distribuição k sejam satisfeitos.

$$\sum_j C_{ijk} = \sum_m y_{km} D_{im} \quad \forall i, k \quad (13)$$

- Equação 14: assegura que todas as variáveis sejam positivas.

$$X_{ij}, C_{ijk}, A_{rvj} \geq 0 \quad \forall r, i, v, j, k \quad (14)$$

- Equação 15: restringe as variáveis binárias.

$$q_{2j}, q_{3k}, y_{km} = [0 \text{ ou } 1] \quad j, k, m \quad (15)$$

5.2.4 Estimando os Parâmetros Subjetivos do Submodelo Estratégico

O mínimo nível de flexibilidade ε (Sabri e Beamon, 2000) resulta na solução preferida. Entretanto, a tomada de decisão pode necessitar de muitas soluções não-conhecidas (associadas aos “trade offs”). Esta análise pode ser testada pela variação do ε para gerar algumas soluções não-dominadas. A determinação do método do ε é a seguinte:

Passo 1

Fixar o ε em zero. Examinar a flexibilidade total (W).

Passo 2

Decidir se há a necessidade de continuar a gerar algumas soluções não-dominadas, caso o valor de W não seja suficiente. Ou parar, caso a flexibilidade total disponível W seja suficiente.

Passo 3

Escolher o peso apropriado para ε e adicioná-lo ao valor delimitado previamente.

Passo 4

Ir para o passo 3, a menos que a melhor solução tenha sido alcançada. A melhor solução é alcançada quando a adição de flexibilidade aumenta os custos.

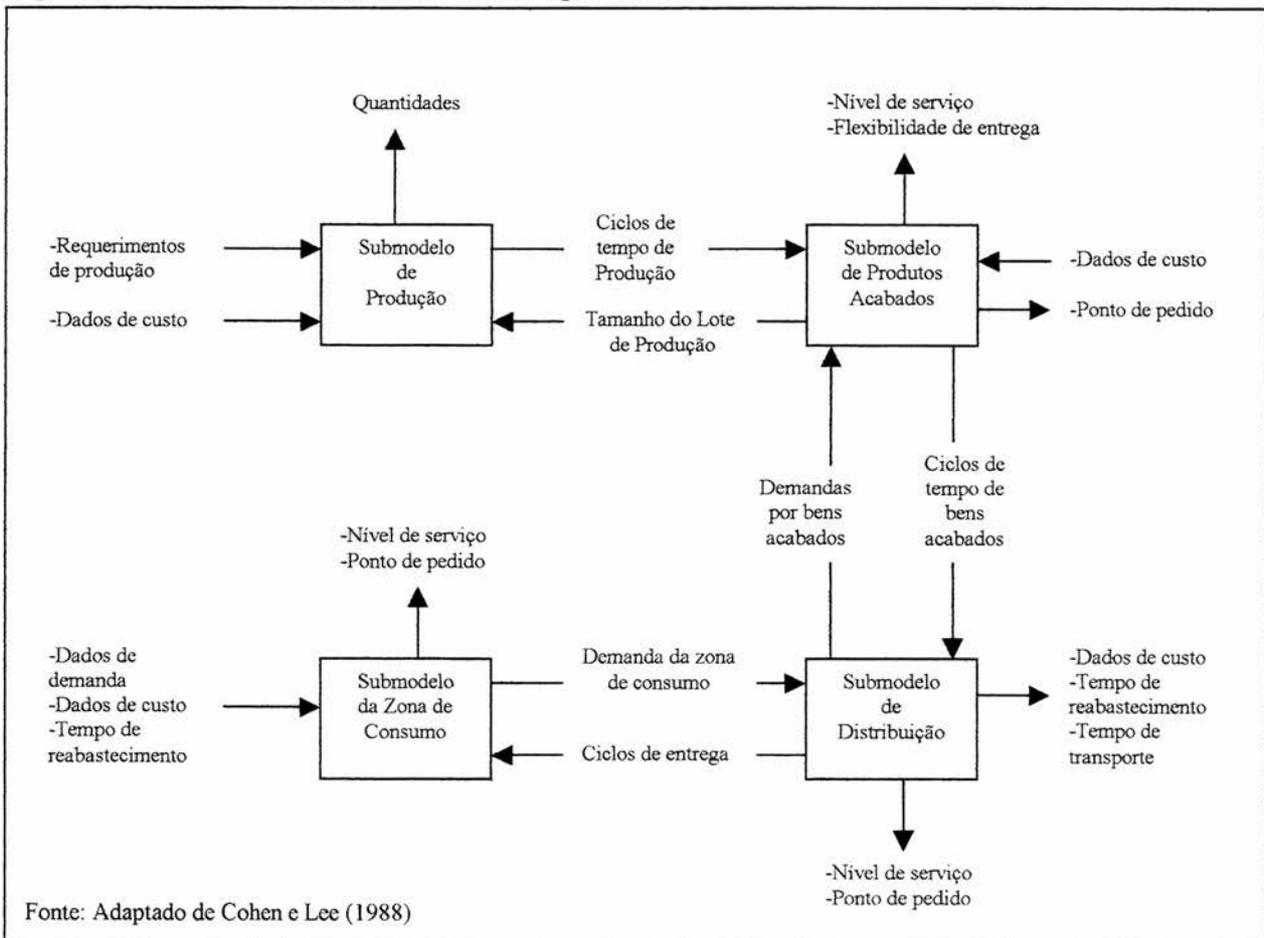
Os pesos w_2 e w_3 são especificados pelo tomador de decisão para cada medida de performance de flexibilidade.

Após serem determinadas as variáveis de saída do submodelo estratégico, a demanda do consumidor final, os mínimos níveis de serviço, os dados de custo e os ciclos de tempo, os custos variáveis operacionais serão estimados sob a incerteza.

5.3 SUBMODELO OPERACIONAL

Diversas variáveis operacionais são determinadas pela otimização das variáveis relacionadas aos níveis de estoque, como: tamanho de lotes (Q), pontos de pedido (s) e estoques de segurança. A função multiobjetivo é desenvolvida por incorporar todos “trade offs” entre os custos, níveis de serviço ao cliente (“*fill rate*”) e a flexibilidade de entrega. A Figura 2, abaixo, apresenta as relações existentes entre os submodelos operacionais da cadeia de suprimentos.

Figura 2 – Relação entre os Submodelos Operacionais



O submodelo operacional incorpora três estágios: (i) produção (engarrafadora e estoque de produtos acabados), (ii) centros de distribuição e (iii) zona de consumo ou varejo. Este trabalho aplica dois diferentes métodos de controle de estoques à cadeia de suprimentos da água mineral, buscando os métodos utilizados empiricamente. O submodelo operacional simula a cadeia de suprimentos da água mineral pesquisada, por meio de uma política de controle de estoques pelo método min-máx (s,S) nos estágios de produção e distribuição.

O método de controle de estoques de revisão periódica (q,Q) é adotado no submodelo da zona de consumo para atender ao método utilizado de revisões pré-programadas.

O quadro a seguir apresenta as variáveis utilizadas no submodelo operacional.

Quadro 2 – Variáveis do Submodelo Operacional

Definições	
i	Índice de tipo de produto, $i=1,\dots,I$
v	Índice do fornecedor (elo 1), $v=1,\dots,V$
j	Índice da engarrafadora (elo 2), $j=1,\dots,J$
κ	Índice do centro de distribuição CD (elo 3), $\kappa=1,\dots,K$
m	Índice de zona de consumo ZC (elo 4), $m=1,\dots,M$
r	Índice do tipo de matéria-prima, $r=1,\dots,R$
Variáveis de Entrada (valores fixados)	
η	Índice de performance de serviço ao cliente $[0,1]$
γ	Índice de performance de flexibilidade de entrega $[0,1]$
τ_{ri}	Taxa de utilização para cada matéria-prima r por unidade de produto i
θ_{2ij}	Custo do set up de produção de produto i na engarrafadora j ($\$$)
X_{ij}	Quantidade de produto i produzido na engarrafadora j (unid/periodo)
Γ_{ij}	Custo unitário de processar o produto i na engarrafadora j ($\$/unid$)
Ω_{ij}	Custo unitário de manutenção durante o processo de i em j ($\$/período/unid$)
P'_{2ij}	Mínimo nível de serviço requerido de produto i na engarrafadora j $[0,1]$
I_{2ij}	Nível de estoque de produtos à disposição mais estoque de segurança na engarrafadora
H_{2ij}	Custo unitário manutenção de produto i na engarrafadora j ($\$/período/unid$)
π_{2ij}	Custo unitário para escassez de i na engarrafadora j ($\$/unid$)
e_{ij}	Custo de entrega expressa de produto i na engarrafadora j ($\$/unid$)

d_1, d_2, d_3	<i>Demanda média diária (unid/dia), respectivamente a j, k, m.</i>
N_{ijk}	<i>Ciclo de tempo normal para transportar o produto i de j ao CD k (período)</i>
E_{ijk}	<i>Ciclo de tempo de entrega expressa i de j ao CD k (período)</i>
θ_{3ik}	<i>Custo do set up do pedido de produto i no CD k (\$)</i>
θ_{4im}	<i>Custo do set up do pedido de produto i na zona de consumo m (\$)</i>
C_{ijk}	<i>Quantidade de produto i embarcado da engarrafadora j para o CD k (unid/período)</i>
H_{3ik}	<i>Custo de manutenção unitário de produto i no CD k (\$/período/unid)</i>
π_{3ik}	<i>Penalidade por escassez de produto i no CD k (\$/unid)</i>
χ_{ijk}	<i>Custo unitário de rota para transportar i de j para k (\$/período/unid)</i>
T'_{ijk}	<i>Tempo de entrega padrão em j quando i está fora de estoque no CD k</i>
g_{ij}	<i>Tempo de setup de produção para produto i na engarrafadora j (período)</i>
p_{ij}	<i>Tempo do processo de produção para produto i na engarrafadora j (período)</i>
l_{ij}	<i>Tempo de espera nas estações de trabalho para produto i na engarrafadora j (período)</i>
$G_{(n2)}$	<i>Função perda normal de produto i requerido em ZC m que faltou em j (unidades)</i>
$G_{(n3)}$	<i>Função perda normal de produto i requerido em ZC m que faltou em CD k (unidades)</i>
$G_{(n4)}$	<i>Função perda normal i requerido pelo consumidor final n que faltou na ZC (unidades)</i>
D_{im}	<i>Demanda esperada por produto i na ZC m (unid/período)</i>

Variáveis de Saída (Variáveis de decisão)

Ed_{ij}	<i>Estoque deficitário na engarrafadora j (unid)</i>
Ed_{ik}	<i>Estoque deficitário nos centros de distribuição k (unid)</i>
Q_{2ij}	<i>Tamanho ótimo do lote de produção de produto i na engarrafadora j (unid)</i>
QP_{2ij}	<i>Tamanho pedido de produção de produto i na engarrafadora j (unid)</i>
t_{2ij}	<i>Ciclo total de produção de produto i na engarrafadora j (período)</i>
Θ_{2ij}	<i>Tempo de atraso de produção de produto i na engarrafadora j (período)</i>
h_{ij}	<i>Taxa de trabalho médio para processar produto i na engarrafadora j</i>
σ_{2ij}	<i>Desvio padrão distrib. da demanda de i em j durante o reabastecimento (unid/período)</i>
t_{3ik}	<i>Ciclo de transporte esperado para produto i em CD k (período)</i>
s_{2ij}	<i>Ponto de ressuprimento de produto i na engarrafadora j (unid)</i>
S_{2ij}	<i>Nível superior de produtos i estocados na engarrafadora j (unid)</i>
P_{2ij}	<i>Nível de serviço ao cliente de produto i na engarrafadora j [0,1]</i>
u^P_{2ij}	<i>Custo unitário de produção de produto i na engarrafadora j (\$/unid)</i>
u^F_{2ij}	<i>Custo unitário de estocagem de produtos acabados i na engarrafadora j (\$/unid)</i>
σ_{3ik}	<i>Desvio padrão distrib. da demanda de i em k durante o reabastecimento (unid/período)</i>
P_{3ik}	<i>Nível de serviço ao cliente de produto i no CD k [0,1]</i>
T_{ijk}	<i>Ciclo de reabastecimento esperado de produto i da engarrafadora j ao CD k (período)</i>
s_{3ik}	<i>Ponto de ressuprimento de produto i no CD k (unid)</i>
S_{3ik}	<i>Nível superior de produtos i estocados no CD k (unid)</i>

σ_{4im}	<i>Desvio padrão distrib. da demanda de i em m durante o reabastecimento (unid/periódodo)</i>
Q_{3ik}	<i>Tamanho ótimo do pedido de produto i no CD k (unid)</i>
Qp_{3ik}	<i>Tamanho do pedido de produto i no CD k (unid)</i>
Qp_{4im}	<i>Tamanho do pedido de produto i na zona de consumo m (unid)</i>

Variáveis de Saída (Variáveis de decisão)

U_{2ij}	<i>Custo unitário de produção, manuseio e estoque de i na engarrafadora j (\$/unid)</i>
U_{3ik}	<i>Custo unitário de manuseio e estoque de produto i no CD k (\$/unid)</i>
U_{4im}	<i>Custo unitário de manuseio e estoque de produto i nas ZC (\$/unid)</i>
c_{ijk}	<i>Custo unitário de transporte de produto i da engarrafadora j para o CD k (\$/unid)</i>
c_{ikm}	<i>Custo unitário de transporte de produto i dos CD k à ZC m (\$/unid)</i>
TC_{2ij}^P	<i>Custo total esperado de produção de produto i na engarrafadora j (\$)</i>
TC_{2ij}^F	<i>Custo total de manuseio e estoque de produtos acabados i na engarrafadora j (\$)</i>
TC_{3ik}	<i>Custo total de manuseio e estoque de produto i na engarrafadora j (\$)</i>
TC_{4im}	<i>Custo total de manuseio e estoque de produto i na engarrafadora j (\$)</i>
PS_{ijk}	<i>Serviço ao cliente (fill rate) – disponibilidade de produto i na engarrafadora j</i>
PD_{ijk}	<i>Flexibilidade de entrega – disponibilidade de produto i da engarrafadora j ao CD k</i>

Os estágios de distribuição e zona de consumo (varejo) são solucionados por meio de técnicas analíticas, enquanto os estágios relacionados à produção são otimizados usando programação não-linear. Uma única solução para os três estágios da cadeia de suprimentos no nível operacional é determinada usando um enfoque heurístico, como o descrito nos seguintes tópicos.

5.3.1 Submodelo de Produção

O submodelo de produção é composto por dois estágios: a engarrafadora e o estoque de produtos acabados. A função-objetivo deste submodelo é o controle dos custos de produção e de estocagem de bombonas de 20 litros de água mineral.

A função custo a ser minimizada neste sistema consiste em (i) custos de manutenção, (ii) custos de processamento e (iii) custos de “set up”. Mais especificamente, a função dos custos totais de produção de produto i na planta de produção j por período, pode ser especificada pela seguinte equação (Sabri e Beamon, 2000):

$$TC_{2ij}^P = \theta_{2ij} \left(\frac{X_{ij}}{Q_{2ij}} \right) + \Gamma_{ij} X_{ij} + \Omega_{ij} X_{ij} t_{2ij} \quad (16)$$

Assim, o custo unitário de produzir produto i na planta j pode ser determinado por:

$$u_{2ij}^P = \frac{TC_{2ij}^P}{X_{ij}} \quad (17)$$

O ciclo de tempo total de produção (t_{2ij}) é determinado pela soma do tempo de “set up” (g_{ij}) e do tempo de espera nas estações de trabalho (l_{ij}). O tempo de processamento de lotes (p_{ij}) de produto i na planta de produção j pode ser calculado segundo a equação:

$$p_{ij} = \frac{Q_{2ij}}{h_{ij}} \quad (18)$$

Onde h_{ij} denota a taxa de trabalho médio para o processamento de produto i na planta de produção j .

$$t_{2ij} = g_{ij} + p_{ij} + l_{ij} \quad (19)$$

Assumindo que os tempos de “set up” e tempos de processo são determinísticos, a variância do ciclo de produção é determinada por:

$$\text{var}(t_{2ij}) = \text{var}(l_{ij}) \quad (20)$$

5.3.2 Estoque de Produtos Acabados

Este estágio adota uma política de controle de estoques pelo método min-máx (s,S). Segundo Ballou (2001), essa política de controle de estoques deve ser adotada quando a demanda é irregular ou errática. Essa política, segundo Cohen e Lee (1988),

minimiza os custos de manutenção de estoques frente à escassez de produtos, além de satisfazer os mínimos níveis de serviço requeridos.

A quantidade de produto na fábrica (X_{ij}) é determinada a partir da demanda reunida no estágio de distribuição. Assume-se que as distribuições de demanda sejam reunidas pelos embarques das cargas solicitadas.

A equação de custo total de estoques de produtos acabados, a seguir, é composta (i) pelos custos de manutenção de estoques regular e de segurança, (ii) custos de transporte, e (iii) custos de “set up” de entregas expressas.

$$TC_{2ij}^F = q_{2ij} \left[H_{2ij} \left(\frac{Q_{2ij}}{2} + \sigma_{2ij} n_2 \right) + \sum_k \chi_{ijk} C_{ijk} (N_{ijk} P_{2ij} + E_{ijk} (1 - P_{2ij})) + \frac{e_{ij} X_{ij}}{Q_{2ij}} (1 - P_{2ij}) \right] \quad (21)$$

A quantidade ótima de produto na fábrica (Q_{2ij}) é calculada consecutivamente para os submodelos de produção e estoque de produtos acabados, através de um procedimento de otimização computacional de equações não-lineares.

5.3.2.1 Método do Ponto de Pedido

O método do ponto de pedido (s_{2ij}) é determinado frente às incertezas de demanda média diária (d) e dos ciclos de operação. Ele dá-se pela seguinte equação:

$$s_{2ij} = d_{2ij} t_{2ij} + \sigma_{2ij} n_2 \quad (22)$$

Onde a variável σ_{2ij} é o desvio padrão da distribuição da demanda durante o tempo de reabastecimento. Segundo Ballou (2001), isto é encontrado adicionando a variância da demanda à variância do tempo de reabastecimento, através da seguinte fórmula:

$$\sigma_{2ij} = \sqrt{t_{2ij} \sum_j s d_{2ij}^2 + \sum_j [d_{2ij}]^2 \text{var}(t_{2ij})} \quad (23)$$

Onde t_{2ij} é o ciclo de tempo total de produção baseado no tempo médio de reabastecimento e sd_{2ij} é o desvio padrão da demanda.

A variável n_2 é a função inversa da probabilidade (Pr) de ter estoque durante o tempo de reabastecimento. O cálculo da probabilidade de ter estoque durante o ciclo de reabastecimento é feito através da seguinte fórmula (Ballou, 2001):

$$Pr_{2ij} = 1 - \frac{Q_{2ij} H_{2ij}}{X_{ij} \pi_{2ij}} \quad (24)$$

5.3.2.2 Controle de Estoques de Produtos Acabados

A quantidade ótima de pedido no centro de distribuição (Q_{2ij}) é utilizada somente no cálculo inicial, pois posteriormente adota-se o método de controle min-max (s,S). Porém o método de controle de estoque min-max (s,S) dita que as quantidades de pedido sejam constantes. Então:

$$Qp_{ij} = S_{2ij} - s_{2ij} + Ed_{ij} \quad (25)$$

Onde,

$$S_{2ij} = Q_{2ij} + s_{2ij} \quad (26)$$

5.3.2.3 Custo Unitário do Estágio de Produção

O custo unitário do estágio de produção dá-se pela soma do custo unitário de produção com o custo unitário de controle de estoque de produtos acabados. Antes, porém, é necessário calcular o custo unitário do estoque de produtos acabados, cujo resultado é obtido pela seguinte equação:

$$u_{2ij}^F = \frac{TC_{2ij}^F}{X_{ij}} \quad (27)$$

Finalmente, o custo unitário do estágio de produção segue abaixo:

$$U_{2ij} = u_{2ij}^P + u_{2ij}^F \quad (28)$$

5.3.2.4 Nível de Serviço Fornecido pelo Estágio de Produção

O nível de serviço ou taxa de preenchimento (“fill rate”), obtida pela política de estoque, é encontrado pela seguinte equação:

$$P_{2ij} = 1 - \frac{\sigma_{2ij}}{Q_{2ij}} \quad (29)$$

5.3.2.5 Ciclo de Reabastecimento Esperado no Estágio de Produção

O ciclo de tempo do reabastecimento esperado é calculado a partir da fórmula abaixo:

$$T_{ijk} = N_{ijk} P_{2ij} + (t_{2ij} + E_{ijk})(1 - P_{2ij}) \quad (30)$$

Assumindo o ciclo de tempo randômico de Bernoulli, que segundo Cohen e Lee (1988) ocorre quando um dos dois valores é tomado com probabilidade fixada, dependendo se há ou não produto em estoque. Assim, a variância do ciclo de reabastecimento é:

$$\text{var}(T_{ijk}) = P_{2ij}(1 - P_{2ij})[T_{ijk} - (t_{2ij} + E_{ijk})]^2 \quad (31)$$

5.3.2.6 Encontrando a Função de Múltiplos Objetivos

A função-multiobjetivo é desenvolvida para contabilizar “trade offs” entre os custos, o nível de serviço ao cliente e a flexibilidade de entrega. A primeira função-objetivo considera os custos como uma medida de performance, determinada por:

$$TC_{ij} = TC_{2ij}^P + TC_{2ij}^F \quad \forall i, j \quad (32)$$

A segunda função-objetivo representa os níveis de serviço (“fill rate”) para o reabastecimento dos centros de distribuição k a partir da estocagem de produtos acabados na fábrica j , e é determinado por:

$$PS_{ij} = P_{2ij} - P'_{2ij} \quad \forall i, j \quad (33)$$

Finalmente, a função-objetivo flexibilidade de entrega é determinada por:

$$PD_{ijk} = T'_{ijk} - T_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (34)$$

Semelhantemente ao método para determinar ε (flexibilidade de volume) do submodelo estratégico, a função multiobjetivo é formulada como segue (Sabri e Beamon, 2000):

$$[Indice de Performance Operacional] \text{ Minimizar } TC_{ij} \quad (35)$$

Sujeito a:

$$PS_{ij} \geq \eta_2 \quad \forall i, j \quad (36)$$

$$PD_{ijk} \geq \gamma_2 \quad \forall i, j, k \quad (37)$$

Os índices de performance operacional η e γ são especificados para assegurar os mínimos níveis de serviço e de flexibilidade de entrega, respectivamente.

5.3.3 Estágio de Distribuição

O estágio de distribuição adota uma política de revisão contínua min-max (s, S) . O custo total de distribuição consiste nos (i) custos de manutenção, nos (ii) custos de transporte de produto i de k para m , nos (iii) custos de ressuprimento e nos (iv) custos de falta de estoque para produto i nos centros de distribuição k . O custo total de distribuição é expresso pela seguinte equação:

$$TC_{3ik} = q_{3ik} \left[H_{3ik} \left(\frac{Q_{3ik}}{2} + \sigma_{3ik} n_3 \right) + \theta_{3ik} \frac{\sum_m y_{km} D_{im}}{Q_{3ik}} + \sum_m \pi_{3ik} \sigma_3 G_{(n_3)} \right] \quad (38)$$

A variável $G_{(n_3)}$ é chamada de função perda normal.

5.3.3.1 Método do Ponto de Pedido com Custos da Falta de Estoque Conhecidos

O método do ponto de pedido (s_{3ik}), com custos da falta de estoques conhecidos, é determinado frente às incertezas de demanda média diária (d) e dos ciclos de tempo de operação. Esse processo ocorre a partir da seguinte equação:

$$s_{3ik} = d_{3ik} t_{3ik} + \sigma_{3ik} n_3 \quad (39)$$

Onde a variável σ_{3ik} é o desvio padrão da distribuição da demanda durante o tempo de reabastecimento que, segundo Ballou (2001), pode ser encontrado adicionado-se a variância da demanda à variância do reabastecimento, através da seguinte fórmula:

$$\sigma_{3ik} = \sqrt{t_{3ik} \sum s d_{3ik}^2 + \text{var}(t_{3ik}) [\sum d_{3ik}]^2} \quad (40)$$

Onde t_{3ik} é o ciclo de tempo total de reabastecimento e $s d_{3ik}$ é o desvio padrão da demanda.

Os passos para determinar o ponto de pedido através deste método baseiam-se em Ballou (2001) e são descritos a seguir:

Passo 1

Aproximar a quantidade de pedidos através da fórmula básica quantidade econômica de pedido, isto é:

$$Q^* = \sqrt{\left(\frac{2\theta_{3ik} \sum_i D_{im}}{H_{3ik}} \right)} \quad (41)$$

Passo 2

Computar a probabilidade de ter estoque durante o tempo de reabastecimento, utilizando a seguinte fórmula (Ballou, 2001):

$$Pr_{3ik} = 1 - \frac{Q_{3ik} H_{3ik}}{D_{im} \pi_{3ik}} \quad (42)$$

Após encontrar σ_{3ik} , encontrar n_3 , que corresponde à probabilidade de uma distribuição normal. A variável n_3 é a função inversa da probabilidade (Pr) de ter estoque durante o tempo de reabastecimento.

Encontrar a função perda normal $G_{(n_3)}$ (Ballou, 2001).

Passo 3

Determinar um Q revisado através da seguinte fórmula abaixo (Ballou, 2001):

$$Q_{3ik} = \sqrt{\left(\frac{2D_{im} (\theta_{ik} + \sigma_{3ik} \pi_{3ik} G_{(n_3)})}{H_{3ik}} \right)} \quad (43)$$

Passo 4

Repetir os passos 2 e 3 até que não haja mudança em Pr ou Q .

Passo 5

Computar o ponto de pedido (s_{3ik}).

O método de controle de estoque min-máx (s, S), no entanto, requer que as quantidades de pedido sejam constantes (Ballou, 2001). Então:

$$Qp_{ik} = S_{3ik} - s_{3ik} + Ed_{3ik} \quad (44)$$

Onde S_{3ik} é o nível máximo de produtos em estoque nos centros de distribuição k. Deste modo:

$$S_{3ik} = Q_{3ik} + s_{3ik} \quad (45)$$

5.3.3.2 Custo Unitário do Estágio de Distribuição

O custo unitário no centro de distribuição é a divisão do custo total de distribuição pelo nível de estoque regular e de segurança. Assim,

$$U_{3ik} = \frac{TC_{3ik}}{I_{3ik}} \quad (46)$$

onde,

$$I_{3ik} = \frac{Q_{3ik}}{2} + \sigma_{3ik} n_3 \quad (47)$$

5.3.3.3 Ciclo de Reabastecimento Esperado no Estágio de Distribuição

O ciclo de tempo de reabastecimento esperado é calculado a partir da fórmula a seguir:

$$t_{3ik} = \frac{\sum_j q_{2j} T_{ijk}}{\sum_j q_{2j}} \quad (48)$$

e

$$\text{var}(t_{3ik}) = \text{Max}_j (q_{2j} \text{var}(T_{ijk})) \quad (49)$$

5.3.3.4 Nível de Serviço Fornecido pelo Estágio de Distribuição

O nível de serviço ou taxa de preenchimento (“*fill rate*”), obtida pela política de estoque no estágio de distribuição é encontrado pela seguinte equação:

$$P_{3ik} = 1 - \frac{\sigma_{3ik}}{Q_{3ik}} \quad (50)$$

5.3.4 Estágio da Zona de Consumo

O estágio da zona de consumo, ou varejo, adota uma política de revisão periódica. Adicionalmente, assume-se que o ciclo de demanda é normalmente distribuído.

O custo total de distribuição consiste nos (i) custos de manutenção dos estoques regular e de segurança, nos (ii) custos de ressuprimento e nos (iii) custos de falta de estoque para produto i na zona de consumo m . O custo total de distribuição é expresso pela seguinte equação:

$$TC_{4im} = \left[H_{4im} \left(\frac{Q_{4im}}{2} + \sigma_{4im} n_4 \right) + \theta_{4im} \frac{\sum_m D_{im}}{Q_{4im}} + \sum_m \pi_{4im} \sigma_{4im} G_{(n_4)} \right] \quad (51)$$

5.3.4.1 Custo Unitário do Estágio da Zona de Consumo

O custo unitário na zona de consumo é a divisão do custo total de distribuição pelo nível de estoque regular e de segurança. Assim:

$$U_{4im} = \frac{TC_{4im}}{I_{4im}} \quad (52)$$

onde,

$$I_{4im} = \frac{d_{4im} T_{4im}^*}{2} + \sigma_{4im} n_4 \quad (53)$$

e, a distribuição da demanda durante o tempo de reabastecimento é determinada pela seguinte equação (Ballou, 2001):

$$\sigma_4 = s d_{4im} \sqrt{T_{4im}^* + t_{4im}} \quad (54)$$

5.3.4.2 Controle de Estoques na Zona de Consumo

Os passos para determinar o controle de estoques através deste método baseiam-se em Ballou (2001) e seguem abaixo:

Passo 1

Aproximar a quantidade de pedido através da fórmula básica quantidade econômica de pedido; conforme equação que segue,

$$Q_{4im}^* = \sqrt{\left(\frac{2D_{4im}\theta_{4im}}{H_{4im}} \right)} \quad (55)$$

Passo 2

Computar a probabilidade de ter estoque durante o tempo de reabastecimento através da seguinte fórmula (Ballou, 2001):

$$\text{Pr}_{4im} = 1 - \frac{Q_{4im} H_{4im}}{D_{4im} \pi_{4im}} \quad (56)$$

Após encontrar σ_{4im} , encontrar n_4 , que corresponde à probabilidade de uma distribuição normal. A variável n_4 é a função inversa da probabilidade (Pr) de ter estoque durante o tempo de reabastecimento.

Passo 3

Determinar o intervalo de revisão a partir da relação abaixo (Ballou, 2001),

$$T_{4im}^* = \sum_m \frac{Q_{4im}^*}{D_{4im}} \quad (57)$$

onde D é a demanda média mensal em cada zona de consumo. Porém, a zona de consumo adota o método de períodos de revisão preestabelecidos T_{4im} . Então:

$$Q_{4im} = \sum_m T_{4im} D_{4im} \quad (58)$$

Passo 4

Determinar o nível máximo de estoques a partir da seguinte fórmula

$$S_{4im}^* = d_{4im} (T_{4im} + t_{4im}) + n_4 \sigma_{4im} \quad (59)$$

O ciclo de tempo de transporte esperado é:

$$t_{4im} = \frac{\sum_k q_{3k} T_{3ik}}{\sum_k q_{3k}} \quad (60)$$

5.3.4.3 Nível de Serviço Fornecido pelo Estágio de Zona de Consumo

O nível de serviço, ou taxa de preenchimento (“*fill rate*”), obtido pela política de estoque no estágio de zona de consumo é encontrado pela seguinte equação:

$$P_{4im} = 1 - \frac{\sigma_{4im}}{Q_{4im}} \quad (61)$$

5.4 RESUMO DOS CUSTOS UNITÁRIOS VARIÁVEIS

Os custos unitários variáveis são utilizados como variáveis de entrada no submodelo estratégico. Os custos unitários do estágio de produção são calculados a partir da seguinte equação:

$$U_{2ij} = u_{2ij}^P + u_{2ij}^F \quad (62)$$

Os custos unitários do estágio de distribuição são estimados através da equação que segue:

$$U_{3ik} = \frac{TC_{3ik}}{I_{3ik}} \quad (63)$$

Os custos unitários de transporte entre a engarrafadora e os centros de distribuição e, entre esses e a zona de consumo, seguem conforme equações abaixo, respectivamente:

$$c_{ijk} = \chi_{ijk} (N_{ijk} P_{2ij} + E_{ijk} (1 - P_{2ij})) \quad (64)$$

e

$$c_{ikm} = \chi_{ikm} (N_{ikm} P_{3ik} + E_{ikm} (1 - P_{3ik})) \quad (65)$$

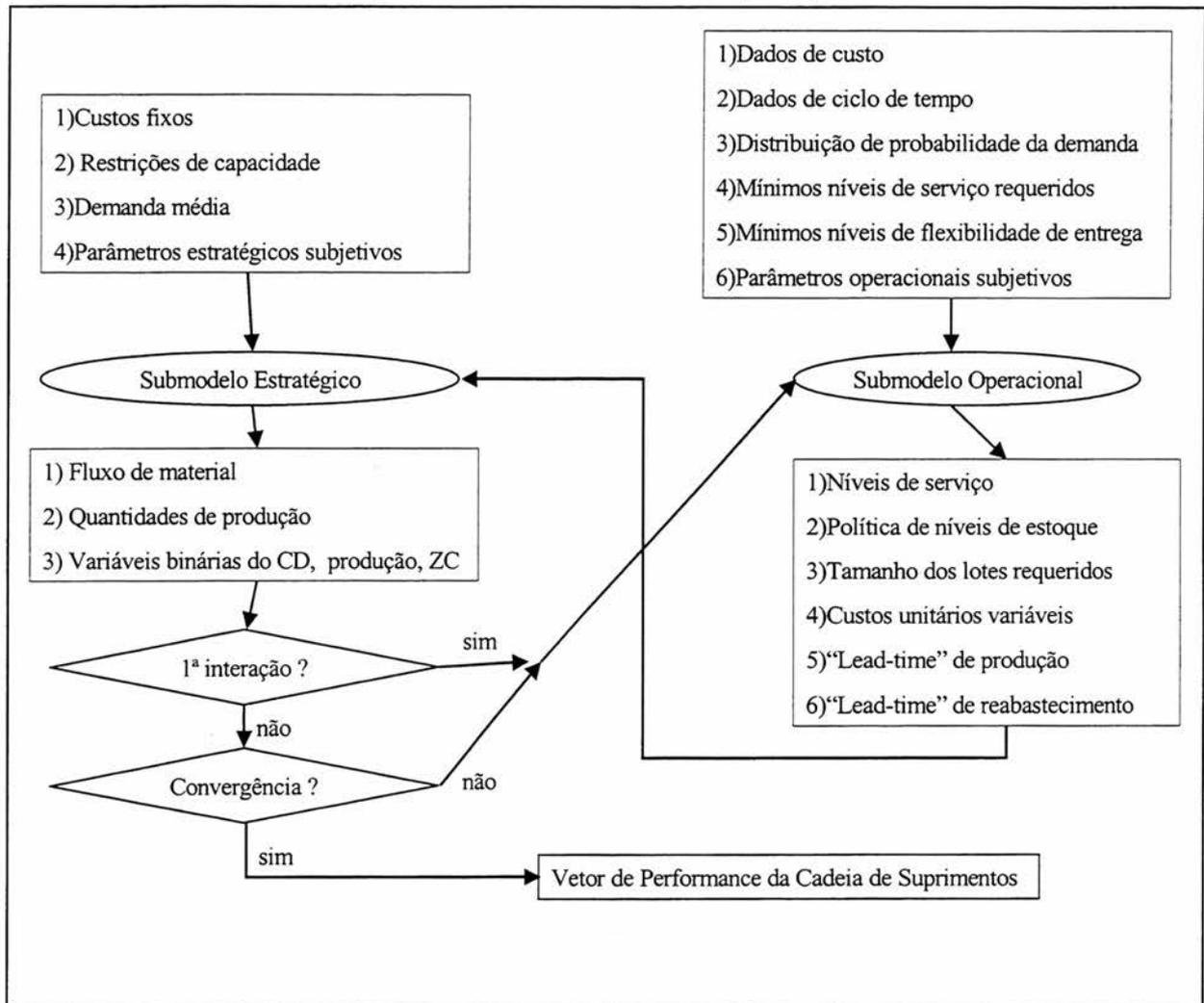
Finalmente, os custos unitários da zona de consumo seguem conforme a equação abaixo:

$$U_{4im} = \frac{TC_{4im}}{I_{4im}} \quad (66)$$

5.5 ALGORITMO DE SABRI & BEAMON (2000)

O algoritmo deste trabalho baseia-se no mesmo fluxograma apresentado no modelo original de Sabri e Beamon (2000), conforme a Figura 3, a seguir.

Figura 3 – Fluxograma do Algoritmo de Sabri & Beamon (2000)



Os passos da solução a partir do fluxograma do algoritmo seguem abaixo.

Passo 1

Otimizar o submodelo estratégico para a cadeia de suprimentos existente ou proposta para obter a configuração inicial, usando programação linear inteira. Neste

passo considerar os valores iniciais de produção, distribuição e custos unitários variáveis de transporte.

Passo 2

Usar as variáveis de decisão obtidas a partir do submodelo estratégico como dados de entrada do submodelo operacional, depois de dividir pelo número de períodos de revisão (número de períodos de revisão do submodelo operacional pelo número de períodos de revisão do submodelo estratégico).

Passo 3

Otimizar o submodelo operacional baseando-se na configuração obtida no Passo 2.

Passo 4

Otimizar o submodelo estratégico com os custos variáveis a partir dos novos dados determinados no Passo 3, depois de multiplicá-los pelo fator de períodos de revisão.

Passo 5

Verificar se os novos custos unitários têm efeitos significantes na ótima configuração, observando a convergência das variáveis binárias. Se todas as variáveis binárias forem iguais, ir para o Passo 6, senão, ir para o Passo 2.

Passo 6

Determinar os valores de performance da cadeia de suprimentos da água mineral.

Passo 7

Parar.

5.6 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A implementação computacional é apresentada em duas partes. A primeira parte descreve os recursos computacionais utilizados. Na segunda, são descritos os procedimentos de programação e as planilhas que compõem cada submodelo.

5.6.1 Recursos de Informática Utilizados

O processo de implementação computacional foi feito em planilhas eletrônicas Microsoft Excel conjugadas ao “What’s Best!” – “software” de programação inteira combinada (MIP). Os submodelos, estratégico e operacional, foram programados em arquivos separados, pois a versão de demonstração utilizada nesse trabalho do “What’s Best!” não comporta o número de variáveis não-lineares dos submodelos juntos na mesma planilha.

5.6.2 Procedimentos de Programação

Os procedimentos de programação são apresentados, separadamente, para os submodelos estratégico e operacional.

5.6.2.1 Programação do Submodelo Estratégico

A solução do submodelo estratégico foi obtida (vide Anexo 4) com programação linear inteira combinada (MILP). Nesse processo, as variáveis binárias [q_{2j} , q_{3k} e y_{km}] são condicionadas a se ajustarem às restrições do submodelo estratégico (vide equações 5 a 15) de forma a minimizar o custo total da cadeia de suprimentos da água mineral (vide equação 3). As variações determinadas dos índices de flexibilidade de volume (ϵ) restringem a capacidade de distribuição (vide equações 2 e 3).

O arquivo do submodelo estratégico foi dividido em cinco pastas. Na pasta um encontram-se os estágios de produção/estoque de produtos acabados. A pasta dois

contém o estágio de zona de consumo. O estágio de distribuição proporciona o “link” entre os estágios do estoque de produtos acabados e da zona de consumo, por isso, este estágio está presente nas pastas um e dois. Nessas duas pastas são feitos os ajustes $[0,1]$ das variáveis binárias $[q_{2j}, q_{3k}$ e $y_{km}]$.

A pasta três contém a função flexibilidade de volume (W), onde são determinados os índices de flexibilidade (ε) e os fatores-peso (w_2 e w_3). Os resultados contendo os vetores de performance – custos totais (Z) e flexibilidade de volume (W) – e a configuração da rede de instalações estão presentes na pasta quatro.

As variáveis de saída (quantidades D_{im} e X_{ij} e matriz de configuração parcial) do submodelo estratégico constam na pasta cinco. Essa pasta contém as informações necessárias para dar entrada de dados no submodelo operacional. O procedimento adotado para transferência de dados de um submodelo a outro foi: *copiar / colar especial, apenas valores*. Como fora citado antes, se os dois submodelos estivessem interconectados, seria superada a capacidade de equações não-lineares do “What’s Best!”.

5.6.2.2 Programação do Submodelo Operacional

A solução do submodelo operacional (vide Anexo 4) foi obtida com programação não-linear no estágio do estoque de produtos acabados. Cada um dos quatro estágios possui uma pasta. Por isso, todas as equações pertencentes a cada estágio constam na mesma pasta. Portanto, o arquivo do submodelo operacional foi dividido em cinco pastas.

A primeira pasta contém o submodelo de produção. A segunda pasta possui o estágio do estoque de produtos acabados. Os estágios de distribuição e de zona de consumo estão presentes, respectivamente, na terceira e quarta pastas.

A equação não-linear do estágio de estoque de produtos acabados, presente na pasta dois, condiciona a quantidade requerida (Q_{p_2}) a se ajustar à função de custo total (TC_{2ij}^F), de forma a minimizá-lo. Essas quantidades requeridas (Q_{p_2}) e as demandas (X_{ij}) são as mesmas utilizadas pelo estágio de produção.

A quinta pasta, assim como no arquivo do submodelo estratégico, tem a função de transferir as variáveis de saída do submodelo operacional. As variáveis essenciais dessa pasta a serem transferidas ao submodelo operacional são os custos unitários de produção e estoque de produtos acabados (U_{2ij}), do estágio de distribuição (U_{3ik}), do estágio de zona de consumo (U_{4im}) e de transporte (c_{ijk} e c_{ikm}). Entretanto, essa pasta contém uma variedade de outras informações que dizem respeito às variáveis operacionais de saída do submodelo operacional (vide Anexo 3).

6 APLICAÇÃO DO MODELO CUSTOMIZADO

A aplicação do modelo de cadeia de suprimentos está organizada em quatro partes. A primeira descreve o problema da cadeia de suprimentos da água mineral. Os resultados do modelo customizado à cadeia de suprimentos de água mineral são apresentados na segunda parte. A terceira parte apresenta a análise de sensibilidade e uma análise global dos resultados obtidos na cadeia de suprimentos pesquisada. Na quarta parte é apresentada a validação do modelo na cadeia de suprimentos da água mineral.

6.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

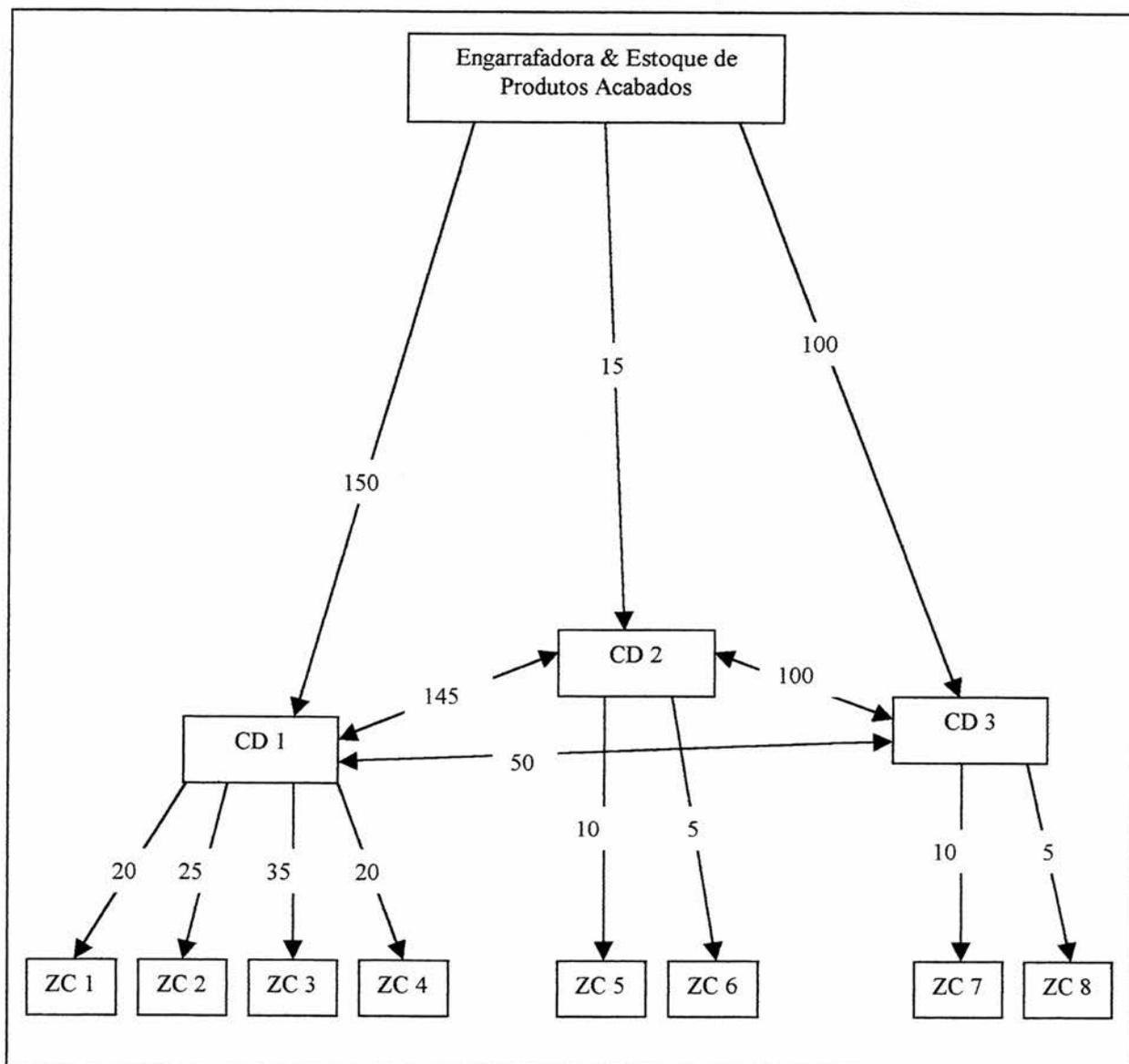
A cadeia de suprimentos pesquisada possui uma engarrafadora, seis centros de distribuição e dezenas de zonas de consumo. Porém, no presente estudo, a pesquisa da cadeia de suprimentos da água mineral está restrita à produção (j), a três centros de distribuição (k) e oito zonas de consumo (m). O motivo desta escolha foi o fato dos três centros de distribuição selecionados apresentarem maior proximidade quando comparados a outros centros, o que proporcionou uma análise mais rica da configuração da rede de instalações. Além disso, estes centros de distribuição são responsáveis por 40% do fluxo total de produtos produzidos.

A engarrafadora (produção) de água mineral produz exclusivamente bombonas de 20 litros. O poço de captação tem uma capacidade de captação de 100.000 litros/dia. A engarrafadora j tem capacidade de produzir 1000 bombonas/hora. A rede de instalações que compõe esta cadeia de suprimentos possui centros de distribuição e varejos localizados em diversos municípios do Estado do Rio Grande do Sul. A presente pesquisa, porém, considera apenas três centros de distribuição, localizados nos municípios de Porto Alegre (CD1), Caxias do Sul (CD2) e Novo Hamburgo

(CD3). Cada um destes centros de distribuição atende às zonas de consumo ZC(1,2,3,4), ZC(5,6) e ZC(7,8), respectivamente. Os centros CD1, CD2 e CD3 possuem, respectivamente, as seguintes capacidades de distribuição: 39.000 unid./mês, 24.000 unid./mês e 16.000 unid./mês.

A Figura 4 apresenta a cadeia de suprimentos pesquisada com seus respectivos elementos.

Figura 4 – Distância (km) entre Elementos da Cadeia de Suprimentos da Água Mineral



As zonas de consumo foram agregadas e cada uma representa um grande número de pontos de venda atendidos pelos centros de distribuição. Assim, as oito zonas de consumo selecionadas são caracterizadas pela agregação das demandas de

zonas de consumo vizinhas. Os tempos de revisão (T^*) foram arbitrados, em cada uma das zonas de consumo, com valores aproximados aos adotados pelos principais pontos de venda.

A cadeia de suprimentos da água mineral pesquisada caracteriza-se pelas oscilações da demanda resultantes da sazonalidade dos consumos de verão e inverno. Os níveis de demanda chegam a crescer 50% durante o verão, o que leva à ocorrência de alterações no preenchimento dos pedidos. Durante cada um destes períodos de consumo, os custos totais também devem ser diferenciados, uma vez que os níveis de estoques reduzem-se com a diminuição da demanda. Além disso, as capacidades de distribuição ficam ociosas durante as épocas de menor demanda média mensal.

A demanda selecionada para o presente trabalho é caracterizada pela época de alto consumo, do mês de dezembro. As políticas de controle de estoques adotadas estão presentes no modelo customizado (vide item 5.2).

6.2 RESULTADOS

Os resultados do modelo customizado foram obtidos a partir da entrada dos dados coletados na cadeia de suprimentos da água mineral, apresentados no questionário – banco de dados (vide Anexo 3). Os resultados são apresentados em tabelas e gráficos que apresentam as relações entre variáveis independentes (flexibilidade de volume, serviço ao cliente, flexibilidade de entrega e o fator peso) e variáveis dependentes (custo total), geradas a partir da simulação de cenários dos submodelos estratégico e operacional no modelo customizado.

Os cenários foram gerados a partir do acréscimo de valores dos índices das variáveis independentes – flexibilidade de volume (ϵ), nível de serviço (η) e flexibilidade de entrega (γ) na função multiobjetivo (vide item 5.3.2.6). O aumento do índice de flexibilidade de volume (ϵ) restringe as capacidades de produção e distribuição (W) (vide equações 2 e 4) do submodelo estratégico.

O índice de nível de serviço (η) restringe os mínimos níveis de serviço requeridos pelo tomador de decisão (vide equação 36), alterando as quantidades ótimas do pedido conforme a necessidade de preenchimento de pedidos. A flexibilidade de entrega é restringida pelo índice (γ), onde foi assumido que as quantidades requeridas chegam aos clientes por meio de entregas expressas.

A configuração da rede de instalações é representada por variáveis binárias. A engarrafadora atende, em todos os casos, aos centros de distribuição ($q_{2j}=1$). Quando os centros de distribuição CD1, CD2 e CD3 estão abertos ($q_{3k}=1$), ou quando fechados ($q_{3k}=0$).

As matrizes (8x3) constantes nas tabelas 1,2,3,4 representam as zonas de consumo ZC[1,2,3,4,5,6,7,8], sendo atendidas pelos centros de distribuição CD[1,2,3]. Se CD atende a ZC, $y_{km}=1$; senão, $y_{km}=0$.

A partir do fluxograma do algoritmo de Sabri e Beamon (2000) apresentado na seção 5.4, foram gerados 36 cenários, os quais são apresentados nas Tabelas 1,2,3,4 (a seguir) e no Anexo 2. Estas tabelas foram organizadas de forma a apresentarem, cada uma delas, um formato de configuração de cadeia de suprimentos. A primeira expressa uma configuração de cadeia de suprimentos onde todas as zonas de consumo são atendidas pelo centro de distribuição CD2, expressando, portanto, baixa flexibilidade de volume.

A segunda tabela apresenta os centros de distribuição CD1 e CD2 atendendo, respectivamente, às zonas de consumo ZC[1,2,3,4] e ZC[5,6,7,8]. A terceira tabela, similar à segunda, apresenta os centros de distribuição CD1 e CD2 atendendo, respectivamente, às zonas de consumo ZC[1,2,3,4,8] e ZC[5,6,7]. A quarta e última tabela apresenta o nível mais elevado de flexibilidade de volume com os centros de distribuição CD1, CD2 e CD3 atendendo, respectivamente, às zonas de consumo ZC[1,2,3,4], ZC[5,6] e ZC[7,8].

Os cenários apresentados (vide Tabelas 1,2,3,4 e Anexo 2) foram gerados a partir da solução conjunta dos submodelos estratégico e operacional. Porém, estes cenários diferem entre si a partir das variáveis de entrada (“inputs”) e das variáveis de decisão adotadas pelo tomador de decisão.

Os cenários [1,2,3,4] acompanhados do termo “artificial” foram gerados a partir de capacidades de distribuição artificiais (80.000 bombonas/mês). Os cenários restantes que estão acompanhados do termo “artificial” representam situações encontradas pelas demandas de inverno, com valores iguais à metade das demandas de verão. Os cenários que não estão acompanhados de nenhum termo representam situações com dados reais de entrada, coletados na cadeia de suprimentos da água mineral (vide Anexo 3).

Tabela 1 – Vetores de Performance e Configuração 1 da Cadeia de Suprimentos

Cenário	w_2	w_3	Z	W	q_{2j}	q_{3k}	y_{km}	
1artificial	0	0,5	0,5	196.314,95	87518	0,040	0,0000	$\left \begin{array}{c c c} 1 & & \\ \hline & 0 & 1 & 0 \\ \hline & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{array} \right $

Tabela 2 – Vetores de Performance e Configuração 2 da Cadeia de Suprimentos

Cenário	w_2	w_3	Z	W	q_{2j}	q_{3k}	y_{km}	
2artificial	120000	0,5	0,5	206.009,86	127518	0,040	0,0000	$\left \begin{array}{c c c} 1 & & \\ \hline & 1 & 1 & 0 \\ \hline & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{array} \right $
22artificial	0	0,5	0,5	123.629,33	111259	0,000	0,0000	$\left \begin{array}{c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \end{array} \right $
24artificial	0	0,5	0,5	123.687,82	111259	0,030	0,0000	$\left \begin{array}{c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \end{array} \right $
26artificial	0	0,5	0,5	123.915,50	111259	0,060	0,0000	$\left \begin{array}{c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \end{array} \right $
28artificial	0	0,5	0,5	125.745,49	111259	0,090	0,0000	$\left \begin{array}{c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \end{array} \right $
30artificial	0	0,5	0,5	123.645,35	111259	0,000	0,1400	$\left \begin{array}{c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \end{array} \right $
32artificial	0	0,5	0,5	123.778,74	111259	0,000	0,1600	$\left \begin{array}{c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \end{array} \right $
34artificial	0	0,5	0,5	124.430,19	111259	0,000	0,1800	$\left \begin{array}{c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \end{array} \right $
36artificial	0	0,5	0,5	125.609,47	111259	0,000	0,2000	$\left \begin{array}{c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \end{array} \right $

Tabela 3 – Vetores de Performance e Configuração 3 da Cadeia de Suprimentos

Cenário	w_2	w_3	Z	W	q_{2j}	q_{3k}	y_{km}	
6	0	0,5	0,5	207.154,78	79018	0,000	0,0000	1 1 1 0 1 0 0
8	0	0,5	0,5	207.211,07	79018	0,030	0,0000	1 0 0
10	0	0,5	0,5	207.463,91	79018	0,060	0,0000	1 0 0
12	0	0,5	0,5	209.369,29	79018	0,090	0,0000	1 0 0
14	0	0,5	0,5	207.208,86	79018	0,000	0,1400	0 1 0
16	0	0,5	0,5	207.449,68	79018	0,000	0,1600	0 1 0
18	0	0,5	0,5	208.548,04	79018	0,000	0,1800	0 1 0
20	0	0,5	0,5	210.467,01	79018	0,000	0,2000	1 0 0

Tabela 4 – Vetores de Performance e Configuração 4 da Cadeia de Suprimentos

Cenário	w_2	w_3	Z	W	q_{2j}	q_{3k}	y_{km}	
3artificial	130000	0,5	0,5	209.466,19	167518	0,040	0,0000	1 1 1 1 1 0 0
4artificial	130000	0	0,8	209.466,19	139214	0,040	0,0000	1 0 0
5	80000	0,5	0,5	209.376,77	87018	0,000	0,0000	1 0 0
7	80000	0,5	0,5	209.426,56	87018	0,030	0,0000	1 0 0
9	80000	0,5	0,5	209.671,10	87018	0,060	0,0000	0 1 0
11	80000	0,5	0,5	211.562,78	87018	0,090	0,0000	0 1 0
13	80000	0,5	0,5	209.439,76	87018	0,000	0,1400	0 0 1
15	80000	0,5	0,5	209.693,04	87018	0,000	0,1600	0 0 1
17	80000	0,5	0,5	210.824,38	87018	0,000	0,1800	
19	80000	0,5	0,5	212.781,06	87018	0,000	0,2000	
21artificial	112000	0,5	0,5	126.251,18	119259	0,000	0,0000	
23artificial	112000	0,5	0,5	126.307,30	119259	0,030	0,0000	
25artificial	112000	0,5	0,5	126.532,98	119259	0,060	0,0000	
27artificial	112000	0,5	0,5	128.361,37	119259	0,090	0,0000	
29artificial	112000	0,5	0,5	126.271,62	119259	0,000	0,1400	
31artificial	112000	0,5	0,5	126.413,01	119259	0,000	0,1600	
33artificial	112000	0,5	0,5	127.019,51	119259	0,000	0,1800	
35artificial	112000	0,5	0,5	128.312,82	119259	0,000	0,2000	

A relação entre as variáveis independentes e dependentes é expressa, a seguir, na forma de gráficos. Estes gráficos apresentam, respectivamente, a relação entre o índice de flexibilidade de volume e o custo total (Gráfico 1); entre o índice de serviço ao cliente e o custo total (Gráficos 2 e 4); e entre o índice de flexibilidade de entrega e o custo total (Gráficos 3 e 5).

Gráfico 1. Relação entre Flexibilidade de Volume e Custo Total (Capacidade de Distribuição Artificial)

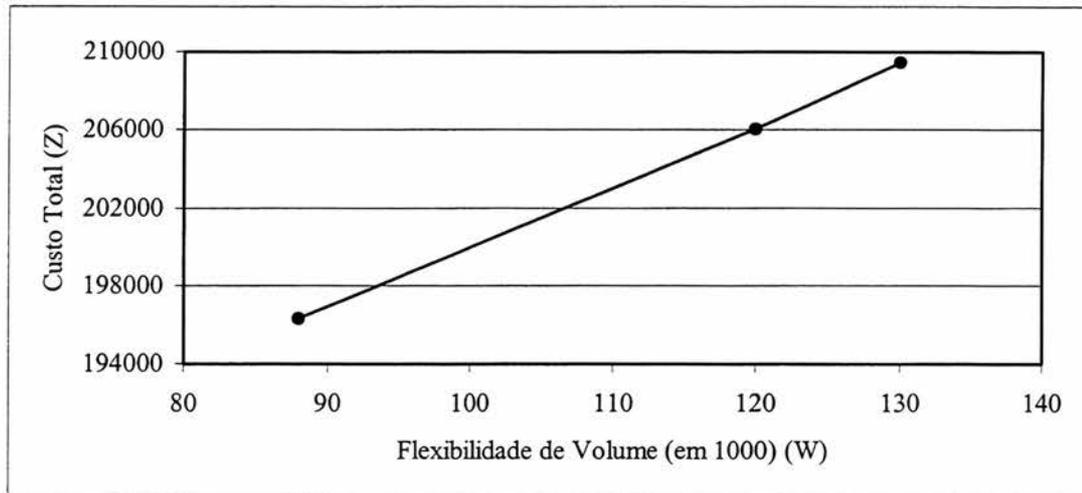


Gráfico 2. Relação entre Nível de Serviço e Custo Total

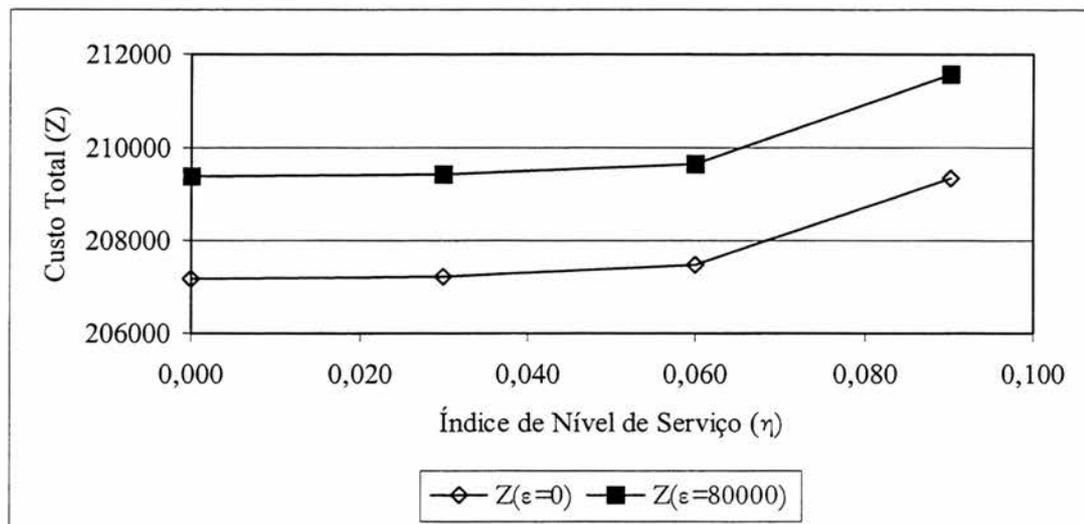


Gráfico 3. Relação entre Flexibilidade de Entrega e Custo Total

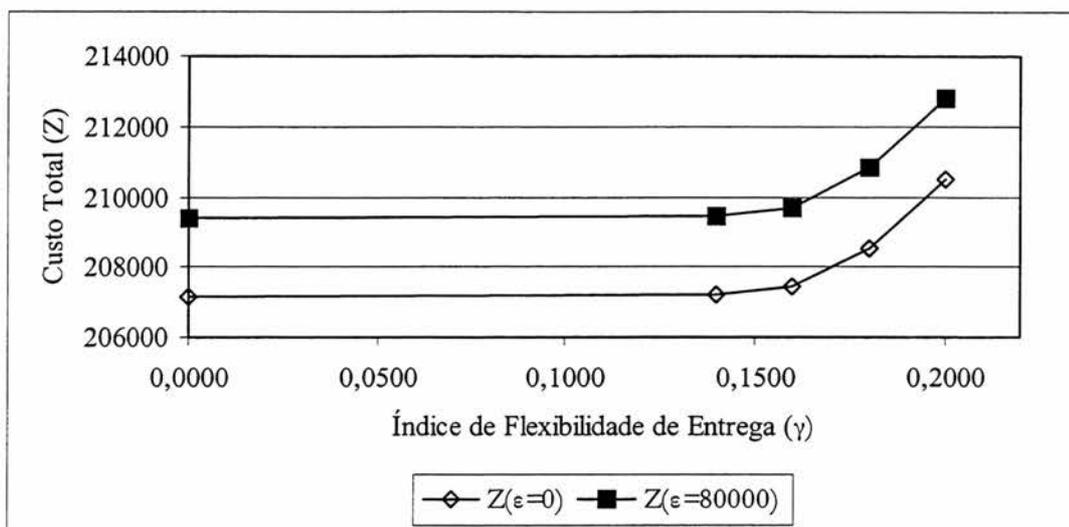


Gráfico 4. Relação entre Nível de Serviço e Custo Total (Demanda Artificial)

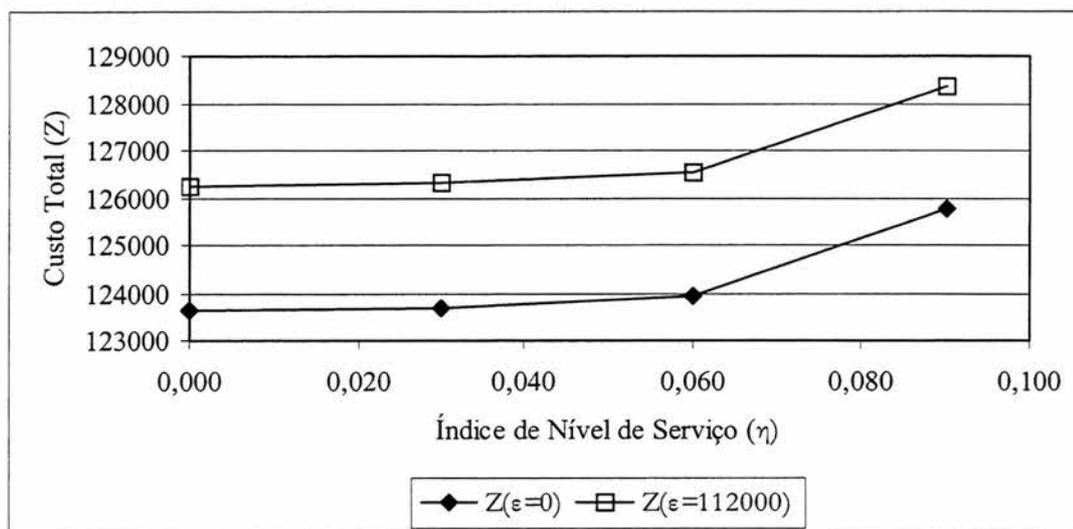
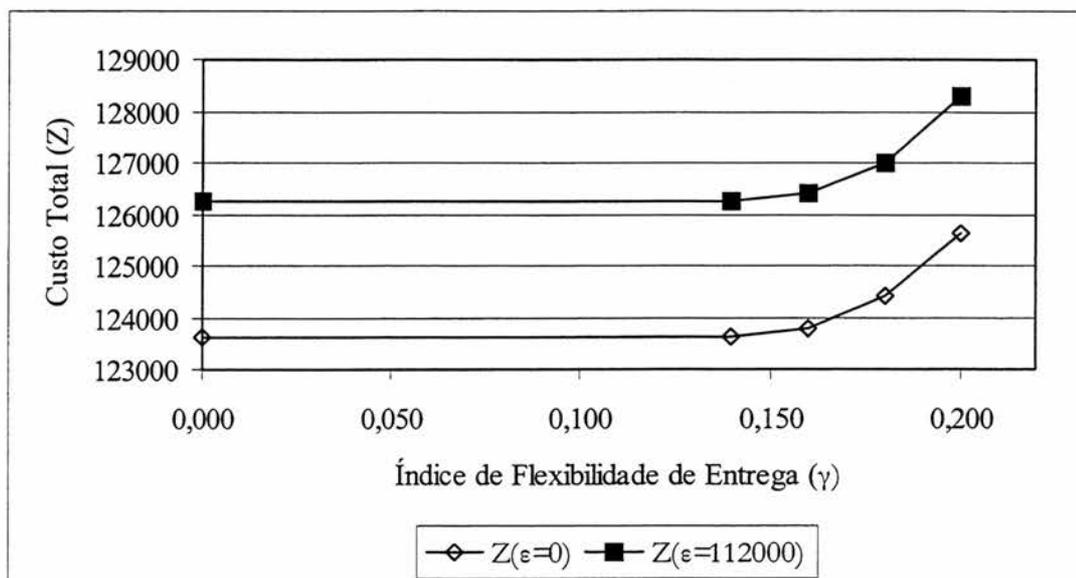


Gráfico 5. Relação entre Flexibilidade de Entrega e Custo Total (Demanda Artificial)



6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados foi feita em duas etapas. A primeira etapa descreve a análise de sensibilidade do vetor performance apresentado nos cenários gerados no item anterior. A segunda etapa apresenta uma análise geral dos cenários apresentados no item anterior.

6.3.1 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade teve como objetivo identificar a influência das variáveis independentes (flexibilidade de volume, nível de serviço, flexibilidade de entrega e fatores-peso das capacidades de produção e distribuição) na variável dependente (custo total), a partir dos cenários gerados na cadeia de suprimentos da água mineral.

6.3.1.1 Flexibilidade de Volume

Os cenários 1, 2 e 3 (vide Tabelas 1, 2 e 4) permitem constatar a influência das variações dos valores da flexibilidade de volume (W) frente ao custo total. Especificamente nestes cenários, foram atribuídos valores virtuais às capacidades de distribuição ($\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 80000$ unid./mês); e à demanda nas zonas de consumo equivalente à metade da demanda no verão. Isto foi procedido devido ao fato de que as limitações das capacidades reais não possibilitaram que esta análise pudesse ser realizada com maior riqueza.

As variações do índice de flexibilidade de volume variaram de valores menores ($\epsilon=87000$) até valores máximos ($\epsilon=130000$), passando por um valor intermediário ($\epsilon=120000$). Em todos os casos houve um aumento dos custos totais quando do aumento do índice de flexibilidade de volume.

A configuração da cadeia de suprimentos também é alterada quando do aumento do índice de flexibilidade de volume, a qual é verificada através da inclusão de centros de distribuição. Nestes três primeiros cenários, nos quais um menor índice de flexibilidade de volume é aplicado ($\epsilon=87000$), apenas o centro de distribuição CD2 faz parte da configuração da cadeia de suprimentos. Quando o índice ϵ aumenta até o valor intermediário ($\epsilon=120000$), os centros de distribuição CD1 e CD2 atendem, respectivamente, às zonas de consumo ZC[1,2,3,4] e ZC[5,6,7,8]. Quando o índice de flexibilidade de volume atinge o valor máximo ($\epsilon=130000$), os CD1, CD2 e CD3 distribuem produtos às zonas de consumo ZC[1,2,3,4], ZC[5,6] e ZC[7,8], respectivamente.

Caracteriza-se o aumento dos custos totais da cadeia de suprimentos da água mineral devido aos custos de manutenção dos produtos estocados e custos fixos requeridos em cada um dos centros de distribuição. Embora os índices de nível de serviço (η) e flexibilidade de entrega (γ) nos cenários 1, 2 e 3 estivessem fixados ($\eta=0,04$ e $\gamma=0,00$), houve alterações nos custos do estágio de produção/estoque de produtos acabados e no estágio de distribuição. Há uma redução dos custos do estágio

de produção/estoque de produtos acabados (U_{2ij}) nas configurações com menores flexibilidades de volume (W) porque os custos unitários de transporte (c_{ijk}) também são menores.

Ocorre uma redução dos custos unitários (U_{3ik}) no estágio de distribuição (vide Anexo 2). O aumento do giro de produtos, em um único centro de distribuição (CD2), dilui os custos de manutenção e os custos de ressuprimento (vide equação 38), através da elevação das quantidades médias de estoque (I_{3ik}).

6.3.1.2 Fatores-peso das Capacidades de Produção e Distribuição

Embora os fatores-peso de capacidade de produção (w_2) e distribuição (w_3) sejam constantes ($w_2=0,5$ e $w_3=0,5$) em grande parte dos cenários (35 cenários do total de 36), uma comparação entre os cenários 3 e 4 possibilitaram analisá-los. No cenário 4 fez-se uma alteração dos fatores w_2 e w_3 , atribuindo-os o valor extremo mínimo ($w_2=0$) e máximo ($w_3=0,8$). Esta formatação, relacionada à flexibilidade de volume ($\epsilon=130000$), permitiu a obtenção da mesma configuração e custos totais alcançados no cenário 3, o qual possui os mesmos fatores-peso adotados em grande parte dos cenários. Embora a cadeia de suprimentos da água mineral apresente apenas uma unidade de produção (engarrafadora), ela é caracterizada pela grande capacidade de produção. A capacidade de distribuição, no entanto, necessitou receber peso alto ($w_3=0,8$) para atender à flexibilidade de volume (W) restrita pelo índice de flexibilidade de volume ($\epsilon=130000$).

6.3.1.3 Índices dos Níveis de Serviço

A análise dos níveis de serviço foi feita em 16 dos 36 cenários, os quais permitiram constatar o aumento dos custos totais em todos os casos quando do aumento dos índices de nível de serviço (η). Nestes cenários, foi determinado um aumento dos índices de nível de serviço, ascendendo de valores mínimos ($\eta=0,000$) e intermediários ($\eta=0,030$; $\eta=0,040$ e $\eta=0,060$) a valores máximos ($\eta=0,090$) adotados.

O valor do índice de nível de serviço nulo ($\eta=0,000$) leva aos mínimos níveis de serviços requeridos ($P'_{2ij}=0,90$). Há um aumento nos níveis de serviço relacionados ao aumento dos índices de nível de serviço ($P_{2ij}=0,93$ para $\eta=0,030$; $P_{2ij}=0,94$ para $\eta=0,040$; $P_{2ij}=0,96$ para $\eta=0,060$; e $P_{2ij}=0,99$ para $\eta=0,090$).

Nos cenários com demanda artificial (22 a 28 e 21 a 27) e demanda real (6 a 12 e 5 a 11) o aumento dos níveis de serviço repercutiram no aumento dos custos de estoques de produtos acabados (U_{2ij}), pois há um incremento das quantidades estocadas para atender aos mínimos níveis de serviço requeridos. Embora haja o “trade off” entre os custos de manutenção e os custos de obtenção de bens, houve predominância dos custos de manutenção sobre a diminuição dos custos de obtenção. Conseqüentemente, o aumento dos custos totais ocorre devido ao aumento dos custos de manutenção dos bens estocados para atender aos mínimos níveis de serviço requeridos.

As diferenças entre os custos unitários dos estágios de produção/estoque de produtos acabados (U_{2ij}) e os custos unitários do estágio de distribuição (U_{3ik}) ocorreram entre as diferentes configurações da rede de instalações pelos mesmos motivos já expostos na análise de flexibilidade de volume (item 6.3.1.1). Isto significa que o aumento do giro mensal de produtos dilui os custos de manutenção. Portanto, as configurações com os maiores índices de flexibilidade de volume e com as demandas artificiais (metade da demanda real) resultaram em custos unitários mais altos.

6.3.1.4 Índices da Flexibilidade de Entrega

A análise da flexibilidade de entrega foi feita em 20 dos 36 cenários, os quais permitiram constatar o aumento dos custos totais em todos os casos quando do aumento dos índices de flexibilidade de entrega. Nestes cenários, foi determinado um aumento dos índices de flexibilidade de entrega, ascendendo de valores mínimos ($\gamma=0,000$) e intermediários ($\gamma=0,14$; $\gamma=0,16$ e $\gamma=0,18$), a valores máximos ($\gamma=0,20$) adotados.

Os cenários gerados com o índice de flexibilidade de entrega nulo ($\gamma=0,000$) são os mesmos cenários gerados com índice de nível de serviço nulo ($\eta=0,000$).

Nos cenários com demanda artificial (30 a 36 e 29 a 31) e demanda real (13 a 19 e 14 a 20) o aumento dos índices de flexibilidade de entrega repercutiram no aumento dos custos unitários de produção/estoques de produtos acabados (U_{2ij}) e dos custos unitários de distribuição (U_{3ik}). Isso se deve à redução dos tempos de entrega (T_{ijk}), à redução das quantidades de pedidos (Q_{2ij}) e ao aumento dos custos unitários de transporte (c_{ijk}).

6.3.2 Análise Global dos Cenários

As diferenças dos custos totais (Z) entre os projetos de cadeia de suprimentos com maior e menor flexibilidade de volume (W) são pequenas. Isto pode ser explicado pelos “trade offs” entre os custos operacionais de transporte e os custos operacionais do estágio de produtos estocados nos centros de distribuição. Nesta perspectiva, os custos de transporte dos centros de distribuição à zona de consumo (c_{ikm}) aumentaram sua parcela unitária quando relacionados às configurações com menores capacidades de distribuição. Entretanto, os custos de transporte (c_{ijk}) entre a engarrafadora e os centros de distribuição diminuiram. Nestas configurações, a utilização de rotas alternativas entre os centros de distribuição (CD) e as zonas de consumo (ZC) corroboraram para o aumento dos custos unitários de transporte devido às maiores distâncias entre estes estágios.

Entretanto, os componentes operacionais – custo de manutenção, custos de ressuprimento e custos de falta de estoque do estágio de distribuição (TC_{3ik}) – apresentaram uma pequena redução em configurações de rede de instalações com menor grau de flexibilidade de volume.

O fato de terem sido geradas apenas quatro configurações da rede de instalações deve-se à função que minimiza os custos totais Z (vide equação 4) e está restrita a determinadas capacidades e quantidades (vide equações 5 a 15).

Uma análise dos cenários com demanda e capacidade reais, onde foram testados os níveis de serviço (cenários 5 a 11 e 6 a 12), permite constatar que os custos totais Z foram sempre maiores em configurações de rede de instalações com maiores flexibilidades de volume, mesmo quando os níveis de serviço (P_{2ij}) adotados nessas configurações tenham sido inferiores aos níveis de serviços adotados em configurações com menor flexibilidade de volume (vide Gráficos 2 e 4). Por outro lado, as curvas de custo total relacionadas ao índice de nível de serviço (P_{2ij}) mostram uma pequena elevação dos custos totais quando os níveis de serviço variam entre 0,90 (mínimos níveis requeridos) e 0,96; tanto em configurações com menor ou maior flexibilidade de volume (W). A maior elevação dos custos totais Z ocorreu quando os níveis de serviço (P_{2ij}) atingiram taxas de preenchimento de pedidos de 0,99.

Isso mostra que duas decisões estratégicas podem ser tomadas na cadeia de suprimentos da água mineral. Em primeiro lugar, as configurações de cadeia de suprimentos com menor flexibilidade de volume (capacidade de distribuição) permitem atender à demanda (X_{ij}) com os maiores níveis de serviço (P_{2ij}) e menores custos totais (Z). Em segundo lugar, as configurações de cadeia de suprimentos com menores capacidades de distribuição podem fornecer melhores níveis de serviço às zonas de consumo (vide Anexo 2), pois há uma elevação da disponibilidade de produtos relacionada às maiores quantidades de pedido requeridas.

Os cenários com demandas e capacidades reais, onde foram testados os índices de flexibilidade de entrega (cenários 13 a 19 e 14 a 20), mostraram que, diferentemente da relação custos totais *versus* níveis de serviço, os custos totais dos cenários com menores flexibilidades de volume nem sempre são inferiores. Os cenários 15 e 20 (vide Anexo 2) explicitam esta particularidade. O aumento do custo total se dá porque as quantidades requeridas (Q_{p2}) são induzidas a serem diminuídas por meio da redução dos níveis de serviço (P_{2ij}). A redução dos níveis de serviço ocorre devido aos menores tempos das entregas expressas, equacionadas pelo ciclo de tempo de Bernoulli (vide equação 30). Os índices de flexibilidade de entrega (vide

equação 34) restringem os ciclos de tempo (T_{ijk}) a serem inferiores ao ciclo de entrega padrão (T'_{ijk}).

Nessa perspectiva, duas decisões estratégicas podem ser tomadas. Em primeiro lugar, os cenários com menor flexibilidade de volume ($W=79018$) têm custos totais (Z) inferiores aos cenários com maior flexibilidade de volume ($W=111259$) entre os índices de flexibilidade de entrega 0,18 e 0,20 (vide Gráfico 3). Em segundo lugar, para o índice de flexibilidade de entrega máximo adotado ($\gamma=0,20$) nos cenários com menor capacidade de distribuição ($\epsilon=0$; $W=79018$), os custos totais ($Z=210467,01$) são maiores do que os custos totais ($Z=209693,04$) dos cenários com maior capacidade de distribuição ($\epsilon=80000$; $W=87018$) quando os índices de flexibilidade de entrega (γ) são menores ou iguais a 0,16.

6.3.2.1 Análise dos Estágios de Produção, de Distribuição e de Zona de Consumo

Outras variáveis operacionais de saída foram analisadas nos cenários 5 ao 20. Estes cenários (vide Anexo 2) representam os resultados operacionais obtidos a partir dos dados reais coletados em pesquisa de campo. A seguir são apresentadas as análises a) dos estágios de produção/estoque de produtos acabados; b) do estágio de distribuição; c) do estágio da zona de consumo.

a) Estágio de Produção e Estoque de Produtos Acabados

As maiores quantidades de pedido requeridas no estágio de produção (Q_{p2}) são encontradas nos cenários 11 e 12, por consequência dos maiores níveis de serviço ($P_{2ij}=0,99$). Inversamente, a probabilidade de ter estoque disponível (Pr_j) neste estágio diminui em virtude do acréscimo dessas quantidades (vide equação 24).

Os pontos de pedido deste estágio (s_{2ij}) expressaram valores decrescentes quando do aumento dos níveis de serviço, haja vista que as oscilações do ponto de pedido são alteradas pela função inversa da probabilidade normalmente distribuída de haver estoque (n_2) (vide equação 22). Portanto, quanto maiores forem os níveis de serviço (P_{2ij}), menores os pontos de pedido (s_{2ij}). Entretanto, o aumento dos índices de

flexibilidade de entrega (γ) diminui as quantidades de pedido requeridas (Q_{2ij}) que, conseqüentemente, elevam o ponto de pedido. Assim, os pontos de pedido mínimo ($s_{2ij}=575,44$ unidades) e máximo ($s_{2ij}=775,22$ unidades) encontram-se, respectivamente, nos cenários que contêm os maiores índices de nível de serviço ($\eta=0,090$) e os maiores índices de flexibilidade de entrega ($\gamma=0,20$).

Por outro lado, os níveis máximos de estoque (S_{2ij}) crescem com o aumento dos níveis de serviço e decrescem com o aumento da flexibilidade de entrega (γ). Os níveis máximos de estoques no estágio de produção foram mais altos ($S_{2ij}=13065,48$ unidades) quando os índices de nível de serviços tiveram os valores máximos ($\eta=0,090$) adotados; e mais baixos ($S_{2ij}=949,89$ unidades), quando os índices de flexibilidade de entrega tiveram os valores máximos ($\gamma=0,20$). Os motivos dessas oscilações são as quantidades de pedido requeridas (Q_{2ij}), que aumentam para os maiores níveis de serviço e diminuem para maiores flexibilidades de entrega (vide equação 26).

Os custos do estágio de produção/estoques de produtos acabados (TC_{2ij}) apresentaram eficácia (vide equação 32), haja vista que as oscilações das quantidades requeridas representaram o aumento dos custos unitários (u_{2ij}^F) quando atingiram valores acima ou abaixo da quantidade ótima de pedidos (Q_{2ij}^*). Nesta perspectiva, a parcela relativa aos custos de manutenção aumentou, devido à elevação das quantidades requeridas, quando acima da quantidade ótima. Já as parcelas relativas aos custos de transporte e “set up” de entrega expressa aumentaram quando da redução dos níveis de serviço.

b) Estágio de Distribuição

As maiores quantidades requeridas no estágio de distribuição ($Q_{3ik}=2469,57$ unidades) foram encontradas no cenário 12. Este cenário apresenta uma configuração onde os centros de distribuição CD1 e CD2 atendem, respectivamente, às zonas de consumo $ZC[1,2,3,4,8]$ e $ZC[5,6,7]$, o que justifica que as maiores quantidades

requeridas devem-se ao índice máximo dos níveis de serviço ($P_{3ik}=0,99$) e à demanda ($D_{im}=38181,82$ unidades/mês).

A menor quantidade requerida ($Q_{3ik}=881,99$ unidades) ocorreu no cenário 19. Este cenário apresenta uma configuração onde os centros de distribuição CD1, CD2 e CD3 atendem, respectivamente, às zonas de consumo ZC[1,2,3,4], ZC[5,6] e ZC[7,8]. Os máximos índices de flexibilidade de entrega adotados ($\gamma=0,20$) e a pequena demanda mensal ($D_{im}=10067,27$ unidades/mês), justificam as menores quantidades requeridas.

No estágio de distribuição, a probabilidade de ter estoque é sempre máxima ($Pr_k=1$ ou 100%), pelo fato de ter sido adotada a função perda normal ($G_{(n3)}$) no cálculo das quantidades ótimas de pedido (Q_{3ik}). Além disso, os valores dados aos produtos fora de estoque ($\pi_{3ik}=2,00$) equivalem-se ao preço de venda destes produtos, fazendo com que a quantidade requerida seja suficiente para atingir a probabilidade máxima de haver produto em estoque (vide equações 42 e 43).

Os pontos de pedido do estágio de distribuição (s_{3ik}) foram calculados a partir do método dos custos de falta de estoques conhecidos (Ballou, 2001). Tal método aumenta as quantidades requeridas, por funcionar como um mecanismo de proteção frente às variâncias do ciclo de reabastecimento e às variâncias de demanda (vide equação 40). Os pontos de pedido (s_{3ij}) expressaram valores decrescentes quando do aumento dos níveis de serviço fornecidos pelo estágio de produção e estoque de produtos acabados (P_{2ij}) (vide equação 49). Da mesma forma, nos casos de aumento dos índices de entregas expressas (γ), quando da escassez de produtos nos centros de distribuição, houve uma redução dos pontos de pedido (vide equações 48 e 49).

Portanto, há uma relação entre os pontos de pedido e o desvio padrão da distribuição da demanda (σ_{3ik}), onde foi também constatado que os cenários com menor flexibilidade de volume (vide cenários 6 e 14) apresentam os pontos de pedido mais altos, no centro de distribuição CD1 ($s_{3ik}=1523,54$ no cenário 6 e $s_{3ik}=1536,05$ no cenário 14).

Os níveis máximos de estoques (S_{3ik}) nos centros de distribuição, assim como os pontos de pedido (s_{3ik}), diminuiram com o aumento dos níveis de serviço fornecidos pelo estágio de produção. Portanto, em casos de entregas expressas pelo estágio de produção, encontram-se os menores níveis máximos de estoques. A justificativa para isso (vide equação 45) é que os níveis máximos de estoque (S_{3ik}) são dependentes das quantidades ótimas de pedido (Q_{3ik}) e dos pontos de pedido (s_{3ik}).

Os níveis médios de estoque (I_{3ik}) são determinantes para a solução dos custos unitários nos centros de distribuição (U_{3ik}). Pois essa solução ocorre da razão dos custos totais do estágio de distribuição (TC_{3ik}) pelos níveis médios de estoque (vide equação 47). A composição da equação de nível médio de estoque reúne as quantidades médias requeridas à distribuição da demanda e da função inversa da probabilidade de haver estoque. Nesta perspectiva, ocorreu um repasse dos níveis de serviço recebidos pelo estágio de produção (P_{2ij}) aos níveis de serviço fornecidos ao estágio a jusante. Portanto, a estabilidade dos valores encontrados nos custos unitários do estágio de distribuição, entre os cenários ($U_{i1}=0,13$; $U_{i2}=0,14$ e $U_{i3}=0,14$ para maiores flexibilidades de volume; $U_{i1}=0,13$ e $U_{i2}=0,14$ para menores flexibilidades de volume), é justificada pelo fato de que, embora os níveis médios de estoque tenham decrescido, os custos totais (TC_{3ik}) também decresceram.

Os custos unitários de transporte entre a produção e a zona de consumo (c_{ijk}) apresentaram estabilidade de valores na maior parte dos cenários (cenários 5 a 16). Entretanto, uma pequena parte dos cenários (cenários 17 a 20), apresentou custos unitários de transporte mais elevados que os cenários anteriores. Isso representa que a equação dos custos unitários de transporte mostrou eficácia, haja vista que a sua elevação ocorreu nos cenários 17 a 20, onde foram adotados os maiores índices de flexibilidade de entrega ($\gamma=0,18$ e $\gamma=0,20$).

A equação de custos totais do estágio de distribuição (TC_{ijk}) mostrou eficácia na sua função, efetuando adequadamente os “trade offs” entre os custos de manutenção, os custos de “set up” e os custos de falta de produtos em estoque (vide equação 38). Os custos de manutenção são contrabalanceados pelo aumento das quantidades médias

requeridas (Q_{3ik}) e pela função inversa da probabilidade de haver produtos em estoque (n_3). Entretanto, tenderam a aumentar quando do aumento das quantidades requeridas.

A relação entre a demanda (D_{im}) e as quantidades requeridas (Q_{3ik}) efetuou os custos totais gastos com pedido durante o mês.

A parcela dos custos totais relativa aos custos de falta de estoque mostrou eficácia em sua composição, haja vista que essa apresentou uma relação com os níveis de serviço fornecidos pelo estágio de produção/estoque de produtos acabados. Especificamente, houve um aumento dos custos de falta de estoque quando da elevação dos níveis de serviço fornecidos pelo estágio de produção (P_{2ij}). A justificativa disso é que, para maiores níveis de serviço (P_{2ij}), maiores foram os tempos de reabastecimento e suas variâncias (vide equações 47, 48 e 49).

c) Estágio de Zona de Consumo

Cada uma das oito zonas consumo agregou demandas de pontos de venda próximos. A localização adotada para cada zona de consumo é a mesma do ponto de venda principal. As quantidades requeridas pela zona de consumo (Q_{4im}) são determinadas pelo produto da demanda média diária (d_{4im}) e pelo tempo de reabastecimento predeterminado (vide equação 58), o que levou as variáveis operacionais deste estágio a serem constantes em todos os cenários (5 a 20).

A probabilidade de ter produtos estocados apresentou os valores máximos ($Pr_m=1$ ou 100%), pelo fato de ter sido adotada a função perda normal ($G_{(n4)}$) no cálculo das quantidades ótimas de pedido (Q_{4im}). Além disso, os valores dados aos produtos fora de estoque ($\pi_{4im}=5,00$) são equivalentes ao preço de venda destes produtos, fazendo com que a quantidade requerida seja suficiente para atingir a probabilidade máxima de haver produto em estoque (vide equações 55 e 56).

Ao contrário dos estágios anteriores, este estágio não possui ponto de pedido, uma vez que foi adotada uma política de revisão periódica de estoques (q,Q).

Entretanto, os níveis máximos de estoque (S_{4im}) apresentaram valores dependentes, principalmente, da demanda média diária (d_{4im}) e dos tempos de reabastecimento e de revisão periódica (vide equação 59).

Os níveis de serviço (P_{4im}) variaram (vide equação 61) de valores máximos adotados a menores taxas de preenchimento ($P_{4i4}=0,95$ e $P_{4i6}=0,88$). Os referidos valores variaram devido às diferentes quantidades requeridas (Q_{4im}) e às diferentes distribuições da demanda (σ_4) durante o ciclo de revisão periódica (T^*).

As quantidades médias de estoque (I_{4im}) são equilibradas pelas médias das quantidades requeridas somadas ao estoque de segurança (vide equação 53). Os custos unitários do estágio de zona de consumo (U_{4im}) são determinados pela razão entre os custos operacionais (TC_{4im}) e a quantidade média de estoque (I_{4im}). Por isso, os ciclos de revisão periódica foram adotados com o objetivo de equilibrar as quantidades médias de estoque e balancear o “trade off” entre os custos unitários das zonas de consumo (U_{4im}). Logicamente, esse equilíbrio não esteve limitado apenas às quantidades médias de pedido (I_{4im}), pois os custos totais deste estágio (TC_{4im}) também foram determinantes para encontrar a solução dos custos unitários.

Os valores máximo e mínimo dos custos unitários foram encontrados nas zonas de consumo 8 e 6, respectivamente ($U_{4i8}=0,32$ e $U_{4i5}=0,25$). A justificativa para estas diferenças encontra-se na composição custos totais (TC_{4im}), onde estão os custos de manutenção, os custos de “set up” e os custos de falta de estoque.

Os custos de manutenção da zona de consumo crescem com a elevação das quantidades requeridas. Por outro lado, os custos de pedidos (θ_{im}) são reduzidos com o aumento do número de quantidades requeridas. Os custos unitários de falta de estoque (π_{im}) adotados elevam os custos totais, pois os custos de falta de estoque equivalem-se ao preço final de venda dos produtos. Tais custos foram de valores mais baixos (4,50), quando as zonas de consumo localizam-se nas proximidades da engarrafadora ZC[5,6]; a valores mais altos (5,00), para as zonas de consumo mais distantes ZC[1,2,3,4,7,8].

A equação de custos totais mostrou eficácia ao estimar os “trade offs” entre os custos de manutenção e os custos de realizar os pedidos. Entretanto, os custos unitários de transporte entre os centros de distribuição e as zonas de consumo (c_{ikm}) variaram, dependendo da rota necessária a cada configuração da cadeia de suprimentos.

Os custos de transporte (c_{ikm}) mais baixos foram encontrados na configuração de cadeia de suprimentos com maior flexibilidade de volume, na qual os centros de distribuição CD1, CD2 e CD3 atendem, respectivamente, às zonas de consumo ZC[1,2,3,4], ZC[5,6] e ZC[7,8]. Por outro lado, os custos de transporte (c_{ikm}) mais altos foram encontrados em cenários com baixa flexibilidade de volume, onde são utilizadas rotas alternativas para entrega de produtos. Essas rotas foram adotadas em configurações onde os centros de distribuição CD1 e CD2 atendem, respectivamente, às zonas de consumo ZC[1,2,3,4,8] e ZC[5,6,7].

6.3.3 Recomendações Práticas

Posteriormente às análises acima realizadas, foi possível estabelecer algumas variáveis de decisão para determinar a melhor configuração da cadeia de suprimentos da água mineral. Os Gráficos 2 e 4 mostram que a configuração 3 da cadeia de suprimentos possui custos totais $\{Z(\varepsilon=0)\}$ inferiores aos custos totais da configuração 4 $\{Z(\varepsilon=80000 \text{ e } \varepsilon=112000)\}$, tanto para as demandas de inverno como para as demandas de verão, independentemente dos níveis de serviços oferecidos ao estágio de distribuição (P_{2ij}).

Entretanto, a escassez de produtos nos centros de distribuição, durante a demanda de verão (vide Gráfico 3), ocasiona entregas expressas. A flexibilidade de entrega, ao contrário dos níveis de serviço, aumenta os custos totais quando a configuração 3 possui índices maiores ($\gamma \geq 0,19$) que os índices de flexibilidade de entrega ($\gamma \leq 0,17$) existentes na configuração 4 (vide Tabelas 3 e 4, respectivamente).

Nessa perspectiva, duas ações podem ser tomadas. A primeira relaciona-se ao tipo de configuração adotado pela cadeia de suprimentos frente ao ambiente em que se

encontra a cadeia de suprimentos da água mineral, denominada de ação de curto prazo. A segunda está relacionada a uma alternativa operacional, denominada de ação de longo prazo.

6.3.3.1 Ação de Curto Prazo

Tendo em vista a redução dos custos totais (Z) e suas variações frente ao fornecimento de determinados níveis de serviço e flexibilidade de entrega, recomenda-se que sejam mantidas configurações com alta flexibilidade de volume (configuração 4) durante o período de verão. Por outro lado, durante o período de inverno, quando a demanda média mensal equivale à metade da demanda de verão, recomenda-se que sejam adotadas configurações de cadeia de suprimentos com menores capacidades de distribuição (configuração 2 ou 3). Logicamente, essa recomendação é dependente das reais capacidades de produção e distribuição e das demandas de verão e inverno adotadas neste trabalho.

6.3.3.2 Ação de Longo Prazo

Tendo em vista a possibilidade de reduzir as entregas expressas e de rever a capacidade de distribuição, recomenda-se a configuração 2 em ambos os períodos do ano. A redução de entregas expressas seria obtida por meio de um rigoroso controle de estoques nos centros de distribuição – evitando assim a escassez de produtos –, enquanto a capacidade de distribuição do CD2 atenderiam às zonas de consumo ZC[5,6,7,8].

Destaca-se o fato da inexistência de uma análise considerando os custos de abertura e fechamento dos centros de distribuição, haja vista que a ação de curto-prazo propõe medidas neste sentido ante à demanda sazonal.

6.4 VALIDAÇÃO PARCIAL DO MODELO CUSTOMIZADO

O processo de validação parcial foi organizado em três partes. Na primeira, consta o motivo da escolha do cenário selecionado para o processo de validação. Na

segunda, é feita uma comparação entre o cenário selecionado e a cadeia de suprimentos real, justificando as diferenças encontradas. Na terceira, ocorre uma discussão dos resultados encontrados durante a comparação, abordando aspectos da política de estoques adotada em cada um dos estágios da cadeia de suprimentos.

O que justifica a parcialidade do processo de validação é fato de não ter havido um prolongamento do trabalho e ajuste final das variáveis de saída com os tomadores de decisão da cadeia de suprimentos pesquisada, a partir do modelo customizado. Dessa forma, configura-se um processo de validação parcial enquanto não houver ajustes realizados a partir dos “feed backs” fornecidos pelos membros-tomadores de decisão ante o reconhecimento e análise de todas as variáveis de saída dos submodelos estratégico e operacional.

6.4.1 Escolha do Cenário que Corresponde à Realidade

As informações obtidas durante a coleta de dados permitiram a escolha do cenário 4 (vide Tabela 1 e Anexo 2) para o processo de validação. As informações que determinaram a seleção do cenário 4 foram os tempos de reabastecimento dos centros de distribuição e a configuração da rede de instalações. Os outros resultados obtidos a partir da modelagem serviram como parâmetros, os quais tiveram as diferenças justificadas.

Os resultados operacionais do cenário 4 aproximam-se dos aspectos operacionais e estratégicos da cadeia de suprimentos da água mineral. Os resultados operacionais a serem comparados entre os estágios da cadeia de suprimentos são os pontos de pedido, as quantidades requeridas, os níveis máximos de estoque e os custos unitários.

6.4.2 Comparação Entre o Cenário Simulado e o Cenário Real

O cenário 4 apresenta uma cadeia de suprimentos configurada com os centros de distribuição CD1, CD2 e CD3 atendendo, respectivamente, às zonas de consumo ZC[1,2,3,4], ZC[5,6] e ZC[7,8]. Esta configuração da cadeia de suprimentos

corresponde, exatamente, à configuração real da cadeia de suprimentos da água mineral.

O sistema de estoque min-max (s,S) adotado no estágio de produção determina que as quantidades requeridas (Q_p) devam ser constantes. Nesta perspectiva, as diferenças entre os resultados modelados e os resultados reais podem ser justificadas por, ao menos, uma das variáveis usadas para determinar essas quantidades.

As quantidades requeridas ao estágio de produção ($Q_{p_2}=2465,05$ unidades) correspondem às quantidades reais produzidas ($Q_{p_{real}}=2500$ unidades), diariamente, para atender a demanda dos centros de distribuição CD[1,2,3]. Sabendo-se que a quantidade requerida (Q_{p_2}) (vide equação 25) depende das quantidades máximas de estoque (S_{2ij}), dos pontos de pedido (s_{2ij}) e do déficit de estoque (Ed_j), é apresentada, a seguir, uma análise de cada uma dessas variáveis.

As quantidades máximas de estoque (S_{2ij}) são determinadas pela quantidade ótima de pedido (Q_{2ij}) e pelo ponto de pedido (vide equação 26). As quantidades máximas modeladas ($S_{2ij}=2752,27$ unidades) possuem valores próximos dos valores reais ($S_{2ireal}=3000$ unidades). A principal razão dessas disparidades é a diferença entre os pontos de pedido real ($s_{2ireal}=800$ unidades) e modelado ($s_{2ij}=672,83$ unidades). Embora a engarrafadora não adote o método de quantidade ótima de pedido (Q_{2ij}) para determinar o nível máximo (S), as quantidades requeridas ($Q_{p_{real}}=2200$ unidades) são calculadas simplesmente adotando as diferenças existentes entre os níveis máximo ($S_{2ireal}=3000$ unidades) e mínimo ($s_{2ireal}=800$ unidades). Entretanto, a engarrafadora não adota o estoque deficitário (Ed), justificando o aumento das quantidades máximas e mínimas.

Os tempos de reposição em cada um dos centros de distribuição CD1, CD2 e CD3 são, respectivamente, 1; 1,5 e 2 dias. Esses tempos equivalem-se aos resultados encontrados na solução para atender a cada um dos centros de distribuição do cenário 4 ($T^*_1=0,96$ dia; $T^*_2=1,33$ dias e $T^*_3=1,76$ dias).

Todavia, o custo unitário do estágio de produção modelado (U_{2ij}) e o custo unitário praticado pela engarrafadora (U_{2ireal}) não apresentaram diferenças

representativas. São eles calculados a partir dos custos totais (TC_{2ij}) deste estágio e pela demanda média mensal na engarrafadora (X_{ij}), mantendo, portanto, os mesmos valores ($U_{2ij}=U_{2real}=0,62/\text{unidade}$).

O estágio de distribuição apresentou as mesmas características empíricas do estágio de produção. Entretanto, constam algumas diferenças entre os custos unitários modelados ($U_{3i1}=0,13$; $U_{3i2}=0,14$ e $U_{3i3}=0,14$) e os custos unitários reais ($U_{3i1real}=0,16$; $U_{3i2real}=0,17$ e $U_{3i3real}=0,17$). O motivo de tais alterações está no método de cálculo adotado, onde as maiores quantidades requeridas (Q_p) dissolvem os custos unitários. As quantidades requeridas na modelagem (Q_{p3}) para os centros de distribuição CD1, CD2 e CD3 (2292,75; 997,94 e 949,89) são superiores às quantidades reais requeridas (Q_{preal}) para os mesmos centros de distribuição (1600,00; 850,00 e 800,00).

6.4.3 Comentários

A seguir, constam comentários a respeito do processo de validação parcial do modelo na cadeia de suprimentos da água mineral.

1) Embora o cenário 4 tenha sido solucionado com capacidades de distribuição artificiais ($\beta_1=\beta_2=\beta_3=80000$ bombonas/mês), é possível adotar os valores dessas capacidades a partir dos cenários que possuem capacidades reais ($\beta_1=39000$ bombonas/mês, $\beta_2=24000$ bombonas/mês, $\beta_3=16000$ bombonas/mês), de forma que não haja nenhuma diferença nos resultados estratégicos e operacionais da cadeia de suprimentos, com exceção do valor da flexibilidade de volume (W).

2) As quantidades ótimas de pedido do estágio de produção foram obtidas a partir da minimização dos custos totais (TC_{2ij}) dentro da função múltiplos objetivos (vide equação 35). Portanto, não foi adotada a equação tradicional de quantidade ótima de pedido (Q^*), pois as quantidades requeridas foram arbitradas de forma que os custos totais fossem minimizados.

3) As menores quantidades requeridas pelos centros de distribuição (Q_{p3real}) além de aumentarem os custos unitários (U_{3ik}), também diminuíram os níveis de serviço ($P_{3ireal}=0,81$; $P_{3ireal}=0,94$ e $P_{3ireal}=0,93$), quando comparados aos níveis de serviço modelados ($P_{3il}=0,92$; $P_{3il}=0,95$ e $P_{3il}=0,94$). Isso pode representar um aumento de vendas perdidas por falta de estoque.

4) Embora os custos unitários da zona de consumo (U_{4im}) estejam próximos dos valores praticados, não foram tecidas comparações, haja vista que houve uma agregação de demandas (D_{im}) de diversos pontos de venda para chegar-se às oito zonas de consumo modeladas.

5) As políticas de estoque adotadas nos estágios de produção (s,S), distribuição (s,S) e zona de consumo (q,Q) do modelo correspondem às praticas adotadas na cadeia de suprimentos da água mineral. Entretanto, as políticas de estoques de revisão contínua (s,Q) se adequariam melhor à cadeia de suprimentos da água mineral. Isso porque as demandas encontradas nesta cadeia de suprimentos são normalmente distribuídas e, portanto, reduziria os custos.

6) Não foi realizada a validação dos custos totais do submodelo estratégico (Z), devido ao fato destas informações não serem calculadas pela empresa que forneceu os dados para este trabalho.

7) O submodelo estratégico não se mostrou sensível à função de múltiplos objetivos devido às características desta cadeia de suprimentos. Cadeias de suprimentos com outros custos de manutenção e outro tipo de formato da rede de instalações poderiam apresentar resultados diferentes.

Esses são, em síntese, as apreciações relativas ao processo de validação parcial.

7 CONCLUSÕES

A modelagem da cadeia de suprimentos da água mineral com o modelo de múltiplos objetivos proporcionou uma nova forma de abordar as relações existentes entre os estágios de cadeias de suprimentos. A função de múltiplos objetivos aplicada no estágio de produção/estoque de produtos acabados demonstrou ser uma valiosa ferramenta para análise de cadeia de suprimentos, através da avaliação de diferentes cenários de operação.

Embora os efeitos das variáveis operacionais tenham apresentado resultados limitados na configuração e custeio total do submodelo estratégico, devido ao restrito número de elementos enfocados nesta pesquisa, foi possível constatar a utilidade do modelo customizado como uma ferramenta de auxílio aos tomadores de decisão. Em primeiro lugar, durante a aplicação do modelo customizado, houve a possibilidade de equacionar os efeitos sistêmicos das variáveis operacionais encontradas ao longo da cadeia de suprimentos, onde os menores custos totais (Z) foram obtidos em configurações em que ocorreram os maiores custos de transporte (c_{ijk} e c_{ikm}). Além disso, foi possível verificar a influencia dos níveis de serviços oferecidos pela produção aos centros de distribuição (P_{2ij}) frente à incerteza da demanda (σ_{2ij}) e à incerteza do ciclo de performance ($\text{var}T_{ijk}$). Em segundo lugar, o modelo customizado possibilitou analisar os “trade offs” entre as variáveis independentes (nível de serviço, flexibilidade de volume e flexibilidade de entrega) e a variável dependente (custo total). Em terceiro lugar, foi possível verificar a importância de incorporar, simultaneamente, aspectos estratégicos e operacionais em um mesmo modelo, uma vez que comprovada a influência das saídas de um submodelo quando inseridas em outro submodelo.

A partir desses resultados, foram feitas duas recomendações de configuração de cadeia de suprimentos. A primeira, a recomendação de curto prazo, baseia-se nas atuais capacidades de produção/distribuição e nas demandas adotadas neste estudo, quando poderiam ser adotadas configurações com maior flexibilidade de volume com três centros de distribuição CD[1,2,3], nos períodos de maior demanda; enquanto nos períodos de menor demanda, adotadas configurações com apenas dois centros de distribuição CD[1,2].

A recomendação de longo prazo surge tendo-se em vista duas possibilidades: a) organizar os níveis de estoques entre os diversos estágios da cadeia de suprimentos da água mineral; b) rever as capacidades da rede de instalações. Estas duas possibilidades evitariam, respectivamente, a ocorrência de entregas expressas e as atuais restrições de flexibilidade de volume. Com tal perspectiva, poderia ser adotada uma configuração onde os CD1 e CD2 atendessem às zonas de consumo ZC[1,2,3,4] e ZC[5,6,7,8], respectivamente.

Tanto as recomendações de curto prazo como as de longo prazo estão baseadas nos cenários gerados durante a aplicação do modelo customizado à cadeia de suprimentos da água mineral. Ambas têm como objetivo principal proporcionar um vetor performance eficiente, na determinação dos custos totais; e eficaz, quando do fornecimento dos níveis de serviço requeridos.

Assim, a pesquisa desenvolvida na cadeia de suprimentos da água mineral provou que o modelo de múltiplos objetivos é robusto e passível de ser replicado em outras cadeias agroalimentares, haja vista que grande parte dessas mantêm relação com a gestão de fluxos.

8 LIMITAÇÕES E FUTURAS PESQUISAS

Este capítulo apresenta as principais limitações e propostas para futuras pesquisas no âmbito deste trabalho.

As limitações existentes no presente estudo comportam aspectos tecnológicos e de escopo. O principal aspecto tecnológico relaciona-se à capacidade do programa de otimização “*What’s Best!*” 5.0, haja vista que durante a aplicação do modelo à cadeia de suprimentos utilizou-se uma versão de demonstração, licenciada para uso comercial, em um único computador. Os recursos disponíveis nesta versão são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 5 – Recursos Disponíveis no Programa de Otimização Utilizado

Capacidade	Recursos Disponíveis
10000	Variáveis de Memória
150	Restrições
300	Variáveis de Ajuste
30	Variáveis Lineares Inteiras (Binárias)
30	Variáveis Não-lineares

Durante a aplicação do modelo, as principais limitações ocorreram com as variáveis não-lineares e as variáveis binárias. A Tabela 6, a seguir, apresenta os recursos utilizados nos submodelos estratégico e operacional durante a aplicação do modelo à cadeia de suprimentos da água mineral.

Embora tenham restado 24 variáveis não-lineares, a programação não-linear limitou-se ao cálculo com 6 variáveis durante a programação do estágio de produtos acabados, pois a programação não-linear do estágio de distribuição aumentaria este

número para 92. As variáveis binárias, por outro lado, foram utilizadas em programação linear inteira no submodelo estratégico.

Tabela 6 – Recursos Utilizados pelo Modelo Customizado

Recursos Utilizados	S. Estratégico	S. Operacional
Variáveis de Memória	746	1664
Restrições	52	29
Variáveis de Ajuste	31	28
Variáveis Lineares Inteiras (Binárias)	28	0
Variáveis Não-lineares	0	6

Os aspectos de escopo do modelo multiobjetivo estão restritos às flexibilidades de volume e entrega, nível de serviço e custo total. Logicamente estas não são as únicas dimensões possíveis de serem analisadas na performance de cadeias de suprimentos.

Além disso, o presente estudo baseou-se em uma cadeia de suprimentos que possui apenas bombonas de 20 litros, o que não deixa de ser uma limitação, pois cadeias de suprimentos com diversos tipos de bens, ou produtos, tendem a ser mais complexas.

Nessa perspectiva, embora os níveis de serviço do modelo customizado sejam considerados em todos os estágios da cadeia de suprimentos, a função de múltiplos objetivos foi testada apenas no estágio de produção e estoque de produtos acabados. A inclusão de funções múltiplos objetivos em outros estágios esteve limitada ao número de equações não-lineares envolvidas na sua solução. Modelos de cadeias de suprimentos solucionados com “softwares” de maior capacidade possibilitariam análises mais complexas.

Considerações relacionando aspectos ambientais à cadeia de suprimentos da água mineral seriam pertinentes, haja vista que a água mineral é um bem finito. A inclusão de um outro submodelo operacional de logística reversa, especificamente no

caso das bombonas, também seria útil, uma vez que a cadeia de suprimentos pesquisada comporta o fluxo reverso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNTZEN, Bruce C.; BROWN, Gerald G.; HARRISON, Terry P.; TRAFTON, Linda L. Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation. **Interfaces**, v. 25, p. 69-93, jan-fev 1995.
- BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento, Organização e Logística Empresarial**. Bookman, 4ª ed., Porto Alegre: 2001.
- BORDLEY, Robert; BELTRAMO, Mark; BLUMENFELD, Dennis. Consolidating distribution centers can reduce lost sales. **International Journal of Production Economics**, v. 58, p. 57-61, 1999.
- BORENSTEIN, Denis. Towards a practical method to validate decision support systems. **Decision Support Systems – The International Journal**, v. 23, p. 227-239, 1998.
- BOWERSOX, Donald J.; CLOSS, David J. **Logistical Management: The Supply Chain Integrated Process**. The Dryden Press, New York, 1996.
- CHANDRA, Pankaj. A Dynamic Distribution Model with Warehouse and Customer Replenishment Requirements. **Journal of Operational Research Society**, v. 44, n.7, p. 681-692, jul 1993.
- CHING, Hong Yuh. **Gestão de Estoques na Cadeia Logística Integrada: Supply Chain**. São Paulo: Atlas, 1999.
- COHEN, Morris A.; LEE, Hau L. Strategic Analysis of Integrated Production-Distribution Systems: Models and Methods. **Operations Research**, 36, n.2, p. 216-228, mar-abr 1988.
- COOPER, Martha C.; ELLRAM, Lisa M. Characteristics of Supply Chain Management and the Implications for Purchasing and Logistics Strategy. **The International Journal of Logistics Management**, v. 4, n. 2, p. 13-24, 1993.
- DORNIER, Philippe-Pierre; ERNST, Ricardo; FENDER, Michel; KOUVELIS, Panos. **Logística e Operações Globais: Textos e Casos**. São Paulo: Atlas, 2000.
- FAGERHOLT, Kjetil; LINDSTAD, Hakon. Optimal policies for maintaining a supply service in the Norwegian Sea. **Omega – The International Journal of Management Science**, v. 28, p. 269-275, 2000.
- FLEISCHMANN, Mortiz; KRIKKE, Hans R.; DEKKER, Rommert; FLAPPER, Simme D. P. A characterisation of logistics networks for product recovery. **Omega – The International Journal of Management Science**, v. 28, p. 653-666, 2000.

- FLEURY, Paulo F.; WANKE, Peter; FIGUEIREDO, Kleber F. **Logística Empresarial: A perspectiva Brasileira**. Centro de Estudos Logísticos – CEL / UFRJ, 2000.
- FLOOD, R.; CARLSON, E.R. **Dealing with Complexity – An Introduction of Theory and Application of Systems Science**. Plenum Press, New York, 1988.
- GERWIN, Donald. Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective. **Management Science**, v. 39, n. 4, Apr/1993.
- GILBERT, Stephen M.; BALLOU, Ronald H. Supply Chain Benefits from Advanced Customer Commitments. **Journal of Operations Management**, v. 18, p. 61-73, 1999.
- HAHN, Chan K.; DUPLAGA, Edward A.; HARTLEY, Janet L. Supply-Chain Synchronization: Lessons from Hyundai Motor Company. **Interfaces**, v. 30, p. 32-45, 2000.
- HERER, Yale T.; TZUR, Michal; EVER, Yücesan. Transshipments: an Emerging Inventory Resource to Achieve Supply Chain Leagility. **Associação Franco-Israelence de Pesquisa Científica e Tecnológica. Insead – R&D**. Oct/1999.
- MIN, Honey. A Personal-Computer Assisted Decision Support System for Private Versus Common Carrier Selection. **Transportation Research Part – E**, v. 34, n. 3, p. 229-241, 1998.
- HUNG, Yi-Feng; CHANG, Ching-bin. Determining safety stocks for production in uncertain manufacturing. **International Journal of Production Economics**, v. 58, p. 199-208, 1999.
- JACOBY, S.L.S.; KOWALIK. **Mathematical Modeling with Computers**. Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, New Jersey, 1980.
- JANSSEN, Fred; KOK, Ton de. A two-supplier inventory model. **International Journal of Production Economics**, v. 59, p. 395-403, 1999.
- KORPELA, Jukka; LEHMUSVAARA Antti. A customer oriented approach to warehouse network evaluation and design. **International Journal of Production Economics**, v. 59, p. 135-146, 1999.
- KORPELA, Jukka; LEHMUSVAARA Antti; TUOMINEN, Markku. Customer service based design of the supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 69, p.193-204, 2001.
- LANDRY, Maurice; MALQUIN, Jean-Louis; ORAL, Muhittin. Model Validation in operations research. **European Journal of Operational Research**, v. 14, p. 207-220, 1983.
- LEE, Hau L.; BILLINGTON, Corey. Managing Supply Chain Inventory: Pitfalls and Opportunities. **Sloan Management Review**. Spring, p. 65-73, 1992.
- LEHMUSVAARA, Antti. Transport Time Policy and Service Level as Components in Logistics Strategy: A Case Study. **International Journal of Production**

- Economics**, v. 56, p. 379-387, 1998.
- LI, Dong; O'BRIEN, Christopher. Integrated decision modelling of supply chain efficiency. **International Journal of Production Economics**, v. 59, p. 147-157, 1999.
- LOPES, Ricardo Luis; CAIXETA-FILHO, José Vicente. Suinocultura no Estado de Goiás: aplicação de um modelo de localização. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Sobrapo, v. 20, p. 213-232, dez.2000.
- LUDWIG, Luciano M.; HILLMANN, Mark; DEON, Paulo R.C.; VIDOR, Ana Carla. Podemos Desconsiderar os Relacionamentos em uma "Supply Chain Management"? **III International Conference on Agri-food Chain / Networks Economics and Management**. FEA-USP – Campus de Ribeirão Preto, out / 2001.
- MORIN, Edgar. **O Método I: A Natureza da Natureza**. Mira-Sintra – Mem Martins, 1987.
- NEEDHAM, Paul M.; EVERS, Philip T. The Influence of Individual Cost Factors on the Use of Emergency Transshipments. **Transportation Research Part – E**, v. 34, n.2, p. 149-160, 1998.
- PIDD, Michael. **Modelagem Empresarial – Ferramentas para tomada de decisão**. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.
- ROTHENBERG, Jeff. **The Nature of Modeling**. In: Widman, L.E.; Loparo; K.A. & Nielsen (Eds.). **Artificial Intelligence, Simulation and Modeling**, Wiley, 1989.
- SABRI, Ehap H.; BEAMON, Benita M. A Multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. **Omega – The International Journal of Management Science**, v. 28, p. 581-598, 2000.
- SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; HARLAND, Christine; HARRISON, Alan; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. 1ª ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- SLACK, Nigel D.C.; CORRÊA, Henrique Luiz. Flexibilidade Estratégica na Manufatura: Incertezas e Variabilidades de Saídas. **Revista de Administração**, São Paulo, v. 29, n. 1, jan/mar 1994.
- STOCK, Gregory N.; GREIS, Noel P.; KASARDA, John D. Logistics, strategy and structure. **International Journal of Operation & Production Management**, v. 18, n. 1, p. 37-52, 1998.
- ROSS, Anthony D. Performance-based strategic resource allocation in supply networks. **International Journal of Production Economics**, v. 63, p. 255-266, 2000.
- TSOUROS, C.; SATRATZEMI, M. Optimal solution of a time distribution problem. **International Journal of Production Economics**, v. 45, p. 473-478, 1996.
- UPON, David M. The Management of Manufacturing Flexibility. **California Management Review**. Winter/1994.

- VORST, Van der; BEULENS, A.J.M.; BEEK, P. van. **Redesigning Food Supply Chains: an Integral Logistical Approach**. In: ZIGGERS; G.W.; TRIENEKENS, J.H.; ZUURBIER, P.J.P. (eds). Proceedings of the Third International Conference on Chain Management in Agribusiness and Food Industry. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Agricultural University – Management Studies Group, v. 28-29, p. 377-390, 2000.
- VROBLEFSKI, Mark; RAMESH, R.; ZIONTS, Stanley. Efficient lot-sizing under a differential transportation cost structure for serially distributed warehouse. **European Journal of Operational Research**, 127, p. 574-593, 2000.
- XU, Kefeng; DONG, Yan; EVERS, Philip T. Towards better coordination of the supply chain. **Transportation Research Part E**, 37, p. 35-54, 2001.

ANEXO 1 – MODELO ORIGINAL DE SABRI & BEAMON (2000)

MODELO MULTI OBJETIVO DE SABRI & BEAMON (2000)

SUBMODELO ESTRATÉGICO

Custo Total

$$Z = \left[\sum_{rvj} (a_{rvj} + \lambda_{rv}) A_{rvj} \right] + \left[\sum_j f_{2j} q_{2j} + \sum_{ij} U_{2ij} X_{ij} \right] \\ + \left[\sum_k f_{3k} q_{3k} + \sum_{ikm} U_{3ik} D_{im} y_{km} + \sum_{ijk} c_{ijk} C_{ijk} \right] + \left[\sum_{ikm} d_{ikm} D_{im} y_{km} \right] \quad (1)$$

Flexibilidade de Volume

$$W = \left[\sum_j \left(q_{2j} \Phi_j - \sum_i \delta_{2ij} X_{ij} \right) \right] w_2 + \left[\sum_k \left(q_{3k} \beta_k - \sum_{im} \delta_{3ik} D_{im} y_{km} \right) \right] w_3 \quad (2)$$

Sujeito a minimizar Z (3)

Sujeito a $W \geq \varepsilon$ (4)

Restrições do Submodelo Estratégico

A seguir são apresentadas as restrições do modelo através das equações 5 a 15:

$$\sum_j A_{rvj} \leq \Psi_{rv} \quad \forall r, v \quad (5)$$

- Equação 5: assegura que as quantidades requeridas de água estão dentro das capacidades do poço de água mineral.

$$\sum_i \tau_{ri} X_{ij} \leq \sum_v A_{rvj} \quad \forall r, j \quad (6)$$

- Equação 6: reúne as quantidades de matéria-prima para os requerimentos de produção.

$$\sum_i \delta_{2ij} X_{ij} \leq \Phi_j q_{2j} \quad \forall j \quad (7)$$

- Equação 7: especifica que as quantidades de produção totais não excedam as capacidades da fábrica.

$$\xi_{ij} q_{2j} \leq X_{ij} \leq \zeta_{ij} q_{2j} \quad \forall i, j \quad (8)$$

- Equação 8: restringe as capacidades mínimas e máximas de produção.

$$\alpha_k q_{3k} \leq \sum_{im} \delta_{3ik} D_{im} y_{km} \leq \beta_k q_{3k} \quad \forall k \quad (9)$$

- Equação 9: restringe as capacidades mínimas e máximas e manuseio e inventário nos centros de distribuição (k) e assegura que as zonas de consumo (m) sejam atendidas somente por centros de distribuição (k) abertos.

$$\sum_k y_{km} = 1 \quad \forall m \quad (10)$$

- Equação 10: especifica que cada zona de consumo (m) deva ser atendida por somente um centro de distribuição

$$X_{ij} = \sum_k C_{ijk} \quad \forall i, j \quad (11)$$

- Equação 11: assegura que a quantidade total de produtos carregados na fábrica (j) seja igual à quantidade disponível nela.

$$\sum_{jk} C_{ijk} = \sum_m D_{im} \quad \forall i \quad (12)$$

- Equação 12: assegura a satisfação de todos os requerimentos da demanda; isto é, que os carregamentos totais para a zona de consumo sejam exatamente iguais às demandas previstas nele.

$$\sum_j C_{ijk} = \sum_m y_{km} D_{im} \quad \forall i, k \quad (13)$$

- Equação 13: assegura que os requerimentos da demanda em cada centro de distribuição (m) sejam satisfeitos.

$$X_{ij}, C_{ijk}, A_{rvj} \geq 0 \quad \forall r, i, v, j, k \quad (14)$$

- Equação 14: assegura que todas as variáveis sejam positivas.

$$q_{2j}, q_{3k}, y_{km} = [0/1] \quad j, k, m \quad (15)$$

- Equação 15: restringe as variáveis binárias.

SUBMODELO OPERACIONAL

Após serem determinadas as variáveis de saída do submodelo estratégico, a demanda do consumidor final, os mínimos níveis de serviço, dados de custo e ciclos de tempo, os custos variáveis operacionais serão estimados sob a incerteza.

Diversas variáveis operacionais são determinadas pela otimização das variáveis relacionadas aos níveis de estoque, como: tamanho de lotes (Q^*), pontos de pedido (s) e estoques de segurança. A função multiobjetivo é desenvolvida por incorporar todos “trade offs” entre os custos, níveis de serviço ao cliente (“fill rate”) e a flexibilidade de entrega.

Este submodelo incorpora três estágios: (i) fornecedores, (ii) fábricas (produção e estoque de produtos acabados) e (iii) centros de distribuição. Os estágios (i) e (iii) são solucionados por meio de técnicas analíticas; enquanto os estágios de produção e estoque de produtos de acabados são simultaneamente otimizados usando programação não-linear. Uma única solução para os três estágios da cadeia de suprimentos no nível operacional é determinado usando um enfoque heurístico, como descrito nas seguintes seções.

Controle de Fornecimento

Este modelo assume uma política de controle de estoques de revisão contínua (s, Q). A quantidade de produto na fábrica (X_{ij}) é determinada a partir do submodelo estratégico.

A escassez de matéria-prima é assumida para ser suprida por entregas atrasadas. Para simplificar as computações, assume-se ciclos de tempo da demanda como normalmente distribuídos. O custo total de controle de matéria-prima envolve custo de preparação de equipamentos, custo de posse e custo de pedidos atrasados. Usando os termos r para matéria-prima e j para a planta de produção, o custo total de fornecimento por período pode ser especificado como segue:

$$TC_{1rj}^s = q_j \left[\left(\sum_{i \in Fr_j} \frac{\tau_{ri} X_{ij}}{Q_{1rj}} \right) \theta_{1rj} + H_{1rj} I_{1rj} + \pi_{1rj} \sigma_1 G_{b(n)} \right] \quad (16)$$

O nível de estoque à disposição (estoque médio mais estoque de segurança) é determinado por:

$$I_{1rj} = \frac{Q_{1rj}}{2} + n_1 \sigma_1 \quad (17)$$

O fator n_1 é selecionado para controlar o estoque de segurança associado com o nível especificado de serviço ao cliente, e representa o número de desvios padrão de ciclos de demanda cobertos pelo estoque à disposição. Supondo uma regra de decisão de probabilidade especificada (P_{1rj}), de nenhuma falta de estoque por ciclo de reabastecimento seja selecionada na determinação de n_1 . Então o fator de segurança n_1 deveria satisfazer a seguinte equação:

$$\Pr(B \geq k) = 1 - P_{1rj} \quad (18)$$

onde B é a variável normal padrão.

O ponto de pedido (s) pode ser determinado diretamente usando a seguinte relação:

$$s_{1rj} = L_1 + n_1 \sigma_1 \quad (19)$$

onde L_1 é a demanda esperada sobre o ciclo de reabastecimento, que pode ser determinado como segue:

$$L_1 = \left[\sum_i \tau_{ri} X_{ij} \right] \theta_{1rj} \quad (20)$$

Onde Θ_{1rj} é o ciclo de reabastecimento total médio de matéria-prima (r) na planta de produção (j), que é calculada como a soma dos ciclos de reabastecimento de r e dos tempos de atraso, considerando todos os fornecedores:

$$\Theta_{1rj} = \frac{\sum (\mu_{rvj} + g_{rv}(1 - P_{1rv}))}{V} \quad (21)$$

a variância de Θ_{1rj} pode ser calculada como segue:

$$\text{var}(\Theta_{1rj}) = \text{var}\left(\frac{\sum \mu_{rvj}}{V}\right) + \text{var}\left(\frac{\sum g_{rv}(1 - P_{1rv})}{V}\right) \quad (22)$$

então,

$$\text{var}(L_1) = \left[\sum_i \tau_{ri} X_{ij} \right]^2 \text{var}(\Theta_{1rj}) + \text{var}\left[\sum_i \tau_{ri} X_{ij} \right] \Theta_{1rj} \quad (23)$$

Uma vez que a demanda de produção X_{ij} é fixada, e portanto tenha variância zero, a variância do ciclo de tempo da demanda é determinada por:

$$\text{var}(L_1) = \left[\sum_i \tau_{ri} X_{ij} \right]^2 \text{var}(\Theta_{1rj}) \quad (24)$$

e

$$\sigma_1 = \sqrt{\text{var}(L_1)} \quad (25)$$

Agora, o tamanho ótimo do pedido (Q^*_{1rj}) pode ser determinado minimização da equação (16), consumada pela primeira derivada do custo total com relação Q_{rj} , e fixando-a igual a zero.

Isto dá,

$$Q_{1rj}^* = \sqrt{\frac{2\theta_{1rj} \sum_i \tau_{ri} X_{ij}}{H_{1rj}}} \quad (26)$$

O ótimo nível de serviço para o fornecimento de matéria-prima r na planta de produção pode ser determinado a partir da diferenciação da equação (16) de custo total, com respeito a P_{1rj} , e fixando-a igual a zero.

Isto dá,

$$P_{1rj} = -\frac{H_{1rj}}{\pi_{1rj}} + 1 \quad (27)$$

Agora, o custo unitário associado ao controle de matéria-prima r na planta de produção j é determinado por:

$$u_{1rj} = \frac{TC_{1rj}^s}{\sum_i \tau_{ri} X_{ij}} \quad (28)$$

Os custos unitários associados com o controle de toda a matéria-prima requerida para o produto i na planta de produção j é determinado por:

$$u_{1ij} = \sum_{r \in Y_i} \tau_{ri} u_{1rj} \quad (29)$$

Controle de Produção e Estoque de Produtos Acabados

Esta subseção descreve os submodelos associados com a manufatura e os estoque de produtos acabados na planta de produção.

Modelo de Produção

A função custo a ser minimizada neste sistema consiste no custo de “set up”, custo de processamento e custo de manutenção. Mais especificamente, a função dos

custos totais de produção de produto i na planta de produção j por período, pode ser especificada pela seguinte equação:

$$TC_{2ij}^P = \theta_{2ij} \left(\frac{X_{ij}}{Q_{2ij}} \right) + \Gamma_{ij} X_{ij} + \Omega_{ij} X_{ij} t_{2ij} \quad (29)$$

Assim, o custo unitário de produzir produto i na planta j pode ser determinada por:

$$u_{2ij}^P = \frac{TC_{2ij}^P}{X_{ij}} \quad (30)$$

O ciclo de tempo total de produção (t_{2ij}) é determinado pela soma do tempo de “set up” (g_{ij}), tempo de espera nas estações de trabalho (l_{ij}), e tempos de atraso de matéria prima (Θ_{ij}). O tempo de processamento de lotes de produto i na planta de produção j pode ser calculado segundo a equação:

$$p_{ij} = \frac{Q_{2ij}}{h_{ij}} \quad (31)$$

Onde h_{ij} denota a taxa de trabalho médio para o processamento de produto i na planta de produção j .

O tempo máximo de atraso de matéria-prima pode ser determinado a partir da seguinte relação:

$$\Theta_{2ij} = \text{Max}_{r \in Y_i} (\Theta_{1rj} (1 - P_{1rj})) \quad (32)$$

Portanto,

$$t_{2ij} = g_{ij} + p_{ij} + l_{ij} + \Theta_{2ij} \quad (33)$$

Assumindo um set determinísticos “set up” e tempos de processo, a variância do ciclo de produção é determinada por:

$$\text{var}(t_{2ij}) = \text{var}(l_{ij}) + \text{var}(\Theta_{2ij}) \quad (34)$$

Onde,

$$\text{var}(\Theta_{2ij}) = \text{Max}_{r \in Y_i} (\text{var}(\Theta_{1rj})(1 - P_{1rj}) + \Theta_{1rj}^2(1 - P_{1rj})P_{1rj}) \quad (35)$$

Controle de Estoque de Produtos Acabados

Uma política de controle de estoques (s, Q) de revisão continua é adotado para este estágio do modelo de cadeia de suprimentos. Assume-se que as distribuições de demanda sejam reunidas pelos embarques das cargas solicitadas. A equação de custo total de estoques de produtos acabados, a seguir, é composta pelos custos de manutenção de estoques, custos de produtos transportados da planta de produção j aos centros de distribuição k , e aos custos de “set up” dos pedidos.

$$TC_{2ij}^F = q_{2j} \left[H_{2ij} \left(\frac{Q_{2ij}}{2} + n_2 \sigma_2 \right) + \sum_k x_{ijk} C_{ijk} (N_{ijk} P_{2ij} + E_{ijk} (1 - P_{2ij})) + e_{ij} \frac{X_{ij}}{Q_{2ij}} (1 - P_{2ij}) \right] \quad (36)$$

Os seguintes parâmetros para estoque de produtos acabados são calculados similarmente àqueles do estágio de suprimentos. Estes parâmetros são determinados por:

$$\text{var}(L_2) = X_{ij}^2 \text{var}(t_{2ij}) \quad (37)$$

$$s_{2ij} = L_2 + n_2 \sigma_2 \quad (38)$$

$$u_{2ij}^F = \frac{TC_{2ij}^F}{X_{ij}} \quad (39)$$

Então os custos unitários variáveis de produção de produto i na planta de produção j , são determinados por:

$$U_{2ij} = u_{1ij} + u_{2ij}^P + u_{2ij}^F \quad (40)$$

Assumindo o ciclo de tempo randômico de Bernoulli demandado na planta de produção j para cada centro de distribuição k , o ciclo de reabastecimento esperado para produto i da planta de produção j até o centro de distribuição k é:

$$T_{ijk} = N_{ijk} P_{2ij} + (t_{2ij} + E_{ijk})(1 - P_{2ij}) \quad (41)$$

e

$$\text{var}(T_{ijk}) = P_{2ij}(1 - P_{2ij}) [T_{ijk} - (t_{2ij} + E_{ijk})]^2 \quad (42)$$

Encontrando os Ótimos Q_{2ij} , P_{2ij} , T_{ijk} .

A função multiobjetivo é desenvolvida para balancear “trade offs” entre custos, nível de serviço ao cliente (“fill rate”) e flexibilidade de entrega. A primeira função-objetivo considera os custos como uma medida de performance, e é determinada por:

$$TC_{ij} = TC_{2ij}^P + TC_{2ij}^F \quad \forall i, j \quad (43)$$

A segunda função-objetivo representa os níveis de serviço (“fill rate”) para o reabastecimento dos centros de distribuição a partir do estoque de produtos acabados na fábrica j , e é determinada por:

$$PS_{ij} = P_{2ij} - P'_{2ij} \quad \forall i, j \quad (44)$$

Finalmente, a função-objetivo flexibilidade de entrega é determinada da seguinte forma:

$$PD_{ijk} = T'_{ijk} - T_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (45)$$

Utilizando o método de restrição ε , a multiobjetivo é formulada como segue:

$$[\text{Índice de Performance Operacional}] \quad \text{Minimizando } TC_{ij} \quad (46)$$

Sujeito a:

$$PS_{ij} \geq \eta \quad \forall i, j \quad (47)$$

e a

$$PD_{ijk} \geq \gamma \quad \forall i, j, k \quad (48)$$

Os valores γ e η são especificados para assegurar os mínimos níveis de serviço e flexibilidade de entrega desejados. O procedimento de determinar ε discutido previamente é o mesmo utilizado para calcular γ e η .

Estágio de Distribuição

Para o estágio de distribuição, uma política de controle de estoques *mín-máx* (s, S) é adotada. O tamanho da quantidade deve ser suficiente para elevar o estoque até o nível máximo S . A demanda é periódica, estocástica e independentemente distribuída nas zonas de consumo, durante todo o tempo. Adicionalmente, o ciclo de tempo em cada centro de distribuição é assumido para ser normalmente distribuído. Se a demanda é normalmente distribuída e se os ciclos de tempo entre os centros de distribuição e a zona de consumo são fixados, então os ciclos de tempo nos centros de distribuição também serão normalmente distribuídos.

O custo total de distribuição de produtos i nos centros de distribuição k por período consiste nos custos de manutenção de produtos, custos de pedidos e custos de

falta de estoques. A formulação dos custos totais de distribuição segue de acordo com a fórmula abaixo:

$$TC_{3ik} = q_{3k} \left[H_{3ik} \left(\frac{Q_{3ik}}{2} + n_3 \sigma_3 \right) + \theta_{3ik} \frac{\sum_m y_{km} D_{im}}{Q_{3ik}} + \pi_{3ik} \sigma_3 G(n_3) \right] \quad (49)$$

Os seguintes parâmetros também são calculados similarmente àquele do estágio de suprimento, e são determinados por:

$$t_{3ik} = \frac{\sum_j q_{2j} T_{ijk}}{\sum_j q_{2j}} \quad (50)$$

$$\text{var}(t_{3ik}) = \text{Max}_j (q_{2j} \text{var}(T_{ijk})) \quad (51)$$

$$\text{var}(L_3) = \left[\sum_m y_{km} D_{im} \right]^2 \text{var}(t_{3ik}) + t_{3ik} \sum_m y_{km} \text{var}(D_{im}) \quad (52)$$

O ponto de pedido é:

$$s_{3ik} = L_3 + n_3 \sigma_3 \quad (53)$$

onde L_3 é:

$$L_3 = t_{3ik} \sum_m y_{km} D_{im} \quad (54)$$

Então

$$S_{3ik} = s_{3ik} + Q_{3ik} \quad (55)$$

e

$$U_{3ik} = \frac{TC_{3ik}}{I_{3ik}} \quad (56)$$

onde

$$I_{3ik} = \frac{Q_{3ik}}{2} + n_3 \sigma_3 \quad (57)$$

Para obter o ótimo tamanho do lote de produto i do centro de distribuição k para zona de consumo m , a equação de custo total (49) foi diferenciada com respeito a Q , igualando-a a zero. Isto dá:

$$Q_{3ik}^* = \sqrt{\frac{2\theta_{3ik} \sum_m y_{km} D_{im}}{H_{3ik}}} \quad (58)$$

Da mesma forma, o ótimo nível de serviço para produto i no centro de distribuição k é determinado pela derivação da equação (49) com respeito a P_{3ik} , igualando-a a zero. Então,

$$P_{3ik} = \frac{-H_{3ik}}{\pi_{3ik}} + 1 \quad (59)$$

O resumo dos custos unitários variáveis do submodelo operacional que serão usados como entrada do submodelo estratégico é:

$$U_{2ij} = u_{1ij} + u_{2ij}^p + u_{2ij}^f \quad (60) \therefore (40)$$

$$U_{3ik} = \frac{TC_{3ik}}{I_{3ik}} \quad (61) \therefore (56)$$

$$c_{ijk} = \chi_{ijk} (N_{ijk} P_{2ij} + E_{ijk} (1 - P_{2ij})) \quad (62)$$

O método de solução é apresentado na figura a seguir.

Fluxograma do Algoritmo Proposto por Sabri e Beamon (2000)

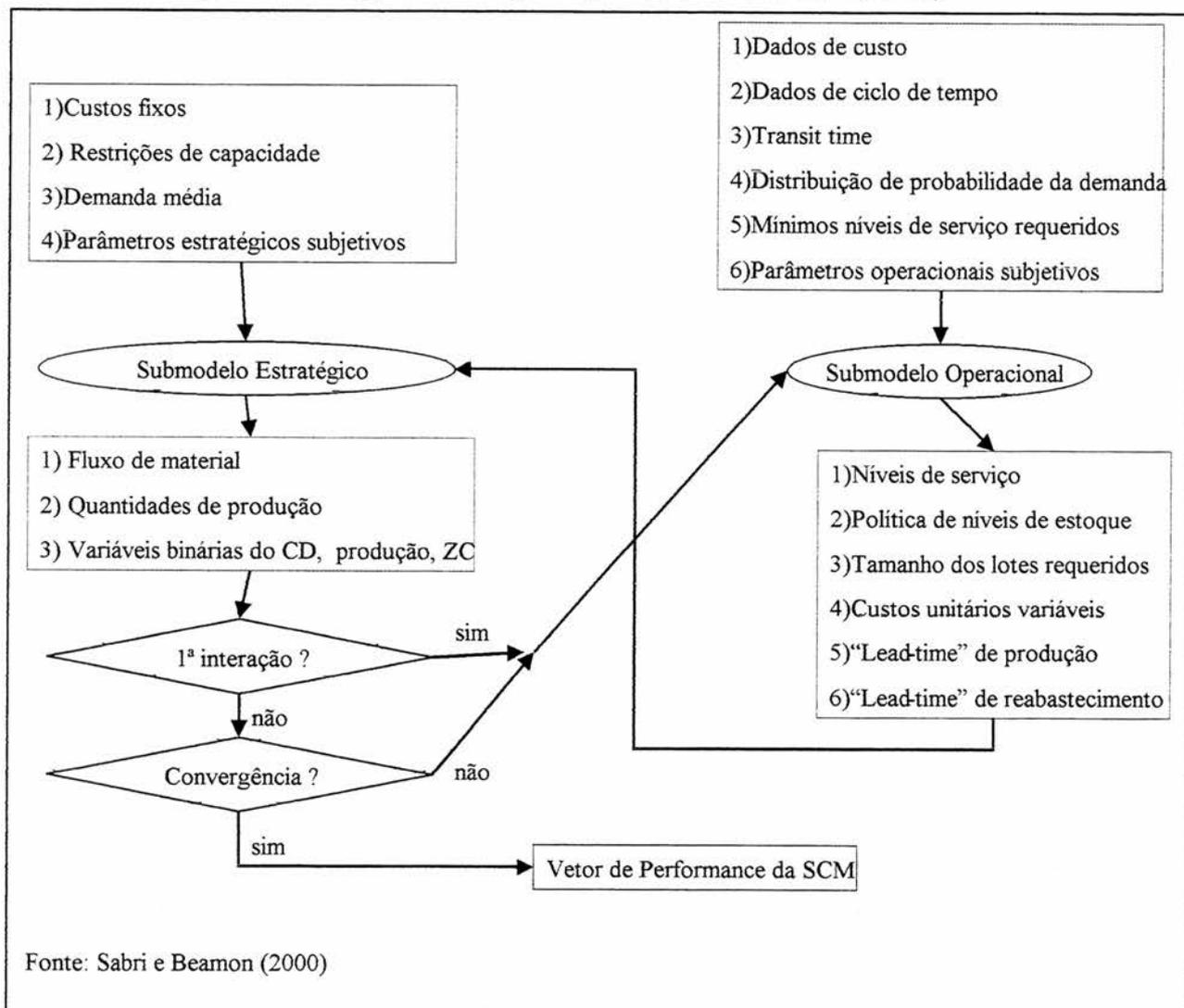


Tabela de Variáveis dos Submodelos Estratégico e Operacional

*Submodelo de Nível Estratégico***Variáveis** **Definições**

i	Índice de tipo de produto, $i=1, \dots, I$
v	Índice do fornecedor, $v=1, \dots, V$
j	Índice da fábrica, $j=1, \dots, J$
κ	Índice do centro de distribuição CD, $\kappa=1, \dots, K$
m	Índice de zona de clientes ZC, $m=1, \dots, M$
r	Índice do tipo de matéria-prima, $r=1, \dots, R$

Variáveis de Entrada (valores fixados)

ε	<i>Índice da performance da flexibilidade de volume</i>
ω_2	<i>Fatores de peso para a capacidade de utilização [0,1]</i>
ω_3	<i>Fatores de peso para a capacidade de utilização [0,1]</i>
f_{2j}	<i>Cargas fixadas para a fábrica j (\$/período)</i>
f_{3k}	<i>Cargas fixadas para o CD k (\$/período)</i>
Ψ_{rv}	<i>Capacidade de produção do fornecedor v de matéria-prima r (unid/período)</i>
δ_{2ij}	<i>Unidade padrão (equivalente) na fábrica j por unidade de produto i</i>
δ_{3ik}	<i>Unidade padrão (equivalente) CD k por unidade de produto i</i>
Φ_j	<i>Capacidade de produção (unidade padrão) para cada fábrica j (unid/período)</i>
τ_{ri}	<i>Taxa de utilização para cada matéria-prima r por unidade de produto i</i>
ξ_{ij}	<i>Mínimo volume de produção para produto i na fábrica j (unid/período)</i>
ζ_{ij}	<i>Máximo volume de produção para produto i na fábrica j (unid/período)</i>
α_k	<i>Mínimo throughput (manuseio e inventário) no CD k (unid/período)</i>
β_k	<i>Máximo throughput (manuseio e inventário) no CD k (unid/período)</i>
a_{rvj}	<i>Custo unitário de transporte de matéria-prima r do fornecedor v à fábrica j (\$/unid)</i>
c_{ijk}	<i>Custo unitário de transporte de produto i da fábrica j ao CD k (\$/unid)</i>
d_{ikm}	<i>Custo unitário de transporte de produto i do CD k à ZC m (\$/unid)</i>
λ_{rv}	<i>Custo unitário de matéria-prima r para o fornecedor v (\$/unid)</i>
U_{2ij}	<i>Custo unitário de produção de i na fábrica j(\$/unid)</i>
U_{3ik}	<i>Custo unitário de throughput do produto i no CD k(\$/unid)</i>
D_{im}	<i>Demanda media por produto i na ZC m (unid/período)</i>

Variáveis de Saída (Variáveis de decisão)

X_{ij}	<i>Quantidade de produto i produzido na fábrica j (unid/período)</i>
C_{ijk}	<i>Quantidade de produto i embarcado da fábrica j para CD k (unid/período)</i>
A_{rvj}	<i>Quantidade de matéria-prima r embarcada de v para fábrica j (unid/período)</i>
Z	<i>Custo total (\$/período)</i>
W	<i>Flexibilidade de volume</i>

Variáveis Binárias (Variáveis de decisão)

q_{2j}	<i>1, se a fábrica j está aberta; zero, se fechada</i>
q_{3k}	<i>1, se o CD k está aberto; zero, se fechado</i>
y_{km}	<i>1, se CD k serve ZC m; zero, senão</i>

Submodelo de Nível Operacional

Variáveis	Definições
i	Índice de tipo de produto, $i=1,\dots,I$
v	Índice do fornecedor (elo 1), $v=1,\dots,V$
j	Índice da fábrica (elo 2), $j=1,\dots,J$
κ	Índice do centro de distribuição CD (elo 3), $\kappa=1,\dots,K$
m	Índice de zona de clientes ZC (elo 4), $m=1,\dots,M$
r	Índice do tipo de matéria-prima, $r=1,\dots,R$
Variáveis de Entrada (valores fixados)	
η	Índice de performance de serviço ao cliente $[0,1]$
γ	Índice de performance de flexibilidade de entrega $[0,1]$
τ_{ri}	Taxa de utilização para cada matéria-prima r por unidade de produto i
μ_{rvj}	Lead time esperado de reabastecimento de r do fornecedor v à fábrica j (períodos)
P_{1rv}	Disponibilidade de matéria-prima (fill rate) r pelo fornecedor v $[0,1]$
ϑ_{rv}	Tempo esperado do atraso de matéria-prima r pelo fornecedor v (período)
θ_{1rj}	Custo de setup do pedido de reabastecimento de matéria-prima r na fábrica j (\$)
H_{1rj}	Holding cost unitário de matéria-prima r na fábrica j (\$/período/unid)
π_{1rj}	Penalidade de Backorder cost unitário para escassez de r na fábrica j (\$/unid)
θ_{2ij}	Custo do setup de produção de produto i na fábrica j (\$)
X_{ij}	Quantidade de produto i produzido na fábrica j (unid/período)
I_{1rj}	Nível de estoque de matéria prima à disposição mais estoque de segurança na fábrica
Γ_{ij}	Custo unitário de processar o produto i na fábrica j (\$/unid)
Ω_{ij}	Holding cost unitário de processo de produto i na fábrica j (\$/período/unid)
P'_{2ij}	Mínimo nível de serviço requerido de produto i na fábrica j $[0,1]$
I_{2ij}	Nível de estoque de produtos acabados, mais estoque de segurança na fábrica
H_{2ij}	Holding cost unitário de produto i na fábrica j (\$/período/unid)
π_{2ij}	Penalidade de Backorder cost unitário para escassez de i na fábrica j (\$/unid)
e_{ij}	Custo de iniciar e expedir o pedido de produção de produto i na fábrica j (\$)
P'_{3ik}	Mínimo nível de serviço requerido de produto i no CD k $[0,1]$
N_{ijk}	Leadtime normal para transportar o produto i da fábrica j ao CD k (período)
E_{ijk}	Leadtime de expedição para transportar o produto i da fábrica j ao CD k (período)
θ_{3ik}	Custo do setup do pedido de produto i no CD k (\$)
C_{ijk}	Quantidade de produto i embarcado da fábrica j para o CD k (unid/período)
H_{3ik}	Holding cost unitário de produto i no CD k (\$/período/unid)
π_{3ik}	Penalidade de Backorder cost unitário para escassez de i no CD k (\$/unid)
χ_{ijk}	Holding cost unitário de rota para transportar i de j para k (\$/período/unid)
T'_{ijk}	Tempo de entrega padrão em j quando i está fora de estoque no CD k

g_{ij}	<i>Tempo de setup de produção para produto i na fábrica j (período)</i>
p_{ij}	<i>Tempo do processo de produção para produto i na fábrica j (período)</i>
l_{ij}	<i>Tempo de espera nas estações de trabalho para produto i na fábrica j (período)</i>
$G_{b(n)}$	<i>Quantidade de matéria-prima r em falta na fábrica j (unidades)</i>
$G_{(n3)}$	<i>Quantidade de produto i requerido em ZC m que faltou (unidades)</i>
D_{im}	<i>Demanda esperada por produto i na ZC m (unid/período)</i>

Variáveis de Saída (Variáveis de decisão)

Q_{1rj}^*	<i>Ótimo tamanho do lote de matéria-prima r na fábrica j (unid)</i>
P_{1rj}	<i>Nível de serviço ao cliente (fill rate) de matéria-prima r na fábrica j [0,1]</i>
s_{1rj}	<i>Ponto de ressuprimento (reorder) de matéria-prima r na fábrica j (unid)</i>
Θ_{1rj}	<i>Lead time de reabastecimento total esperado de matéria-prima r em j (períodos)</i>
L_1	<i>Demanda esperada de r sobre o lead time de reabastecimento em j (unid/período)</i>
σ_1	<i>Desvio padrão do lead time de demanda de matéria-prima r</i>
Q_{1rj}	<i>Tamanho do lote de matéria-prima na fábrica j (unid)</i>
Q_{2ij}	<i>Tamanho do lote de produção de produto i na fábrica j (unid)</i>
t_{2ij}	<i>Lead time total de produção de produto i na fábrica j (período)</i>
Θ_{2ij}	<i>Tempo de atraso de produção de produto i na fábrica j (período)</i>
h_{ij}	<i>Taxa de trabalho médio para processar produto i na fábrica j</i>
L_2	<i>Demanda esperada de produto i sobre o lead time de produção em j (unid/período)</i>
σ_2	<i>Desvio padrão do lead time de produção de produto i (período)</i>
t_{3ik}	<i>Lead time de transporte esperado para produto i em CD k (período)</i>
s_{2ij}	<i>Ponto de ressuprimento de produto i na fábrica j (unid)</i>
P_{2ij}	<i>Nível de serviço ao cliente de produto i na fábrica j [0,1]</i>
u_{1ij}	<i>Custo unitário envolvido no controle de toda r requerida por i (\$/unid)</i>
u_{2ij}^P	<i>Custo unitario de produção de produto i na fábrica j (\$/unid)</i>
u_{2ij}^F	<i>Custo unitario de stockpile de produtos acabados i na fábrica j (\$/unid)</i>
L_3	<i>Demanda esperada de i sobre o lead time de reabastecimento CD k (unid/período)</i>
σ_3	<i>Desvio padrão do lead time de demanda de produto i no CD k (período)</i>
$P_{3ik(62)}$	<i>Nível de serviço ao cliente de produto i no CD k [0,1]</i>
T_{ijk}	<i>Lead time de reabastecimento esperado de produto i da fábrica j ao CD k (período)</i>
$s_{3ik(56)}$	<i>Ponto de ressuprimento de produto i no CD k (unid)</i>
$S_{3ik(58)}$	<i>Nível superior de produto i no CD k (unid)</i>
Q_{3ik}	<i>Tamanho do lote pedido de produto i no CD k (unid)</i>

Variáveis de Saída (Variáveis de decisão)

U_{2ij}	<i>Custo unitario de produção total de produto i na fábrica j (\$/unid)*</i>
U_{3ik}	<i>Custo unitario de throughput de produto i no CD k (\$/unid)*</i>
c_{ijk}	<i>Custo unitario de transporte de produto i da fábrica j para o CD k (\$/unid)*</i>
TC_{ij}	<i>Custo total esperado de produção e estoque de produto i na fábrica j (\$)</i>
PS_{ijk}	<i>Serviço ao cliente (fill rate) – disponibilidade de produto i na fábrica j</i>
PD_{ijk}	<i>Flexibilidade de entrega – disponibilidade de produto i da fábrica j ao CD k</i>

ANEXO 2 – VARIÁVEIS DE SAÍDA DO SUBMODELO OPERACIONAL

ANEXO 3 – QUESTIONÁRIO / BANCO DE DADOS

Questionário empregado durante o levantamento de dados para a modelagem da cadeia de suprimentos da água mineral Elan

Submodelo Estratégico

Zona de Consumo (m)

Qual a localização de cada ZC m?

ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC6	ZC 7	ZC 8
A	B	C	D	E	F	G	H

Qual a demanda média mensal em cada ZC m?

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC6	ZC 7	ZC 8
Verão	9.532,73	7.267,27	12.320,00	5.701,82	7.292,73	7.801,82	6.707,27	3.360,00

Qual a demanda anual em cada ZC m?

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC6	ZC 7	ZC 8
	114.392,73	87.207,27	147.840,00	68.421,82	87.512,73	93.621,82	80.487,27	40.320,00

Qual o custo fixo mensal em cada ZC (m) em R\$?

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC6	ZC 7	ZC 8
Telefonista	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Entregador	Custo Variável de Manutenção							
Controlador	Custo Variável de Manutenção							
Fone/aluguel	700,00	650,00	750,00	550,00	600,00	650,00	600,00	500,00
Total	1.100,00	1.050,00	1.150,00	950,00	1.000,00	1.050,00	1.000,00	900,00

Qual a capacidade máxima mensal de manuseio e estoque de produtos em cada ZC (m) unidades/mês?

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC6	ZC 7	ZC 8
	15.000,00	10.000,00	18.000,00	9.000,00	14.000,00	20.000,00	13.000,00	7.000,00

Centros de Distribuição (k)

Qual a localização de cada CD (k)?

CD 1	CD 2	CD 3
x	y	z

Qual a demanda mensal em cada CD (k) em unidades?

CD 1	CD 2	CD 3
34.821,82	15.094,55	10.067,27

Qual o custo fixo mensal em cada CD (k) em R\$/mês?

	CD 1	CD 2	CD 3
Telefonista	400,00	400,00	400,00
Entregador	Custo Variável de Manutenção		
Controlador	Custo Variável de Manutenção		
Aluguel	1600,00	1400,00	1100,00
Disp. Gerais	280,00	200,00	250,00
Total	2.280,00	2.000,00	1.750,00

Quais as capacidades mensal de manuseio e estoque de produtos em cada CD (k)?

	CD 1	CD 2	CD 3
Máximas	39.000,00	24.000,00	16.000,00
Mínima	0,00	0,00	0,00
Quebra	1,01	1,01	1,01
Capac. Artificial	80.000,00	80.000,00	80.000,00

Demanda Artificial

80.000,00 80.000,00 80.000,00

Engarrafadora (j)

Qual a demanda máxima e mínima mensal da engarrafadora (j) ao longo do ano?

	Máxima (Verão)	Mínima (Inverno)
	59.983,64	22.000,00

Qual a localização da engarrafadora (j)?

Qual o custo fixo mensal da engarrafadora (j) em R\$/mês (40% do total)?

<i>j</i>
14.000,00

Qual a capacidade máxima e mínima de produção da engarrafadora (j) em unidades?

<i>j</i>	un/hora	8 horas/dia	28	Reserv. (l)
Capacidade Máxima	1.000,00	8.000,00	224.000,00	60.000,00

Submodelo Operacional

Transporte (ZC, CD, Fábrica)

Quais são as capacidades de transporte dos caminhões (em unidades) e quais as rotas que cada tipo de veículo?

Rotas (j a k)	Custo unitário de rota		
	CD 1	CD 2	CD 3
<i>xijk</i>			
Fábrica 1	0,400	0,250	0,350

Rotas (k-m)	Custo unitário de rota		
	CD 1	CD 2	CD 3
<i>xikm</i>			
ZC 1	0,35	0,70	0,55
ZC 2	0,40	0,75	0,60
ZC 3	0,45	0,80	0,65
ZC 4	0,35	0,70	0,55
ZC 5	0,85	0,40	0,80
ZC 6	0,80	0,35	0,75
ZC 7	0,60	0,70	0,40
ZC 8	0,55	0,65	0,35

Custo Transporte do Varejo ao Consumidor Final (R\$/unid)

ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC6	ZC 7	ZC 8
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Quais as distâncias entre os seguintes membros da cadeia de suprimentos (em km)?

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC6	ZC 7	ZC 8
CD 1	20,00	25,00	35,00	20,00	130,00	140,00	45,00	50,00
CD 2	135,00	145,00	150,00	140,00	10,00	5,00	100,00	90,00
CD 3	45,00	50,00	55,00	40,00	100,00	90,00	10,00	5,00

Quais as distâncias entre os seguintes membros da cadeia de suprimentos (em km)?

	CD 1	CD 2	CD 3
Engarrafadora (m)	150,00	15,00	100,00

Qual o ciclo de tempo de transporte (N_{ijk}) entre a produção j e os centros de distribuição k (em dias)?

N _{ijk}	CD 1	CD 2	CD 3	T _{ijk}	CD 1	CD 2	CD 3
Dias	0,90	0,50	0,90	Dias	1	0,65	1

Qual o ciclo de tempo de entrega expressa (E_{ijk}) entre a produção j e os centros de distribuição k (em dias)?

E _{ijk}	CD 1	CD 2	CD 3
Dias	0,45	0,25	0,45

Qual o ciclo de tempo de transporte (N_{ikm}) entre os centros de distribuição k e as zonas de consumo m (em dias)?

N _{ikm}	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC6	ZC 7	ZC 8
CD 1	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
CD 2	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
CD 3	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

Qual o ciclo de tempo de expedição (E_{ikm}) dos centros de distribuição k para as zonas de consumo m (em dias)?

E _{ikm}	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC6	ZC 7	ZC 8
CD 1	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
CD 2	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
CD 3	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Zona de Consumo (m)

Qual a distribuição da demanda Diária?

	ZC1			ZC2			
	Demanda Diária	Frequência		Demanda Diária	Frequência		
	280	2	7.309,50	210	1	2.454,75	
	290	2	5.091,32	220	2	3.127,69	
	315	2	1.295,87	230	2	1.745,87	
	325	3	716,53	240	3	1.146,07	
	330	4	437,19	245	4	846,28	
	345	5	103,31	260	5	1,03	
	350	3	273,35	270	3	327,89	
	360	3	1.146,07	280	3	1.255,17	
	375	2	2.386,78	290	2	1.854,96	
	385	1	1.984,30	300	2	3.273,14	
	390	1	2.454,75	310	1	2.545,66	
Média Diária(d)	340,45	28	23.198,97	Média Diária(d)	259,55	28	18.578,51
Total Mensal	9.532,73			Total Mensal	7.267,27		
Variância	s ² d	828,53		Variância	s ² d	663,52	

ZC3			
Demanda Diária	Frequência		
365	2	11.250,00	
380	2	7.200,00	
395	2	4.050,00	
410	3	2.700,00	
425	3	675,00	
440	4	0,00	
455	4	900,00	
470	3	2.700,00	
485	2	4.050,00	
500	2	7.200,00	
515	1	5.625,00	
Média Diária(d)	440,00	28	46.350,00
Total Mensal	12.320,00		
Variância	s ² d	1655,36	

ZC4			
Demanda Diária	Frequência		
170	1	1.131,40	
180	2	1.117,36	
190	2	371,90	
195	3	223,76	
200	4	52,89	
205	6	11,16	
210	3	121,49	
215	3	387,40	
220	2	535,54	
225	1	456,40	
230	1	695,04	
Média Diária(d)	203,64	28	5.104,34
Total Mensal	5.701,82		
Variância	s ² d	182,30	

ZC5			
Demanda Diária	Frequência		
200	1	3.654,75	
210	2	5.091,32	
220	2	3.273,14	
230	3	2.782,44	
240	4	1.673,55	
265	5	103,31	
275	5	1.057,85	
285	3	1.807,44	
300	1	1.563,84	
315	1	2.975,21	
325	1	4.166,12	
Média Diária(d)	260,45	28	28.148,97
Total Mensal	7.292,73		
Variância	s ² d	1005,32	

ZC6			
Demanda Diária	Frequência		
215	1	4.049,59	
225	1	2.876,86	
235	2	3.808,26	
240	2	2.985,54	
255	4	2.234,71	
285	5	202,48	
290	4	516,53	
300	4	1.825,62	
320	3	5.132,85	
345	1	4.404,13	
355	1	5.831,40	
Média Diária(d)	278,64	28	33.867,98
Total Mensal	7.801,82		
Variância	s ² d	1209,57	

ZC7			
Demanda Diária	Frequência		
200	1	1.563,84	
205	2	2.386,78	
215	2	1.204,96	
220	3	1.146,07	
225	4	846,28	
230	4	364,46	
240	4	0,83	
255	3	716,53	
275	2	2.514,05	
280	2	3.273,14	
290	1	2.545,66	
Média Diária(d)	239,55	28	16.562,60
Total Mensal	6.707,27		
Variância	s ² d	591,52	

ZC8			
Demanda Diária	Frequência		
90	1	900,00	
95	2	1.250,00	
115	2	50,00	
105	3	675,00	
110	4	400,00	
120	4	0,00	
125	3	75,00	
130	3	300,00	
135	2	450,00	
145	2	1.250,00	
150	2	1.800,00	
Média Diária(d)	120,00	28	7.150,00
Total Mensal	3.360,00		
Variância	s ² d	255,36	

Qual a distribuição do Reabastecimento? (em dias)

ZC1			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	4	4,00	
1,00	5	1,25	
1,50	11	0,00	
2,00	6	1,50	
2,50	2	2,00	
Média Diária(d)	1,50	28	8,75
Variância	s ² d	0,31	

ZC2			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	2	2,00	
1,00	4	1,00	
1,50	8	0,00	
2,00	10	2,50	
2,50	4	4,00	
Média Diária(d)	1,50	28	9,50
Variância	s ² d	0,34	

ZC3			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	3	3,00	
1,00	5	1,25	
1,50	12	0,00	
2,00	5	1,25	
2,50	3	3,00	
Média Diária(d)	1,50	28	8,50
Variância	s ² d	0,30	

ZC4			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	2	2,00	
1,00	4	1,00	
1,50	6	0,00	
2,00	10	2,50	
2,50	6	6,00	
Média Diária(d)	1,50	28	11,50
Variância	s ² d	0,41	

ZC5			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	6	6,00	
1,00	11	2,75	
1,50	6	0,00	
2,00	3	0,75	
2,50	2	2,00	
Média Diária(d)	1,50	28	11,50
Variância	s ² d	0,41	

ZC6			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	6	6,00	
1,00	12	3,00	
1,50	5	0,00	
2,00	4	1,00	
2,50	1	1,00	
Média Diária(d)	1,50	28	11,00
Variância	s ² d	0,39	

ZC7			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	1	1,00	
1,00	5	1,25	
1,50	7	0,00	
2,00	10	2,50	
2,50	5	5,00	
Média Diária(d)	1,50	28	9,75
Variância	s ² d	0,35	

ZC8			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	2	2,00	
1,00	6	1,50	
1,50	7	0,00	
2,00	11	2,75	
2,50	2	2,00	
Média Diária(d)	1,50	28	8,25
Variância	s ² d	0,29	

Tempo de Reposição

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC 6	ZC 7	ZC 8
Dias	2,00	2,00	1,50	2,50	2,00	2,00	2,00	2,50

Custos de obtenção - q_{4im}

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC 6	ZC 7	ZC 8
R\$/pedido	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00

Custo de manutenção - L_{4im} (espaço, capital, serviço)

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC 6	ZC 7	ZC 8
%/mês	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%

Valor do item mantido em estoque - H_{4im}

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC 6	ZC 7	ZC 8
R\$/unidade	3,50	3,50	3,50	3,50	3,20	3,20	3,50	3,50

Custo da falta de estoque - a_{4im}

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC 6	ZC 7	ZC 8
R\$/un.	5,00	5,00	5,00	5,00	4,50	4,50	5,00	5,00

Centros de Distribuição (k)

Qual a distribuição da demanda Diária?

CD1			
	Demanda Diária	Frequência	
	750	2	500.000,00
	850	2	320.000,00
	950	2	180.000,00
	1050	3	120.000,00
	1150	3	30.000,00
	1250	3	0,00
	1350	3	30.000,00
	1450	3	120.000,00
	1550	3	270.000,00
	1650	3	480.000,00
	1750	1	250.000,00
Média Diária(d)	1.250,00	28	2.300.000,00
Total Mensal	35.000,00		
Variância	s ² d	82142,86	

CD2			
	Demanda Diária	Frequência	
	400	1	19.855,37
	420	2	29.238,02
	440	2	20.365,29
	450	3	24.793,39
	490	3	7.775,21
	530	3	357,02
	560	3	1.093,39
	600	3	10.475,21
	640	3	29.457,02
	700	3	75.929,75
	720	2	64.147,11
Média Diária(d)	540,91	28	283.486,78
Total Mensal	15.145,45		
Variância	s ² d	10124,53	

CD3			
	Demanda Diária	Frequência	
	280	1	6.400,00
	300	2	7.200,00
	320	2	3.200,00
	345	4	900,00
	355	4	100,00
	370	5	500,00
	380	4	1.600,00
	390	3	2.700,00
	400	1	1.600,00
	405	1	2.025,00
	415	1	3.025,00
Média Diária(d)	360,00	28	29.250,00
Total Mensal	10.080,00		
Variância	s ² d	1044,64	

Conferência		
CD1	CD2	CD3
34.821,82	15.094,55	10.067,27

Qual a distribuição do Reabastecimento mensal nos centros de distribuição k?

CD1			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	4	6,25	
1,00	5	2,81	
1,50	5	0,31	
2,00	5	0,31	
2,50	5	2,81	
3,00	4	6,25	
Média Diária(d)	1,75	28	18,75
Variância	s ² d	0,67	

CD2			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	3	4,69	
1,00	7	3,94	
1,50	8	0,50	
2,00	5	0,31	
2,50	4	2,25	
3,00	1	1,56	
Média Diária(d)	1,75	28	13,25
Variância	s ² d	0,47	

CD3			
Tempo de Reabastecimento	Frequência		
0,50	2	3,13	
1,00	2	1,13	
1,50	7	0,44	
2,00	7	0,44	
2,50	6	3,38	
3,00	4	6,25	
Média Diária(d)	1,75	28	14,75
Variância	s ² d	0,53	

Custo do pedido - q_{3ik}

	CD 1	CD 2	CD 3
R\$/pedido	2,00	1,70	2,00

Custo de manutenção - L_{3ik} (espaço, capital, serviço)

	CD 1	CD 2	CD 3
%/mês	5,00%	5,00%	5,00%

Valor do item mantido em estoque - H_{3ik}

	CD 1	CD 2	CD 3
R\$/un.	2,10	2,00	2,10

Custo da falta de estoque - p_{3ik}

	CD 1	CD 2	CD 3
R\$/un.	2,00	2,00	2,00

Fábrica (j)

Qual a distribuição da demanda diária?

Engarrafadora			
	Demanda Diária	Frequência	
	1500	1	416.611,57
	1900	2	120.495,87
	1950	3	114.607,44
	2000	3	63.471,07
	2050	3	27.334,71
	2100	4	8.264,46
	2150	3	61,98
	2250	3	32.789,26
	2300	2	47.768,60
	2400	2	129.586,78
	3000	2	1.460.495,87
Média Diária(d)	2.145,45	28	2.421.487,60
Total Mensal	60.072,73		
Variância	s ² d	86.481,70	

Conferência	CD[1,2,3]
Média Diária(d)	2.150,91
Total Mensal	60.225,45

Lead Time Total de Produção - t_{2ij}

Tempo de Set up (dia)

Engarrafadora			
	Tempo	Frequência	
	0,070	2	0,00
	0,080	5	0,00
	0,090	7	0,00
	0,100	8	0,00
	0,110	6	0,00
Média Diária(d)	0,09	28	0,00
Variância	s ² d	0,0002	

Tempo de Espera na Estação de Trabalho

Engarrafadora			
	Demanda Diária	Frequência	
	0,010	3	0,00
	0,015	5	0,00
	0,020	6	0,00
	0,025	8	0,00
	0,030	6	0,00
Média Diária(d)	0,02	28	0,00
Variância	s ² d	0,0000	

Tempo de processo

Engarrafadora			
	Demanda Diária	Frequência	
	0,05	2	0,00
	0,06	4	0,00
	0,07	6	0,00
	0,08	8	0,00
	0,09	8	0,00
Média Diária(d)	0,07	28	0,01
Variância	s^2d	0,0002	

Custo do pedido expresso- e_{ij}

	j
R\$/pedido	25,00

Custo de manutenção - L_{2ij} (espaço, capital, serviço)

	j
%/mês	10,00%

Valor do item mantido em estoque - H_{2ij}

	j
R\$/un.	4,00

Custo da falta de estoque - p_{2ij}

	j
R\$/un.	1,30

Controle de Produção na Engarrafadora j

Quantidade Produzida de produto i em j - X_{ij}

	j
Unidades 20 litros	59.983,64

Custo de obtenção de i em j - θ_{2ij}

	j
\$/unidade	0,50

Custo de processamento - Γ_{ij}

	j
\$/unidade	0,30

Custo de manutenção - Ω_{ij}

	j
\$/unidade	0,10

Zona de Consumo (m)

Qual a distribuição da demanda mensal?

ZC1			
Demanda Mensal		Frequência	
7500	1	3.174.876,03	
7900	1	1.909.421,49	
8300	1	963.966,94	
9100	1	33.057,85	
9300	1	330,58	
9500	1	47.603,31	
9700	1	174.876,03	
9900	1	382.148,76	
10100	1	669.421,49	
10300	1	1.036.694,21	
10500	1	1.483.966,94	
Média Mensal	9.281,82	11	9.876.363,64
Desvio Padrão	sd		947,55

ZC2			
Demanda Mensal		Frequência	
6200	1	2.250.000,00	
6500	1	1.440.000,00	
6800	1	810.000,00	
7100	1	360.000,00	
7400	1	90.000,00	
7700	1	0,00	
8000	1	90.000,00	
8300	1	360.000,00	
8600	1	810.000,00	
8900	1	1.440.000,00	
9200	1	2.250.000,00	
Média Mensal	7.700,00	11	9.900.000,00
Desvio Padrão	sd		948,68

ZC3			
Demanda Mensal		Frequência	
10000	1	6.250.000,00	
10500	1	4.000.000,00	
11000	1	2.250.000,00	
11500	1	1.000.000,00	
12000	1	250.000,00	
12500	1	0,00	
13000	1	250.000,00	
13500	1	1.000.000,00	
14000	1	2.250.000,00	
14500	1	4.000.000,00	
15000	1	6.250.000,00	
Média Mensal	12.500,00	11	27.500.000,00
Desvio Padrão	sd		1581,14

ZC4			
Demanda Mensal		Frequência	
4100	1	250.000,00	
4200	1	160.000,00	
4300	1	90.000,00	
4400	1	40.000,00	
4500	1	10.000,00	
4600	1	0,00	
4700	1	10.000,00	
4800	1	40.000,00	
4900	1	90.000,00	
5000	1	160.000,00	
5100	1	250.000,00	
Média Mensal	4.600,00	11	1.100.000,00
Desvio Padrão	sd		316,23

ZC5			
Demanda Mensal		Frequência	
6200	1	1.000.000,00	
6400	1	640.000,00	
6600	1	360.000,00	
6800	1	160.000,00	
7000	1	40.000,00	
7200	1	0,00	
7400	1	40.000,00	
7600	1	160.000,00	
7800	1	360.000,00	
8000	1	640.000,00	
8200	1	1.000.000,00	
Média Mensal	7.200,00	11	4.400.000,00
Desvio Padrão	sd		632,46

ZC6			
Demanda Mensal		Frequência	
7200	1	250.000,00	
7300	1	160.000,00	
7400	1	90.000,00	
7500	1	40.000,00	
7600	1	10.000,00	
7700	1	0,00	
7800	1	10.000,00	
7900	1	40.000,00	
8000	1	90.000,00	
8100	1	160.000,00	
8200	1	250.000,00	
Média Mensal	7.700,00	11	1.100.000,00
Desvio Padrão	sd		316,23

ZC7			
Demanda Mensal	Frequência		
6000	1	250.000,00	
6100	1	160.000,00	
6200	1	90.000,00	
6300	1	40.000,00	
6400	1	10.000,00	
6500	1	0,00	
6600	1	10.000,00	
6700	1	40.000,00	
6800	1	90.000,00	
6900	1	160.000,00	
7000	1	250.000,00	
Média Diária(d)	6.500,00	11	1.100.000,00
Desvio Padrão	sd	316,23	

ZC8			
Demanda Mensal	Frequência		
3050	1	62.500,00	
3100	1	40.000,00	
3150	1	22.500,00	
3200	1	10.000,00	
3250	1	2.500,00	
3300	1	0,00	
3350	1	2.500,00	
3400	1	10.000,00	
3450	1	22.500,00	
3500	1	40.000,00	
3550	1	62.500,00	
Média Mensal	3.300,00	11	275.000,00
Desvio Padrão	sd	158,11	

Centros de Distribuição (k)

Qual a distribuição da demanda Mensal?

CD1			
Demanda Mensal	Frequência		
32500	1	6.250.000,00	
33000	1	4.000.000,00	
33500	1	2.250.000,00	
34000	1	1.000.000,00	
34500	1	250.000,00	
35000	1	0,00	
35500	1	250.000,00	
36000	1	1.000.000,00	
36500	1	2.250.000,00	
37000	1	4.000.000,00	
37500	1	6.250.000,00	
Média Mensal	35.000,00	11	27.500.000,00
Desvio Padrão	sd	1581,14	

CD2			
Demanda Mensal	Frequência		
12500	1	6.250.000,00	
13000	1	4.000.000,00	
13500	1	2.250.000,00	
14000	1	1.000.000,00	
14500	1	250.000,00	
15000	1	0,00	
15500	1	250.000,00	
16000	1	1.000.000,00	
16500	1	2.250.000,00	
17000	1	4.000.000,00	
17500	1	6.250.000,00	
Média Mensal	15.000,00	11	27.500.000,00
Desvio Padrão	sd	1581,14	

CD3			
Demanda Mensal	Frequência		
8500	1	4.000.000,00	
8900	1	2.560.000,00	
9300	1	1.440.000,00	
9700	1	640.000,00	
10100	1	160.000,00	
10500	1	0,00	
10900	1	160.000,00	
11300	1	640.000,00	
11700	1	1.440.000,00	
12100	1	2.560.000,00	
12500	1	4.000.000,00	
Média Mensal	10.500,00	11	17.600.000,00
Desvio Padrão	sd	1264,91	

Fábrica (j)

Qual a distribuição da demanda diária?

Engarrafadora			
	Demanda Mensal	Frequência	
	55000	1	25.000.000,00
	56000	1	16.000.000,00
	57000	1	9.000.000,00
	58000	1	4.000.000,00
	59000	1	1.000.000,00
	60000	1	0,00
	61000	1	1.000.000,00
	62000	1	4.000.000,00
	63000	1	9.000.000,00
	64000	1	16.000.000,00
	65000	1	25.000.000,00
Média Mensal	60.000,00	11	110.000.000,00
Desvio Padrão	sd	3162,28	

ANEXO 4 – IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Pasta 1 - Submodelo Estratégico

CUSTOS FIXOS E VARIÁVEIS ASSOCIADOS COM OPERAÇÕES EM j

Zona de Produção	Centros de Distribuição			Custos Fixos Mensais	Fábrica On/Off	Custo Operacional
	CD 1	CD 2	CD 3			
Fábrica 1	0,95	0,72	0,91	\$14.000	1	\$14.000
C. Variável	\$33.160	\$18.030	\$0	Custos Fixos Totais:		\$14.000
				Custo Variável Total:		\$51.190
Un. Padrão:	1,05			Custo Operacional Total:		\$65.190

Zona de Produção	Centros de Distribuição			Limite Superior de Suprimento	Capacidade Máxima de Produção	Produção Relativa
	CD 1	CD 2	CD 3			
Fábrica 1	34821,8	25161,8	0,0	<=	224000,0	59983,6
Restrições	=>=	=>=	=>=		Limite Inferior de Suprimento	Capacidade Mínima de Produção
Quantidade Produzida	34821,8	25161,8	0,0		>=	10000,0
<u>CU transporte de j para k</u>						
	CD 1	CD 2	CD 3		<u>CU de produção de i em j</u>	
Fábrica 1	0,36	0,13	0,32			0,59

Pasta 2 - Submodelo Estratégico

CUSTO VARIÁVEL DE MANUSEIO E ESTOQUE DE IEM K E CUSTO DE TRANSPORTE DE J PARA K

Zona de Consumo	Centros de Distribuição			Demanda Mensal de Bombonas	Demanda Relativa			Custo	
	CD 1	CD 2	CD 3		CD 1	CD 2	CD 3	Total / mês	Fixo Mensal
1	1	0	0	9532,73	9533	0	0	\$2.485,24	\$1.100,00
2	1	0	0	7267,27	7267	0	0	\$2.047,07	\$1.050,00
3	1	0	0	12320,00	12320	0	0	\$3.450,62	\$1.150,00
4	1	0	0	5701,82	5702	0	0	\$1.582,87	\$950,00
5	0	1	0	7292,73	0	7293	0	\$1.887,46	\$1.000,00
6	0	1	0	7801,82	0	7802	0	\$1.962,14	\$1.050,00
7	0	1	0	6707,27	0	6707	0	\$1.942,88	\$1.000,00
8	0	1	0	3360,00	0	3360	0	\$1.065,15	\$900,00
Open?	1	1	0		Somatório	34822	25162	\$16.423,43	\$24.623,43
Cost/Month:	\$2.280	\$2.000	\$1.750		Max Throughput	80000	80000		
Fixed Costs:	\$2.280	\$2.000	\$0	\$4.280	Min Throughput	0	0		
Custo Variável	\$14.514	\$12.795	\$0	\$27.310					
Depreciação		1,01		\$31.590					

Custo Unitário de manuseio e estoque, transporte de j para k e de k para m

Zona de Consumo	Centros de Distribuição			Zona de Consumo	CU transporte de k para m		
	CD 1	CD 2	CD 3		CD 1	CD 2	CD 3
1	0,38	0,65	1,12	1	0,25	0,51	0,22
2	0,42	0,69	1,14	2	0,29	0,55	0,24
3	0,45	0,73	1,16	3	0,33	0,59	0,26
4	0,38	0,65	1,12	4	0,25	0,51	0,22
5	0,74	0,43	1,22	5	0,61	0,29	0,32
6	0,70	0,39	1,20	6	0,58	0,28	0,30
7	0,56	0,65	1,06	7	0,43	0,51	0,16
8	0,52	0,62	1,04	8	0,40	0,48	0,14

Restrições

Zona de Consumo	Centros de Distribuição			Box?
	CD 1	CD 2	CD 3	
1	>=	>=	>=	=
2	>=	>=	>=	=
3	>=	>=	>=	=
4	>=	>=	>=	=
5	>=	>=	>=	=
6	>=	>=	>=	=
7	>=	>=	>=	=
8	>=	>=	>=	=

CU manuseio e estoque

CD 1	CD 2	CD 3
0,13	0,14	0,90

Pasta 3 - Submodelo Estratégico

CUSTO VARIÁVEL DE MANUSEIO E ESTOQUE DE i EM m E CUSTO DE TRANSPORTE DE m PARA n

	ZC1	ZC2	ZC3	ZC4	ZC5	ZC6	ZC7	ZC8
Demanda Mensal	9.532,73	7.267,27	12.320,00	5.701,82	7.292,73	7.801,82	6.707,27	3.360,00
Custos Variáveis (R\$/unid)	0,26	0,28	0,28	0,28	0,26	0,25	0,29	0,32
Custo Transporte (R\$/unid)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Custos Fixos (R\$)	1.100,00	1.050,00	1.150,00	950,00	1.000,00	1.050,00	1.000,00	900,00
Custos Totais na ZC	13.117,97	10.364,34	16.920,62	8.234,68	10.180,19	10.813,96	9.650,15	5.325,15
Custo Total	84.607,06							

Pasta 4 - Submodelo Estratégico

CÁLCULO DA FLEXIBILIDADE DE VOLUME (W)

Produção		<i>Quebra Padrão</i>						<i>Capacidade de Produção</i>	
1	224000	<u>224000</u>	<u>1,05</u>	59983,6	62982,8	<u>W2</u>	0,5	<u>80508,6</u>	

Distribuição

1	80000	<i>Unidade Padrão</i>								
1	80000									
0	80000	<u>160000</u>	<u>1,1</u>							
			9532,73	7267,27	12320	5701,82	7292,73	7801,82	6707,27	3360
			10486	7994	13552	6272	8022	8582	7378	3696

						<i>Capacidade de Distribuição</i>
		65982	<u>W3</u>	0,5	<u>47009</u>	

Resultados (ε)	<u>Flexibilidade (W)</u>	127518	>=	<u>120000</u>
----------------	--------------------------	--------	----	---------------

Pasta 5 - Submodelo Estratégico

Estratégico - Operacional

Copiar

	Demanda Mensal - Dim		
	CD 1	CD 2	CD 3
Somatório	34821,82	25161,82	0,00
	F1		
Somatório	59983,64		

	CD 1	CD 2	CD 3
1	1	0	0
1	1	0	0
1	1	0	0
1	1	0	0
0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0
0	0	1	0

Colar Especial (só valores)

ZC	U4ikm	CU transporte de k para m			CU manuseio e estoque		
		CD 1	CD 2	CD 3	CD 1	CD 2	CD 3
1	\$0,26	0,25	0,51	0,22	0,13	0,14	0,90
2	\$0,28	0,29	0,55	0,24			
3	\$0,28	0,33	0,59	0,26			
4	\$0,28	0,25	0,51	0,22			
5	\$0,26	0,61	0,29	0,32			
6	\$0,25	0,58	0,26	0,30			
7	\$0,29	0,43	0,51	0,16			
8	\$0,32	0,40	0,48	0,14			
					CU transporte de j para k		
					CD 1	CD 2	CD 3
					0,36	0,13	0,32
					η	γ	
					0,040	0,000	
					CU de prod. de i em j		
					0,59		

U4im	0,26	0,28	0,28	0,28	0,26	0,25	0,29	0,32
------	------	------	------	------	------	------	------	------

Engarrafadora		CD1	CD2	CD3	ZC1		
Qp2	2465,05	Qp3	2292,75	1392,74	0,01	Q4im	680,91
Prj	0,99	Prk	1,00	1,00	0,00	Prm	1,00
S2ij	2752,27	S3ik	2562,13	1512,73	0,01	S4im	1512,98
s2ij	672,82	s3ik	1368,51	565,54	0,00	T*	2,00
Edj	385,61	Edk	1099,13	445,54	0,00	I4im	491,62
I2ij	1519,74	I3ik	1415,76	816,36	0,01	P4im	0,92
t2ij	0,18	t3ik	0,88	0,50	0,88	U4im	0,26
Xij	59983,64	Dim	34821,82	25161,82	0,00	Cikm	0,25
P2ij	0,94	P3ik	0,92	0,96	0,00		
U2ij	0,59	U3ik	0,13	0,14	0,90		
		Cijk	0,36	0,13	0,32		

Pasta 1 - Submodelo Operacional

Controle de Produção

	P1
TC_{2ij}^P	19.089,22
Q_{2ij}	2079,45
X_{ij}	59983,64
θ_{2ij}	0,50
Γ_{ij}	0,30
Ω_{ij}	0,10
t_{2ij}	0,18
uP_{2ij}	0,318

Pasta 2 - Submodelo Operacional

Estocagem de produtos acabados (s,S)

TCF2ij	16.372,52
Q2ij	2079,45
T*(dias)	1,04
Qp2	2465,05
Pvj	98,93%
S2ij	2752,27
s2ij	672,82
E-dj	385,61
I2ij	1519,74
P2ij	0,94
dj	2142,27
t2ij	0,18
Xij	59983,64
e2ij	25,00
L2ij	10%
H2ij	4,00
n2	2,30
σ2	124,77
π2ij	1,30
cijk	15728,13
uf2ij	0,273
U2ij	0,59

P2ij	0,94	0,94	0,94	0,94
P*2ij	0,90	0,90	0,90	0,90
PSij	0,040	0,040	0,040	0,040
Restrição	>=	>=	>=	>=
η	0,040	0,040	0,040	0,040
(Tijk)	0,8838	0,4958	0,8838	0,8838
var (Tijk)	0,0036	0,0002	0,0036	0,0036
(T*ijk)	1	0,65	1	1
PIijk	0,116	0,154	0,116	0,116
Restrição	>=	>=	>=	>=
γ	0,000	0,000	0,000	0,000

Área de Transferência da Demanda

59983,64

Colar especial só valores Xij

>>>>>>>>

Holding cost de transporte			
CU transporte de j para k			
	CD 1	CD 2	CD 3
Fábrica 1	0,36	0,13	0,32 ##
Custo unitário de rota			
	CD 1	CD 2	CD 3
Fábrica 1	0,400	0,250	0,350
Lead time normal de transporte (dias)			
	CD 1	CD 2	CD 3
Fábrica 1	0,90	0,50	0,90
Lead time expreso (dias)			
	CD 1	CD 2	CD 3
Fábrica 1	0,15	0,25	0,45

Pasta 3 - Submodelo Operacional

Controle de Distribuição (s,S)

	CD1	CD2	CD3
TC3ik	179,18	112,43	0,00
Q3ik	1193,63	947,20	0,01
T*(dias)	1,03	1,13	0,00
Qp3	2292,75	1392,74	0,01
Prk	99,82%	99,81%	0,00%
S3ik	2562,13	1512,73	0,01
s3ik	1368,51	565,54	0,00
Edk	1099,13	445,54	0,00
I3ik	1415,76	816,36	0,01
F3ik	92,25%	95,63%	0,00%
dk	1243,64	898,64	0,00
t3ik	0,88	0,50	0,88
Dim	34821,82	25161,82	0,00
o3ik	2,00	1,70	2,00
L3ik	5%	5%	5%
H3ik	2,10	2,00	2,10
n3	2,91	2,90	-4,27
σ3	92,53	41,42	0,00
π3ik	2,00	2,00	2,00
G(m3)	0,0008	0,0010	0,0012
U3ik	0,127	0,138	0,900

var(Dim)	CD 1	CD 2	CD 3
ZC1	829	0	0
ZC2	664	0	0
ZC3	1655	0	0
ZC4	182	0	0
ZC5	0	1005	0
ZC6	0	1210	0
ZC7	0	592	0
ZC8	0	295	0
Somatório	3330	3082	0

Início	35000,00	15145,45	10080,00
Área de Transferência da Demanda			
Dim	34821,82	25161,82	0,00

Colar especial só valores

(Iijk)	0,8838	0,4958	0,8838	0,8838
var (Iijk)	0,0036	0,0002	0,0036	0,0036
var(dim)	8561,663363	1715,221503	0	0
	8561,6634	1715,2215	0	0

Colar especial só valores

Pasta 4 - Submodelo Operacional

Controle de Varejo - revisão Periódica

	ZC 1	ZC 2	ZC 3	ZC 4	ZC 5	ZC 6	ZC 7	ZC 8
TC4im	128,17	111,21	149,64	91,16	110,43	115,93	106,39	75,26
Q4im	680,91	519,09	660,00	509,09	520,91	557,27	479,09	300,00
	0,07	0,07	0,05	0,09	0,07	0,07	0,07	0,09
T (dia)	2,00	2,00	1,50	2,50	2,00	2,00	2,00	2,50
Prm	99,75%	99,75%	99,81%	99,69%	99,75%	99,75%	99,75%	99,69%
S4im	1512,98	1173,46	1524,25	1092,02	1208,03	1296,86	1085,91	687,39
I4im	491,62	394,82	534,25	328,38	426,66	460,95	367,27	237,39
P4im	92,09%	90,72%	89,32%	94,70%	88,61%	88,32%	90,50%	89,35%
dim	340,45	259,55	440,00	203,64	260,45	278,64	239,55	120,00
t4im	2,00	2,00	1,50	2,50	2,00	2,00	2,00	2,50
Dim	9532,73	7267,27	12320,00	5701,82	7292,73	7801,82	6707,27	3360,00
θ4im	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
L4im	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%	5,00%
H4im	3,50	3,50	3,50	3,50	3,20	3,20	3,50	3,50
n4	2,81	2,81	2,90	2,73	2,80	2,80	2,81	2,73
σ4	53,85	48,19	70,47	27,00	59,32	65,07	45,50	31,96
π4im	5,00	5,00	5,00	5,00	4,50	4,50	5,00	5,00
G(n-4)	0,0005	0,0005	0,0004	0,0007	0,0006	0,0006	0,0005	0,0007
U4im	0,26	0,28	0,28	0,28	0,26	0,25	0,29	0,32

