

JOÃO FLÁVIO DE FREITAS ALMEIDA

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO TÁTICO DA
CADEIA DE SUPRIMENTOS: FORMULAÇÕES E
MÉTODOS**

Belo Horizonte
30 de março de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO TÁTICO DA
CADEIA DE SUPRIMENTOS: FORMULAÇÕES E
MÉTODOS**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Produção.

JOÃO FLÁVIO DE FREITAS ALMEIDA

Belo Horizonte
30 de março de 2015

A447o

Almeida, João Flávio de Freitas.

Otimização do planejamento tático da cadeia de suprimentos [manuscrito]: formulações e métodos / João Flávio de Freitas Almeida. – 2015.

x, 114 f., enc.: il.

Orientador: Samuel Vieira da Conceição.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 105-114.

1. Engenharia de produção - Teses. 2. Programação estocástica - Teses. 3. Cadeia de suprimentos - Teses. 4. Logística empresarial - Teses. 5. Método de decomposição – Teses. I. Conceição, Samuel Vieira da. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 658(043)



ATA DA DEFESA DE TESE DO ALUNO JOÃO FLÁVIO DE FREITAS ALMEIDA

Realizou-se, no dia 30 de março de 2015, às 14:00 horas, Sala 3226, Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a 5ª defesa de tese, intitulada **OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO TÁTICO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS: FORMULAÇÕES E MÉTODOS**, apresentada por JOÃO FLÁVIO DE FREITAS ALMEIDA, número de registro 2011670556, graduado no curso de ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Samuel Vieira Conceicao - Orientador (UFMG), Prof(a). Reinaldo Morabito Neto (UFSCAR), Prof(a). Gilberto de Miranda Junior (UFMG), Prof(a). Ormeu Coelho da Silva Júnior (CEFET/RJ), Prof(a). Rodney Rezende Saldanha (UFMG), Prof(a). Ricardo Saraiva de Camargo (UFMG).

A Comissão considerou a tese:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 30 de março de 2015.

Prof(a). Samuel Vieira Conceicao (Doutor)

Prof(a). Reinaldo Morabito Neto (Doutor)

Prof(a). Gilberto de Miranda Junior (Doutor)

Prof(a). Ormeu Coelho da Silva Júnior (Doutor)

Prof(a). Rodney Rezende Saldanha (Doutor)

Prof(a). Ricardo Saraiva de Camargo (Doutor)



FOLHA DE MODIFICAÇÕES

As modificações exigidas na tese de JOÃO FLÁVIO DE FREITAS ALMEIDA, número de registro 2011670556, de número 5, em 30 de março de 2015, são relacionadas a seguir:

O prazo para entrega da versão final do trabalho com as modificações exigidas acima é de:

- () 7 (sete) dias () 30 (trinta) dias () 90 (noventa) dias
 () Outro (a critério da comissão): _____ dias

ficando responsável pela verificação destas o professor: _____

_____ Assinatura do Aluno

_____ Assinatura do Professor Responsável

Atesto que as modificações exigidas _____ integralmente cumpridas.

Belo Horizonte, ____ de _____ de ____.

_____ Assinatura do Professor Responsável



FOLHA DE APROVAÇÃO

OTIMIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO TÁTICO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS: FORMULAÇÕES E MÉTODOS

JOÃO FLÁVIO DE FREITAS ALMEIDA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito para obtenção do grau de Doutor em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, área de concentração PESQUISA OPERACIONAL E ENGENHARIA DE MANUFATURA, linha de pesquisa Otimização de

Aprovada em 30 de março de 2015, pela banca constituída pelos membros:



Prof(a). Samuel Vieira Concação - Orientador
UFMG


Prof(a). Reinaldo Morabito Neto
UFSCAR


Prof(a). Gilberto de Miranda Junior
UFMG


Prof(a). Ormeu Coelho da Silva Júnior
CEFET/RJ


Prof(a). Rodney Rezende Saldanha
UFMG


Prof(a). Ricardo Saraiva de Camargo
UFMG

Belo Horizonte, 30 de março de 2015.

Resumo

Indústrias de manufatura são caracterizadas por terem sistemas de produção e logística complexos. Na área de planejamento, os objetivos de várias divisões de negócios, como *marketing*, distribuição, manufatura e compras são frequentemente conflitantes, portanto, demandam o desenvolvimento de uma estrutura unificada e rigorosa capaz de capturar as várias sinergias e *tradeoffs* envolvidos.

Nesta tese, abordamos a otimização do planejamento tático da cadeia de suprimentos em indústrias de manufatura. As formulações apresentadas são multi-produto, multi-modal, multi-período e integram decisões de médio prazo abordando o suprimento, produção e distribuição por quatro elos da cadeia: fornecedores, fábricas, centros de distribuição e clientes. Elaboramos formulações determinísticas e estocásticas. Estas são abordadas por programação estocástica e programação estocástica robusta.

Para resolver os problemas estocásticos de grande porte, são elaborados métodos de decomposição estocástica baseados em Benders (1962). Os modelos e métodos elaborados são avaliados por meio de um estudo computacional. Este estudo, no entanto, vai além ao avaliar a flexibilidade da cadeia, uma abordagem pouco explorada na literatura, como discutido no recente estudo de Esmailikia et al. (2014).

Finalmente, um estudo de caso relacionado à aplicação de programação estocástica ao planejamento tático anual da cadeia de suprimentos de um grupo siderúrgico é elaborado. São descritos os processos logísticos, operacionais e as etapas de desenvolvimento do modelo. Os resultados computacionais indicam o desempenho superior do método de decomposição adotado em relação à formulação monolítica. A qualidade da solução por programação estocástica também é demonstrada.

Palavras-chaves: planejamento da cadeia de suprimentos, programação estocástica robusta, decomposição de Benders.

Abstract

Manufacturing industries are characterized by having complex logistics and production systems. In the planning area, goals of multiple business divisions such as marketing, distribution, manufacturing and purchases are often conflicting, requiring the development of a unified and rigorous structure capable of capturing the various synergies and tradeoffs involved.

In this thesis, we deal with the optimization of tactical supply chain planning for manufacturing industries. We present multi-product, multi-modal and multi-period formulations to integrate medium-term decisions addressing the supply, production and distribution of a four echelons supply chain: suppliers, factories, distribution centers and customers. We develop deterministic and stochastic formulations addressed by stochastic programming and robust stochastic programming.

To solve the large scale stochastic problems, we developed methods of stochastic decomposition based on Benders (1962). The developed models and methods are evaluated by a computational study. The analysis also evaluate the flexibility of the supply chain. Such approach has not been explored in the literature, as discussed in the recent study of Esmailikia et al. (2014).

Finally, a complete case study evaluates the application of stochastic programming to the annual tactical planning of a steel making company supply chain. We describe logistics, operations and the model development. Computational results demonstrate the superior performance of the proposed decomposition method compared to the monolithic formulation. The quality of the stochastic programming solution is also demonstrated.

Keywords: supply chain planning, robust stochastic programming, Benders decomposition.

À minha família, minha base.

Faça bem feito, ou não faça!

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela vida.

À minha família, pelo amor, paciência e motivação.

Ao Prof. Samuel Vieira Conceição, pela sua valiosa orientação e dicas.

Aos professores e colegas do Departamento de Engenharia de Produção.

Aos colegas da Usiminas e Vale, que motivaram o estudo de caso.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Sumário

1	Introdução	2
1.1	Otimização do planejamento da cadeia de suprimentos	2
1.1.1	Modelo de planejamento da cadeia de suprimentos	3
1.1.2	Consideração da incerteza	7
1.1.3	Métodos de decomposição	8
1.2	Motivação e relevância da pesquisa	9
1.3	Objetivos da pesquisa	9
1.3.1	Objetivos específicos	10
1.4	Limitações	10
1.5	Delineamento do trabalho	11
2	Exame da Literatura	12
2.1	Planejamento da cadeia de suprimentos	12
2.2	Modelos determinísticos	14
2.3	Modelos estocásticos	17
2.3.1	Programação estocástica	17
2.3.2	Programação estocástica robusta	19
3	Novas Formulações	20
3.1	Formulação determinística	21
3.2	Reformulação	29
3.3	Exemplo numérico	31
3.4	Formulações por programação estocástica	37
3.4.1	Formulação por cenários	38
3.4.2	Formulação por dois-estágios	42
3.5	Formulação por programação estocástica robusta	52
4	Decomposição Estocástica de Benders	57
4.1	Decomposição do problema determinístico	57
4.2	Decomposição do problema estocástico	61

4.2.1	Decomposição estocástica multi-corte	67
4.2.2	Decomposição do problema estocástico inteiro-misto	69
5	Estudo Computacional	71
5.1	Descrição dos problemas-teste	71
5.2	Avaliação de desempenho das formulações	73
5.2.1	PTCS-D vs. PTCS-R	73
5.2.2	PTCS-R vs. PTCS-C	74
5.2.3	PTCS-R vs. PTCS-2ML	75
5.2.4	PTCS-R vs. PTCS-2HR	76
5.2.5	PTCS-R vs. PTCS-OR	77
5.3	Avaliação da decomposição de Benders	80
5.3.1	Decomposição estocástica multi-corte de PTCS-2HR	81
5.4	Avaliação da flexibilidade	84
5.4.1	Flexibilidade de suprimento	86
5.4.2	Flexibilidade de manufatura	87
5.4.3	Flexibilidade de distribuição e logística	88
6	Um Estudo de Caso	89
6.1	Planejamento tático da cadeia de suprimentos	90
6.1.1	Agrupamento de recursos, produtos e clientes	91
6.1.2	Estimativa de parâmetros incertos	91
6.1.3	Desenvolvimento do modelo	92
6.1.4	Resultados computacionais e análises	94
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	102
	Referências Bibliográficas	105

Lista de Figuras

1.1	Rede expandida representa os períodos de planejamento	10
3.1	Cadeia de suprimentos com quatro elos	21
3.2	Lista de materiais: estrutura genérica de produtos	31
3.3	Cadeia de suprimentos do exemplo numérico: planejamento em dois meses	32
5.1	Desempenho dos modelos lineares	73
5.2	Desempenho dos modelos inteiro-misto	73
5.3	Avaliação do nível de serviço com o aumento da penalidade ω	80
5.4	Avaliação da lucratividade global com o aumento da penalidade ω	80
5.5	Avaliação da lucratividade global diante de cenários com variabilidade λ .	80
5.6	Avaliação do nível de serviço diante de cenários com variabilidade λ	80
5.7	Avaliação de estratégias de estoque diante de variabilidade λ	81
5.8	Desempenho dos modelos lineares	84
5.9	Desempenho dos modelos inteiro-misto	84
6.1	Fluxo na planta-[1]: Roteiro tecnológico dos produtos acabados.	93
6.2	Fluxo na planta-[2]: Roteiro tecnológico dos produtos acabados.	93
6.3	Estrutura da rede de suprimentos para 1 período de planejamento.	95
6.4	Plano mensal de suprimento de minério pelo fornecedor-[1] e fornecedor-[2]	96
6.5	Plano mensal de suprimento de carvão pelo fornecedor-[Ext]	96
6.6	Plano mensal de produção e estoque da planta-[1]	97
6.7	Plano mensal de produção e estoque da planta-[2]	97
6.8	Plano mensal de transporte de CDs e Portos	97
6.9	Plano mensal de armazenamento em CDs e Portos	97
6.10	Efeito operacional e financeiro da variação do custo da matéria-prima . . .	100
6.11	Efeito operacional e financeiro da variação do preço do produto acabado .	100
6.12	Efeito operacional e financeiro da variação do volume demandado	101

Lista de Tabelas

1.1	Planejamento da cadeia de suprimentos. Adaptado de Simchi-Levi et al. (2014)	4
1.2	Lista de parâmetros e variáveis do modelo de planejamento	5
3.1	Parâmetros e variáveis da formulação determinística PTCS-D	23
3.2	Parâmetros complementares da formulação reformulada PTCS-R	29
3.3	Conjuntos do exemplo numérico	31
3.4	Disponibilidade mensal de matérias-primas e produtos acabados	32
3.5	Custo variável de produção dos produtos em cada fábrica	33
3.6	Custo de aquisição de matéria-prima ou produtos acabados	33
3.8	Plano de compras	33
3.7	Desempenho econômico e resultado do modelo do exemplo numérico	34
3.9	Estoque projetado nos locais da cadeia de suprimentos	34
3.10	Plano de transporte capacitado da cadeia de suprimentos	35
3.11	Plano de atendimento da demanda	35
3.12	Volume de entrada e saída nos centros de distribuição	36
3.13	Consumo de matéria prima e produção	36
3.14	Plano de produção nas indústrias	37
3.15	Parâmetros e variáveis da formulação estocástica por cenários PTCS-C	39
3.16	Variáveis da formulação estocástica PTCS-2ML	43
3.17	Variáveis do primeiro estágio da formulação estocástica PTCS-2HR	47
3.18	Parâmetros e variáveis da formulação estocástica robusta PTCS-OR	54
5.1	Configuração da cadeia de suprimentos para os parâmetros P, M e G	72
5.2	Avaliação dos modelos lineares PTCS-D e PTCS-R	74
5.3	Avaliação dos modelos lineares inteiro-misto PTCS-D e PTCS-R	74
5.4	Avaliação dos modelos lineares PTCS-R e PTCS-C	75
5.5	Avaliação dos modelos inteiro-misto PTCS-R e PTCS-C	75
5.6	Avaliação dos modelos lineares PTCS-R e PTCS-2ML	76
5.7	Avaliação dos modelos inteiro-misto PTCS-R e PTCS-2ML	76
5.8	Avaliação dos modelos lineares PTCS-R e PTCS-2HR	77

5.9	Avaliação dos modelos inteiro-misto estocástico de dois-estágios PTCS-2HR	77
5.10	Avaliação dos modelos lineares PTCS-R e PTCS-OR	78
5.11	Avaliação dos modelos inteiro-misto estocástico de dois-estágios PTCS-OR	78
5.12	Avaliação da decomposição de PTCS-2HR: Estágio 1 e 2: MILP	82
5.13	Avaliação da decomposição estocástica de PTCS-2HR linear	82
5.14	Avaliação da decomposição estocástica de PTCS-2HR: Estágio 1: MILP	82
5.15	Dimensão dos problemas PTCS-2HR: PL e PLIM	83
5.16	Tempo de PTCS-2HR: PL e PLIM. *Sem solução. **Sem memória.	83
5.17	Desempenho do exemplo base para avaliação de flexibilidade	86
5.18	Desempenho do exemplo com suprimento flexível	86
5.19	Desempenho do exemplo com a manufatura flexível	87
5.20	Desempenho do exemplo com a logística flexível	88
6.1	Resultado financeiro e operacional do estudo de caso	95
6.2	Desempenho de 1 hora para $s = 6$ cenários. *Sem solução inicial.	98
6.3	Análise VEIP e VSE do estudo de caso.	99

Lista de abreviaturas

APS:	<i>Advanced Planning Systems</i> : Sistemas avançados de planejamento
BTF:	<i>Build to Forecast</i> : Fabricação para a previsão
BTO:	<i>Build to Order</i> : Customização sob pedido
MTO:	<i>Make to Order</i> : Fabricação sob pedido
MTS:	<i>Make to Stock</i> : Fabricação para estoque
EWO:	<i>Enterprise Wide Optimization</i>
AMPL:	<i>Software</i> de programação matemática
GLPK:	<i>Software</i> de programação matemática
Gurobi:	<i>Solver</i> de programação PL e PLIM
LI:	Limite Inferior
LS:	Limite Superior
PL:	Programação Linear
PLIM:	Programação Linear Inteira Mista
PM:	Problema Mestre
SP:	Sub Problema
PTCS-D:	Planejamento Tático da Cadeia de Suprimentos - Determinístico
PTCS-R:	Planejamento Tático da Cadeia de Suprimentos - Reformulado
PTCS-C:	Planejamento Tático da Cadeia de Suprimentos - Cenários
PTCS-2ML:	Formulação PTCS - 2 estágios: Manufatura e Logística
PTCS-2HR:	Formulação PTCS - 2 estágios e Horizonte Rolante
PTCS-OR:	Formulação PTCS - Otimização Robusta
VEIP:	Valor Esperado da Informação Perfeita
VSE:	Valor da Solução Estocástica

Capítulo 1

Introdução

"Try not to become a man of success, but rather try to become a man of value."

Albert Einstein

1.1 Otimização do planejamento da cadeia de suprimentos

Indústrias de manufatura possuem sistemas de produção e logística complexos. Neste sistema, matérias primas são transportadas em lotes dos fornecedores às fábricas onde são convertidas em produtos acabados após serem processados em linhas de produção com características particulares. Periodicamente, estes produtos precisam ser transportados das fábricas aos centros de distribuição ou diretamente aos clientes finais para atender a demanda. A formação de estoques de produto acabado contribui para o aumento do nível de serviço aos clientes, favorecendo o atendimento da demanda no prazo.

Em contrapartida, as empresas também precisam manter baixos níveis de estoque e escolher os melhores modais de transporte de forma a minimizar os custos de produção, estoque e logística. O desafio de alocar, simultaneamente, recursos de produção, estoque e transporte de forma a satisfazer a demanda pode ser intimidador. As empresas precisam levar em consideração as interações dos diversos níveis da rede logística, também conhecida como cadeia de suprimentos (Simchi-Levi et al., 2014).

Uma cadeia de suprimentos integra operações de manufatura e logística para atender pedidos de clientes de forma eficiente e eficaz. Neste processo, matérias primas, proveniente de fornecedores, são convertidas tanto em produtos intermediários quanto produtos acabados em uma ou mais plantas industriais. Em seguida, os produtos são transportados a lojas ou varejos, podendo usar de armazéns ou centros de distribuição como pontos de transbordo. O planejamento da cadeia pode ser realizado nos níveis

estratégico, tático e operacional. Neste processo, o planejamento da produção e distribuição é realizado de forma integrada, como visto em Beamon (1998) e Schmidt e Wilhelm (2000), contribuindo, portanto, ao gerenciamento integrado desta estrutura.

A gestão da cadeia de suprimentos tem forte impacto no desempenho organizacional em termos de competição baseada em preço, qualidade, responsividade e flexibilidade (Mirzapour Al-E-Hashem et al., 2011). Ela abrange conhecimentos de pesquisa operacional, logística, ciência da computação, marketing, teoria organizacional (Stadtler, 2005) e vem se tornando uma disciplina mais madura.

Sob o ponto de vista da teoria sócio-técnica, gerentes de cadeias de suprimentos precisam ter competência ao lidarem com aspectos sociais e tecnológicos para administrarem atividades internas e externas à empresa. Sob ponto de vista de negócios, os principais desafios estão relacionados à mudança de atitude: abandonar o comportamento reativo e adotar a rotina de planejamento (Prajogo e Sohal, 2013).

As características fundamentais de atividades de planejamento da cadeia de suprimentos são resumidas na Tabela 1.1. A tabela mostra que o planejamento da cadeia de suprimentos no nível estratégico determina o projeto da rede logística por meio da prescrição de localização de facilidades, tecnologias de produção e capacidade das fábricas. O projeto deve ser revisado anualmente por poucos decisores de alto escalão e pode render elevado retorno sobre os investimentos. No nível tático são determinadas as políticas de alocação de recursos e de fluxo de materiais, incluindo a decisão sobre níveis de produção e estoque e distribuição. Este planejamento é feito para classes de produtos, em horizonte de um a dois anos, em períodos mensais. Finalmente, no nível operacional busca-se determinar tanto estoques de segurança quanto de sequenciamento de operações. O objetivo é garantir a entrega do produto acabado e obter coordenação da rede logística (Schmidt e Wilhelm, 2000), (Simchi-Levi et al., 2014).

Na seção 1.1.1, apresentamos uma formulação matemática do problema de planejamento da cadeia de suprimentos. O modelo aborda decisões de compra e produção em lotes múltiplos, o estoque de segurança e a capacidade limitada de armazenamento, servindo como motivação para a elaboração de novas formulações.

1.1.1 Modelo de planejamento da cadeia de suprimentos

Nessa seção, é apresentada uma extensão da formulação matemática do problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) de planejamento da cadeia de suprimentos disponível em Kallrath e Maindl (2006). Os elementos da cadeia são descritos em seguida.

Considere uma cadeia de suprimentos onde \mathcal{P} é o conjunto de produtos formados por \mathcal{X} matérias primas e \mathcal{Y} produtos acabados, ou seja, $\mathcal{P} = \mathcal{X} \cup \mathcal{Y}$. Sejam \mathcal{L} os locais

	Projeto de rede	Alocação de recursos	Sequência de produção
Foco de decisão	Infraestrutura	Produção e distribuição	Produção e distribuição
Horizonte	Anos	Meses	Semanas
Nível de agregação	Família	Classe	Item
Frequência de planejamento	Anual	Mensal / semanal	Semanal / diário
Retorno	Alto	Médio	Médio
Decisores	Muito pouco	Pouco	Pouco

Tabela 1.1: Planejamento da cadeia de suprimentos. Adaptado de Simchi-Levi et al. (2014)

na rede formados por \mathcal{F} fornecedores, \mathcal{I} indústrias e \mathcal{C} clientes, assim, $\mathcal{L} = \mathcal{F} \cup \mathcal{I} \cup \mathcal{C}$. Nesta cadeia, \mathcal{F} fornecedores fornecem \mathcal{X} matérias-primas a \mathcal{I} plantas industriais. Estas processam as matérias primas em \mathcal{R} recursos produzindo \mathcal{Y} produtos acabados ao longo de \mathcal{T} períodos de forma a atender a \mathcal{D} demandas de \mathcal{C} clientes. Os conjuntos de produtos, locais, recursos e demandas são indexados por p, l, r e d , respectivamente. A notação é apresentada na Tabela 1.2.

O modelo de programação linear inteiro-misto busca determinar o plano tático da cadeia de suprimentos de custo mínimo estabelecendo estratégias de compra de matérias-primas, produção, estoque e transporte respeitando a capacidade produtiva em todos os períodos. O problema é formulado como segue.

A função objetivo (1.1) minimiza o custo total formado pelos custos de entrega atrasada, de ruptura (ou não entrega), de produção, de aquisição, de expansão de capacidade e de estocagem.

$$\begin{aligned} \min \mathcal{Z} = & \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{dt}^L f_{dt} + \sum_{d \in \mathcal{D}} C_d^N (D_d - \sum_{t \in \mathcal{T}} f_{dt}) + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_p^P L_p \alpha_{lpt} + \\ & \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^P r_{lpt} + \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_r^X c'_{rt} + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_p^S s_{lpt} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Restrições de estoque (1.2) determinam que os níveis de estoque devem respeitar a capacidade de armazenamento e a política de estoque de segurança.

$$S_{lpt}^S \leq s_{lpt} \leq S_{lpt}^X \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (1.2)$$

A equação (1.3) garante o balanço de fluxo. O lado esquerdo da equação representa a entrada de um produto em um local, em um dado período. Para este nó determina-se o volume de transporte do estágio anterior da cadeia, a produção, o nível de estoque ao final do período anterior e a compra externa. O lado direito da restrição considera o transporte para o estágio subsequente da cadeia, o atendimento da demanda, o nível

Parâmetros de entrada

D_d	: Vetor de d demandas
I_{dp}^P	: $\in \{0, 1\}$: Se a demanda d é referente ao produto p
I_{dl}^L	: $\in \{0, 1\}$: Se a demanda d é referente ao local l
C_{dt}^L	: Custo de entrega atrasada da demanda d no período t
C_d^N	: Custo de não entrega da demanda d
T_d^D	: Último período em que se pode atender a demanda d
$B_{p'p}$: Quantidade de matéria-prima p' necessária para produzir o produto p
R_{pr}	: Quantidade que o produto p consome para ser produzido pelo recurso r
L_p	: Tamanho do lote do produto p
C_p^P	: Custo de produção do produto p
R_r^C	: Capacidade padrão do recurso r
R_r^X	: Capacidade extra do recurso r
C_r^X	: Custo de expansão de capacidade do recurso r
C_p^S	: Custo de estocagem do produto p
C_{lp}^P	: Custo de aquisição do produto p no local l
$T_{ll'pt}^X$: Capacidade de transportar o produto p de l para l' no período t
S_{lp}^0	: Estoque inicial do produto p no local l
S_{lpt}^S	: Estoque de segurança do produto p no local l e período t
S_{lpt}^X	: Capacidade de estocagem do produto p no local l no período t

Variáveis de decisão

α_{lpt}	: $\in \mathbb{Z}^+$: Quantidade de lotes do produto p produzidos no local l e período t
b_{lpt}	: Consumo da produção do produto p no local l e período t
s_{lpt}	: Estoque do produto p no local l ao final do período t , $s_{lp0} = S_{lp}^0$
$t_{ll'pt}$: Volume do produto p transportado do local l para l' no período t
d_{lpt}	: Demanda pelo produto p atendida no local l e no período t
f_{dt}	: Quantidade entregue para satisfazer a demanda d no período t
r_{lpt}	: $\in \mathbb{Z}^+$: Compra externa de lotes do produto p , no local l e período t
c_{rt}	: Uso da capacidade produtiva do recurso r no período t
c'_{rt}	: Uso da capacidade extra de produção do recurso r no período t

Tabela 1.2: Lista de parâmetros e variáveis do modelo de planejamento

de estoque no período t e o consumo de matéria-prima p pelo processo produtivo. No primeiro período, a variável de estoque assume o valor do estoque inicial, ou seja $s_{lp0} = S_{lp}^0$. O balanço de fluxo ocorre para todo $l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}$.

$$\sum_{l' \in \mathcal{L}} t_{ll'pt} + L_p \alpha_{lpt} + s_{lpt-1} + L_p r_{lpt} = \sum_{l' \in \mathcal{L}} t_{ll'pt} + d_{lpt} + s_{lpt} + b_{lpt} \quad \forall \{l, p, t\} \quad (1.3)$$

A variável de entrega de produtos é modelada pelas restrições (1.4) e (1.5) para atender a demanda. Dessa forma, os parâmetros binários $I_{dl}^L I_{dp}^P$ contribuem com o atendimento d_{lpt} de múltiplas demandas do produto p no local l . Em (1.6) não são permitidas entregas de produtos após o último período de atendimento T_d^D .

$$d_{lpt} = \sum_{d \in \mathcal{D}} I_{dl}^L I_{dp}^P f_{dt} \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (1.4)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} f_{dt} \leq D_d \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (1.5)$$

$$f_{dt} = 0 \quad \forall d \in \mathcal{D}, t \in \mathcal{T} | t > T_d^D \quad (1.6)$$

A formulação do processo de produção é representada em (1.7), que determina que o consumo de componentes b_{lpt} é definido pelos coeficientes $B_{p'p}$ das listas de materiais. O consumo de capacidade dos recursos é modelado pelas restrições (1.8)–(1.10).

$$L_p \alpha_{lpt} = \sum_{p' \in \mathcal{P}} B_{p'p} b_{lp't} \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (1.7)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} R_{pr} L_p \alpha_{lpt} = c_{rt} \quad \forall l \in \mathcal{L}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (1.8)$$

$$c_{rt} \leq R_r^C + c'_{rt} \quad \forall r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (1.9)$$

$$c'_{rt} \leq R_r^X \quad \forall r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (1.10)$$

As restrições (1.11) determinam a capacidade disponível para o transporte de produtos pela rede.

$$t_{ll'pt} \leq T_{ll'pt}^X \quad \forall l \in \mathcal{L}, l' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (1.11)$$

Finalmente, as restrições (1.12)–(1.14) representam o domínio das variáveis, enquanto que as restrições (1.15)–(1.22) estabelecem onde o fluxo não é permitido. Em (1.15)–(1.16) a produção só é possível em plantas e para produtos acabados. Em (1.17) o armazenamento de estoques nos clientes não é permitido. Em (1.18)–(1.19) o transporte de matérias-primas só é permitido dos fornecedores para as plantas. Os produtos acabados só podem ser transportados das plantas para os clientes. Em (1.20), a demanda deve ser atendida apenas nos clientes. Compras externas devem ocorrer somente para matérias-primas e nos fornecedores como representado em (1.21)–(1.22).

$$b_{lpt}, s_{lpt}, d_{lpt}, r_{lpt} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (1.12)$$

$$\alpha_{lpt}, r_{lpt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (1.13)$$

$$t_{ll'pt} \geq 0 \quad \forall l, l' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (1.14)$$

$$\alpha_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{F} \cup \mathcal{C}, p \in \mathcal{X}, t \in \mathcal{T} \quad (1.15)$$

$$b_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{F} \cup \mathcal{C}, p \in \mathcal{X}, t \in \mathcal{T} \quad (1.16)$$

$$s_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (1.17)$$

$$t_{l'pt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{F}, l' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T} \quad (1.18)$$

$$t_{l''pt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, l' \in \mathcal{I} \cup \mathcal{C}, p \in \mathcal{X}, t \in \mathcal{T} \quad (1.19)$$

$$d_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{F} \cup \mathcal{I}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (1.20)$$

$$r_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (1.21)$$

$$r_{l'pt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T} \quad (1.22)$$

1.1.2 Consideração da incerteza

Em ambientes incertos, a capacidade de lidar com a flexibilidade é uma característica importante dos modelos de planeamento. Em diversas situações, os parâmetros dos modelos determinísticos não são conhecidos por completo. Nesses casos, a análise de sensibilidade combinada com otimização paramétrica é comumente adotada. O estudo de Wallace (2000), no entanto, mostra que esta estratégia, conhecida como programação linear paramétrica, tem pouco a ver com otimização sob incerteza.

Ao considerarmos a incerteza em problemas de otimização incorremos em um *trade-off* entre o aumento da acurácia da solução e o aumento do número de variáveis e restrições do modelo, que se torna mais difícil de ser resolvido. O processo de decisão se torna ainda mais complexo na presença de variáveis inteiras em modelos multi-período ou multi-estágio (Sahinidis, 2004).

Pelo paradigma de programação estocástica a incerteza pode ser abordada por cenários, (um-estágio), por dois-estágios ou multi-estágios. A formulação por cenários é abordada diretamente por meio de um número discreto de cenários associados a distribuições de probabilidade. Neste caso, alguns parâmetros do programa matemático são aleatórios. A ideia básica por trás da programação estocástica por dois-estágios com recurso é tomar uma decisão agora, no estágio 1 (aqui e agora) e em seguida uma ação corretiva (esperar para ver e recorrer) no estágio 2 após a revelação da incerteza. O conceito pode ser expandido para uma estratégia multi-estágios, onde decisões ocorrem de forma recursiva até o estágio inicial.

A incerteza também pode ser avaliada pela otimização robusta (Bertsimas e Sim, 2004) e (Bertsimas et al., 2011) ou (Mulvey et al., 1995). Pela abordagem de Bertsimas

et al. (2011) ao invés de predeterminar um número finito de cenários, determina-se um conjunto computacionalmente tratável de cenários de incerteza. Por esta estratégia, não se assume o conhecimento das distribuições de probabilidade dos parâmetros. Seu uso é motivado por *trade-offs* entre o valor da função objetivo e o risco de inviabilidade; quando não há dados suficientemente confiáveis para elaborar cenários de decisão. Alternativamente, em Mulvey et al. (1995) a otimização robusta é avaliada por meio da adição de medidas de esperança e dispersão à função objetivo. Neste caso, a otimalidade das soluções podem ser ajustadas por medidas de aversão ao risco.

Uma vantagem da formulação por programação estocástica é seu uso frequente em otimização do planejamento da cadeia de suprimentos, pois geralmente se obtém boas estimativas de desempenho esperado (McLean, 2014). Por outro lado, a otimização robusta foi desenvolvida para garantir a viabilidade do problema dado um conjunto de realizações de incerteza. No entanto, o modelo com parâmetros incertos pode se tornar muito conservador ao buscar garantir o pior caso para assegurar a não violação das restrições. Para isso é preciso que se determine previamente os *budgets* de incerteza, como visto em Alem (2011) e Alem e Morabito (2013). O método pode considerar ações de recurso quando combinado à métodos de programação estocástica, denominado programação estocástica robusta. Neste caso, o escopo das aplicações é viabilizado a problemas onde a ação de recorrer pode ser vantajosa.

Modelos de otimização sob incerteza são baseados em cenários, portanto, geram um enorme espaço de decisões. Tais modelos demandam muito recurso computacional, por isso, a aplicação de métodos de decomposição para a sua resolução é frequentemente requisitada.

1.1.3 Métodos de decomposição

O uso de métodos de decomposição para resolver problemas de planejamento tático da cadeia de suprimentos se justifica pela grande dimensão desses problemas. Dentre as abordagens de decomposição, destacamos a estratégia baseada em horizontes rolantes e o método de decomposição de Benders (1962).

A abordagem de decomposição baseada na estratégia de horizontes rolantes consiste em resolver problemas multi-períodos recursivamente aplicando um modelo mais detalhado no período inicial e um problema mais agregado nos períodos subsequentes. Após cada estágio, as decisões do período inicial são fixadas e o problema é formulado para o estágio seguinte (Kallrath e Maindl, 2006), (Grossmann, 2012).

O método de decomposição de Benders (1962) consiste em decompor o problema com base em suas variáveis. O algoritmo deve iterar entre um problema mestre com variáveis complicantes (geralmente inteiras ou binárias) buscando um limite inferior e

subproblemas formados por variáveis não complicantes (contínuas) buscando um limite superior (no caso de minimização). O problema mestre é obtido pela aproximação dual do problema original, enquanto que os subproblemas são formados quando fixamos as variáveis complicantes.

1.2 Motivação e relevância da pesquisa

Existe grande interesse em explorar todo potencial da cadeia de suprimentos como forma de aumentar a competitividade. Na área de planejamento, os objetivos de várias divisões de negócios, como *marketing*, distribuição, planejamento, manufatura e compras são frequentemente conflitantes. Dessa forma, é necessário que seja desenvolvido uma estrutura unificada e rigorosa capaz de capturar as várias sinergias e *trade-offs* envolvidos (Gupta e Maranas, 2003).

Muitas pesquisas, no entanto, se concentram apenas em componentes do problema ao invés tratá-lo de forma integrada. Estudos relacionados ao planejamento tático da cadeia de suprimentos, como em Mula et al. (2010) e Fahimnia et al. (2012), demonstram que as formulações destes problemas abordam decisões simultâneas de produção e distribuição, no entanto, os trabalhos apresentam limitações. Mais de 60% destes não consideram fornecedores ou centros de distribuição como elementos da cadeia em seus modelos. Além disso, algumas simplificações são frequentemente adotadas, como considerar infinita a capacidade de produção, estocagem ou transporte.

Para lidar com esse desafio, elaboramos formulações e métodos de resolução de problemas determinísticos e estocásticos para o planejamento tático da cadeia de suprimentos baseada em uma estrutura fixa, cujas decisões são relacionadas a políticas de nível tático. Os modelos de suprimento-produção-distribuição, representados esquematicamente pela Figura 1.1, são capacitados, multi-planta, multi-produto, multi-período e multi-modal. Tais características são lacunas na literatura e conferem flexibilidade aos modelos integrados de planejamento, portanto, representam tendências de pesquisa (Mula et al. (2010), Fahimnia et al. (2012) e Esmailikia et al. (2014)).

1.3 Objetivos da pesquisa

O propósito desta tese é elaborar novas formulações e métodos de resolução para o problema de planejamento tático da cadeia de suprimentos da indústria de manufatura. As formulações são baseadas em programação estocástica (Birge e Louveaux, 1997) e programação estocástica robusta (Mulvey et al., 1995), enquanto que os métodos são baseados em decomposição estocástica de Benders.

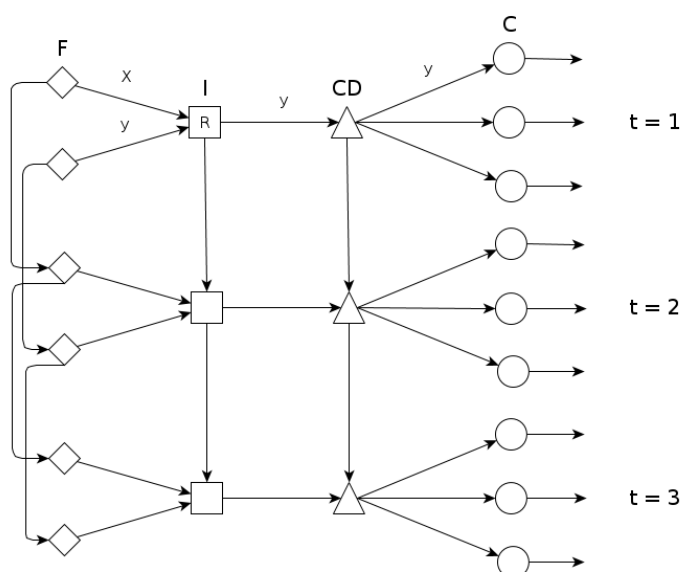


Figura 1.1: Rede expandida representa os períodos de planejamento

1.3.1 Objetivos específicos

Em resumo, os principais objetivos deste trabalho são:

1. Viabilizar a análise integrada do planejamento anual da cadeia de suprimentos.
2. Elaborar novas formulações contemplando os componentes descritos.
3. Elaborar formulações que abordem o problema estocástico.
4. Desenvolver métodos para resolver o problema estocástico de grande porte.
5. Avaliar a flexibilidade das formulações para casos genéricos.
6. Avaliar o desempenho computacional das formulações para casos genéricos.
7. Avaliar a aplicação da formulação e do método para um caso real.

1.4 Limitações

A modelagem do planejamento da cadeia de suprimentos possui escopos estratégicos, cujos desafios são apresentados em Shapiro (2004), táticos ou operacionais. Nossas formulações abordam decisões de nível tático. Adotamos a estrutura genérica de produtos para a lista de materiais (Cap.13 de Pochet e Wolsey (2006)), no entanto, apenas um subnível da estrutura é considerado. O adiamento da entrega (*backlogging*) não é considerado. Além disso, as rotas de produção de cada produto são pré-determinadas, evitando inserir decisões de sequenciamento, pois estas são relacionadas a decisões de nível operacional.

Nos problemas estocásticos, assumimos a independência dos parâmetros e consideramos variações de demanda e de valores financeiros como fonte de incerteza. Embora estas sejam as principais fontes de incerteza em cadeias de suprimentos (Gupta et al., 2000), outras incertezas podem existir, como: tempo de suprimento, de entrega, *lead time* de produção, entre outros.

1.5 Delineamento do trabalho

Este trabalho está organizado na seguinte forma: O capítulo 1 apresenta a relevância, o contexto e uma formulação inicial do problema abordado, servindo de motivação para desenvolver novas formulações e métodos de solução.

A literatura sobre este tema é examinada no capítulo 2. Apresentamos uma revisão sobre modelos determinísticos e estocásticos, abordando com mais profundidade os temas de programação estocástica e otimização robusta para elaborar formulações para o problema estocástico. Estas, são apresentadas no capítulo 3. Reformulamos o modelo determinístico e elaboramos formulações por programação estocástica e programação estocástica robusta, tornando-os modelos logísticos de grande porte. Para resolvê-los, estudamos métodos de decomposição, apresentados no capítulo 4.

A eficiência dos métodos e formulações são avaliadas no capítulo 5 por um estudo computacional. Avaliamos, adicionalmente, a flexibilidade da cadeia, uma abordagem pouco explorada na literatura.

Finalmente, no capítulo 6, descrevemos um estudo de caso completo abordando a aplicação de programação estocástica para a elaboração do plano tático anual da cadeia de suprimentos de um grupo siderúrgico. O capítulo 7 conclui este trabalho com as considerações finais e sugestões de trabalho futuro.

Capítulo 2

Exame da Literatura

“Honest differences are often a healthy sign of progress.”

Mahatma Gandhi

Neste capítulo a literatura sobre o planejamento da cadeia de suprimentos é revisada. As seções são divididas de forma que em 2.1 é abordada a evolução do escopo de modelos de programação matemática para o planejamento da cadeia de suprimentos. Em 2.2 destacamos os modelos determinísticos e as estratégias de implantação destes na prática, enquanto que em 2.3 são analisados os modelos estocásticos e as técnicas recentemente adotadas para a análise e resolução desses problemas, como a programação estocástica e a otimização robusta.

2.1 Planejamento da cadeia de suprimentos

O termo planejamento da cadeia de suprimentos, introduzido por Christopher (1992), é um assunto que vem recebendo, desde então, a atenção de pesquisadores e do meio empresarial. A contribuição de modelos abrangentes de programação matemática implementados por meio de sistemas de apoio à decisão já influenciava estrategistas e profissionais de logística. Seu amplo escopo, no entanto, gerava dificuldades na definição eficiente dos seus componentes. Ainda assim, era (e ainda é) necessário reforçar aos novos praticantes que modelos matemáticos não substituem o fator humano na tomada de decisão (Shapiro et al., 1993).

Uma contribuição relevante que integra conceitos qualitativos e técnicos é encontrado em Stadtler (2005). A estrutura adotada nesta revisão é a base para o desenvolvimento de sistemas avançados de planejamento da cadeia de suprimentos. A abordagem qualitativa determina que a competitividade da cadeia de suprimentos é obtida pela combinação de atividades de integração e coordenação. Complementando este ponto

de vista, a abordagem técnica define o horizonte de planejamento e o elo da cadeia em que os modelos matemáticos devem abordar por meio de uma estrutura matricial.

Os modelos de planejamento da cadeia de suprimentos podem ser baseados tanto em programação matemática quanto em simulação. As duas alternativas são frequentemente avaliadas para auxiliar os tomadores de decisão, no entanto, o seu uso é dependente da atividade que se tem em mãos:

1. Modelos de programação matemática são usados para determinar uma configuração ótima, *a priori* desconhecida, adotando uma visão geral e agregada do processo.
2. Modelos baseados em simulação são usados para estudar a dinâmica detalhada da operação em uma configuração fixa sob condições de incerteza, permitindo avaliar medidas de desempenho com alto nível de acuracidade (Papageorgiou (2009) e Fahimnia et al. (2012)).

Focamos nosso estudo em modelos de programação matemática para o planejamento tático da cadeia de suprimentos. Estes, fornecem o poder analítico necessário para avaliar problemas complexos de planejamento. Por meio destes, cadeias de suprimento podem ser beneficiadas à medida em que as organizações passam a entender a dimensão de sua produção e logística mais profundamente e de forma integrada. Gerentes e profissionais da cadeia de suprimentos são bem munidos com ferramentas para construir alternativas viáveis de planejamento baseadas em critérios quantitativos e qualitativos, enquanto que os modelos de programação matemática devem ser usados para selecionar a melhor configuração dentre as alternativas, contribuindo assim, com a melhoria do desempenho das indústrias. (Shapiro et al. (1993), Geoffrion e Powers (1995), Vidal e Goetschalckx (1997) e Prajogo e Sohal (2013)).

O desempenho de “classe mundial” é obtido quando o planejamento da cadeia contempla, tanto os elementos da rede, quanto os componentes individuais das indústrias. Neste setor, as indústrias de processo estão entre as mais estudadas, como visto em Shah (2005) e Papageorgiou (2009). Estas revisões discutem o estado da arte envolvendo projeto de rede, modelagem e análise da cadeia de suprimentos apontando oportunidades de melhorias, como por exemplo, pela integração de cadeias com abrangência global.

Cadeias globais de valor é um conceito que ganha popularidade com a expansão geográfica e a internacionalização de cadeias de suprimento (Gereffi e Lee, 2012). Os ganhos obtidos por meio da modelagem matemática destes problemas estão na criação de valor pelo redesenho da cadeia. Formulações sofisticadas associadas aos avanços em métodos e *softwares* viabilizam a implantação customizada destes modelos por meio

de sistemas avançados de planejamento (Stadtler, 2005) ou sistemas especialistas de apoio à decisão, como descrito em Roy e Dasgupta (2014) e Gupta et al. (2014).

A integração dos modelos de otimização de uma cadeia é denominada *Enterprise Wide Optimization* (EWO). Os avanços recentes relacionados à elaboração de modelos EWO são apresentados em Grossmann (2012). Embora sistemas comerciais e genéricos de planejamento avançado - *Advanced Planning Systems* (APS) sejam robustos, como descrito em Kallrath e Maindl (2006) e Rudberg e Cederborg (2011), há uma forte tendência em desenvolver sistemas especialistas customizados às necessidades específicas de cada cadeia de suprimentos, dada a flexibilidade dos sistemas de modelagem matemática.

A elaboração de modelos integrados de EWO é um desafio, e tem sido abordado por técnicas como a programação multi-nível combinado com programação paramétrica (Ryu et al., 2004). Grossmann (2012), entretanto, ressalta que a otimização de toda cadeia de suprimentos ainda é uma limitação, principalmente quando se busca integrar decisões de dimensionamento de lotes e sequenciamento. A dificuldade ocorre devido à característica complexa do modelo resultante e dos componentes operacionais, que são particulares de cada cadeia. Além disso, é preciso coordenar as atividades de toda cadeia de forma integrada.

A atividade de coordenar plantas descentralizadas, fornecedores e centros de distribuição não é uma tarefa fácil. Stadtler (2005) e Navid e Ismaeli (2012) alertam que, se membros de uma companhia relutam em compartilhar os dados para alimentar o banco de dados do modelo, o planejamento mestre da cadeia de suprimentos se torna impossível. Neste contexto, destacamos que as técnicas de modelagem matemática são fatores de integração e contribuem para se obter coordenação. Modelos matemáticos de planejamento da cadeia de suprimentos podem ser determinísticos ou estocásticos.

2.2 Modelos determinísticos

Modelos determinísticos de planejamento da cadeia de suprimentos buscam a minimização dos custos, o aumento da fatia de mercado, a melhoria da responsividade operacional, dentre outros objetivos. Estes modelos podem ser estratégicos, táticos ou operacionais.

Modelos estratégicos abordam o projeto da cadeia, o planejamento multi-nível de longo prazo, a realocação de facilidades e o planejamento de capacidade. Modelos de planejamento tático abordam o planejamento multi-período de médio prazo por meio do dimensionamento de lotes integrado ao planejamento do transporte. Finalmente, o planejamento operacional da cadeia aborda decisões de curto ou curtíssimo prazo

envolvendo a programação da produção integrado ao sequenciamento do despacho de caminhões e roteamento de veículos.

Discussões como a de Geoffrion e Powers (1995), Vidal e Goetschalckx (1997), Beamon (1998) e Min e Zhou (2002) abordam tanto a evolução da formulação de modelos logísticos estratégicos, quanto a valorização da logística como uma função corporativa. Neste contexto, o planejamento de redes multinacionais é explorado por revisões, como a de Schmidt e Wilhelm (2000) e Shapiro (2004), e por estudos de caso, como o de Fleischmann et al. (2006), que elaboram um modelo de planejamento da cadeia global de suprimentos da BMW por um horizonte de 12 anos.

Um recente estudo elaborado por Martínez-Costa et al. (2014) classifica os problemas estratégicos de planejamento dinâmico de capacidade em empresas de manufatura. Para agilizar a customização e implantação, sugere-se o foco no desenvolvimento de modelos genéricos para indústrias de setores específicos, considerando os elementos relevantes dos mesmos.

Dentre os casos reais que envolvem a implantação de modelos de planejamento *estratégico* da cadeia de suprimentos, destacamos: a reestruturação da cadeia global de suprimentos de uma rede pioneira de computadores dos Estados Unidos (Arntzen et al., 1995); o desenvolvimento de um método de decomposição para projetar cadeias de produção-distribuição em uma indústria de embalagens (Goetschalckx et al., 2002); a formulação genérica para o planejamento de redes de suprimentos de uma indústria química (Kallrath, 2002); a elaboração de um sistema de planejamento da capacidade da rede de suprimentos de gás natural na Noruega (Rømo et al., 2009); a determinação da quantidade e localização ótima de facilidades em uma indústria siderúrgica (Conceição et al., 2012); o aumento da sustentabilidade da cadeia do bioetanol pela alocação de refinarias processadoras de biomassa (Zhang et al., 2013); a análise do impacto no redesenho de uma rede de suprimentos quando impostos inter-estaduais são aplicados aos produtos de uma indústria petroquímica (Frias et al., 2014); o projeto da cadeia do petróleo considerando a produção de refinarias locais (Fernandes et al., 2014) e o projeto de uma cadeia de processamento de biomassa da palmeira por meio da agregação de *clusters* de recursos com características semelhantes (Ng e Lam, 2014).

Em problemas determinísticos de planejamento *tático* da cadeia de suprimentos, uma atenção especial é dada a estudos de casos com destaque às suas contribuições e novidades. Alguns exemplos envolvem: o planejamento anual da produção e distribuição em uma indústria de vidros planos automotivos (Martin et al., 1993); o planejamento integrado da montagem de computadores por meio de um sistema capacitado multi-nível (Escudero, 1994); o planejamento integrado de produção e distribuição em uma siderúrgica canadense (Chen e Wang, 1997) e a elaboração de uma formulação genérica para a gestão da cadeia de uma indústria de processos químicos (Timpe e

Kallrath, 2000).

Estes problemas podem se tornar complexos quando restrições intrínsecas de operações são implementadas inviabilizando a sua resolução computacional em tempo hábil. Para isso, alguns autores elaboram abordagens interativas como a decomposição do problema original em problemas distintos de produção e distribuição, como em Park (2005), Ekşioğlu et al. (2006) e Piewthongngam et al. (2012).

Modelos de planejamento *operacional* da cadeia de suprimentos resultam da adição de restrições de sequenciamento em modelos estratégicos ou táticos, portanto, não são genéricos. Alguns exemplos industriais envolvem: a elaboração de um modelo hierárquico que considera tanto restrições estratégicas de mercado quanto restrições operacionais de rota de fabricação e de balanço de oxigênio para a indústria siderúrgica indiana Tata Steel (Sinha et al., 1995); a decomposição de um modelo integrado da cadeia de celulose de uma indústria sueca em dois modelos independentes (Bredstrom e Ronnqvist, 2002); a elaboração de um modelo que combina a operação de mistura e o transporte de grãos a granel para uma empresa que gerencia a cadeia de suprimentos do trigo (Bilgen e Ozkarahan, 2007) e a inclusão de decisões de sequenciamento em um modelo integrado de produção e distribuição para a produção semi-contínua na indústria de alimentos na Grécia (Kopanos et al., 2012). Problemas como estes, contêm restrições tanto de dimensionamento de lotes quanto de sequenciamento e são difíceis de serem resolvidos computacionalmente.

Recentemente Meyr e Mann (2013) adotaram uma abordagem por decomposição para a resolução do problema geral de dimensionamento de lotes e sequenciamento simultâneo em linhas paralelas de produção. A decomposição pode ser adaptada aos problemas de planejamento operacional da cadeia de suprimentos, no entanto, a estratégia não elimina por completo a complexidade do problema.

Por outro lado, estudos como Min e Zhou (2002), Stadtler (2005), Kallrath e Maindl (2006) apontam que o planejamento operacional da cadeia de suprimentos pode ser simplificado e obtido sob forma de módulos em APS ou sistemas de apoio à decisão (Roy e Dasgupta, 2014). Nestes sistemas, as restrições do modelo operacional são desvinculadas de modelos estratégicos ou táticos. A capacidade operacional disponível para elaborar o sequenciamento é predeterminado pelo módulo do nível superior. No entanto, é preciso considerar o *trade-off* entre a qualidade da solução e o tempo de se obter os planos. Além disso, a coordenação é impactada por atividades de replanejamento, pois modelos determinísticos podem ter seus parâmetros alterados frequentemente.

Wallace (2000) e Higle (2005) alertam que, diante de cenários incertos, as estratégias de replanejamento e de otimização paramétrica não são as mais adequadas. O que elas fazem são previsões do que acontecerá diante de cenários de *certeza*. Portanto, em otimização, a abordagem adequada da incerteza deve ser feita por modelos estocásticos.

2.3 Modelos estocásticos

A necessidade de considerar a incerteza nos parâmetros da cadeia de suprimentos tem sido amplamente reconhecida por conferir flexibilidade aos modelos de programação matemática. Por outro lado, a consideração da incerteza pode tornar os problemas de planejamento da cadeia de suprimentos de grande porte e difíceis de serem resolvidos. Além disso, a flexibilidade, resultante de abordagens alternativas de suprimento, manufatura e logística, embora desempenhe um papel estratégico nestes sistemas, ainda tem sido pouco discutida (Esmailikia et al., 2014).

O problema de planejamento da cadeia de suprimentos tem sido abordado por programação bi-nível (Ryu et al. (2004) e Roghanian et al. (2007)), por programação multi-objetivo (Mirzapour Al-E-Hashem et al. (2011) e Biswal e Acharya (2013)), por reformulação e otimização de cones de segunda ordem (Ang et al., 2014), por programação estocástica ou por otimização robusta.

Exploramos as técnicas de programação estocástica e de otimização robusta para avaliar a flexibilidade dos modelos propostos. Estas estratégias têm recebido a atenção tanto do meio científico quanto do meio empresarial, como visto na revisão de Gabrel et al. (2014) e no estudo de caso de Ye et al. (2014).

2.3.1 Programação estocástica

A ideia inicial de incorporar incerteza em modelos de programação matemática surge em Dantzig (1955), que busca capturar o comportamento dinâmico de aplicações do mundo real. Desde então, um tremendo progresso em direção ao entendimento das propriedades da programação estocástica e sua relação com modelos de planejamento tem ocorrido (Birge, 1997), (Birge e Louveaux, 1997), (Wallace, 2000), (Higle, 2005), (Mula et al., 2006) e (Sodhi e Tang, 2009).

Os modelos de programação estocástica podem ser representados por problemas mono e multi-estágios. Os problemas mono-estágio, como em Awudu e Zhang (2013), envolvem a formulação por cenários. Estes requerem as previsões de todas as possíveis realizações de um parâmetro incerto e buscam minimizar o valor esperado da função objetivo. São justificáveis quando a variação das decisões não impactam fortemente seu valor final (Mulvey et al., 1995). Em problemas multi-estágio as atividades do primeiro estágio são as únicas determinadas. As atividades dos estágios subsequentes, portanto, dependem de resultados aleatórios realizados.

O conceito de estágio em cadeias de suprimentos descentralizadas é introduzido por Clark e Scarf (1960). Sua essência consiste em transferir a demanda do cliente final diretamente aos estágio da cadeia de forma que a informação final não seja distorcida.

Modelos estocásticos, além de adotarem o conceito de estágios, também são baseados em cenários, por isso, usam o princípio de não antecipação (Rockafellar e Wets, 1991). Este princípio define que, se dois cenários diferentes são idênticos até um período em termos de informação, então a variável de decisão relacionada indexada no período deve ser idêntica até aquele período (Escudero et al., 1999). Dessa forma, problemas multi-estágio podem apresentar uma quantidade de cenários muito expressiva tornando o problema intratável computacionalmente.

Na literatura, um destaque maior é dado a problemas envolvendo dois estágios. Em abordagens como em Gupta et al. (2000) e Gupta e Maranas (2003) o planejamento da cadeia de suprimentos sob demanda incerta pode ser decomposto em duas fases distintas: manufatura e logística. Variáveis relacionadas à manufatura são de primeiro estágio, caracterizadas por decisões “aqui e agora” enquanto que decisões de estocagem e logística são postergadas para o segundo estágio em um formato “espera para ver”. Assim, as decisões logísticas são postergadas após a realização da demanda.

A programação estocástica por dois estágios também é abordada em Santoso et al. (2005) para projetar cadeias de suprimentos sob incerteza e em Bashiri e Rezaei (2013) para planejar a realocação de armazéns da cadeia de suprimentos em um ambiente de custos operacionais, capacidade de produção e demanda incertos. Baseado no trabalho de Santoso et al. (2005), Bihlmaier et al. (2009) apresentam uma formulação determinística e estocástica para elaborar o projeto estratégico da cadeia de suprimentos de uma indústria automotiva. O modelo permite lidar com centenas de cenários. No entanto, a incerteza é considerada apenas no parâmetro de demanda. A decomposição de Benders e as abordagens de aceleração utilizadas são mais eficientes que a formulação padrão expandida quando o número de cenários é maior que 20.

A logística reversa é abordada em Litvinchev et al. (2014). Neste trabalho uma formulação estocástica de dois estágios determina o planejamento de uma cadeia de suprimentos fechada. Busca-se determinar locais de centros de distribuição e de facilidades de remanufatura através da determinação de preços de compra e da quantidade ótima de bens retornáveis a ser adquirida.

Estudos de caso abordando o planejamento da cadeia de suprimentos por programação estocástica envolvem: o setor automotivo (Escudero et al., 1999), (Bihlmaier et al., 2009); o planejamento de capacidade no setor de mineração (Pimentel et al., 2011); o mercado global de gás natural (Egging, 2013) o planejamento em indústrias do setor de eletroeletrônicos (Chen et al., 2014); o setor de segurança pública de emergências, como abordado em Kelle et al. (2014); o projeto e planejamento de uma cadeia do biodiesel (Marufuzzaman et al., 2014); o setor de motores elétricos (Rodriguez et al., 2014); o planejamento da cadeia do petróleo (Oliveira et al., 2014); de indústrias de processos (You e Grossmann, 2013), (McLean, 2014), (Gupta et al., 2014).

2.3.2 Programação estocástica robusta

A otimização robusta, inicialmente considerada em Soyster (1973) e Falk (1976), surge como uma proposta alternativa ao uso de análises de sensibilidade, que são estudos pós-otimalidade *reativos* incapazes de avaliar o impacto da incerteza nos dados. Dessa maneira, a modelagem robusta surge para viabilizar análises de forma *proativa* e menos sensível aos dados do modelo (Mulvey et al., 1995), (Ben-Tal e Nemirovski, 1998).

O paradigma, sob a ótica da otimização robusta convexa, é um tipo de programa linear estocástico, cuja solução do problema fornece uma estratégia ultra-conservadora (Ben-Tal e Nemirovski, 1999), (Ben-Tal e Nemirovski, 2000), (Ben-Tal et al., 2009). Desta forma, busca-se uma solução ótima contra a pior realização da função objetivo. Os parâmetros são descritos como um conjunto de possíveis cenários, ao invés de estimativas probabilísticas presentes nos modelos de programação estocástica. A função robusta não muda a complexidade do problema original (Bertsimas e Sim, 2004).

A otimização robusta é geralmente avaliada por dois critérios básicos: solução robusta e modelo robusto. Um modelo de programação matemática robusta possui solução robusta se ela é “próxima” ao ótimo de todos os cenários de entrada. Um modelo é dito robusto se ele se mantém “quase” viável para todos os cenários (Mulvey et al., 1995). As formulações podem ser elaboradas por programação matemática, otimização não-linear, métodos de busca direta ou evolucionários (Beyer e Sendhoff, 2007).

O planejamento da cadeia de suprimentos é favorecido pela otimização robusta quando se busca agilidade em sistemas que precisam lidar com incertezas de várias naturezas (Yu e Li, 2000). Estas podem estar relacionadas à logística reversa (Pishvae et al., 2011) ou sistemas de manufatura *Build to Order* (BTO) (Lalmazloumian et al., 2013), em que as atividades de produção são ativadas somente após os pedidos dos clientes. Sistemas BTO combinam características dos sistemas *Make to Stock* (MTS) e *Make to Order* (MTO), pois fabricam componentes comuns às famílias de produtos com base em previsões de curto prazo, enquanto que os produtos finais customizados são produzidos após a confirmação do pedido do cliente. Estes sistemas viabilizam economias de escopo, ao invés de economias de escala.

O planejamento tático por otimização robusta e por programação estocástica robusta envolvem: usinas do setor sucroenergético (Paiva e Morabito, 2011), a produção e corte de estoque em fábricas de móveis (Alem e Morabito, 2013) e a indústria cítrica (Munhoz e Morabito, 2014). A literatura sobre os modelos aponta que não importa o quão rápido os computadores se tornem ou o quanto a tecnologia dos *solvers* evoluam, as formulações e os métodos de resolução continuarão sendo caracterizadas como a combinação de arte e ciência. Assim, as escolhas da modelagem e soluções devem ser feitas com atenção de forma a cumprir os objetivos originalmente propostos.

Capítulo 3

Novas Formulações

"If people do not believe that mathematics is simple, it is only because they do not realize how complicated life is."

John von Neumann

Neste capítulo, são apresentadas novas formulações para o problema de planeamento tático da cadeia de suprimentos em indústrias de manufatura. Uma nova formulação é apresentada na seção 3.1. Na seção 3.2, reescrevemos o modelo original tornando-o mais compacto. Dessa forma, viabilizamos a elaboração de modelos estocásticos de grande porte. As características de decisão abordadas no modelo são ilustradas e discutidas com detalhe na seção 3.3 por meio de um exemplo numérico. Em 3.4, são apresentadas formulações por programação estocástica. Discutimos as estratégias de formulação por cenários e por dois-estágios. Finalmente, na seção ??, elaboramos uma formulação por otimização robusta.

Os modelos integram decisões de suprimento, produção e distribuição no médio prazo e consideram quatro elos da cadeia: fornecedores, fábricas, centros de distribuição e clientes. O modelo aborda políticas de fluxos de materiais determinando: (i) a ocupação de máquinas e de armazéns, (ii) o dimensionamento de lotes e estoques e (iii) o volume de matérias-primas e produtos acabados transportados por diferentes modais entre fornecedores, fábricas, centros de distribuição e clientes.

As formulações são baseadas em uma configuração existente viável da cadeia de suprimentos, previamente determinada. Determinar as possíveis configurações da cadeia de suprimentos é um problema por si só, que não é o foco deste trabalho. O modelo considera algumas características como: lista de materiais com estrutura genérica de produto, decisões de produzir ou comprar e decisões de desativar ou ativar operações produtivas.

Representamos uma cadeia de suprimentos como apresentado na figura 3.1. Esta é formada pelo conjunto de \mathcal{F} fornecedores, \mathcal{I} plantas industriais, \mathcal{H} centros de dis-

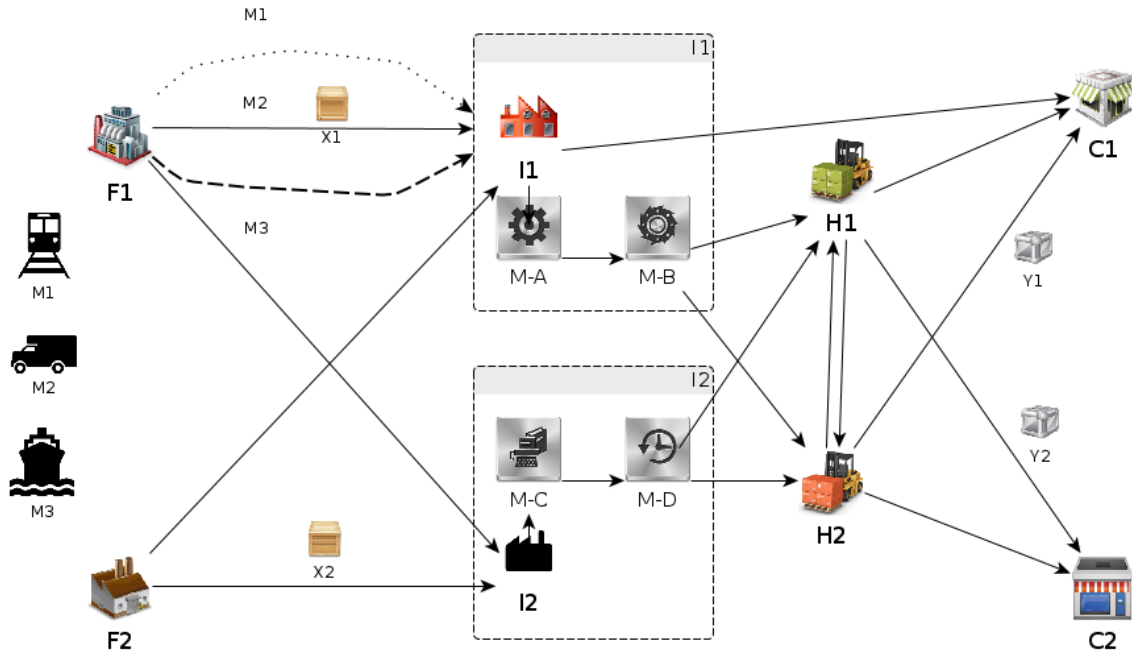


Figura 3.1: Cadeia de suprimentos com quatro elos

tribuição e \mathcal{C} clientes. Ao longo de \mathcal{T} meses, \mathcal{X} matérias-primas são transportadas de \mathcal{F} fornecedores a \mathcal{I} indústrias. Nestas, as matérias-primas são processadas seguindo um roteiro tecnológico em \mathcal{R} máquinas, resultando em \mathcal{Y} produtos acabados. O transporte dos fornecedores às plantas industriais e destas aos centros de distribuição e/ou clientes é feito por \mathcal{M} modais. Consideramos $\mathcal{L} = \mathcal{F} \cup \mathcal{I} \cup \mathcal{H} \cup \mathcal{C}$ locais e $\mathcal{P} = \mathcal{X} \cup \mathcal{Y}$ produtos. Os conjuntos de produtos, locais, recursos e modais são indexados por p, l, r e m , respectivamente.

3.1 Formulação determinística

Apresentamos uma formulação determinística do nosso modelo de planejamento tático da cadeia de suprimentos. Adotamos **PTCS-D** (Planejamento Tático da Cadeia de Suprimentos - Determinístico) para sua nomenclatura. São consideradas diferentes funções de planejamento do suprimento, produção e distribuição.

A formulação genérica segue a estrutura (3.1)–(3.4):

$$\min c^\top x + f^\top z \quad (3.1)$$

$$Ax + Bz \geq b \quad (3.2)$$

$$x \geq 0 \quad (3.3)$$

$$z \in \mathbb{Z}^+ \quad (3.4)$$

O modelo de planejamento da cadeia de suprimentos, também referido como coordenação multi-planta por Vidal e Goetschalckx (1997) e Kopanos et al. (2012), relaciona simultaneamente a demanda, a produção, os estoques e o transporte, respeitando a capacidade de produção, de armazenamento, de transporte e os níveis de estoques de segurança. O plano produção é integrado a um único plano de suprimentos e distribuição. Como resultado, obtemos o nível de serviço aos clientes, a produção anual detalhada por mês e um plano de transporte, que determina o volume transportado por modal logístico entre cada elemento da cadeia.

Assumimos algumas hipóteses: os custos de transporte não dependem de um componente específico ou produto acabado, pois estes custos são proporcionais à distância de origem ao destino. Linhas de manufatura possuem a capacidade expressa em horas/mês. A necessidade de recursos para manufaturar um produto específico em uma linha de produção particular é conhecida e expressa em horas/unidade. O custo médio constante do produto é conhecido. Os custos de *setup* são rateados, ou seja, estão inclusos no custos variáveis de fabricação de componentes. O custo de manufatura contém os custo de controle de qualidade. Canais de transporte possuem a capacidade de atravessamento expressa em unidades de peso. Custos de estoque nos fornecedores não são considerados nesse modelo.

Os níveis de estoque nos armazéns e centros de distribuição ao final de cada período equivalem à diferença entre o fluxo de saída e fluxo de entrada de produtos em cada período. O acúmulo de estoque da rede de distribuição facilita o atendimento da demanda, no entanto, o atendimento integral da demanda não é uma necessidade, pois o volume demandado pode ser maior que a capacidade de produção ou transporte. Nesse caso, o atendimento da demanda pode ser mais custoso que lucrativo. Sob este aspecto, o modelo auxilia a estratégia apontando combinações produto-cliente não lucrativas.

O modelo proposto nos permite responder perguntas de um plano diretor, do tipo: (i) Quando e quanto comprar de matéria-prima em cada fornecedor? (ii) Qual produto acabado deve ser comprado diretamente do fornecedor? Em que quantidade? (iii) Quanto produzir e estocar em cada mês e onde? (iv) Qual deve ser a utilização ideal de cada máquina? (v) Quanto deve ser produzido em cada planta industrial? (vi) Quanto transportar em cada rota e modal? (vii) Quanto armazenar de cada produto nos centros de distribuição? (viii) Qual o nível de serviço ideal para cada cliente? (ix) Qual o impacto de uma decisão no custo global da cadeia? A rede, representada pela Figura 3.1 possui quatro elos. Seus dados são apresentados na Tabela 3.1.

Parâmetros de entrada

W_t	: Peso associado à demanda em t para curto, médio e longo prazo
D_{tpc}	: Demanda no período t do produto p e cliente c
T_{lrp}^R	: $\in \{0, 1\}$: Rota técnica do produto p nas máquinas r da planta industrial l
$B_{p'p}$: Quantidade de matéria-prima p' necessária para produzir um produto p
M_{lrp}^C	: Tempo unitário que o produto p consome na máquina r da planta l
E_{lrt}^F	: Eficiência da máquina r na planta l e período t
A_t^H	: Horas disponíveis em cada período t
A_{lrt}^X	: Horas extras disponíveis na máquina r da planta l no período t
L_{lp}^M	: Tamanho do lote do produto p no local l
P_{lrt}^M	: Horas de manutenção preventiva para a máquina r da planta l e período t
S_{lpt}^S	: Estoque de segurança do produto p no local l e período t
S_{lpt}^X	: Capacidade de estocagem do produto p no local l e período t
A_{lpt}^R	: Disponibilidade de matéria prima p no fornecedor l no período t
S_{lp}^0	: Estoque inicial do produto p no local l
Y_{lr}	: Rendimento de matéria prima na máquina r e planta l
N_{lr}^M	: Quantidade de máquinas do tipo r na planta l
$T_{mll'}^C$: Capacidade de transporte do local l para l' pelo modal m
C_{ht}^I	: Capacidade de manuseio <i>inbound</i> do centro de distribuição h e período t
C_{ht}^O	: Capacidade de manuseio <i>outbound</i> do centro de distribuição h e período t
R_p	: Receita por venda de produto acabado p
C_{lr}^F	: Custo fixo produção da máquina r na planta industrial l
C_{lp}^V	: Custo variável de produção do produto p na planta industrial l
C_{lr}^X	: Custo de capacidade extra na máquina r na planta industrial l
C_{lp}^S	: Custo unitário de estoque do produto p na planta industrial l
$C_{mll'}^L$: Custo unitário de transporte pelo modal m do local l para o local l'
C_{lp}^P	: Custo unitário de aquisição da matéria prima x no fornecedor l
T_{lp}^X	: Imposto sobre produto vendido p ao cliente l

Variáveis de decisão

α_{lpt}	: $\in \mathbb{Z}^+$: Produção do produto p no local l e período t
a_{lrpt}	: Produção do produto p na máquina r , planta l e período t
b_{lpt}	: Consumo de matéria prima x no local l e período t
s_{lpt}	: Estoque no local l do produto p ao final do período t , $s_{lp0} = S_{lp}^0$
d_{lpt}	: Demanda atendida do produto p no local l e período t
n_{lpt}	: Demanda não atendida do produto p no local l e período t
r_{lpt}	: $\in \mathbb{Z}^+$: Compra de lotes de matéria prima x no local l e período t
$t_{mll'pt}$: Quantidade do produto p transportado no modal m de l para l' em t
c_{lrt}	: Capacidade consumida da máquina r da planta industrial l e período t
c'_{lrt}	: Percentual da capacidade extra consumida para a máquina r da planta l em t
y_{lrt}	: $\in \{0, 1\}$: Decisão de ativar ou não a máquina r da planta l no período t

Tabela 3.1: Parâmetros e variáveis da formulação determinística PTCS-D

O problema é formulado como segue. A função objetivo (3.5) maximiza o lucro operacional. Ela é obtida como a diferença da receita, após dedução dos impostos, e custos de aquisição, produção, estoque e transporte. Os custos são compostos por uma parcela fixa e variável. Os custos fixos são relacionados à ativação de operações nos períodos. Os custos variáveis são relacionados à aquisição, produção, uso de capacidade extra, estoque, logística e entrega. A linearidade da função objetivo neste modelo de planejamento é consistente com a prática de negócios de empresas de manufatura.

Adicionalmente, considera-se um peso W_t complementar. Este pode ser usado quando se adota a estratégia de planejamento por horizontes rolantes (descrita na sub-seção 1.1.3) favorecendo o atendimento no curto prazo. Os valores de W_t são parametrizáveis e podem ser ajustados de acordo com a estratégia de planejamento de cada empresa. Avaliamos esta abordagem a mais adequada do ponto de vista econômico.

$$\begin{aligned} \max \mathcal{Z} = 1/W_t & \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} (R_p - T_{lp}^X) d_{lpt} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{L}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{ml'p}^L t_{ml'pt} - \right. \\ & \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lr}^F y_{lrt} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^V \alpha_{lpt} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^P r_{lpt} - \\ & \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^S s_{lpt} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lr}^X c'_{lrt} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Os estoques iniciais de matérias-primas e produtos acabados são avaliados nas indústrias e centros de distribuição e representados pela restrição (3.6). Os volumes estocados de matérias-primas e de produtos acabados devem respeitar os níveis de estoque de segurança e não exceder os limites de capacidade de armazenamento destes locais, como descrito em (3.7). Em modelos de otimização de planejamento da cadeia de suprimentos, o estoque no último período é zero ou atende ao limite do estoque de segurança (Fleischmann et al., 2006). Por isso, é necessário que seu valor seja ajustado a um valor próximo ao estoque cíclico e acordado com a empresa, permitindo, assim, o planejamento por horizonte rolante. A compra mensal de lotes de matérias-primas ou produtos acabados deve respeitar a disponibilidade destes nos fornecedores (3.8).

$$s_{lpt} = S_{lp}^0 \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t = 0 \quad (3.6)$$

$$S_{lpt}^S \leq s_{lpt} \leq S_{lpt}^X \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.7)$$

$$L_{lp}^M r_{lpt} \leq A_{lpt}^R \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.8)$$

As equações de balanço de fluxo (3.9) integram as diferentes partes do problema. O final de cada período é conectado pela soma de fluxos de entrada e saída, logo, o transporte desses produtos não é permitido se o produto não chegar ao destino dentro do horizonte planejado. Os fluxos de entrada e saída ocorrem para cada local, produto e período. O fluxo de entrada é representado pelo transporte de matérias-primas ou produtos acabados proveniente do elo anterior da cadeia, pela produção em lotes de produtos acabados, pelo nível de estoque ao final do período anterior e a compra externa de lotes de matérias-primas ou produtos acabados. Os estoques são relativos ao final de cada período t . No início do planejamento, a variável de estoque assume o valor do estoque inicial, ou seja $s_{lpt} = S_{lp}^0$. O fluxo de saída é o resultado do balanço de transporte de itens para o elo subsequente da cadeia, pelo atendimento da demanda, pelo volume de estoque ao final do período t e pelo consumo de matéria-prima p no processo produtivo.

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{L}} t_{ml'lpt} + L_{lp}^M \alpha_{lpt} + s_{lpt-1} + L_{lp}^M r_{lpt} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{L}} t_{mll'pt} + d_{lpt} + s_{lpt} + b_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in 1..|\mathcal{T}| \quad (3.9)$$

As capacidades mensais de manuseio de produtos acabados de entrada e saída (*inbound* e *outbound*) dos centros de distribuição são representados pelas restrições (3.10) e (3.11), respectivamente.

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{L}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{ml'lpt} \leq C_{lt}^I \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in \mathcal{T} \quad (3.10)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{L}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'pt} \leq C_{lt}^O \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in \mathcal{T} \quad (3.11)$$

O volume produzido em cada processo depende da rota e do tempo unitário de produção de cada item. A equação (3.12) descreve este consumo de capacidade. Manter um processo ativado em momentos de baixa demanda pode incorrer em custos fixos de operações desnecessários. No planejamento da cadeia de suprimentos os períodos são representados por meses. Dessa forma, decisões relacionadas a desativação de processos em determinados períodos são de natureza tática pois envolvem tanto a redução de despesas fixas de operação e manutenção, quanto atividades de realocação de equipes.

Uma máquina ou processo possui a capacidade de produção medida em tempo total disponível para produção. Nestes períodos, máquinas podem estar ativadas ou não. Se ativadas, sua capacidade pode ser modificada por manutenções preventivas programadas, eficiência operacional ou rendimento da matéria prima, como representado pela

restrição (3.13). Caso seja lucrativo, a decisão de consumir horas extras pode ser uma alternativa viável. O uso desta capacidade extra incorre em custos extras, que são contemplados na função objetivo. Seu valor, no entanto, é limitado pela disponibilidade programada pela empresa. Além disso, a capacidade extra só pode ser ativada caso haja produção no período. Essa condição é formulada pela equação (3.14).

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} a_{lrpt} M_{lrp}^C = c_{lrt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.12)$$

$$c_{lrt} \leq [(A_t^H N_{lr}^M - P_{lrt}^M)(E_{lrt}^F Y_{lr}) y_{lrt} + c'_{lrt} A_{lrt}^X] \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.13)$$

$$c'_{lpt} \leq y_{lrt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.14)$$

Em cada planta industrial, considera-se produto acabado o item produzido na última máquina da rota técnica como descrito em (3.15).

$$a_{lrpt} T_{lrp}^R = L_{lp}^M \alpha_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.15)$$

A restrição de consumo de matéria-prima segundo a lista de materiais (3.16) estabelece que cada produto acabado é resultado da combinação de matérias-primas em diferentes proporções.

$$b_{lp't} = \sum_{p \in \mathcal{Y}} B_{p'p} L_{lp}^M \alpha_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p' \in \mathcal{X}, t \in \mathcal{T} \quad (3.16)$$

O volume transportado não deve exceder a capacidade de cada modal, como descrito em (3.17).

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} t_{mll'pt} \leq T_{mll'}^C \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T} \quad (3.17)$$

As restrições (3.18) representam as demandas atendidas e estabelecem que, eventualmente, parte da demanda original não é atendida.

$$d_{lpt} = D_{tpc} - n_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T} \quad (3.18)$$

As restrições (3.19)–(3.28) determinam as condições de operação da cadeia de suprimentos. Em (3.19) e (3.20) a produção é permitida somente em plantas industriais e para produtos acabados. Em (3.21) determinamos que, em cada planta, somente matérias-primas podem ser convertidas em produto acabado. Em (3.22) o transporte

de matérias primas só deve ocorrer dos fornecedores às plantas, onde estas devem ser consumidas. As restrições (3.23) estabelecem que o estoque de produto acabado não pode ocorrer em fornecedores nem clientes, somente em fábricas e centros de distribuição, enquanto que em (3.24), temos que matérias-primas podem ser armazenadas somente nos fornecedores e plantas. O armazenamento de qualquer produto ou matéria prima nos clientes não é permitido. Em (3.25)–(3.26) determinamos os fluxos de transporte que não são permitidos. A restrição (3.25) determina que o transporte de matéria prima ocorre apenas de fornecedores para plantas industriais. Produtos acabados podem ser eventualmente adquirido por fornecedores e transportado de plantas para os clientes, plantas para os centros de distribuição ou dos centros de distribuição para os clientes. Não é permitido o transporte de produtos ou matérias primas para mesma origem e destino, como representado pelas equações (3.26). Em (3.27) determinamos que a demanda deve ser atendida apenas para produtos acabados e nos clientes. Em (3.28) determinamos que a compra de matérias-primas ou eventualmente, produtos acabados, é permitida somente nos fornecedores. O domínio das variáveis é representado pelas restrições (3.29)–(3.34). O problema inteiro-misto considera lotes múltiplos de suprimento e de produção, além de considerar a possibilidade de desativar operações ao longo do período de planejamento.

Sob algumas condições, no entanto, a formulação linear ou uma versão relaxada deste problema pode ser utilizada. Empresas sob condições similares ao caso da Toyota (Womack et al., 2008) nas décadas de 1950 e 1960 no Japão pós-guerra, formadas por infraestruturas de baixo custo operacional, com fornecedores próximos e flexíveis, podem ter o planejamento de suas cadeias modelado por uma formulação linear. Isso porque o custo fixo de ativação ou desativação, representado pela variável binária y_{prt} , é muito pequeno se comparado ao custo total da cadeia. Além disso, a proximidade e a flexibilidade oferecida pelos fornecedores viabiliza a negociação do tamanho de lotes de matéria prima e produto acabado. Portanto, para esses casos, podemos desconsiderar a variável binária y_{prt} e relaxar as variáveis inteiras r_{lpt} e α_{lpt} . Esta condição, no entanto, não é a mais comum entre as empresas.

$$\alpha_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L} \setminus \mathcal{I}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.19)$$

$$\alpha_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{P} \setminus \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T} \quad (3.20)$$

$$b_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{P} \setminus \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T} \quad (3.21)$$

$$b_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L} \setminus (\mathcal{F} \cup \mathcal{I}), p \in \mathcal{P} \setminus \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T} \quad (3.22)$$

$$s_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L} \setminus (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P} \setminus \mathcal{X}, t \in \mathcal{T} \quad (3.23)$$

$$s_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L} \setminus (\mathcal{F} \cup \mathcal{I}), p \in \mathcal{P} \setminus \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T} \quad (3.24)$$

$$t_{mll'pt} = 0 \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H} \cup \mathcal{C}), p \in \mathcal{P} \setminus \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T} \quad (3.25)$$

$$t_{mll'pt} = 0 \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \mid l = l' \quad (3.26)$$

$$d_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L} \setminus \mathcal{C}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.27)$$

$$r_{lpt} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L} \setminus \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.28)$$

$$b_{lpt}, s_{lpt}, d_{lpt}, n_{lpt} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.29)$$

$$\alpha_{lpt}, r_{lpt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.30)$$

$$a_{lrpt} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.31)$$

$$t_{mll'pt} \geq 0 \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.32)$$

$$y_{lrt} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.33)$$

$$0 \leq c'_{irt} \leq 1 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.34)$$

3.2 Reformulação

Nesta seção o modelo **PTCS-D** é reescrito. Adotamos **PTCS-R** (Planejamento Tático da Cadeia de Suprimentos - Reformulado) para sua nomenclatura. Embora a relaxação linear de PTCS-R não seja mais ajustada que o modelo PTCS-D, a nova formulação usa matrizes de variáveis e parâmetros menos esparsos viabilizando ganhos em pré-processamento e resolução. Portanto, a formulação é mais compacta se comparada à formulação da seção 3.1, contribuindo para a implementação de problemas estocásticos.

Problemas reais de planejamento tático da cadeia de suprimentos são representados por modelos computacionais de grande porte (milhões de variáveis e restrições) e tendem a crescer muito rapidamente com o aumento de elementos da rede, consumindo toda memória RAM do computador, o que torna a solução do problema intratável computacionalmente.

A formulação **PTCS-R** representa o mesmo problema de forma fiel e viabiliza a implementação de modelos de grande porte e seu processamento pelos computadores. Além disso, a nova formulação contribui fortemente para a elaboração de problemas de programação estocástica e otimização robusta, que demandam maior esforço computacional que o problema determinístico.

Nesta formulação, o conjunto de rotas disponíveis é reformulado para uma estrutura de origem-destino para cada nó, viabilizando a eliminação das restrições (3.19)-(3.28). Assim, o conjunto \mathcal{K} é formado por 2-tuplas, resultante da combinação de locais de origem e destino, determinando as rotas de transporte existentes na rede.

As restrições (3.9), que integram as diferentes partes do problema, são reformuladas para as restrições (3.36)-(3.40), enquanto que as restrições de capacidade de transporte (3.17) são reformuladas para cada tipo de produto transportado. Dessa forma, o parâmetro de capacidade de transporte $T_{ml'}^C$ foi separado em $T_{ml'}^{CX}$ e $T_{ml'}^{CY}$. Estas são representadas pelas restrições (3.44)-(3.45). As horas disponíveis em cada máquina são simplificadas pelo parâmetro A_{irt}^V . O modelo resultante, cujos parâmetros complementares são descritos na Tabela 3.2, é apresentado como segue:

Parâmetros de entrada

A_{irt}^V	:	$(A_t^H N_{lr}^M - P_{lrt}^M)(E_{lrt}^F Y_{lr})$	Horas disponíveis na máquina r , fábrica l e período t
$T_{ml'}^{CX}$:		Capacidade de transporte de matéria-prima pelo modal m do local l para l'
$T_{ml'}^{CY}$:		Capacidade de transporte de produto acabado pelo modal m do local l para l'

Tabela 3.2: Parâmetros complementares da formulação reformulada PTCS-R

$$\begin{aligned}
\max \mathcal{Z} = 1/W_t & \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} (R_p - T_{lp}^X) d_{lpt} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{mll'pt}^L t_{mll'pt} - \right. \\
& \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lr}^F y_{lrt} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^V \alpha_{lpt} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^P r_{lpt} - \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^S s_{lpt} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lr}^X c'_{lrt} \right) \quad (3.35)
\end{aligned}$$

s.a: Restrições (3.6)–(3.8), (3.12), (3.14)–(3.16), (3.18) e (3.29)–(3.34)

$$L_{lp}^M r_{lpt} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} t_{mll'pt} \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.36)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} t_{mll'pt} + s_{lpt-1} = s_{lpt} + b_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{X}, t \in 1..|\mathcal{T}| \quad (3.37)$$

$$L_{lp}^M \alpha_{lpt} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} t_{mll'pt} + s_{lpt-1} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} t_{mll'pt} + s_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{Y}, t \in 1..|\mathcal{T}| \quad (3.38)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} t_{mll'pt} + s_{lpt-1} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} t_{mll'pt} + s_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{H}, p \in \mathcal{Y}, t \in 1..|\mathcal{T}| \quad (3.39)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} t_{mll'pt} = d_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T} \quad (3.40)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'pt} \leq C_{lt}^I \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in \mathcal{T} \quad (3.41)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'pt} \leq C_{lt}^O \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in \mathcal{T} \quad (3.42)$$

$$c_{lrt} \leq AV_{lrt} y_{lrt} + c'_{lrt} A_{lrt}^X \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.43)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{X}} t_{mll'pt} \leq T_{mll'}^{CX} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T} \quad (3.44)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'pt} \leq T_{mll'}^{CY} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T} \quad (3.45)$$

3.3 Exemplo numérico

Um exemplo numérico é elaborado para apresentar a formulação proposta. O modelo tem o objetivo de reduzir estoques, otimizar quantidades produzidas, otimizar a compra de componentes de forma a maximizar o lucro operacional. Os elementos desta cadeia são listados na Tabela 3.3.

Elementos do exemplo numérico	
Fornecedores	F_1, F_2
Plantas Industriais	I_1, I_2
Centros de Distribuição	H_1, H_2
Modais de Transporte	M_1, M_2
Matérias-primas	X_1, X_2
Produtos Acabados	Y_1, Y_2
Máquinas da Planta 1	M_A, M_B
Máquinas da Planta 2	M_C, M_D

Tabela 3.3: Conjuntos do exemplo numérico

Neste exemplo, ilustrado pela Figura 3.3, uma pequena cadeia de suprimentos que faz o planejamento em dois meses. Nesta, dois tipos de produtos acabados são comercializados por duas fábricas a dois clientes. Cada cliente demanda 10 unidades de cada produto em dois meses, ou seja, $D_{tpc} = 10$, totalizando uma demanda de 80 unidades em todo período. Os produtos podem ser enviados por dois modais de transporte das fábricas aos dois centros de distribuição e destes aos dois clientes.

Nos centros de distribuição os dois produtos são manuseados para o despacho ou para o estoque. Os limites de estoque de segurança, de capacidade de manuseio e de armazenamento devem ser respeitados. Os produtos enviados a estes centros podem ser produzidos por qualquer uma das duas plantas industriais ou por ambas.

Nas plantas industriais, as matérias-primas são processadas por uma sequência de máquinas seguindo um roteiro tecnológico até se transformarem em produtos acabados. Na planta industrial I_1 as matérias-primas passam por M_A e, em seguida, M_B . Em I_2 as matérias-primas são processadas em M_C e M_D , respectivamente. A proporção do consumo de matérias-primas pelos produtos acabados é determinada pela lista de materiais. Estas podem ser classificadas em (i) estruturas em série, (ii) estrutura de montagem, (iii) estrutura em árvore ou (iv) genérica (Pochet e Wolsey, 2006). A lista apresentada pela Figura 3.2. possui estrutura de produtos genérica.

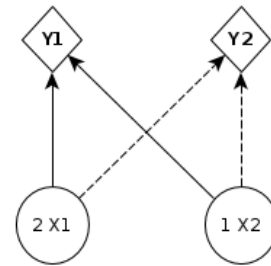


Figura 3.2: Lista de materiais: estrutura genérica de produtos

A aquisição de matérias-primas ocorre em lotes múltiplos de 10 unidades em dois fornecedores. Produtos acabados podem ser adquiridos somente em F_1 . O transporte destes pode ser efetuado por qualquer um dos dois modais. A disponibilidade de matérias-primas e de produtos acabados nos fornecedores é apresentada na Tabela 3.4.

Quantidade	X_1	X_2	Y_1	Y_2
F_1	50	10	10	10
F_2	10	50	-	-

Tabela 3.4: Disponibilidade mensal de matérias-primas e produtos acabados

O estoque inicial disponível em cada fábrica é de 100 unidades de cada matéria-prima e 5 unidades de cada produto acabado. Nos dois centros de distribuição também estão disponíveis 5 unidades de cada produto acabado como estoque inicial. O estoque de segurança de matérias-primas e produtos acabados é de 10 unidades tanto para plantas industriais quanto para os centros de distribuição.

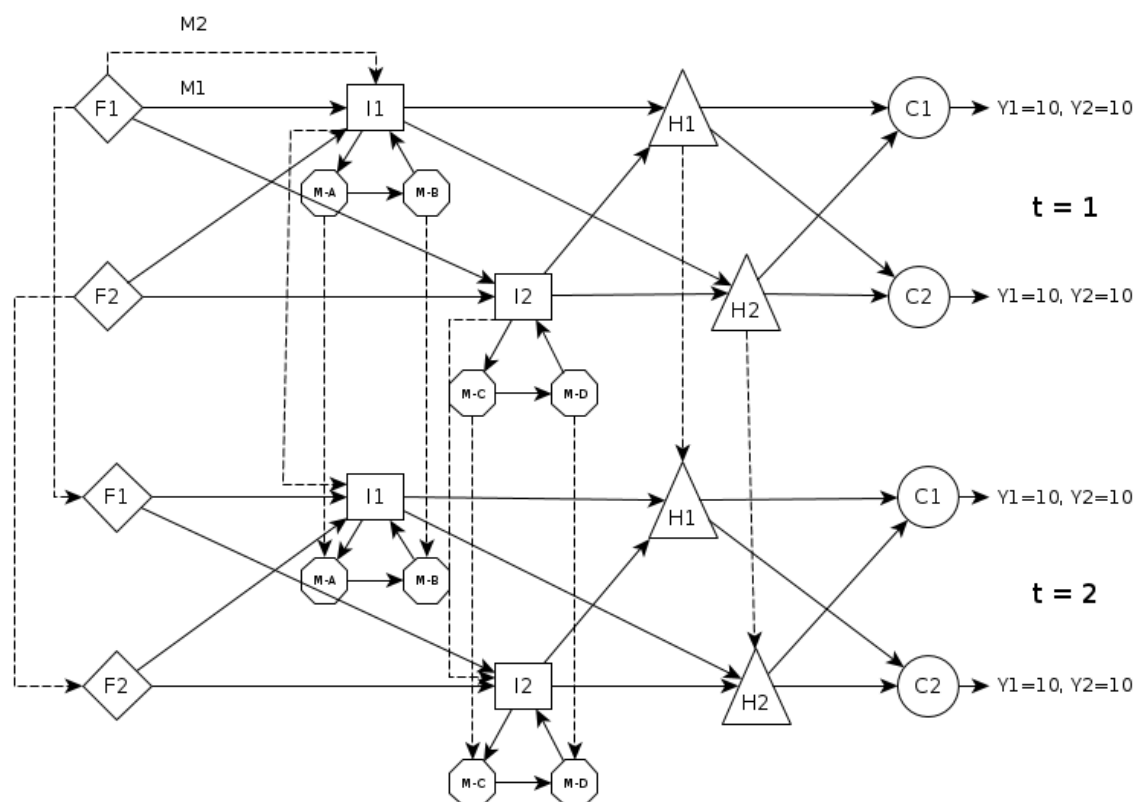


Figura 3.3: Cadeia de suprimentos do exemplo numérico: planejamento em dois meses

Em cada planta industrial são disponibilizadas, mensalmente, 50 horas de capacidade e 10 horas de capacidade extra para cada processo, ou seja, $A_{irt}^X = 10$. A produção de Y_1 deve ocorrer em lotes múltiplos de 5 unidades. Não há restrições de lotes múltiplos para a produção de Y_2 .

O modal M_1 possui capacidade mensal de transporte de 10 unidades de peso, enquanto que o modal M_2 possui o dobro da capacidade, ou seja, 20 unidades de peso por mês. A capacidade C_{ht}^I de manuseio de materiais de entrada e C_{ht}^O de manuseio de saída é de 50 unidades de peso por mês.

Cada produto acabado é vendido a \$100,00 aos clientes. Um imposto de 5% é descontado sobre o valor da venda. O custo fixo de produção em cada máquina é de \$500,00. Os custos variáveis de produção são listados na Tabela 3.5, enquanto que os custos de aquisição de matéria-prima ou produto acabado são listados na Tabela 3.6. O custo relacionados à horas extras ou aumento de capacidade em cada máquina é de \$100,00. O custo de transporte em cada rota e modal C_{ml}^L é \$10,00/km.kg.

Os parâmetros adotados são simplificados de forma que o plano resultante, ou seja, os volumes determinados de compra, produção, consumo, estocagem e transporte nos períodos possam ser intuitivos e de fácil compreensão. Para fins didáticos, sem perda de generalidade, os parâmetros W_t , T_{irp}^R , M_{irp}^C , E_{irt}^F , N_{ir}^M , Y_{ir} , T_{irp}^R e C_{ip}^S assumem valor unitário igual a 1 para qualquer combinação de índices. Não há manutenção preventiva planejada para o período, ou seja, $P_{irt}^M = 0$.

Os resultados do plano da cadeia de suprimentos são apresentados nas tabelas seguintes. O relatório financeiro e as estatísticas do modelo são apresentados na Tabela 3.7. Toda demanda é atendida, como apresentado na Tabela 3.11. Da receita bruta de \$8000,00 resultante das vendas são descontados 5% de impostos, ou seja, \$400,00. O consumo de horas extras no processo produtivo não se faz necessário.

O planejamento ótimo determina que a decisão de produzir, que implica na ativação parcial de processos de produção, é complementada pela decisão de comprar uma quantidade de produtos acabados em um fornecedor externo como visto na Tabela 3.8.

Matéria-prima/Produto	Y_1	Y_2
I_1	20	20
I_2	10	20

Tabela 3.5: Custo variável de produção dos produtos em cada fábrica

Aquisição	X_1	X_2	Y_1	Y_2
F_1	1	1	40	50
F_2	1	1	-	-

Tabela 3.6: Custo de aquisição de matéria-prima ou produtos acabados

Mês	Fornecedor	Item	Quantidade
1	F_1	X_1	20
		Y_2	10
2	F_1	Y_2	10

Tabela 3.8: Plano de compras

Relatório Financeiro	Valor (\$)
Receita bruta	8000,00
Receita líquida	7600,00
Custo logístico	2000,00
Custo de oportunidade	0,00
Custo fixo de produção	2000,00
Custo variável de produção	940,00
Custo de compras	1002,00
Custo de horas extras	0,00
Custo de estoques	80,00
Lucro operacional	1578,00

Estatísticas do modelo	Valor (unid.)
Número de equações	687
Número de variáveis	606
Variáveis inteiras	128
Variáveis binárias	8
Tempo computacional	0,1 s

Tabela 3.7: Desempenho econômico e resultado do modelo do exemplo numérico

O plano de compras determina o fluxo ótimo de matérias-primas e produtos acabados dos fornecedores às plantas industriais respeitando as capacidades de transporte de cada modal. De acordo com o plano, a compra de 10 unidades em cada mês do produto acabado Y_2 é econômica. Esta, no entanto, ocorre apenas em F_1 , dada a indisponibilidade destes produtos em F_2 . Além disso, estes produtos são transportados apenas pelo modal M2, uma vez que a capacidade do modal M1 é totalmente ocupada pelo transporte de matérias-primas, como pode ser visto na Tabela 3.10.

Os estoques de matérias-primas e produtos acabados respeitam a capacidade de armazenamento e os limites de estoque de segurança nas fábricas e nos centros de distribuição, como pode ser visto na Tabela 3.9. A matéria-prima X_2 possui estoque de 50 unidades porque seu consumo, pela lista de materiais, é a metade de X_1 (ver Tabela 3.2), portanto, a produção consome menos este item.

A Tabela 3.10 apresenta o plano geral de transporte em cada tipo de modal ao longo da cadeia de suprimentos. Nela são listados os fluxos de matérias-primas e produtos

Mês	Local	Item	Quantidade	
1	I_1	X_1	10	
		X_2	50	
		Y_1	10	
		Y_2	10	
		X_1	10	
		X_2	50	
	I_2	Y_1	10	
		Y_2	10	
		H_1	Y_1	10
			Y_2	10
		H_2	Y_1	30
			Y_2	20
2	I_1	X_1	10	
		X_2	50	
		Y_1	10	
		Y_2	10	
		X_1	10	
		X_2	50	
	I_2	Y_1	10	
		Y_2	10	
		H_1	Y_1	10
			Y_2	10
		H_2	Y_1	10
			Y_2	10

Tabela 3.9: Estoque projetado nos locais da cadeia de suprimentos

Mês	Modal	Origem	Destino	Item	Quantidade	Ocupação do modal
1	M1	F_1	I_1	X_1	10	100%
			I_2	X_1	10	100%
		I_1	H_1	Y_2	10	100%
			H_2	Y_1	5	50%
		I_2	H_2	Y_1	10	100%
		H_1	C_1	Y_1	10	100%
		H_2	C_2	Y_1	10	100%
	M2	F_1	I_1	Y_2	5	25%
			I_2	Y_2	5	25%
		I_1	H_1	Y_2	15	75%
			H_2	Y_2	15	75%
		I_2	H_1	Y_1	15	75%
			H_2	Y_1	20	100%
		H_1	C_1	Y_2	10	50%
C_2	Y_2	10	50%			
2	M1	I_2	H_1	Y_2	10	100%
		H_2	C_1	Y_1	10	100%
			C_2	Y_1	10	100%
	M2	F_1	I_2	Y_2	10	50%
		H_1	C_1	Y_2	10	50%
		H_2	C_2	Y_2	10	50%

Tabela 3.10: Plano de transporte capacitado da cadeia de suprimentos

acabados entre fornecedores, plantas industriais, centros de distribuição e clientes. Os valores transportados no plano consideram os estoques iniciais, estoques de segurança, capacidade de armazenamento e de manuseio em locais da rede. Cada modal pode transportar mais de um tipo de produto em cada período. Sua ocupação é mostrada na última coluna da tabela. Neste plano, ambos modais são utilizados. O modal M1 é frequentemente ocupado até o limite. Este tem a metade da capacidade do modal M2.

O plano de atendimento da demanda, ou seja, a quantidade de produtos entregue a cada cliente, é apresentado resumidamente na Tabela 3.11. No entanto, informações como: (i) fluxo de produtos acabados provenientes dos centros de distribuição e (ii) o volume transportado por cada modal, são informações complementares e podem ser vistos na Tabela 3.10.

O transporte de produtos das indústrias aos centros de distribuição e destes aos clientes, ou seja, a logística *inbound* e *outbound*, podem ser limitados pela capacidade de manuseio, que pode ser dinâmica em cada centro.

Adotamos, por simplificação, uma capacidade estática de 50 unidades de peso por mês para cada centro, no entanto, percebemos pela Tabela 3.12, que a ocupação dos recursos de manuseio de entrada e saída é dinâmica. O volume de estoques nos centros de distribuição se limitou ao nível de segurança. Ressaltamos que os centros possuem capacidade de armazenamento limitada, o que traz mais complexidade à atividade de

Mês	Cliente	Produto	Quantidade
1	C_1	Y_1	10
		Y_2	10
	C_2	Y_1	10
		Y_2	10
2	C_1	Y_1	10
		Y_2	10
	C_2	Y_1	10
		Y_2	10

Tabela 3.11: Plano de atendimento da demanda

planejamento integrado da cadeia de suprimentos.

Nas duas plantas industriais, as matérias-primas provenientes do estoque são processadas nas máquinas de acordo com o roteiro tecnológico e consumidas conforme a proporção estabelecida na lista de materiais (ver Figura 3.2).

O plano de consumo de matérias-primas nas indústrias e o volume projetado de geração de produtos acabados são apresentados na Tabela 3.13. Ao analisá-la, percebemos na planta I_1 , que a produção de 10 unidades de Y_1 consome 20 unidades de X_1 e 10 unidades de X_2 , enquanto que a produção de 40 unidades de Y_2 consome 80 unidades de X_1 e 40 unidades de X_2 , respectivamente. Dessa forma, o consumo de X_1 na planta I_1 é de 100 unidades ($20 + 80$), enquanto que o consumo de X_2 na mesma planta é de 50 unidades ($10 + 40$). Na planta I_2 , a produção de 50 unidades de Y_1 consome 100 unidades de X_1 e 50 unidades de X_2 .

A Tabela 3.14 apresenta o plano geral e detalhado de produção por máquina, ou processo. De acordo com o plano, a produção no segundo mês não é ativada. O alto custo fixo de produção contribui para forçar a ativação dos recursos apenas no primeiro mês. Dessa forma, os custos de acúmulo de estoques e ativação dos recursos neste período compensam uma eventual ativação dos recursos no segundo mês.

São produzidos 50 produtos acabados em cada indústria totalizando 100 unidades produzidas. Destes, 80 são destinados ao atendimento da demanda e 20 são destinados ao abastecimento do estoque de segurança: 10 unidades (5 de Y_1 e 5 de Y_2) em cada planta industrial.

Embora o custo de aquisição de Y_1 seja menor que Y_2 (Tabela 3.6) o custo variável de sua produção é menor na planta industrial I_2 (Tabela 3.5). Por isso, toda a capacidade disponível em I_2 é utilizada para produzir Y_1 . Percebemos que os custos de ativação de recursos de produção são muito maiores que os custos de estocagem, por isso, a

Volume de entrada nos Centros de Distribuição			
Mês	CD	Quantidade	Ocupação
1	H_1	40	80%
	H_2	50	100%
2	H_1	10	20%

Volume de saída nos Centros de Distribuição			
Mês	CD	Quantidade	Ocupação
1	H_1	30	60%
	H_2	10	20%
2	H_1	10	20%
	H_2	30	60%

Tabela 3.12: Volume de entrada e saída nos centros de distribuição

Consumo de matérias-primas nas fábricas			
Mês	Planta	Matéria-prima	Quantidade
1	I_1	X_1	100
		X_2	50
	I_2	X_1	100
		X_2	50

Produção de produtos na plantas industriais			
Mês	Planta	Produto	Quantidade
1	I_1	Y_1	10
		Y_2	40
	I_2	Y_1	50

Tabela 3.13: Consumo de matéria prima e produção

Plano de produção por máquina

Mês	Planta	Máquina	Ativada?	Produção
1	I_1	M_A	Sim	50
		M_B	Sim	50
	I_2	M_C	Sim	50
		M_D	Sim	50
2	I_1	M_A	Não	0
		M_B	Não	0
	I_2	M_C	Não	0
		M_D	Não	0

Plano detalhado de produção por máquina

Mês	Planta	Máquina	Produto	Quantidade
1	I_1	M_A	Y_1	10
		M_A	Y_2	40
		M_B	Y_1	10
		M_B	Y_2	40
	I_2	M_C	Y_1	50
		M_D	Y_1	50

Tabela 3.14: Plano de produção nas indústrias

produção é ativada somente no primeiro mês e em sua capacidade máxima. Em seguida, os produtos acabados são transportados aos centros de distribuição onde permanecem em estoque até realizar o atendimento da demanda no mês seguinte.

O exemplo numérico apresentado nesta seção busca demonstrar a abrangência da formulação elaborada. Embora simplificado, o modelo determina o fluxo que maximiza o lucro operacional considerando, simultaneamente, as restrições de produção e logística por toda cadeia. Problemas reais são de maior dimensão e podem ter parâmetros incertos. Para isso elaboramos formulações para o problema estocástico.

3.4 Formulações por programação estocástica

Ao se depararem com a incerteza, as empresas podem adotar duas posturas estratégicas distintas: *modeladora* ou *adaptadora* (Gupta e Maranas, 2003). Na primeira estratégia a empresa reestrutura a demanda de forma ativa por meio de contratos e acordos com os clientes, como por exemplo, determinando o fornecimento mínimo e máximo em troca de descontos nos preços. Por outro lado, pela estratégia adaptadora, a empresa não influencia a incerteza do mercado. O controle do risco é feito determinando os níveis de estoque e lucratividade pela constante adaptação das operações à realização da demanda. Este trabalho considera a estratégia *adaptadora* de planejamento.

As formulações de programação estocástica apresentadas consideram o modelo determinístico **PTCS-R** como base de nomenclatura. São abordadas formulações por cenários e por dois-estágios. Consideramos a tipologia de incerteza adotada por Mula et al. (2006), onde “incertezas ambientais” são externas à estrutura física da cadeia,

como incertezas de demanda e de suprimento. “Incertezas do sistema” estão relacionadas ao processo de produção, logística, precificação, custeio ou qualidade. Nestas formulações, considera-se a presença de incertezas na demanda e em parâmetros financeiros.

3.4.1 Formulação por cenários

A formulação estocástica por cenários do planejamento tático da cadeia de suprimentos adota **PTCS-C** (Planejamento Tático da Cadeia de Suprimentos - Cenários) como nomenclatura. Um ponto chave da formulação por cenários é que não podemos observar todos os elementos aleatórios ω quando fazemos todas as decisões, ou seja, não podemos antecipar todos os possíveis resultados, portanto, nossas decisões são *não-antecipativas* de resultados futuros (Birge e Louveaux, 1997).

Usamos o princípio de não antecipação (Rockafellar e Wets, 1991) em nosso modelo de planejamento da cadeia de suprimentos. Este princípio define que se dois cenários diferentes são idênticos até um período em termos de informação, então a variável de decisão relacionada aos cenários indexada no período deve ser idêntica até aquele período (Escudero et al., 1999). Isso significa dizer que é preciso tomar decisões fixas de produção, estoques e vendas no primeiro período ($t = 1$), para todo $\omega \in \Omega$, ou seja, o espaço de todos elementos aleatórios que podem vir a ocorrer.

Dentre as simplificações adotadas, assumimos independência entre as variáveis aleatórias de receita R_{ps} e demanda D_{pts} . Embora esta relação seja fortemente ressaltada por modelos econômicos, equações de correlação não são facilmente obtidas na prática, portanto, ficam implícitas na elaboração de cenários para produtos de cada empresa.

O modelo PTCS-C possui recurso completo (capítulo 5 de Birge e Louveaux (1997)), portanto, deve ser factível para qualquer cenário. Tal condição é garantida pelas variáveis de folga n_{lpts} presentes nas restrições (3.64), usadas para modelar a demanda não atendida, evitando a inviabilidade do problema de planejamento.

Consideramos o conjunto de \mathcal{S} cenários, além dos conjuntos adotados no modelo **PTCS-R**. Este conjunto é indexado por $s = 1..S$. O princípio de não antecipação é modelado pelas restrições (3.65) – (3.71) e frequentemente usado em programas multi-estágios com recurso. O modelo resultante, cuja nomenclatura complementar é descrita na Tabela 3.15, apresenta a seguinte e formulação:

Parâmetros de entrada

D_{cpt_s}	: Demanda no cliente c , do produto p , período t no cenário s
R_{ps}	: Receita por venda de produto acabado p no cenário s
ρ_s	: Probabilidade de ocorrência de cada cenário s , $\sum_{s \in \mathcal{S}} \rho_s = 1$

Variáveis de decisão

α_{lpts}	: Produção do produto p no local l e período t no cenário s
a_{lrpts}	: Produção do produto p na máquina r planta l e período t no cenário s
b_{lpts}	: Consumo de produção de matéria prima x no local l e período t no cenário s
s_{lpts}	: Estoque no local l do produto p ao final do período t no cenário s
d_{lpts}	: Demanda atendida do produto p no local l e período t no cenário s
n_{lpts}	: Demanda não atendida do produto p no local l e período t no cenário s
r_{lpts}	: Compra de lotes de matéria prima x no local l e período t no cenário s
$t_{ml'l'pts}$: Quantidade do produto p transportado no modal m de l para l' em t no cenário s
c_{lrts}	: Capacidade consumida da máquina r da planta industrial l e período t no cenário s
c'_{lrts}	: Percentual da capacidade extra para a máquina r da planta l em t no cenário s
y_{lrts}	: Decisão de ativar ou não a máquina r da planta l no período t no cenário s

Tabela 3.15: Parâmetros e variáveis da formulação estocástica por cenários PTCS-C

$$\begin{aligned}
\max \Psi = & \sum_{l \in \mathcal{S}} \rho_s \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} (R_{ps} - T_{lp}^X) d_{lpts} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l'l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{ml'l'}^L t_{ml'l'pts} - \right. \\
& \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lr}^F y_{lrts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^V \alpha_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^P r_{lpts} - \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^S s_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lr}^X c'_{lrts} \right) \quad (3.46)
\end{aligned}$$

s.a.:

$$s_{lpts} = S_{lp}^0 \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t = 0, s \in \mathcal{S} \quad (3.47)$$

$$S_{lpt}^S \leq s_{lpts} \leq S_{lpt}^X \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.48)$$

$$L_{lp}^M r_{lpts} \leq A_{lpt}^R \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.49)$$

$$L_{lp}^M r_{lpts} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l'l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'pts} \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.50)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l'l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'pts} + s_{lpt-1s} = s_{lpts} + b_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{X}, t \in 1..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.51)$$

$$L_{lp}^M \alpha_{lpts} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'lpts} + s_{lpt-1s} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} + s_{lpts} \quad (3.52)$$

$$\forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{Y}, t \in 1..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S}$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'lpts} + s_{lpt-1s} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} + s_{lpts} \quad (3.53)$$

$$\forall l \in \mathcal{H}, p \in \mathcal{Y}, t \in 1..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S}$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'lpts} = d_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.54)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{ml'lpts} \leq C_{lt}^I \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.55)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'pts} \leq C_{lt}^O \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.56)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} a_{lrpt} M_{lrp}^C = c_{lrts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.57)$$

$$c_{lrts} \leq AV_{lrt} y_{lrts} + c'_{lrt} A_{lrt}^X \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.58)$$

$$c'_{lpts} \leq y_{lrts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.59)$$

$$a_{lrpts} T_{lrp}^R = L_{lp}^M \alpha_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.60)$$

$$b_{lp'ts} = \sum_{p \in \mathcal{Y}} B_{p'p} L_{lp}^M \alpha_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p' \in \mathcal{X}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.61)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{X}} t_{mll'pts} \leq T_{mll'}^{CX} \quad \forall m \in \mathcal{M}, l' \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.62)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'pts} \leq T_{mll'}^{CY} \quad \forall m \in \mathcal{M}, l' \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.63)$$

$$d_{lpts} = D_{tpcs} - n_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.64)$$

$$\alpha_{lpts} = \alpha_{lpts+1} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{Y}, t = 1, s \in 1..|S-1| \quad (3.65)$$

$$b_{lpts} = b_{lpts+1} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{X}, t = 1, s \in 1..|S-1| \quad (3.66)$$

$$s_{lpts} = s_{lpts+1} \quad \forall l \in \mathcal{I} \cup \mathcal{DC}, p \in \mathcal{P}, t = 1, s \in 1..|S-1| \quad (3.67)$$

$$d_{lpts} = d_{lpts+1} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t = 1, s \in 1..|S-1| \quad (3.68)$$

$$r_{lpts} = r_{lpts+1} \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{X}, t = 1, s \in 1..|S-1| \quad (3.69)$$

$$y_{lrts} = y_{lrts+1} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t = 1, s \in 1..|S-1| \quad (3.70)$$

$$t_{mll'pts} = t_{mll'pts+1} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, p \in \mathcal{P}, t = 1, s \in 1..|S-1| \quad (3.71)$$

$$b_{lpts}, s_{lpts}, d_{lpts}, n_{lpts} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.72)$$

$$t_{mll'pts} \geq 0 \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.73)$$

$$\alpha_{lpts}, r_{lpts} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.74)$$

$$a_{lrpts} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.75)$$

$$y_{lrts} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.76)$$

$$0 \leq c'_{lrts} \leq 1 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.77)$$

Decisões em modelos estocásticos devem ser balanceadas de forma a satisfazer vários cenários, por isso, é impossível encontrar uma solução ideal que atenda todas as circunstâncias simultaneamente.

Ilustramos esse conceito sob a mesma ótica do problema clássico do fazendeiro, apresentado no capítulo 1 de Birge e Louveaux (1997). Para isso, considere novamente os dados do exemplo numérico. Assuma que a receita proveniente da venda dos produtos acabados, R_{ps} , e a demanda, D_{cpt} , variem ao longo dos anos de forma aleatória. Neste cenário hipotético a receita varia 10% abaixo e acima do valor original de \$100, enquanto que a demanda varia 20% abaixo e acima do seu valor original de 100 unidades. Elaboramos 3 cenários com mesma probabilidade de $\frac{1}{3}$ de ocorrência de forma que a esperança do valor de receita e de demanda seja equivalente ao seu valor original. Adotamos os seguintes cenários, ($|S| = 3$) :

s = 1: Receita de \$90,00. Demanda em 80 unidades;

s = 2: Receita de \$100,00. Demanda em 100 unidades;

s = 3: Receita de \$110,00. Demanda em 120 unidades.

Assuma que o gestor possua a informação de demanda e preço antes do planejamento. Diante dessas condições, ele toma a decisão ótima em cada cenário, o que levaria à

um lucro operacional de \$580,00 no primeiro cenário, \$1578,00 no segundo cenário (o mesmo cenário do exemplo numérico) e \$3191,00 no terceiro cenário. O lucro médio ao longo dos anos (no longo prazo) seria de \$1783,00. Esta é a situação sob informação perfeita.

Gestores, no entanto, não possuem a informação antes da sua realização. Neste caso, o gestor, ao usar o modelo estocástico **PTCS-C**, obtém um lucro operacional de \$1400,80. Essa diferença de \$382,20 (\$1783,00 - \$1400,80) é chamada de *valor esperado da informação perfeita* (VEIP), que representa a perda de lucro na presença de incerteza.

Um estratégia frequentemente adotada em otimização é assumir valores médios para os parâmetros, após consulta do histórico da empresa. Esta pode ter consequências desfavoráveis. Neste exemplo, o gestor teria um lucro de \$1348,00 se adotasse um preço médio de \$100,00 na ocorrência *dos três cenários de demanda* (80,100 e 120). Essa diferença de \$52,80 (\$1400,80 - \$1348,00) é chamada de *valor da solução estocástica* (VSE), que representa o ganho provável ao resolver o modelo estocástico (Birge e Louveaux, 1997).

A abordagem por cenários, no entanto, pode ser limitada pois ela requer a previsão de todas as possíveis realizações de um parâmetro incerto. Em situações onde um conjunto discreto de cenários é dificilmente identificado, indica-se adotar uma abordagem por dois-estágios, e parâmetros representados por distribuições de probabilidade.

3.4.2 Formulação por dois-estágios

A formulação genérica de modelos de programação estocástica de dois-estágios adota a nomenclatura de Birge e Louveaux (1997) e segue a estrutura (3.78)–(3.83):

$$\max c^\top x + E_\xi Q(x, \xi(\omega)) \quad (3.78)$$

$$Ax = b \quad (3.79)$$

$$x \geq 0 \quad (3.80)$$

Onde:

$$E_\xi Q(x, \xi(\omega)) = \max q(\omega)^\top y(\omega) \quad (3.81)$$

$$T(\omega)x + Wy(\omega) = h(\omega) \quad (3.82)$$

$$y(\omega) \geq 0 \quad (3.83)$$

Onde c é um vetor conhecido em \mathfrak{R}^{n_1} , b é um vetor em \mathfrak{R}^{m_1} , A e W são matrizes de tamanho $m_1 \times n_1$ e $m_2 \times n_2$, respectivamente, e W é chamada *matriz de recurso*, que assumimos ser fixo. Para cada ω , a *matriz tecnológica* $T(\omega)$ é $m_2 \times n_1$, $q(\omega) \in \mathfrak{R}^{n_2}$ e $h(\omega) \in \mathfrak{R}^{m_2}$. ξ é um vetor aleatório formado pelos componentes q^\top , h^\top e T . E_ξ é a esperança matemática com relação a ξ .

A função objetivo (3.78) contém o termo determinístico $c^\top x$ e a esperança da função objetivo do segundo-estágio $q(\omega)^\top y(\omega)$ tomada para a realização de cada evento aleatório ω . Este segundo termo, portanto, é mais difícil porque para cada evento ω , o valor de $y(\omega)$ é a solução de um programa linear.

Em nossa formulação, a incerteza é representada por uma abordagem baseada em distribuição. Assim, são associadas distribuições de probabilidade à uma variedade de valores prováveis de preço e demanda. O objetivo é encontrar uma política ótima que maximiza a lucro operacional esperado. Adotamos a nomenclatura **PTCS-2ML** (Formulação PTCS - 2 estágios: Manufatura e Logística) para o modelo estocástico de planejamento tático da cadeia de suprimentos por dois-estágios: manufatura e logística. A estratégia também é adotada em Gupta et al. (2000) e Gupta e Maranas (2003).

A fase de planejamento da manufatura é caracterizada por decisões “aqui e agora” e foca na alocação eficiente de recursos e capacidade de produção nas diversas máquinas e plantas determinando a melhor estratégia de operação. Na etapa subsequente, decisões logísticas são postergadas em uma forma “espera para ver”. Nesta fase são determinadas as atividades como aquisição e transporte de matérias-primas e produtos acabados, a gestão de estoques e o atendimento da demanda. Consideramos o primeiro-estágio representado por (3.84)–(3.95) e o segundo estágio é representado por (3.96)–(3.112). As variáveis do primeiro e segundo-estágios são descritos na Tabela 3.16.

Variáveis do primeiro-estágio

α_{lpt}	: Produção do produto p no local l e período t
a_{lrpt}	: Produção do produto p na máquina r planta l e período t
b_{lpt}	: Consumo de produção de matéria prima x no local l e período t
c_{lrt}	: Capacidade consumida da máquina r da planta industrial l e período t
c'_{lrt}	: Percentual da capacidade extra para a máquina r da planta l em t
y_{lrt}	: Decisão de ativar ou não a máquina r da planta l no período t

Variáveis do segundo-estágio

s_{lpts}	: Estoque no local l do produto p ao final do período t no cenário s
d_{lpts}	: Demanda atendida do produto p no local l e período t no cenário s
n_{lpts}	: Demanda não atendida do produto p no local l e período t no cenário s
r_{lpts}	: Compra de lotes de matéria prima x no local l e período t no cenário s
$t_{mll'pts}$: Quantidade do produto p transportado no modal m de l para l' em t no cenário s

Tabela 3.16: Variáveis da formulação estocástica PTCS-2ML

$$\begin{aligned} \max_{\alpha, y, c'} \Psi = & - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^V \alpha_{lpt} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lr}^F y_{lrt} \\ & - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lr}^X c'_{lrt} + \mathcal{Q}(\alpha, y, c') \end{aligned} \quad (3.84)$$

s.a.:

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} a_{lrpt} M_{lrp}^C = c_{lrt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.85)$$

$$c_{lrt} \leq AV_{lrt} y_{lrt} + c'_{lrt} A_{lrt}^X \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.86)$$

$$c'_{lpt} \leq y_{lrt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.87)$$

$$a_{lrpt} T_{lrp}^R = L_{lp}^M \alpha_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.88)$$

$$b_{lp't} = \sum_{p \in \mathcal{Y}} B_{p'p} L_{lp}^M \alpha_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p' \in \mathcal{X}, t \in \mathcal{T} \quad (3.89)$$

$$b_{lpt} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.90)$$

$$\alpha_{lpt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.91)$$

$$a_{lrpt} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T} \quad (3.92)$$

$$y_{lrt} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.93)$$

$$c_{lrt} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.94)$$

$$0 \leq c'_{lrt} \leq 1 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in \mathcal{T} \quad (3.95)$$

A função objetivo Ψ (3.84) do modelo estocástico linear inteiro misto busca maximizar o lucro operacional, que inclui os custos operacionais de manufatura do primeiro-estágio e a receita e custos logísticos do segundo-estágio. O primeiro-estágio é representado pelos custos fixos e variáveis de manufatura dos p produtos nas \mathcal{R} máquinas em \mathcal{I} plantas industriais. Eventualmente, custos extras de operação podem ocorrer. $\mathcal{Q}(\alpha, y, c') = \mathbb{E}_\omega[\alpha, y, c', \xi]$ representa a esperança matemática da função objetivo avali-

ada por todas as $\xi \in \Omega$ possíveis realizações dos parâmetros incertos do problema do segundo-estágio, referidos como cenários, dada uma estratégia de produção (α, y, c') . As restrições (3.85)–(3.95) determinam a estratégia de operação manufatureira, como descrito na seção 3.1.

O problema do segundo-estágio $\mathcal{Q}(\alpha, y, c')$ apresenta, em (3.96), a receita proveniente das vendas e os custos logísticos de aquisição, transporte, entrega e de gestão de estoques. As variáveis do segundo-estágio, ou de *controle*, são determinadas para otimizar em vista da incerteza. As decisões de recurso apresentadas em (3.97)–(3.112) são baseadas nos cenários e discutidas na seção 3.4.1. Estas são do tipo “espera para ver” e determinam como as decisões logísticas se adaptam à realização de eventos incertos. $\mathcal{Q}(\alpha, y, c')$, portanto, equivale ao problema:

$$\begin{aligned} \max_{d,t,r,s} \Phi = & \sum_{l \in \mathcal{S}} \rho_s \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} (R_{ps} - T_{lp}^X) d_{lpts} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{ml'l'pts}^L t_{ml'l'pts} \right. \\ & \left. - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^P r_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in \mathcal{T}} C_{lp}^S s_{lpts} \right) \end{aligned} \quad (3.96)$$

s.a.:

$$s_{lpts} = S_{lp}^0 \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t = 0, s \in \mathcal{S} \quad (3.97)$$

$$S_{lpt}^S \leq s_{lpts} \leq S_{lpt}^X \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.98)$$

$$L_{lp}^M r_{lpts} \leq A_{lpt}^R \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.99)$$

$$L_{lp}^M r_{lpts} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'pts} \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.100)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'pts} + s_{lpt-1s} = s_{lpts} + b_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{X}, t \in 1..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.101)$$

$$\begin{aligned} L_{lp}^M \alpha_{lpt} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'pts} + s_{lpt-1s} &= \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'pts} + s_{lpts} \\ \forall l \in \mathcal{I}, \mathcal{Y}, t \in 1..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \end{aligned} \quad (3.102)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'pts} + s_{lpt-1s} &= \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'pts} + s_{lpts} \\ \forall l \in \mathcal{H}, p \in \mathcal{Y}, t \in 1..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \end{aligned} \quad (3.103)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'lpts} = d_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.104)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{ml'lpts} \leq C_{lt}^I \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.105)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{ml'lpts} \leq C_{lt}^O \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.106)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{X}} t_{ml'lpts} \leq T_{ml'l}^{CX} \quad \forall m \in \mathcal{M}, l' \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.107)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{ml'lpts} \leq T_{ml'l}^{CY} \quad \forall m \in \mathcal{M}, l' \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.108)$$

$$d_{lpts} = D_{tpcs} - n_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.109)$$

$$s_{lpts}, d_{lpts}, n_{lpts} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.110)$$

$$r_{lpts} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.111)$$

$$t_{ml'lpts} \geq 0 \quad \forall m \in \mathcal{M}, l' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in \mathcal{T}, s \in \mathcal{S} \quad (3.112)$$

Note que na formulação proposta assumimos que a alocação de recursos de produção deve ser feita *a priori* antes da ocorrência da demanda. Essa decisão, no entanto, ocorre ao longo de todo período do planejamento. Após a realização da decisão sobre a produção, as decisões logísticas de segundo-estágio são feitas de acordo com a realização da demanda incerta no mesmo período. Este, portanto, é uma representação do comportamento da cadeia dado os possíveis cenários de demanda.

Além disso, o uso de uma formulação de dois-estágios por todo período implica que as decisões de planejamento das operações não podem ser revisadas durante o horizonte considerado. No caso particular, tal formulação é conveniente pois permite avaliar diferentes estratégias de planejamento tático da cadeia de suprimentos.

Em uma estrutura geral de planejamento, no entanto, pode ser necessário adotar uma abordagem de planejamento por horizonte rolante, onde um modelo de dois-estágios é resolvido sucessivamente em cada período. Uma abordagem alternativa seria adotar uma formulação multi-estágios.

A formulação multi-estágios para o nosso modelo de planejamento tático da cadeia de suprimentos requer a geração de muitos cenários, o que o torna intratável computa-

cionalmente mesmo para pequenas instâncias. Se assumimos, por exemplo, a ocorrência de 3 cenários para cada período e estágio, teríamos até 531.441 possíveis cenários (3^{12}) para o planejamento anual. Assim, adotamos a estratégia de planejamento por horizonte rolante.

Para lidar como o desafio de realizar o planejamento anual seguindo um horizonte rolante por revisões mensais, elaboramos uma formulação alternativa de programação estocástica de dois-estágios. A nova formulação considera as decisões de planejamento da cadeia tanto para o primeiro-estágio quanto para o estágio subsequente.

O primeiro estágio é relacionado ao primeiro período ($t = 1$). Neste, as variáveis inteiras determinam o tamanho do lote e as variáveis binárias determinam sobre a ativação (ou desativação) de recursos de produção. As decisões do segundo estágio são relacionadas aos períodos subsequentes de planejamento ($t = 2, 3, \dots$). As variáveis de folga n_{lps} e n_{lpts} presentes nas restrições (3.147) e (3.148) são usadas para modelar a demanda não atendida evitando a inviabilidade do problema de planejamento, uma característica importante para modelos com recurso completo (capítulo 5 de Birge e Louveaux (1997)) favorecendo a implementação da decomposição estocástica, discutida no capítulo 4.

O modelo descrito abaixo apresenta a nomenclatura **PTCS-2HR** (Formulação PTCS - 2 estágios e Horizonte Rolante). Ela se refere ao modelo estocástico de planejamento tático da cadeia de suprimentos por dois-estágios para o planejamento por horizonte rolante. As variáveis do primeiro-estágio são apresentadas na Tabela 3.17. As variáveis do segundo-estágio são equivalente às variáveis do modelo PCTS-C, para $t = 2, \dots, \mathcal{T}$.

Variáveis do primeiro-estágio

α_{lp}	: Produção do produto p no local l no 1º período
a_{lrp}	: Produção do produto p na máquina r planta l no 1º período
b_{lp}	: Consumo de produção de matéria prima x no local l no 1º período
s_{lpt}	: Estoque no local l do produto p ao final do 1º período
d_{lp}	: Demanda atendida do produto p no local l no 1º período
n_{lps}	: Demanda não atendida do produto p no local l no 1º período e cenário s
r_{lp}	: Compra de lotes de matéria prima x no local l no 1º período
$t_{ml'p}$: Quantidade do produto p transportado no modal m de l para l'
c_{lr}	: Capacidade consumida da máquina r da planta industrial l no 1º período
c'_{lr}	: Percentual da capacidade extra para a máquina r da planta l
y_{lr}	: Decisão de ativar ou não a máquina r da planta l no 1º período

Tabela 3.17: Variáveis do primeiro estágio da formulação estocástica PTCS-2HR

$$\begin{aligned}
\max \Psi = & \sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \rho_s (R_{ps} - T_{lp}^X) d_{lp} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{ml'l'p}^L t_{ml'l'p} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lr}^F y_{lr} - \\
& \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lp}^V \alpha_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C_{lp}^P r_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lp}^S s_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lr}^X c'_{lr} + \\
& \sum_{s \in \mathcal{S}} \rho_s \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} (R_{ps} - T_{lp}^X) d_{lpts} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{ml'l'pts}^L t_{ml'l'pts} - \right. \\
& \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lr}^F y_{lrts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lp}^V \alpha_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t > 1} C_{lp}^P r_{lpts} - \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lp}^S s_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lr}^X c'_{lrts} \right) \tag{3.113}
\end{aligned}$$

s.a.:

$$s_{lpt} = S_{lp}^0 \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t = 0 \tag{3.114}$$

$$S_{lpt}^S \leq s_{lpt} \leq S_{lpt}^X \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t = 1 \tag{3.115}$$

$$S_{lpt}^S \leq s_{lpts} \leq S_{lpt}^X \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \tag{3.116}$$

$$L_{lp}^M r_{lp} \leq A_{lpt}^R \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t = 1 \tag{3.117}$$

$$L_{lp}^M r_{lpts} \leq A_{lpt}^R \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \tag{3.118}$$

$$L_{lp}^M r_{lp} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'p} \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t = 1 \tag{3.119}$$

$$L_{lp}^M r_{lpts} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'pts} \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \tag{3.120}$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'p} + s_{lpt-1} = s_{lp} + b_{lp} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{X}, t = 1 \tag{3.121}$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'l'pts} + s_{lpt-1s} = s_{lpts} + b_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{X}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \tag{3.122}$$

$$L_{lp}^M \alpha_{lp} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'lp} + s_{lpt-1} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'p} + s_{lpt} \quad (3.123)$$

$$\forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{Y}, t = 1$$

$$L_{lp}^M \alpha_{lpts} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'lpts} + s_{lpt-1s} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} + s_{lpts} \quad (3.124)$$

$$\forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{Y}, t \in 2..|\mathcal{T}|, \mathcal{S}$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'lp} + s_{lpt-1} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'p} + s_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{H}, p \in \mathcal{Y}, t = 1 \quad (3.125)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'lpts} + s_{lpt-1s} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} + s_{lpts} \quad (3.126)$$

$$\forall l \in \mathcal{H}, p \in \mathcal{Y}, t \in 2..|\mathcal{T}|, \mathcal{S}$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'lp} = d_{lp} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t = 1 \quad (3.127)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'lpts} = d_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.128)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{ml'lp} \leq C_{lt}^I \quad \forall l \in \mathcal{H}, t = 1 \quad (3.129)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{ml'lpts} \leq C_{lt}^I \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.130)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'p} \leq C_{lt}^O \quad \forall l \in \mathcal{H}, t = 1 \quad (3.131)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'pts} \leq C_{lt}^O \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.132)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} a_{lrp} M_{lrp}^C = c_{lr} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t = 1 \quad (3.133)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} a_{lrpts} M_{lrp}^C = c_{lrts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.134)$$

$$c_{lr} \leq AV_{lr}y_{lr} + c'_{lr}A_{lrt}^X \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t = 1 \quad (3.135)$$

$$c_{lrts} \leq AV_{lrt}y_{lrts} + c'_{lrt}A_{lrt}^X \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.136)$$

$$c'_{lp} \leq y_{lr} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t = 1 \quad (3.137)$$

$$c'_{lpts} \leq y_{lrts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.138)$$

$$a_{lrp}T_{lrp}^R = L_{lp}^M \alpha_{lp} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t = 1 \quad (3.139)$$

$$a_{lrpts}T_{lrp}^R = L_{lp}^M \alpha_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.140)$$

$$b_{lp'} = \sum_{p \in \mathcal{Y}} B_{p'p} L_{lp}^M \alpha_{lp} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p' \in \mathcal{X}, t = 1 \quad (3.141)$$

$$b_{lp'ts} = \sum_{p \in \mathcal{Y}} B_{p'p} L_{lp}^M \alpha_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p' \in \mathcal{X}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.142)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{X}} t_{ml'p} \leq T_{ml'}^{CX} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, t = 1 \quad (3.143)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{X}} t_{ml'pts} \leq T_{ml'}^{CX} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.144)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{ml'p} \leq T_{ml'}^{CY} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, t = 1 \quad (3.145)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{ml'pts} \leq T_{ml'}^{CY} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.146)$$

$$d_{lp} = D_{tpcs} - n_{lps} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, s \in \mathcal{S}, t = 1 \quad (3.147)$$

$$d_{lpts} = D_{tpcs} - n_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.148)$$

$$b_{lp}, s_{lpt}, d_{lp}, n_{lp} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t = 1 \quad (3.149)$$

$$b_{lpts}, s_{lpts}, d_{lpts}, n_{lpts} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.150)$$

$$t_{ml'p} \geq 0 \quad \forall m \in \mathcal{M}, l' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P} \quad (3.151)$$

$$t_{ml'pts} \geq 0 \quad \forall m \in \mathcal{M}, l' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.152)$$

$$\alpha_{lp}, r_{lp} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P} \quad (3.153)$$

$$\alpha_{lpts}, r_{lpts} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.154)$$

$$a_{lrp} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P} \quad (3.155)$$

$$a_{lrpts} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.156)$$

$$y_{lr} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R} \quad (3.157)$$

$$y_{lrts} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.158)$$

$$0 \leq c'_{lr} \leq 1 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R} \quad (3.159)$$

$$0 \leq c'_{lrts} \leq 1 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (3.160)$$

A função objetivo (3.113) deste modelo estocástico linear inteiro-misto busca maximizar o lucro operacional, que inclui o lucro esperado do primeiro-estágio e o lucro esperado do segundo-estágio. O lucro proveniente de ambos, primeiro e segundo-estágios, é representado pela receita das vendas e dos custos operacionais de manufatura e logísticos de aquisição, estoque e transporte.

Dez tipos de restrições estão inclusas no modelo: as restrições relacionadas ao estoque são apresentadas em (3.114), (3.115), (3.117), (3.116) e (3.118). Relações de balanço de fluxo são dadas pelas equações (3.119), (3.121), (3.123), (3.125), (3.127), (3.129), (3.131), (3.120), (3.122), (3.124), (3.126), (3.128), (3.130) e (3.132). A relação de consumo de capacidade e decisões de ativação de recursos são apresentadas nas restrições (3.133), (3.135) e (3.134), (3.136) respectivamente. A ativação eventual de capacidade extra é possível somente após a ativação dos recursos de produção. Essa relação está presente nas restrições (3.137) e (3.138). As rotas técnicas de produção e o consumo proporcional de matérias-primas no processo são dadas pelas restrições (3.139), (3.141), (3.140) e (3.142). Relações logísticas de capacidade limitada de transporte são dadas pelas restrições (3.143), (3.145), (3.144) e (3.146). O atendimento da

demanda e a contabilização de vendas não realizadas são apresentadas em (3.147) e (3.148).

As restrições (3.114), (3.115), (3.117), (3.119), (3.121), (3.123), (3.125), (3.127), (3.129), (3.131), (3.133), (3.135), (3.137), (3.139), (3.141), (3.143), (3.145), (3.147), (3.149), (3.151), (3.153), (3.155), (3.157) e (3.159) são do primeiro-estágio ($t = 1$) e não incluem nenhuma variável dependente do segundo estágio. As restrições remanescentes são do segundo-estágio ($t > 1$) e dependentes de cada cenário. Ao maximizar a função objetivo (3.113), sujeito às restrições (3.114)–(3.160) obtemos a solução do modelo de programação estocástica dois-estágios.

A quantidade de cenários, no entanto, pode crescer exponencialmente, quando a incerteza dos dados ocorre simultaneamente em diversos parâmetros. Cadeias de suprimentos têm apresentado mudanças notáveis à medida em que o modelo de operações *Build to Order* (BTO) substitui o método *Build to Forecast* (BTF) (Prajogo e Sohal, 2013). Nessas ocasiões, não se assume o conhecimento das distribuições de probabilidade associadas aos parâmetros. Para estes casos, adotamos a formulação por otimização robusta, uma abordagem relativamente nova de otimização sob incerteza, usada quando os dados não possuem histórico estocástico ou quando a informação sobre sua distribuição não é disponível.

3.5 Formulação por programação estocástica robusta

Os modelos estocásticos anteriores são chamados *neutral-risk*, pois são insensíveis ao risco de ocorrência de soluções longe da solução esperada. Apresentamos uma formulação *mean-risk* do problema tático de planejamento da cadeia de suprimentos por programação estocástica integrada aos conceitos de otimização robusta. Problemas desse tipo são chamados *risk-averse*, *i.e.*, capturam o risco de tomada de decisão, reduzindo a variedade nos custos dos recursos pelos cenários. Adotamos **PTCS-OR** (Formulação PTCS - Otimização Robusta) como nomenclatura para o modelo proposto. A formulação genérica de modelos de programação estocástica robusta propõe a seguinte modificação na função objetivo (3.161) segundo Mulvey et al. (1995) e Sahinidis (2004):

$$\max c^\top x + E_{\omega \in \Omega}[Q(x, \omega)] - \alpha f(\omega, y) \quad (3.161)$$

Onde f é uma medida de variabilidade, tal como variância, dos custos do segundo-estágio e α é um escalar não negativo que representa a tolerância do tomador de decisão ao risco. Valores maiores de α resultam em soluções que reduzem a variância, enquanto que valores menores de α aumentam o lucro esperado.

Explorar a formulação proposta por Mulvey et al. (1995) nos leva a termos quadráticos, que são características indesejáveis que levam à não-linearidade do modelo (Lalmazlounian et al., 2013). Yu e Li (2000) elaboraram uma formulação para linearizar o desvio médio absoluto da função objetivo e propuseram uma metodologia eficiente para minimizar a função objetivo. A nova formulação (3.162)–(3.164) reduz o tempo computacional ao utilizar apenas metade do número de variáveis do modelo desenvolvido por Mulvey et al. (1995):

$$\min \Psi = \sum_{s \in X} \rho_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in X} \rho_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s' \in X} \rho_{s'} \xi_{s'} \right) + 2\theta_s \right] \quad (3.162)$$

$$\left(\sum_{s' \in X} \rho_{s'} \xi_{s'} - \xi_s \right) \leq \theta_s \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (3.163)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (3.164)$$

Onde θ_s representa o desvio de violação da média no cenário s dos X cenários elaborados. λ é um peso que mede o *trade-off* entre o risco e o valor esperado. Em (3.162) e (3.163), se $\xi_s - \sum_{s' \in X} \rho_{s'} \xi_{s'} \geq 0$, então $\theta_s = 0$ na solução ótima e $\Psi = \sum_{s \in X} \rho_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in X} \rho_s \left(\xi_s - \sum_{s' \in X} \rho_{s'} \xi_{s'} \right)$. Caso contrário, se $\xi_s - \sum_{s' \in X} \rho_{s'} \xi_{s'} \leq 0$, então $\theta_s = \sum_{s' \in X} \rho_{s'} \xi_{s'} - \xi_s$ na solução ótima e $\Psi = \sum_{s \in X} \rho_s \xi_s + \lambda \sum_{s \in X} \rho_s \left(\sum_{s' \in X} \rho_{s'} \xi_{s'} - \xi_s \right)$.

A formulação linear completa da função objetivo robusta é adaptada para o nosso caso de maximização e apresentada em (3.165). Esta inclui a robustez da solução, (relacionado à obtenção da solução próxima à otimalidade sob qualquer cenário possível) e a robustez do modelo (relacionado à obtenção da solução que satisfaz a demanda por completo sob qualquer cenário possível). Estes são apresentados no segundo e terceiro termos, respectivamente:

$$\max \Psi = \sum_{s \in X} \rho_s \xi_s - \lambda \sum_{s \in X} \rho_s \left[\left(\xi_s - \sum_{s' \in X} \rho_{s'} \xi_{s'} \right) + 2\theta_s \right] - \omega \sum_{s \in X} \rho_s \delta_s \quad (3.165)$$

Onde δ_s é um desvio negativo em relação à demanda, ou seja, falta de produtos disponíveis aos clientes, portanto, está relacionado à variável de folga associado à inviabilidade das restrições, enquanto que ω é um peso de penalidade sobre δ_s fazendo o *trade-off* entre a robustez da solução e do modelo. Os conceitos de otimização robusta são aplicados à formulação estocástica elaborada. O modelo resultante de progra-

mação estocástica robusta - **PTCS-OR** - cuja nomenclatura complementar é descrita na Tabela 3.18, apresenta a seguinte formulação:

Parâmetros estocásticos de entrada

D_{cpt_s}	: Demanda no cliente c , do produto p , período t no cenário s
R_{ps}	: Receita por venda de produto acabado p no cenário s
N_{ps}	: Custo fictício de penalidade pelo não atendimento da demanda p no cenário s
$C_{lr_s}^F$: Custo fixo produção da máquina r na planta industrial l no cenário s
C_{lps}^V	: Custo variável de produção de p na planta industrial l no cenário s
$C_{lr_s}^X$: Custo de capacidade extra na máquina r na planta industrial l no cenário s
C_{lps}^S	: Custo unitário de estoque do produto p na planta industrial l no cenário s
$C_{mll'_s}^L$: Custo unitário de transporte pelo modal m do local l para o local l' no cenário s
C_{lps}^P	: Custo unitário de aquisição da matéria prima x no fornecedor l no cenário s
T_{lps}^X	: Imposto sobre produto vendido y ao cliente c no cenário s
λ	: Escala de peso para medir <i>trade-off</i> entre risco e valor esperado
ω	: Escala de penalidade para medir <i>trade-off</i> entre robustez da solução e do modelo

Variáveis de decisão

θ_{1_s}	: Desvio pela violação da média sob o cenário s do primeiro-estágio
θ_{2_s}	: Desvio pela violação da média sob o cenário s do segundo-estágio

Tabela 3.18: Parâmetros e variáveis da formulação estocástica robusta PTCS-OR

$$\begin{aligned}
\max \Psi = & \sum_{s \in \mathcal{S}} \rho_s \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} (R_{ps} - T_{lps}^X) d_{lp} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{ml's}^L t_{ml'p} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lrs}^F y_{lr} - \right. \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lps}^V \alpha_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C_{lps}^P r_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lps}^S s_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lrs}^X c'_{lr} \right) - \\
& \lambda \sum_{s \in \mathcal{S}} \rho_s \left[\left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} (R_{ps} - T_{lps}^X) d_{lp} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{ml's}^L t_{ml'p} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lrs}^F y_{lr} - \right. \right. \\
& \left. \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lps}^V \alpha_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C_{lps}^P r_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lps}^S s_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lrs}^X c'_{lr} \right) - \right. \\
& \left. \sum_{s' \in \mathcal{S}} \rho_{s'} \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} (R_{ps'} - T_{lp'}^X) d_{lp} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{ml's'}^L t_{ml'p} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lrs'}^F y_{lr} - \right. \right. \\
& \left. \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lps'}^V \alpha_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C_{lps'}^P r_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lps'}^S s_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lrs'}^X c'_{lr} \right) + 2\theta_{1s} \right] \\
& - \omega \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \rho_s N_{ps} n_{lp} + \\
& \sum_{s \in \mathcal{S}} \rho_s \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} (R_{ps} - T_{lps}^X) d_{lpts} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{ml's}^L t_{ml'pts} - \right. \\
& \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lrs}^F y_{lrts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lps}^V \alpha_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t > 1} C_{lps}^P r_{lpts} - \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lps}^S s_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lrs}^X c'_{lrts} \right) \\
& - \lambda \sum_{s \in \mathcal{S}} \rho_s \left[\left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} (R_{ps} - T_{lps}^X) d_{lpts} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{ml's}^L t_{ml'pts} - \right. \right. \\
& \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lrs}^F y_{lrts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lps}^V \alpha_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t > 1} C_{lps}^P r_{lpts} - \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lps}^S s_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lrs}^X c'_{lrts} \right) \\
& - \sum_{s' \in \mathcal{S}} \rho_{s'} \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} (R_{ps'} - T_{lps'}^X) d_{lpts} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{ml's'}^L t_{ml'pts} - \right. \\
& \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lrs'}^F y_{lrts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lps'}^V \alpha_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t > 1} C_{lps'}^P r_{lpts} - \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lps'}^S s_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lrs'}^X c'_{lrts} \right) + 2\theta_{2s} \Big] \\
& - \omega \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \rho_s N_{ps} n_{lpts}
\end{aligned} \tag{3.166}$$

s.a: Restrições (3.114)–(3.160)

s.a.:

$$\begin{aligned}
& \sum_{s' \in \mathcal{S}} \rho_{s'} \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} (R_{ps'} - T_{lp}^X) d_{lp} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{ml's'}^L t_{ml'p} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lrs'}^F y_{lr} - \right. \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lps'}^V \alpha_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C_{lps'}^P r_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lps'}^S s_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lrs'}^X c'_{lr} \right) \\
& - \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} (R_{ps} - T_{lp}^X) d_{lp} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{ml's}^L t_{ml'p} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lrs}^F y_{lr} - \right. \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lps}^V \alpha_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C_{lps}^P r_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lps}^S s_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lrs}^X c'_{lr} \right) \leq \theta_{1s} \quad \forall s \in \mathcal{S}
\end{aligned} \tag{3.167}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{s' \in \mathcal{S}} \rho_s \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} (R_{ps'} - T_{lps'}^X) d_{lpts} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{ml's'}^L t_{ml'pts} - \right. \\
& \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lrs'}^F y_{lrts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lps'}^V \alpha_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t > 1} C_{lps'}^P r_{lpts} - \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lps'}^S s_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lrs'}^X c'_{lrts} \right) \\
& - \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} (R_{ps} - T_{lps}^X) d_{lpts} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{ml's}^L t_{ml'pts} - \right. \\
& \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lrs}^F y_{lrts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lps}^V \alpha_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t > 1} C_{lps}^P r_{lpts} - \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lps}^S s_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lrs}^X c'_{lrts} \right) \leq \theta_{2s} \quad \forall s \in \mathcal{S}
\end{aligned} \tag{3.168}$$

$$\theta_{1s} \geq 0 \quad \forall s \in \mathcal{S} \tag{3.169}$$

$$\theta_{2s} \geq 0 \quad \forall s \in \mathcal{S} \tag{3.170}$$

A inclusão do parâmetro λ ao termo de variância permite a avaliação do risco por parte do tomador de decisão, assim, tanto a otimização robusta quanto modelos *risk-averse* de programação estocástica robusta, permitem estilos variáveis de gerenciamento, uma vantagem nítida em relação à programação estocástica linear e inteira-mista.

Conforme apresentado em (3.163), a diferença entre o custo médio total e o custo total dos cenários deve ser não negativo e equivalente ao desvio pela violação da média. Esta propriedade é mantida por meio das restrições (3.167)–(3.170). As restrições (3.167) e (3.169) determinam estas condições para o primeiro estágio, enquanto que as restrições (3.168) e (3.170) são relativas ao segundo estágio do programa estocástico de dois-estágios robusto. Elas garantem que funções objetivo distintas e não-negativas sejam geradas por diferentes cenários. As restrições subsequentes (3.114)–(3.160) são equivalentes ao modelo **PTCS-2HR** apresentado na seção 3.4.2.

Capítulo 4

Decomposição Estocástica de Benders

“Divide et impera.”

Iulius Caesar

No capítulo anterior abordamos formulações para o problema de planejamento tático da cadeia de suprimentos, dando enfoque à formulações por programação estocástica robusta e programação estocástica. Diante da incerteza, estes problemas tendem a crescer demandando muito recurso computacional. Por isso, este capítulo é dedicado à avaliação de estratégias de decomposição do problema estocástico. Para resolvê-los, são utilizados os métodos de decomposição, como discutido em 1.1.3.

Apresentamos métodos de decomposição do problema estocástico baseado em Benders (1962). A estratégia de decomposição adotada atende simultaneamente às condições de planejamento por horizonte rolante e aos requisitos decomposição do problema com base em suas variáveis.

Na seção 4.1 discutimos, para o problema determinístico, a teoria que fundamenta o método de decomposição de Benders (1962). Em seguida, a seção 4.2 aborda como o método é usado para realizar a decomposição de problemas estocásticos. Apresentamos o método de decomposição estocástica multi-corte na seção 4.2.1 aplicado ao nosso problema linear de planejamento da cadeia de suprimentos, viabilizando, assim, o seu planejamento por horizonte rolante. Finalmente, na seção 4.2.2, apresentamos a versão do algoritmo elaborada para resolver o problema de programação estocástica inteira-mista.

4.1 Decomposição do problema determinístico

Dentre os métodos usados para a resolução de problemas de programação de grande porte, temos o método de decomposição de Benders (1962), que trata o problema por meio de projeção, seguido por dualização e relaxação. A ideia subjacente ao método

está no particionamento de um dado problema em dois sub problemas; um problema de programação (que pode ser linear, não-linear, discreto, etc.) e um problema de programação linear. A descrição do método para o problema de maximização é baseada nos estudos de De Camargo (2007) e De Sá (2011). Nestes, uma didática descrição do método pode ser vista para o caso de minimização.

Consideremos o particionamento do problema original em um problema de PLIM, conhecido como problema mestre (PM), e um problema contínuo de PL conhecido como subproblema (SP). Para evitar o cálculo de todo conjunto de restrições das regiões viáveis do primeiro problema, o procedimento encontra a solução ótima em um número finito de passos. Resolvemos os problemas iterativamente até que o limite superior do PM convirja para o limite inferior proveniente do SP. Cada passo envolve a solução de um programa genérico de programação.

O PM consiste em uma versão relaxada do problema original ao qual se adicionam, por um processo iterativo, novas restrições, enquanto que o SP consiste no problema original resolvido para um valor fixado das variáveis inteiras.

O algoritmo resolve os dois problemas, PM e SP, iterativamente. A cada iteração uma restrição, conhecida como corte de Benders, é adicionado ao PM. Esta nova restrição é originada pela solução do problema dual do SP. O algoritmo é finalizado quando os limites superiores (LS), solução ótima do PM, e inferiores (LI), da solução do SP, convergem para a solução ótima do problema original, ou seja, $LS = LI$.

Considere o problema de PLIM:

$$\max(c^\top x + f^\top z) \tag{4.1}$$

$$\text{s.a: } Ax + Bz \leq b \tag{4.2}$$

$$Dz \leq d \tag{4.3}$$

$$x \geq 0 \tag{4.4}$$

$$z \in \mathbb{Z}^+ \tag{4.5}$$

Onde c e x são vetores de tamanho n . f e z são vetores de tamanho p . Os vetores b e d têm dimensão m e q respectivamente. As matrizes A , B e D possuem dimensão $m \times n$, $m \times p$ e $q \times p$ respectivamente. Este problema pode ser expresso como:

$$\max(f^\top z + v(z)) \tag{4.6}$$

$$\text{s.a: } Dz \leq d \tag{4.7}$$

$$z \in \mathbb{Z}^+ \tag{4.8}$$

Onde $v(z)$ é uma função convexa definida por:

$$v(z) = \max c^\top x \quad (4.9)$$

$$\text{s.a: } Ax \leq b - Bz \quad (4.10)$$

$$x \geq 0 \quad (4.11)$$

Seja $Z = \{z \in \mathbb{Z}^+ : Dz \leq d\}$. Então, para cada $z \in \mathbb{Z}^+$, o valor de $v(z)$ é a solução ótima de um problema linear cujo dual, conhecido como subproblema de Benders (SP) é dado por:

$$\min(b - Bz)^\top u \quad (4.12)$$

$$\text{s.a: } A^\top u \geq c \quad (4.13)$$

$$u \geq 0 \quad (4.14)$$

Pela teoria da dualidade, o valor de $v(z)$ pode ser encontrado usando qualquer um dos dois problemas lineares. No entanto, uma vez que a região de viabilidade do problema dual não depende da variável inteira z , esta forma é mais conveniente para ser utilizada. Seja $\Omega = \{u \geq 0 : A^\top u \geq c\}$, os conjuntos de soluções viáveis de SP. Assumindo que $\Omega \neq \emptyset$, caso contrário o problema primal seria inviável ou ilimitado, então, pelo teorema de Minkowski, o conjunto Ω pode ser gerado a partir de um conjunto convexo finito de pontos extremos e de raios extremos. Portanto, consideramos G e H o conjunto de pontos extremos e raios extremos de Ω , respectivamente.

É importante ressaltar que não é conveniente que o SP tenha soluções ilimitadas, uma vez que, soluções duais ilimitadas correspondem a soluções primais inviáveis. Então, pelo lema de Farkas, as restrições (4.17) garantem que somente valores primais viáveis de z serão usados para resolver $v(z)$. Sendo assim, o problema (4.6)–(4.8) pode ser reformulado como:

$$\max(f^\top z + \{\min(b - Bz)^\top u : u \in \Omega\}) \quad (4.15)$$

$$\text{s.a: } Dz \leq d \quad (4.16)$$

$$0 \geq (b - Bz)^\top u_h \quad \forall u_h \in H \quad (4.17)$$

$$z \in \mathbb{Z}^+ \quad (4.18)$$

Como a solução do ponto interno de minimização é sempre um ponto extremo $u_g \in G$, então, com o auxílio de uma variável contínua η o problema anterior pode ser reformulado novamente:

$$\max(f^\top z + \eta) \tag{4.19}$$

$$\text{s.a: } Dz \leq d \tag{4.20}$$

$$\eta \leq (b - Bz)^\top u_g \quad \forall u_g \in G \tag{4.21}$$

$$0 \geq (b - Bz)^\top u_h \quad \forall u_h \in H \tag{4.22}$$

$$z \in \mathbb{Z}^+ \tag{4.23}$$

$$\eta \in \Re \tag{4.24}$$

O problema acima é definido como o Problema Mestre (PM). A formulação do PM possui um número menor de variáveis, pois não considera as variáveis lineares do subproblema, no entanto, ela possui um número maior de restrições uma vez que a cardinalidade do conjunto de todos os pontos extremos (G) e raios extremos (H) pode ser (muito) maior que o número de variáveis lineares, dependendo da dimensão do problema. Considerando o fato de que nem todas as restrições estarão ativas na solução ótima, uma alternativa é resolver o PM relaxado, isto é, sem as restrições (4.21) e (4.22) e adicioná-las sob demanda a cada iteração. Estas restrições, conhecidas como cortes de Benders, são geradas a partir da solução do SP.

Dessa forma, sempre que o subproblema primal (4.9)–(4.11) tiver solução ótima, o SP também terá uma solução ótima, que corresponde a um ponto extremo $u_g \in G$ e dará origem à seguinte restrição, conhecida como corte de otimalidade (corte tipo I):

$$\eta \leq (b - Bz)^\top u_g \tag{4.25}$$

Onde η é uma variável contínua que superestima o custo do SP. Caso o subproblema primal seja inviável, a solução do SP será ilimitada e corresponderá a um raio extremo $u_h \in H$ e dará origem a seguinte restrição, conhecida como corte de viabilidade (corte tipo II):

$$0 \geq (b - Bz)^\top u_h \tag{4.26}$$

4.2 Decomposição do problema estocástico

Apresentamos uma descrição do método de decomposição adequado para a resolução do problema estocástico **PTCS-2HR** (Formulação PTCS - 2 estágios e Horizonte Rolante) apresentado na seção 3.4.2. Uma discussão detalhada sobre o algoritmo pode ser encontrada em Birge e Louveaux (1997). Uma versão aplicada do método ao planejamento da cadeia de suprimentos é apresentada em You e Grossmann (2013) e Oliveira et al. (2014).

Considere a formulação genérica do modelo de programação estocástica de dois estágios com recurso fixo (4.27)–(4.32). Esta formulação foi apresentada na seção 3.4.2 para o caso de minimização:

$$\max c^\top x + E_\xi Q(x, \xi) \quad (4.27)$$

$$Ax = b \quad (4.28)$$

$$x \geq 0 \quad (4.29)$$

Onde:

$$E_\xi Q(x, \xi) = \max q(\omega)^\top y(\omega) \quad (4.30)$$

$$T(\omega)x + Wy(\omega) = h(\omega) \quad (4.31)$$

$$y(\omega) \geq 0 \quad (4.32)$$

E_ξ é a esperança matemática com relação a ξ . Seja $\Xi \subseteq \mathfrak{R}^N$ o suporte de ξ , ou seja, o menor subconjunto fechado em \mathfrak{R}^N tal que $P\{\xi \in \Xi\} = 1$. O termo Problema Mestre (PM) é adotado para as variáveis x , enquanto que os Sub Problemas (SP) são usados para avaliar os programas lineares com recurso para o segundo-estágio. O objetivo é evitar a avaliação excessiva de todos estes SP.

Seja $s = 1, \dots, S$ o índice de possíveis realizações de cenários e ρ_s suas respectivas probabilidades de ocorrência. Um problema determinístico equivalente pode ser escrito em sua forma extensiva. Cria-se um conjunto de variáveis do segundo-estágio y_s a cada realização de q_s , h_s e T_s . O Problema Original (PO) de grande porte é apresentado na seguinte forma extensiva (4.33)–(4.36):

$$\text{PO : } \max c^\top x + \sum_{s \in S} \rho_s q_s^\top y_s \quad (4.33)$$

$$\text{s.a: } Ax = b \quad (4.34)$$

$$T_s x + W y_s = h_s \quad s \in S \quad (4.35)$$

$$x \geq 0, \quad y_s \geq 0, \quad s \in S \quad (4.36)$$

No primeiro passo, um PM é resolvido com restrições do tipo (4.34), que não incluem variáveis do segundo-estágio, para obter as decisões do primeiro-estágio. Em seguida, as variáveis do primeiro-estágio são fixadas e se resolvem todos os SP do tipo (4.35) que incluem decisões do segundo-estágio para obter soluções ótimas das variáveis deste estágio. Seja $Q_s(x)$ o valor da função objetivo para cada cenário de SP. Este e o PM podem ser reformulados como:

$$\text{SP : } Q_s(x) = \max q_s^T y_s \quad (4.37)$$

$$\text{s.a: } T_s x + W y_s = h_s, \quad y_s \geq 0 \quad (4.38)$$

$$\text{PM : } \max c^T x + \sum_{s \in S} \rho_s Q_s(x) \quad (4.39)$$

$$\text{s.a: } Ax = b, \quad x \geq 0 \quad (4.40)$$

Para resolver o PO (Problema Original) é possível aproveitar as propriedades duais de (4.39) introduzindo uma variável θ para $\sum_{s \in S} \rho_s Q_s(x)$ e iterando n vezes entre o PM (P1) e o SP (P2) até que se atinja um limite de tolerância pré-determinado:

$$\text{P1 : } \max c^T x + \theta \quad (4.41)$$

$$\text{s.a: } \theta \leq \sum_{s \in S} \rho_s T_s \pi_{n,s}^T + \sum_{s \in S} \rho_s h_s \pi_{n,s}^h \quad n = 1, \dots, N \quad (4.42)$$

$$\text{s.a: } Ax = b, \quad x \geq 0 \quad (4.43)$$

$$\text{P2 : } \max q_s^T y_s \quad (4.44)$$

$$\text{s.a: } T_s x + W y_s = h_s, \quad y_s \geq 0 \quad (4.45)$$

Onde π_s são vetores duais ótimos das restrições (4.38), enquanto que (4.42) são os cortes de otimalidade que vinculam o PM e os SP cenários. Os modelos de dois-estágios **PTCS-2ML** (Manufatura e Logística) e **PTCS-2HR** (Horizonte Rolante) possuem recurso completo (Birge e Louveaux, 1997), ou seja, o segundo estágio é sempre viável para qualquer solução viável do primeiro estágio. Isso porque as variáveis de folga usadas para modelarem a demanda não atendida n_{lps} e n_{lpts} nas restrições (3.147) e (3.148) garantem a viabilidade do problema de planejamento. Neste caso, a etapa de adição de cortes é simplificada, pois não há a necessidade de gerar cortes de viabilidade.

A combinação dos princípios do método de decomposição de Benders e problemas estocásticos é referido como Decomposição Estocástica de Benders ou Método L-Shaped para problemas lineares (Van Slyke e Wets, 1969) e inteiros-mistos (Laporte e Louveaux, 1993). O modelo **PTCS-2ML** (Formulação PTCS - 2 estágios: Manufatura e

Logística) não apresenta características adequadas para a decomposição. Isto porque as restrições de balanceamento de fluxo, que integram todos os elos da cadeia não apresentam uma estrutura separada em blocos. Esta condição é fundamental para elaborar métodos eficientes com bom desempenho computacional. O modelo **PTCS-2HR** (Formulação PTCS - 2 estágios e Horizonte Rolante) proposto na seção 3.4.2, no entanto, pode ser decomposto para aplicações que demandam apenas sua versão linear (PL) ou uma versão inteira-mista (PLIM) em que somente as variáveis inteiras e binárias do primeiro-estágio sejam necessárias, ou seja, as restrições (4.92) e (4.94) do segundo-estágio devem estar relaxadas. Tais características nos permite avaliar um método de decomposição baseado no método Benders (1962), descrito na seção 4.1. O Problema Mestre (PM) pode ser equivalentemente formulado para o período $t = 1$ como segue:

$$\begin{aligned} \max \Psi = & \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \rho_s (R_{ps} - T_{lp}^X) d_{lp} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{ml'p}^L t_{ml'p} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lr}^F y_{lr} - \\ & \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lp}^V \alpha_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} C_{lp}^P r_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} C_{lp}^S s_{lp} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} C_{lr}^X c_{lr} + \theta \end{aligned} \quad (4.46)$$

s.a.:

$$s_{lpt} = S_{lp}^0 \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t = 0 \quad (4.47)$$

$$S_{lpt}^S \leq s_{lpt} \leq S_{lpt}^X \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t = 1 \quad (4.48)$$

$$L_{lp}^M r_{lp} \leq A_{lpt}^R \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t = 1 \quad (4.49)$$

$$L_{lp}^M r_{lp} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'p} \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t = 1 \quad (4.50)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'p} + s_{lpt-1} = s_{lp} + b_{lp} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{X}, t = 1 \quad (4.51)$$

$$\begin{aligned} L_{lp}^M \alpha_{lp} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'p} + s_{lpt-1} &= \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'p} + s_{lpt} \\ \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{Y}, t &= 1 \end{aligned} \quad (4.52)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'p} + s_{lpt-1} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'p} + s_{lpt} \quad \forall l \in \mathcal{H}, p \in \mathcal{Y}, t = 1 \quad (4.53)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{ml'p} = d_{lp} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t = 1 \quad (4.54)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{ml'p} \leq C_{lt}^I \quad \forall l \in \mathcal{H}, t = 1 \quad (4.55)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'p} \leq C_{lt}^O \quad \forall l \in \mathcal{H}, t = 1 \quad (4.56)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} a_{lrp} M_{lrp}^C = c_{lr} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t = 1 \quad (4.57)$$

$$c_{lr} \leq AV_{lr} y_{lr} + c'_{lr} A_{lrt}^X \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t = 1 \quad (4.58)$$

$$c'_{lp} \leq y_{lr} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t = 1 \quad (4.59)$$

$$a_{lrp} T_{lrp}^R = L_{lp}^M \alpha_{lp} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t = 1 \quad (4.60)$$

$$b_{lp'} = \sum_{p \in \mathcal{Y}} B_{p'p} L_{lp}^M \alpha_{lp} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p' \in \mathcal{X}, t = 1 \quad (4.61)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{X}} t_{mll'p} \leq T_{mll'}^{CX} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, t = 1 \quad (4.62)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'p} \leq T_{mll'}^{CY} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, t = 1 \quad (4.63)$$

$$d_{lp} = D_{tpcs} - n_{lps} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, s \in \mathcal{S}, t = 1 \quad (4.64)$$

$$\theta \leq \mathcal{Q}(\alpha, y, r) \quad (4.65)$$

$$b_{lp}, s_{lpt}, d_{lp}, n_{lp} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t = 1 \quad (4.66)$$

$$t_{mll'p} \geq 0 \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P} \quad (4.67)$$

$$\alpha_{lp}, r_{lp} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P} \quad (4.68)$$

$$a_{lrp} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P} \quad (4.69)$$

$$y_{lr} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R} \quad (4.70)$$

$$0 \leq c'_{lr} \leq 1 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R} \quad (4.71)$$

Os Sub Problemas (SP) $\mathcal{Q}(\alpha, y, r) = \mathbb{E}_\omega[\alpha, y, r, \xi]$ podem ser formulados para os períodos $t > 1$ como segue:

$$\begin{aligned}
\max \Phi = & \sum_{l \in \mathcal{S}} \rho_s \left(\sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} (R_{ps} - T_{lp}^X) d_{lpts} - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{mll'}^L t_{mll'pts} - \right. \\
& \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lr}^F y_{lrts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lp}^V \alpha_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t > 1} C_{lp}^P r_{lpts} - \\
& \left. \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t > 1} C_{lp}^S s_{lpts} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{t > 1} C_{lr}^X c'_{lrts} \right) \quad (4.72)
\end{aligned}$$

s.a.:

$$S_{lpt}^S \leq s_{lpts} \leq S_{lpt}^X \quad \forall l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H}), p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.73)$$

$$L_{lp}^M r_{lpts} \leq A_{lpt}^R \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.74)$$

$$L_{lp}^M r_{lpts} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} \quad \forall l \in \mathcal{F}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.75)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} + s_{lpt-1s} = s_{lpts} + b_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{X}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.76)$$

$$L_{lp}^M \alpha_{lpts} + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} + s_{lpt-1s} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} + s_{lpts} \quad (4.77)$$

$$\forall l \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{Y}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} + s_{lpt-1s} = \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} + s_{lpts} \quad (4.78)$$

$$\forall l \in \mathcal{H}, p \in \mathcal{Y}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} t_{mll'pts} = d_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.79)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'pts} \leq C_{lt}^I \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.80)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'pts} \leq C_{lt}^O \quad \forall l \in \mathcal{H}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.81)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} a_{lrpts} M_{lrp}^C = c_{lrts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.82)$$

$$c_{lrts} \leq A V_{lrt} y_{lrts} + c'_{lrt} A_{lrt}^X \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.83)$$

$$c'_{lpts} \leq y_{lrts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.84)$$

$$a_{lrpts} T_{lrp}^R = L_{lp}^M \alpha_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.85)$$

$$b_{lp'ts} = \sum_{p \in \mathcal{Y}} B_{p'p} L_{lp}^M \alpha_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{I}, p' \in \mathcal{X}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.86)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{X}} t_{mll'pts} \leq T_{mll'}^{CX} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.87)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{Y}} t_{mll'pts} \leq T_{mll'}^{CY} \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{K}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.88)$$

$$d_{lpts} = D_{tpcs} - n_{lpts} \quad \forall l \in \mathcal{C}, p \in \mathcal{Y}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.89)$$

$$b_{lpts}, s_{lpts}, d_{lpts}, n_{lpts} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.90)$$

$$t_{mll'pts} \geq 0 \quad \forall m \in \mathcal{M}, ll' \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.91)$$

$$\alpha_{lpts}, r_{lpts} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall l \in \mathcal{L}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.92)$$

$$a_{lrpts} \geq 0 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, p \in \mathcal{P}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.93)$$

$$y_{lrts} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.94)$$

$$0 \leq c'_{lrts} \leq 1 \quad \forall l \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R}, t \in 2..|\mathcal{T}|, s \in \mathcal{S} \quad (4.95)$$

A desigualdade (4.65) não pode ser usada computacionalmente como uma restrição, uma vez que ela não está definida explicitamente, apenas implicitamente por problemas de otimização. A principal ideia do método de decomposição é relaxar esta restrição e substituí-la por uma quantidade de cortes, que devem ser gradualmente adicionados ao PM seguindo um processo iterativo. Determinamos π_n como os vetores duais ótimos da iteração n relativo às restrições (4.73) (4.74) (4.76) (4.77) (4.78) (4.80) (4.81) (4.87) (4.88) (4.89). A desigualdade (4.65) é substituída pelos cortes de otimalidade (4.96), que vinculam o PM e os cenários SP.

$$\begin{aligned} \theta \leq & \sum_{l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H})} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.73)} S_{lpt}^S + \sum_{l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H})} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.73)} S_{lpt}^X \\ & + \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.74)} A_{lpt}^R - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{X}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.76)} S_{lpt-1s} \\ & - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.77)} S_{lpt-1s} - \sum_{l \in \mathcal{H}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.78)} S_{lpt-1s} \\ & + \sum_{l \in \mathcal{H}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.80)} C_{lt}^I + \sum_{l \in \mathcal{H}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.81)} C_{lt}^O + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.87)} T_{mll'}^{CX} \\ & + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{ll' \in \mathcal{K}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.88)} T_{mll'}^{CY} + \sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \sum_{s \in \mathcal{S}} \pi_{(4.89)} D_{tpcs}, \quad n \in N \quad (4.96) \end{aligned}$$

O algoritmo de decomposição estocástica de Benders é apresentado como segue:

Algoritmo decomposição estocástica de Benders

- 1 Faça $GAP = \infty$, $\theta = \infty \quad \forall s \in S$, $n = 1$ e inicialize os parâmetros \bar{s}_{lpt} .
 - 2 Em n , resolva PM (4.46)–(4.71) com cortes gerados nas iterações anteriores e fixe os valores de s_{lpt} obtido na solução do primeiro-estágio (4.46)–(4.71).
 - 3 Resolva todos os cenários SP (4.72)–(4.95).
 - 4 Se $\Phi^n > \theta$ então a solução ótima de **PCTS-2HR** foi obtida. Senão
 - 5 Faça $GAP = \min\{GAP, \theta - \Phi^n\}$.
 - 6 Faça $n = n+1$. Compute os coeficientes dos cortes de otimalidade π_n e adicione (4.96) ao PM e retorne ao passo 2.
-

O modelo **PCTS-2HR** inteiro-misto (PLIM) possui variáveis inteiras e binárias no primeiro e no segundo-estágio (decisões de compra e produção em lotes múltiplos e decisões de ativação ou não de recursos produtivos). Isto o torna mais complexo, pois envolve a resolução de um sub-problema inteiro-misto para cada cenário. Além disso, a função $Q(x)$ de um programa inteiro é, em geral, não convexa e descontínua (Birge e Louveaux, 1997).

Ao final da seção 3.1, discutimos a possibilidade da adoção de formulações lineares ou relaxadas sob determinadas condições. A versão linear deste problema, assim como a versão relaxada (que demande que apenas as variáveis do primeiro estágio sejam inteiras e binárias), possuem sub-problemas contínuos. Tal condição favorece o uso de cortes de otimalidade, usados no método tradicional de Benders (1962), para a decomposição estocástica, pois estes são baseados na teoria da dualidade. Além disso, a independência dos cenários viabiliza a geração múltipla de cortes de otimalidade, contribuindo para o aumento desempenho do método e redução do tempo computacional.

4.2.1 Decomposição estocástica multi-corte

Nessa seção, são apresentadas as etapas do algoritmo de decomposição estocástica multi-corte. Neste algoritmo, resolvemos inicialmente o problema-mestre (PM) para obter um limite superior do valor da função objetivo. Em seguida fixamos a variável de decisão de estoque s_{lpt} do primeiro-estágio e resolvemos cada cenário sub-problema (SP) para obter um limite inferior. Se o limite inferior e superior estão dentro de uma tolerância, então o algoritmo finaliza. Caso contrário, utilizamos os valores duais dos cenários SP para adicionar cortes de Benders e retornar ao PM.

O método padrão de decomposição de Benders retorna apenas um corte ao PM por iteração. Em problemas de grande porte, esta convergência pode ser demorada demandando muitas iterações do algoritmo até se obter os limites de tolerância de otimalidade pré-definidos. Para acelerar o algoritmo, decomponemos a variável θ por cenários para retornar a quantidade de cortes (4.99) equivalente ao número de cenários para cada iteração n . Nesta versão do algoritmo, o PM P3 apresenta a seguinte estrutura:

$$\text{P3 : } \max c^\top x + \sum_{s \in S} \rho_s \theta_s \quad (4.97)$$

$$\text{s.a: } Ax = b \quad (4.98)$$

$$\theta_s \leq T_s \pi_{n,s}^T + h_s \pi_{n,s}^h \quad \forall s \in S, n = 1, \dots, N \quad (4.99)$$

$$x \geq 0 \quad (4.100)$$

Onde $\pi_{n,s}$ são vetores duais ótimos do cenário s e iteração n relativo às restrições (4.38). Os cortes múltiplos de otimalidade (4.101) vinculam o PM e os cenários SP.

$$\begin{aligned} \theta_s \leq & \sum_{l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H})} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.73)} S_{lpt}^S + \sum_{l \in (\mathcal{I} \cup \mathcal{H})} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.73)} S_{lpt}^X + \sum_{l \in \mathcal{F}} \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.74)} A_{lpt}^R \\ & - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{X}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.76)} S_{lpt-1s} - \sum_{l \in \mathcal{I}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.77)} S_{lpt-1s} - \sum_{l \in \mathcal{H}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.78)} S_{lpt-1s} \\ & + \sum_{l \in \mathcal{H}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.80)} C_{lt}^I + \sum_{l \in \mathcal{H}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.81)} C_{lt}^O + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.87)} T_{ml'}^{CX} \\ & + \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{l' \in \mathcal{K}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.88)} T_{ml'}^{CY} + \sum_{l \in \mathcal{C}} \sum_{p \in \mathcal{Y}} \sum_{t \in 2..|\mathcal{T}|} \pi_{(4.89)} D_{tpcs}, \quad \forall s \in S, n \in N \end{aligned} \quad (4.101)$$

O algoritmo é similar ao método de decomposição estocástica de Benders e apresentado como segue:

Algoritmo decomposição estocástica multi-cortes

- 1 Faça $GAP = \infty$, $\theta_s = \infty \quad \forall s \in S$, $n = 1$ e inicialize os parâmetros \bar{s}_{lpt} .
 - 2 Em n , resolva PM (4.46)–(4.71) com cortes gerados nas iterações anteriores e fixe os valores de s_{lpt} obtido na solução do primeiro-estágio (4.46)–(4.71).
 - 3 Resolva todos os cenários SP (4.72)–(4.95).
 - 4 Se $\Phi^n > \sum_{s \in S} \theta_s$ então a solução ótima de **PCTS-2HR** foi obtida. Senão
 - 5 Faça $GAP = \min\{GAP, \sum_{s \in S} \theta_s - \Phi^n\}$.
 - 6 Faça $n = n + 1$. Compute os coeficientes dos cortes de otimalidade $\pi_{n,s}$ e adicione (4.101) ao PM e retorne ao passo 2.
-

O algoritmo contribui para a redução do tempo e de consumo de recursos computacionais, portanto, é de grande utilidade para a resolução de problemas complexos, como o problema de planejamento da cadeia de suprimentos estocástico inteiro-misto.

4.2.2 Decomposição do problema estocástico inteiro-misto

Em 4.2 os problemas estocásticos de planejamento da cadeia de suprimentos por dois-estágios são abordados. No primeiro-estágio, a decisão precisa ser tomada sem conhecimento da informação completa das variáveis aleatórias. Quando o valor destas variáveis são revelados, ações corretivas, ou de recurso, são tomadas no segundo-estágio. Programas estocásticos inteiro-mistos são aqueles para os quais as variáveis são inteiras ou binárias tanto no primeiro quanto no segundo-estágio. Eles possuem a reputação de serem computacionalmente intratáveis, pois combinam dois tipos de programas que são, individualmente, difíceis de serem resolvidos (Laporte e Louveaux, 1993).

O algoritmo elaborado considera a relaxação de restrições integralidade do PM e dos SP. Esta é uma necessidade e condição básica para qualquer esquema de *branch and bound* ou *branch and cut* (Birge e Louveaux, 1997). As restrições de integralidade são recuperadas ao longo do algoritmo de forma a criar os nós pendentes ainda não examinados. Os cortes de otimalidade são baseados na abordagem multi-corte adotada na seção 4.2.1.

Algoritmo decomposição estocástica inteiro-misto

- 1 Faça $GAP = \infty$, $\theta_s = \infty \quad \forall s \in S$, $n = 1$ e inicialize os parâmetros \bar{s}_{lpt} .
 - 2 Relaxe restrições de integralidade dos cenários SP.
 - 3 Relaxe restrições de integralidade do PM.
 - 4 Se $GAP \leq 0$ então
 - Ative a restrições de integralidade dos SP.
 - Resolva os cenários SP (4.72)–(4.95).
 - Atualize as variáveis presentes nas restrições do corte de otimalidade.
 - Ative a restrições de integralidade do PM.
 - Resolva o PM. A solução ótima de **PCTS-2HR** foi obtida. Senão
 - 5 Resolva todos os cenários SP (4.72)–(4.95).
 - 6 Faça $n = n + 1$. Compute os coeficientes dos cortes de otimalidade $\pi_{n,s}$ e adicione (4.101) ao PM.
 - 7 Em n , resolva PM (4.46)–(4.71) com cortes gerados nas iterações anteriores e fixe os valores de s_{lpt} obtido na solução do primeiro-estágio (4.46)–(4.71).
 - 8 Faça $GAP = \min\{GAP, \sum_{s \in S} \theta_s - \Phi^n\}$ e retorne ao Passo 4.
-

Neste capítulo foram elaborados estratégias de decomposição do problema estocástico de planejamento tático da cadeia de suprimentos. Estas, no entanto, devem ser avaliadas. Por isso, o capítulo 5 é dedicado à avaliação dos métodos de decomposição do problema estocástico por meio de um estudo computacional.

Capítulo 5

Estudo Computacional

"If I have been able to see further, it was only because I stood on the shoulders of giants."

Isaac Newton

Neste capítulo, avaliamos, por meio de um estudo computacional, as características dos modelos e as técnicas de solução elaboradas. Esta avaliação, no entanto, vai além ao abordar a flexibilidade da cadeia.

A avaliação da flexibilidade de sistemas de planejamento da cadeia de suprimentos tem sido pouco explorada na literatura, como discutido em Esmailikia et al. (2014). Neste trabalho, a flexibilidade das formulações e métodos, apresentados nos capítulos 3 e 4, é avaliada em cadeias de suprimentos de pequeno, médio e grande porte sob diversos cenários de demanda por meio de problemas-teste lineares e inteiro-misto.

5.1 Descrição dos problemas-teste

Com o intuito de caracterizar as diversas possíveis situações, usamos a notação $a/b/c$ para representar uma classe particular de problemas-teste de planejamento tático da cadeia de suprimentos.

A primeira letra da notação determina o modelo. Estas podem ser **D**, **R**, **C**, **M**, **H** ou **O**, representando, respectivamente, as nomenclaturas adotadas neste trabalho: **PTCS-D**, **PTCS-R**, **PTCS-C**, **PTCS-2ML**, **PTCS-2HR** ou **PTCS-OR**. A segunda letra especifica o tipo de modelo. Este pode ser linear, representado por **L**, ou linear inteiro-misto, representado por **M**. Particularmente, em problemas estocásticos inteiro-misto de dois-estágios, adotamos as letras **ML**, para o primeiro-estágio inteiro-misto e o segundo-estágio linear, e **MM**, para ambos primeiro e segundo estágios inteiro-misto. Finalmente, a terceira letra está relacionada ao tamanho da cadeia de suprimentos. Esta pode ser **P**, se pequena, **M**, se médio, ou **G**, se grande. Assim, o **D/M/M** representa um modelo determinístico de médio porte de planejamento

tático da cadeia de suprimentos, resolvido por programação linear inteira-mista. Os parâmetros relativos ao tamanho da cadeia de suprimentos são descritos na tabela 5.1. O planejamento é avaliado por um período de 12 meses a todos os modelos.

Dados	P	M	G
Fornecedores	3	6	12
Plantas industriais	1	2	4
Centros de distribuição	2	4	8
Regiões de demanda	10	20	50
Matérias primas	4	8	16
Processos	5	10	20
Famílias de produtos	10	20	30
Modais de transporte	1	2	3

Tabela 5.1: Configuração da cadeia de suprimentos para os parâmetros P, M e G

O problema inteiro-misto considera lotes múltiplos de suprimento e de produção, além de considerar a possibilidade de desativar operações ao longo do período de planejamento. Florian et al. (1980) e Bitran e Yanasse (1982) mostram que este problema é NP-difícil pois envolve o dimensionamento de lotes de múltiplos produtos sob restrições de capacidade variável no tempo.

Neste estudo computacional, os parâmetros adotados são comuns a todos os problemas. As diferenças residem no fato do modelo determinístico possuir apenas um cenário e do modelo de programação estocástica robusta assumir parâmetros financeiros estocásticos. Três cenários estão presentes tanto nos modelos de programação estocástica, quanto no modelo de programação estocástica robusta. São investigados, em problemas estocásticos, o *valor esperado da informação perfeita* (VEIP) e o *valor da solução estocástica* (VSE) em relação ao seu modelo similar determinístico. VEIP e VSE representam, respectivamente, a perda de lucro na presença de incerteza e o ganho provável ao resolver o modelo estocástico, como descrito na seção 3.4.1.

Avaliamos as características computacionais dos problemas, como: número de cenários, número de variáveis, número de restrições e tempo computacional. Em particular, apresentamos o lucro total, ou seja, o valor final da função objetivo e o *gap* de otimalidade para problemas PLIM de programação estocástica e programação estocástica robusta.

As formulações e métodos elaborados foram implementados em MathProg do *GNU Linear Programming Kit* – GLPK (Makhorin, 2008) e em AMPLTM (Fourer et al., 1993) e resolvidos pelo *software* Gurobi 6.0TM, usando-se os parâmetros *default* do mesmo. A formulação dos cenários foi baseada em Gassmann e Ireland (1995). Os experimentos foram executados em um *desktop* com processador Intel Core i5TM, 4GB de memória RAM, 3.1 GHz, sob a plataforma Windows 7TM.

5.2 Avaliação de desempenho das formulações

O propósito dos experimentos numéricos é testar as formulações para cadeias de suprimentos de pequeno, médio e grande porte e avaliar os problemas sob condições similares encontradas em empresas. Para isso, realizamos rodadas de otimização utilizando os parâmetros descritos na seção 5.1. Adotamos 3 cenários aleatórios para os problemas estocásticos. Os parâmetros de receita e demanda dos problemas estocásticos foram representados por distribuições uniforme no intervalo $[a,b]$, onde a e b são os valores mínimo e máximo destes parâmetros. As rodadas de otimização foram executadas por até 3600 segundos.

A avaliação do modelo determinístico **PTCS-R** (Planejamento Tático da Cadeia de Suprimentos - Reformulado) em relação a **PTCS-D** (Planejamento Tático da Cadeia de Suprimentos - Determinístico) apresenta as vantagens obtidas com a reformulação proposta. Em seguida, são feitas comparações do modelo determinístico reformulado **PTCS-R** com os modelos estocásticos e com o modelo robusto. Assim, **PTCS-R** é o modelo base para avaliação do modelo estocástico por cenários, **PTCS-C** (Planejamento Tático da Cadeia de Suprimentos - Cenários), dos modelos estocásticos por dois-estágios, **PTCS-2ML** (Manufatura e Logística) e **PTCS-2HR** (Horizonte Rolante), e do modelo de programação estocástica robusta, **PTCS-OR** (Formulação PTCS - Otimização Robusta).

5.2.1 PTCS-D vs. PTCS-R

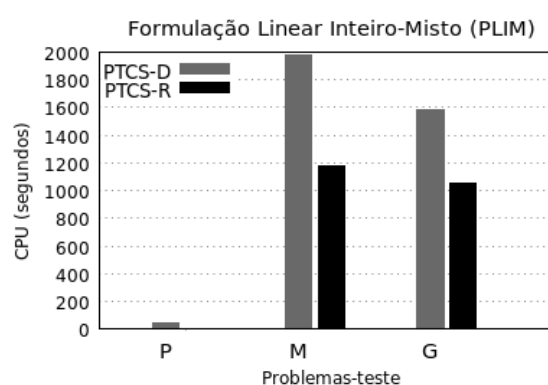
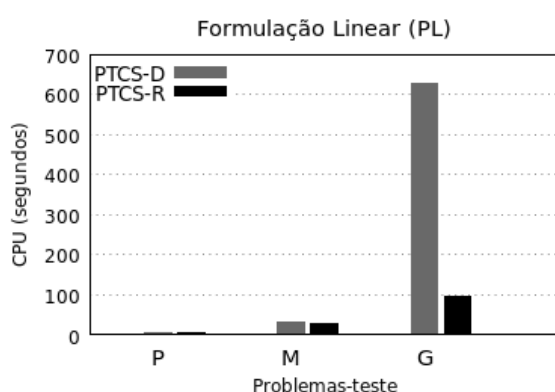


Figura 5.1: Desempenho dos modelos lineares

Figura 5.2: Desempenho dos modelos inteiro-misto

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os ganhos de desempenho computacional das formulações linear e inteiro-misto de **PTCS-R** em relação ao modelo **PTCS-D**. O modelo

reformulado apresenta vantagens ao reduzir em aproximadamente 1,5% o número de variáveis do modelo original. Tal reformulação contribui para a redução do tempo computacional, principalmente para o caso de problemas-teste de médio e grande porte, onde o tempo de solução foi reduzido em mais de 80% no modelo linear e aproximadamente 40% nos modelos inteiro-misto.

Ainda assim, as características do modelo original são mantidas. Embora exista um limite mínimo de 0,01% de *gap* de otimalidade do *solver*, ao comparar o valor final da função objetivo de cada formulação, presente nas Tabelas 5.2 e 5.3 percebe-se que os valores são idênticos ou muito próximos.

Problemas	D/L/P	R/L/P	D/L/M	R/L/M	D/L/G	R/L/G
Nº cenários	1	1	1	1	1	1
Nº variáveis	7.195	7.051	61.807	61.231	554.359	552.055
Nº restrições	3.811	3.811	14.863	14.863	52.279	52.279
Tempo CPU(s)	6,88	6,55	31,75	27,96	627,30	96,32
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lucro total(\$)	288.500,35	288.500,35	1.217.458,85	1.217.458,85	3.467.230,45	3.467.230,45

Tabela 5.2: Avaliação dos modelos lineares PTCS-D e PTCS-R

Problemas	D/M/P	R/M/P	D/M/M	R/M/M	D/M/G	R/M/G
Nº cenários	1	1	1	1	1	1
Nº variáveis	7.195	7.051	61.807	61.231	554.359	552.055
Nº v. inteiras	264	172	1.056	1.056	3.744	3.744
Nº v. binárias	60	60	120	120	240	240
Nº restrições	3.811	3.811	14.863	14.863	52.279	52.279
Tempo CPU(s)	41,70	6,88	1.976,63	1.176,30	1.583,00	1.057,31
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lucro total(\$)	279.459,25	279.427,95	1.211.909,35	1.211.854,35	3.360.536,65	3.360.536,65

Tabela 5.3: Avaliação dos modelos lineares inteiro-misto PTCS-D e PTCS-R

5.2.2 PTCS-R vs. PTCS-C

O modelo estocástico de planejamento tático da cadeia de suprimentos por cenários, **PTCS-C**, avaliado em 12 períodos, possui uma quantidade de variáveis e restrições muito superior ao modelo determinístico **PTCS-R**. Isso ocorre pela presença dos cenários e das restrições de *não-antecipatividade* (3.65) – (3.71) que consideram, simultaneamente, todos os cenários em um único estágio de decisão.

As decisões do modelo, portanto, são *não-antecipativas*. Dessa forma, a variável de decisão relacionada aos cenários indexada no período deve ser idêntica nos três cenários aleatórios. Assim, o plano resultante deve atender todos cenários. Por isso, o resultado do plano estocástico por cenários é mais conservador, ou seja, em média, o VEIP, ou perda de lucro do plano estocástico na presença de incerteza, é 10,65% inferior ao plano determinístico linear com informação precisa e 10,91% inferior ao

plano determinístico inteiro-misto sob a mesma condição. Os valores que viabilizam a análise são apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.5.

Em modelos estocásticos adotamos as distribuições $D_{cpts} \sim U(1, 5)$ e $R_{ps} \sim N(100, 10)$ para demanda e preço, respectivamente. O VSE, equivalente ao ganho provável ao resolver o modelo estocástico, é obtido pela diferença de lucro esperado do modelo estocástico em relação ao lucro do modelo determinístico, quanto neste último são adotados os valores médios ao invés de distribuições de probabilidade, ou seja, $D_{cpts} = 3$ e $R_{ps} = 100$. O VSE médio dos modelos **PTCS-C** linear e inteiro-misto é 12,47% e 12,59% superior ao lucro dos modelos determinístico **PTCS-R** lineares e inteiro-misto.

Problemas	R/L/P	C/L/P	R/L/M	C/L/M	R/L/G	C/L/G
Nº cenários	1	3	1	3	1	3
Nº variáveis	7.051	24.307	61.231	234.367	552.055	2.402.647
Nº restrições	3.811	12.449	14.863	56.355	52.279	286.023
Tempo CPU(s)	6,55	10,92	27,96	46,98	96,32	1.057,31
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lucro esperado(\$)	288.500,35	267.016,67	1.217.458,85	1.039.760,77	3.467.230,45	2.911.395,53
Lucro [1] (\$)		275.217,50		1.050.968,50		2.993.650,15
Lucro [2] (\$)		258.620,30		999.560,05		2.886.615,55
Lucro [3] (\$)		267.466,65		1.069.971,95		2.854.671,80

Tabela 5.4: Avaliação dos modelos lineares PTCS-R e PTCS-C

Problemas	R/M/P	C/M/P	R/M/M	C/M/M	R/M/G	C/M/G
Nº cenários	1	3	1	3	1	3
Nº variáveis	7.051	24.307	61.231	234.367	552.055	2.402.647
Nº v. inteiras	172	480	1.056	2.992	3.744	10.608
Nº v. binárias	60	34	120	76	240	136
Nº restrições	3.811	12.449	14.863	56.355	52.279	286.023
Tempo CPU(s)	6,88	198,15	1.176,30	3.600,00	1.057,31	3.600,00
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Lucro esperado(\$)	279.427,95	257.778,23	1.211.854,35	1.033.544,98	3.360.536,65	2.805.360,58
Lucro [1] (\$)		265.813,00		1.044.755,80		2.887.613,70
Lucro [2] (\$)		249.403,80		993.240,45		2.780.686,20
Lucro [3] (\$)		258.371,65		1.063.860,05		2.748.529,55

Tabela 5.5: Avaliação dos modelos inteiro-misto PTCS-R e PTCS-C

5.2.3 PTCS-R vs. PTCS-2ML

A formulação estocástica **PTCS-2ML** considera variáveis de primeiro e segundo estágio. O primeiro-estágio está relacionado à decisões de manufatura, enquanto que o segundo-estágio se refere a decisões logísticas.

A fase de planejamento da manufatura é caracterizada por decisões imediatas de alocação de recursos e capacidade de produção. No entanto, na fase logística são tomadas decisões de recurso relativos às realizações no segundo-estágio. Nesta fase, são determinadas atividades de aquisição, transporte de matérias-primas e produtos acabados, a gestão de estoques e o atendimento da demanda.

Uma característica comum aos modelos estocásticos é a indisponibilidade imediata de informação completa dos parâmetros, o que acarreta a perda de lucro na presença de incerteza, como apresentado nas Tabelas 5.6 e 5.7.

O VEIP relativo à formulação estocástica **PTCS-2ML** é, em média, 10,59% inferior ao plano determinístico linear com informação precisa e 8,16% inferior ao plano determinístico inteiro-misto sob a mesma condição. O VSE médio dos modelos estocásticos **PTCS-2ML** linear e inteiro-misto é 12,69% e 15,75% superior ao lucro dos modelos determinístico **PTCS-R** lineares e inteiro-misto.

Problemas	R/L/P	M/L/P	R/L/M	M/L/M	R/L/G	M/L/G
Nº cenários	1	3	1	3	1	3
Nº variáveis	7.051	22.411	61.231	227.503	552.055	2.382.391
Nº restrições	3.811	9.763	14.863	38.671	52.279	139.447
Tempo CPU(s)	6,55	9,62	27,96	42,37	96,32	1.187,00
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lucro esperado(\$)	288.500,35	269.918,75	1.217.458,85	1.054.278,68	3.467.230,45	2.853.514,55
Lucro [1] (\$)		277.814,75		1.064.362,65		2.930.593,67
Lucro [2] (\$)		262.588,75		1.012.280,40		2.853.436,34
Lucro [3] (\$)		269.352,75		1.086.193,00		2.776.513,65

Tabela 5.6: Avaliação dos modelos lineares PTCS-R e PTCS-2ML

Problemas	R/M/P	M/M/P	R/M/M	M/M/M	R/M/G	M/M/G
Nº cenários	1	3	1	3	1	3
Nº variáveis	7.051	22.411	61.231	227.503	552.055	2.382.391
Nº v. inteiras	172	1.632	1.056	6.528	3.744	21.312
Nº v. binárias	60	60	120	120	240	240
Nº restrições	3.811	9.763	14.863	38.671	52.279	139.447
Tempo CPU(s)	6,88	198,15	1.176,30	3.600,00	1.057,31	3.600,00
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	-
Lucro esperado(\$)	279.427,95	261.052,28	1.211.854,35	1.048.719,17	3.360.536,65	-
Lucro [1] (\$)		268.800,05		1.060.121,65		-
Lucro [2] (\$)		254.510,85		1.005.654,25		-
Lucro [3] (\$)		259.845,95		1.080.381,60		-

Tabela 5.7: Avaliação dos modelos inteiro-misto PTCS-R e PTCS-2ML

5.2.4 PTCS-R vs. PTCS-2HR

A formulação **PTCS-2ML** é conveniente para a elaboração de planos e orçamentos anuais pois permite avaliar diferentes estratégias de planejamento tático da cadeia de suprimentos. O modelo da seção 5.2.3, no entanto, não obteve solução viável para o problema estocástico inteiro-misto de grade porte em tempo hábil, como visto na Tabela 5.7.

A formulação alternativa de dois-estágios **PTCS-2HR** abrange as decisões da formulação **PTCS-C** sem a necessidade do uso das restrições de *não antecipatividade*. Além disso, o modelo **PTCS-2HR** considera as decisões do primeiro-estágio relativas ao planejamento da cadeia no primeiro período, e no segundo-estágio, decisões relativas aos períodos subsequentes. Dentre suas vantagens estão: o melhor desempenho

computacional (ver Tabelas 5.8 e 5.9), a viabilidade de implantação do planejamento por horizonte rolante e a estrutura adequada para a decomposição estocástica.

A Tabela 5.9 apresenta estratégias distintas de planejamento inteiro-misto: a primeira, identificada pelas letras centrais **ML**, considera, no primeiro-estágio, um problema inteiro-misto, enquanto que a segunda estratégia, identificada pelas letras centrais **MM**, considera um problema inteiro-misto tanto no primeiro quanto no segundo-estágio. Os resultados destes modelos podem ser comparados à sua versão determinística inteiro-misto, disponibilizada na Tabela 5.7.

O VEIP médio relativo à formulação estocástica de dois-estágios **PTCS-2HR** é 10,65% inferior ao plano determinístico linear com informação precisa e 10,91% inferior ao plano determinístico inteiro-misto sob a mesma condição. O VSE médio dos modelos **PTCS-2HR** linear e inteiro-misto é 12,50% e 12,62% superior ao lucro dos modelos determinísticos **PTCS-R** lineares e inteiro-misto.

Problemas	R/L/P	H/L/P	R/L/M	H/L/M	R/L/G	H/L/G
Nº cenários	1	3	1	3	1	3
Nº variáveis	7.051	23.157	61.231	222.147	552.055	2.272.167
Nº restrições	3.811	10.985	14.863	42.899	52.279	151.111
Tempo CPU(s)	6,55	10,36	27,96	44,13	96,32	690,32
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lucro esperado(\$)	288.500,35	267.101,48	1.217.458,85	1.040.166,83	3.467.230,45	2.911.645,83
Lucro [1] (\$)		275.217,50		1.050.968,50		2.993.650,15
Lucro [2] (\$)		258.620,30		999.560,05		2.886.615,55
Lucro [3] (\$)		267.466,65		1.069.971,95		2.854.671,80

Tabela 5.8: Avaliação dos modelos lineares PTCS-R e PTCS-2HR

Problemas	H/ML/P	H/MM/P	H/ML/M	H/MM/M	H/ML/G	H/MM/G
Nº cenários	3	3	3	3	3	3
Nº variáveis	23.157	23.157	222.147	222.147	2.272.167	2.272.167
Nº v. inteiras	18	514	90	2.992	312	10.608
Nº v. binárias	1	34	2	68	4	136
Nº restrições	10.985	10.985	42.899	42.899	151.111	151.111
Tempo CPU(s)	10,39	244,72	64,76	3.600,00	996,66	1.694,80
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Lucro esperado(\$)	265.497,82	257.856,15	1.038.861,83	1.033.968,43	2.903.682,10	2.805.708,17
Lucro [1] (\$)	273.620,50	265.813,00	1.049.663,50	1.044.869,80	2.985.684,20	2.887.534,20
Lucro [2] (\$)	257.022,30	249.403,80	998.255,05	993.214,45	2.878.642,95	2.780.855,85
Lucro [3] (\$)	265.850,65	258.351,65	1.068.666,95	1.063.821,05	2.846.719,15	2.748.734,45

Tabela 5.9: Avaliação dos modelos inteiro-misto estocástico de dois-estágios PTCS-2HR

5.2.5 PTCS-R vs. PTCS-OR

A formulação de programação estocástica robusta **PTCS-OR**, além de incluir as restrições do modelo **PTCS-2HR**, possui os parâmetros λ e ω , que fazem o *trade-off* entre o valor ótimo esperado e o plano ótimo operacional, ou seja, viabilizam a análise da robustez da solução e a robustez do modelo. Além disso, o modelo robusto possui

parâmetros financeiros e operacionais estocásticos permitindo a otimização do planejamento da cadeia de suprimentos considerando diversos cenários independentes.

Elaboramos um experimento computacional que viabiliza uma comparação inicial do modelo **PTCS-OR** com os modelos **PTCS-R** e **PTCS-2HR**. Por isso, consideramos nulo o valor dos parâmetros λ e ω e mantivemos os parâmetros financeiros equivalente ao modelo **PTCS-2HR**. Os resultados, apresentados nas Tabelas 5.10 e 5.11, demonstram que o modelo robusto **PTCS-OR** é aderente ao modelo estocástico **PTCS-2HR**. Este último, portanto, é preferível quando não são considerados diversos parâmetros aleatórios simultaneamente. Neste experimento, o modelo **PTCS-OR** apresenta desempenho computacional inferior ao modelo **PTCS-2HR** para o problema linear e inteiro-misto, embora tenha apresentado valores equivalentes na função objetivo. Tal resultado não é uma surpresa, uma vez que o modelo de programação estocástica robusta **PTCS-OR** contém todos os parâmetros e restrições do modelo estocástico **PTCS-2HR**, além dos parâmetros e variáveis relacionados à robustez.

Problemas	R/L/P	O/L/P	R/L/M	O/L/M	R/L/G	O/L/G
Nº cenários	1	3	1	3	1	3
Nº variáveis	7.051	23.158	61.231	222.149	552.055	2.272.169
Nº restrições	3.811	10.986	14.863	42.901	52.279	151.113
Tempo CPU(s)	6,55	10,27	27,96	56,68	96,32	2048,62
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lucro esperado(\$)	288.500,35	267.101,48	1.217.458,85	1.040.166,83	3.467.230,45	2.911.645,83
Lucro [1] (\$)		275.217,50		1.050.968,50		2.993.650,15
Lucro [2] (\$)		258.620,30		999.560,05		2.886.615,55
Lucro [3] (\$)		267.466,65		1.069.971,95		2.854.671,80

Tabela 5.10: Avaliação dos modelos lineares PTCS-R e PTCS-OR

Problemas	O/ML/P	O/MM/P	O/ML/M	O/MM/M	O/ML/G	O/MM/G
Nº cenários	3	3	3	3	3	3
Nº variáveis	23.158	23.158	222.149	222.149	2.272.169	2.272.169
Nº v. inteiras	52	514	208	2.992	692	10.608
Nº v. binárias	5	34	10	68	20	136
Nº restrições	10.986	10.986	42.901	42.901	151.113	151.113
Tempo CPU(s)	10,39	3600,00	100,37	3.600,00	3600,00	2.770,47
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,0
Lucro esperado(\$)	265.497,82	257.862,82	1.038.861,83	1.033.906,63	2.898.249,58	2.805.748,37
Lucro [1] (\$)	273.620,50	265.813,00	1.049.663,50	1.044.790,40	2.980.253,90	2.887.729,90
Lucro [2] (\$)	257.022,30	249.403,80	998.255,05	993.128,45	2.873.219,30	2.780.895,75
Lucro [3] (\$)	265.850,65	258.371,65	1.068.666,95	1.063.801,05	2.841.275,55	2.748.619,45

Tabela 5.11: Avaliação dos modelos inteiro-misto estocástico de dois-estágios PTCS-OR

A vantagem em se adotar a formulação robusta, no entanto, está na flexibilidade do método. Em sistemas dinâmicos, que adotam a estratégia *build to order* (BTO), por exemplo, incertezas operacionais e ambientais demandam um maior conhecimento da cadeia. Formulações por programação estocástica robusta permitem avaliar a robustez do planejamento considerando diversos cenários e parâmetros aleatórios simultaneamente, contribuindo fortemente para o planejamento tático desses sistemas.

Para avaliar a eficiência do método, elaboramos experimentos computacionais adicionais usando o modelo **PTCS-OR** de programação estocástica robusta. Consideramos os problema-teste com a mesma dimensão do problema **O/L/P**. Foram adotados novos parâmetros e dez cenários, ou seja, $|S| = 10$. Os problemas possuem 36.000 restrições, 75.853 variáveis e foram resolvidos em 15 segundos, em média. Os parâmetros financeiros foram representados por distribuições uniforme no intervalo $[a, b]$, onde a e b são os valores mínimo e máximo dos respectivos parâmetros. Foram feitas 364 rodadas de otimização. Os resultados obtidos são sintetizados nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7.

Definimos λ como o nível de variabilidade da incerteza dos parâmetros em relação ao seu valor nominal e ω , o peso que contribui para a robustez do modelo relativo à penalidade pelo não atendimento da demanda. Consideramos $\lambda = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0$ e $4,5$. Para avaliar o efeito de λ e ω no valor da função objetivo, testamos nossa formulação robusta considerando a variação destes parâmetros individualmente. Assim, para cada nível de variabilidade, alteramos de 0 a 1,0, em unidades de 0,1, os pesos de penalidade pelo não atendimento da demanda. Foram feitas, portanto, 88 rodadas de otimização: 11 problemas-teste para cada valor de λ .

De forma similar, avaliamos o efeito da variabilidade para os índices de penalidade. O objetivo é explicitar os *trade-offs* entre a robustez da solução e a robustez do modelo. Consideramos $\omega = 0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ e $1,0$. Para cada peso ω de penalidade, variamos, em unidades de 0,1, o nível de λ de 0,0 a 4,5. Neste experimento, foram rodados 276 problemas de otimização: 46 problemas-teste para cada valor de ω .

Ao alterar o valor de ω , a quantidade de demanda não atendida e o custo total da cadeia de suprimentos também mudam. A Figura 5.3 demonstra que ao aumentar o peso da penalidade, a quantidade de demanda não atendida é reduzida sob pena de redução global de lucratividade, como visto na Figura 5.4.

Deve ser mencionado que o processo de realizar o *trade-off* entre a robustez da solução e a robustez do modelo é conceitualmente baseado na metodologia de otimização robusta, que permite a inviabilidade pelo controle das restrições por meio de penalidades (Lalmazloumian et al., 2013). Como podemos ver, à medida em que o valor da penalidade aumenta, o lucro total esperado, relacionado à robustez da solução, reduz consideravelmente. No entanto, a demanda média não atendida, relacionada à robustez do modelo, também reduz.

Salientamos que após atingir a situação de estado estacionário de demanda não atendida, não há ruptura de estoque, mesmo como o aumento dos custos. Este valor, no entanto, é influenciado pelo fator de variabilidade λ , que contribui para o aumento do lucro total esperado. Portanto, para o nível de variabilidade $\lambda = 1$, o estado estacionário de demanda não atendida ocorre em $\omega \geq 0,1$. Já para o nível de variabilidade

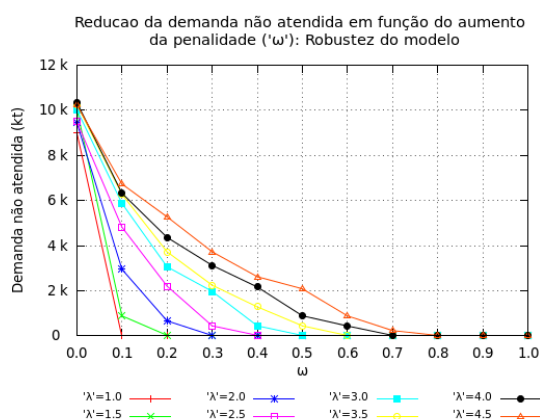


Figura 5.3: Avaliação do nível de serviço com o aumento da penalidade ω

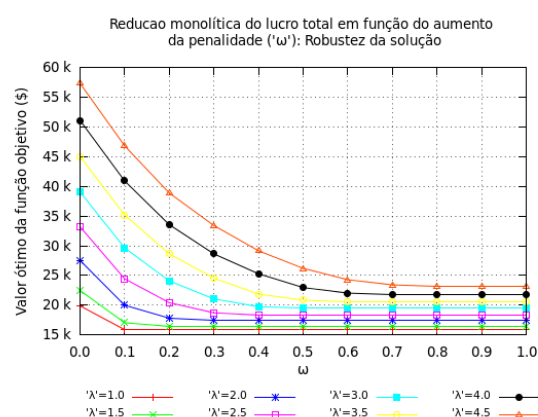


Figura 5.4: Avaliação da lucratividade global com o aumento da penalidade ω

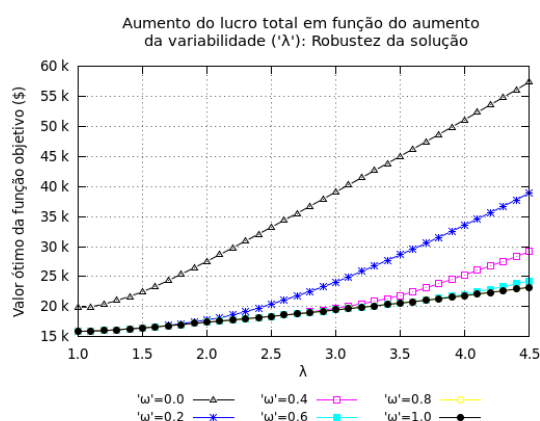


Figura 5.5: Avaliação da lucratividade global diante de cenários com variabilidade λ

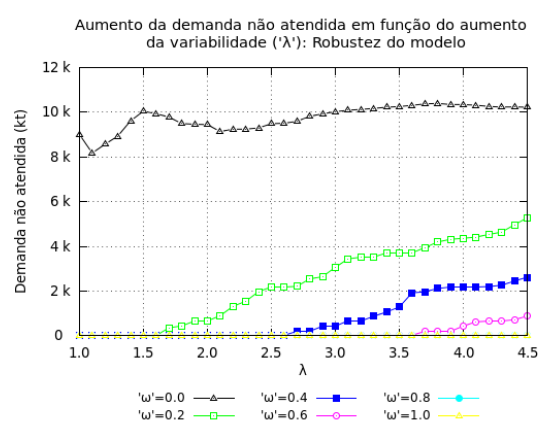


Figura 5.6: Avaliação do nível de serviço diante de cenários com variabilidade λ

$\lambda = 2, 5$, o estado estacionário de demanda não atendida ocorre em $\omega \geq 0,4$.

De forma geral, para um nível fixo de penalidade, o valor ótimo da função objetivo é aumentado diante de do aumento da variabilidade dos parâmetros. Para exemplificar e avaliar o desempenho operacional do modelo, fixamos a penalidade $\omega = 0,4$. Neste caso, para se obter aumento de lucratividade a empresa deve aumentar os níveis globais de estoque nos elos da cadeia, aumentando a disponibilidade dos produtos aos clientes, como apresentado na Figura 5.7. Percebemos que o aumento do custo com estoques ao longo da cadeia é recompensado com o aumento das vendas.

5.3 Avaliação da decomposição de Benders

Nesta seção, avaliamos o desempenho computacional da estratégia de decomposição adotada para resolver o modelo PTCS-2HR. São avaliadas: (i) a decomposição do

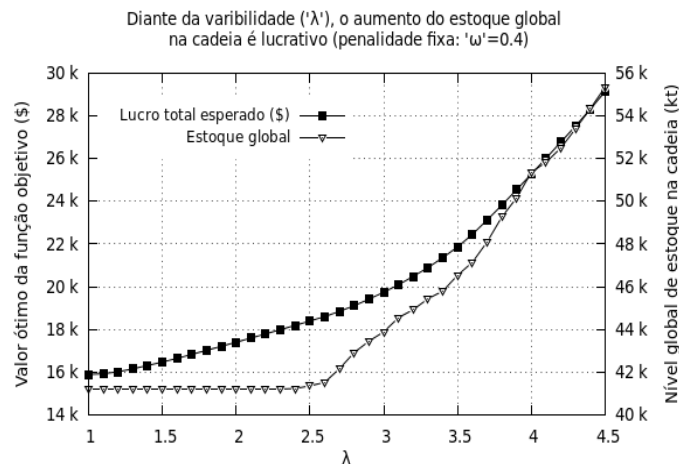


Figura 5.7: Avaliação de estratégias de estoque diante de variabilidade λ

problema linear, (ii) a decomposição do problema com o primeiro estágio inteiro-misto e (iii) o algoritmo de decomposição utilizado para resolver o problema com o primeiro e segundo estágios inteiro-misto.

O método elaborado é projetado para decompor o problema estocástico em cenários. Os problemas-teste descritos na seção 5.1 possuem apenas três cenários, portanto, não são suficientes para avaliar o desempenho do método. Por isso, elaboramos, adicionalmente, problemas-testes com até 200 cenários. Apresentamos o desempenho computacional do método tanto para o problema linear quanto para o problema linear inteiro-misto.

A decomposição estocástica de **PTCS-2ML**, embora tenha gerado resultados financeiros e planos operacionais equivalentes, não obteve desempenho computacional superior ao modelo monolítico. Além disso, problemas de grande porte decompostos não obtiveram resposta em função do estouro do limite de memória RAM disponível. O fato se justifica, uma vez que as restrições de balanceamento de fluxo, que integram todos os elos da cadeia, não apresentam uma estrutura separada em blocos, conforme discutido na seção 4.2.

5.3.1 Decomposição estocástica multi-corte de PTCS-2HR

O método de decomposição estocástica multi-corte é projetado para obter desempenho superior ao *solver* na presença de diversos cenários. Embora os problemas-teste da seção 5.1 possuam apenas três cenários, apresentamos os resultados do algoritmo para avaliação. Percebemos, por meio da Tabela 5.12, que o algoritmo baseado em decomposição, descrito na seção 4.2.2, gerou soluções aproximadas, com menos de 5% de *gap* relativo, e apresentou desempenho expressivo utilizando apenas 10% do tempo com-

putacional de resolução do problema original de pequeno e médio porte com o primeiro e segundo estágios inteiro-misto.

Problemas	H/MM/P	Dec.	H/MM/M	Dec.	H/MM/G	Dec.
Nº cenários	3	3	3	3	3	3
Nº variáveis	23.157	23.157	222.147	222.147	2.272.167	2.272.167
Nº v. inteiras	514	514	2.992	2.992	10.608	10.608
Nº v. binárias	34	34	68	68	136	136
Nº restrições	10.985	10.985	42.899	42.899	151.111	151.111
Tempo CPU(s)	244,72	24,91	3.600,00	129,45	1.694,80	1.738,82
Gap (%)	0,0	3,3	0,2	0,0	0,0	3,6
Lucro esperado(\$)	257.856,15	266.555,82	1.033.968,43	1.037.458,50	2.805.708,17	2.908.307,62
Lucro [1] (\$)	265.813,00	282.440,83	1.044.869,80	1.058.086,55	2.887.534,20	3.061.298,98
Lucro [2] (\$)	249.403,80	250.158,88	993.214,45	958.578,25	2.780.855,85	2.863.652,58
Lucro [3] (\$)	258.351,65	267.067,73	1.063.821,05	1.095.710,70	2.748.734,45	2.799.971,28

Tabela 5.12: Avaliação da decomposição de PTCS-2HR: Estágio 1 e 2: MILP

A decomposição do modelo linear e do problema com o primeiro estágio inteiro-misto, no entanto, não reduziram o tempo computacional de resolução quando comparado ao algoritmo do *solver* Gurobi 6.0TM que utiliza o dual simplex combinado com o algoritmo de barreiras. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.13 e 5.14.

Problemas	H/L/P	Dec.	H/L/M	Dec.	H/L/G	Dec.
Nº cenários	3	3	3	3	3	3
Nº variáveis	23.157	23.157	222.147	222.147	2.272.167	2.272.167
Nº restrições	10.985	10.985	42.899	42.899	151.111	151.111
Tempo CPU(s)	10,36	11,16	44,13	46,85	690,32	1799,96
Gap (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Lucro esperado(\$)	267.101,48	267.101,48	1.040.166,83	1.040.166,83	2.911.645,83	2.911.645,83
Lucro [1] (\$)	275.217,50	275.217,50	1.050.968,50	1.050.968,50	2.993.650,15	2.993.650,15
Lucro [2] (\$)	258.620,30	258.620,30	999.560,05	999.560,05	2.886.615,55	2.886.615,55
Lucro [3] (\$)	267.466,65	267.466,65	1.069.971,95	1.069.971,95	2.854.671,80	2.854.671,80

Tabela 5.13: Avaliação da decomposição estocástica de PTCS-2HR linear

Problemas	H/ML/P	Dec.	H/ML/M	Dec.	H/ML/G	Dec.
Nº cenários	3	3	3	3	3	3
Nº variáveis	23.157	23.157	222.147	222.147	2.272.167	2.272.167
Nº v. inteiras	18	514	90	2.992	312	10.608
Nº v. binárias	1	34	2	68	4	136
Nº restrições	10.985	10.985	42.899	42.899	151.111	151.111
Tempo CPU(s)	10,39	10,92	64,76	46,85	996,66	1.849,37
Gap (%)	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,1
Lucro esperado(\$)	265.497,82	264.848,48	1.038.861,83	1.033.968,43	2.903.682,10	2.902.099,58
Lucro [1] (\$)	273.620,50	272.964,50	1.049.663,50	1.044.869,80	2.985.684,20	3.055.523,63
Lucro [2] (\$)	257.022,30	256.367,30	998.255,05	993.214,45	2.878.642,95	2.856.766,53
Lucro [3] (\$)	265.850,65	265.213,65	1.068.666,95	1.063.821,05	2.846.719,15	2.794.008,58

Tabela 5.14: Avaliação da decomposição estocástica de PTCS-2HR: Estágio 1: MILP

Para avaliar a eficiência computacional da abordagem proposta, elaboramos um experimento adicional. Ilustrado pelas Figuras 5.8 e 5.9, o experimento apresenta os efeitos de usar a técnica de aceleração pelo método multi-corte proposta na seção 4.2.1. Comparamos o desempenho computacional do método proposto com o modelo

monolítico. Para isso, elaboramos 10 problemas-teste com um número de cenários variando de 20 até 200, em incrementos de 20. Permitimos um *gap* de otimalidade em 1% e um limite de 10.000 segundos de tempo computacional para o problema inteiro-misto. As dimensões do problema determinístico equivalente são apresentadas na Tabela 5.15.

Os tempos computacionais dos experimentos são detalhados na Tabela 5.16. Pelos resultados, podemos concluir que o método de decomposição estocástica multi-corte proposto reduziu em aproximadamente 45% o tempo de CPU necessário para encontrar a solução ótima dos problemas lineares. Em problemas inteiro-misto a redução foi mais expressiva: Em problemas com até 80 cenários, o método usou em média um décimo do tempo de CPU do modelo monolítico. Os problemas com 100 a 200 cenários não foram resolvidos pelo modelo monolítico por causa do estouro do limite de memória do computador. Estes problemas, no entanto, foram resolvidos pelo método proposto em menos de uma hora, como apresentado na Figura 5.9.

Cenários	Nº Restrições	Nº Variáveis	Nº V. Inteiras	Nº V. Binárias
20	71.964	151.082	3.319	221
40	143.704	301.582	6.619	441
60	215.444	452.082	9.919	661
80	287.184	602.582	13.219	881
100	358.924	753.082	16.519	1.101
120	430.664	903.582	19.819	1.321
140	502.404	1.054.082	23.119	1.541
160	574.144	1.204.582	26.419	1.761
180	645.884	1.355.082	29.719	1.981
200	717.624	1.505.582	33.019	2.201

Tabela 5.15: Dimensão dos problemas PTCS-2HR: PL e PLIM

Cenários	PL (segundos de CPU)		PLIM (segundos de CPU)	
	Modelo Monolítico	Dec. Multi-corte	Modelo Monolítico	Dec. Multi-corte
20	3,50	7,09	124,62	56,49
40	8,95	14,95	1.131,98	117,86
60	14,31	22,82	3.373,13	341,52
80	21,72	30,72	5.609,30	524,31
100	28,39	39,75	10.000,00*	591,61
120	39,19	48,09	8.656,82**	788,24
140	78,35	57,47	1.960,99**	874,88
160	153,19	65,95	7.346,91**	1.216,40
180	175,58	77,19	8.386,94**	1.796,82
200	306,37	94,25	8.158,83**	3.747,75

Tabela 5.16: Tempo de PTCS-2HR: PL e PLIM. *Sem solução. **Sem memória.

Os resultados da Tabela 5.16 nos demonstram uma vantagem nítida do método de decomposição estocástica multi-corte de Benders em relação ao modelo monolítico. O método se torna mais atraente à medida em que o problema aumenta de tamanho. Embora estes resultados não ocorram em todos os problemas-testes possíveis, eles ilustram o potencial do método de decomposição estocástica. A grande eficiência computacional

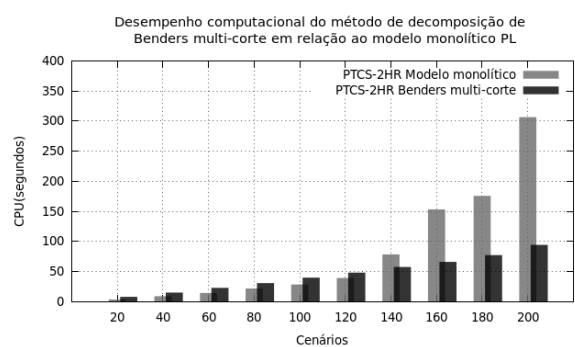


Figura 5.8: Desempenho dos modelos lineares

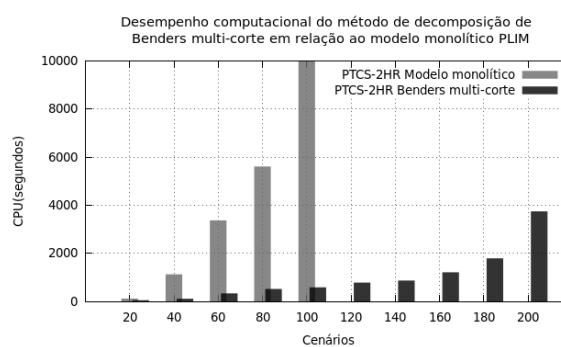


Figura 5.9: Desempenho dos modelos inteiro-misto

do método se dá pelo fato do problema mestre (PM) requerer pouco tempo de solução, apesar de sua grande dimensão. Isto porque, no PM, o número de iterações é significativamente reduzido por consequência dos múltiplos cortes.

5.4 Avaliação da flexibilidade

Uma vez que se reconhece que o futuro é incerto, o mais adequado a fazer é se preparar para as várias possibilidades. A elaboração de sistemas de planejamento tático da cadeia de suprimentos com múltiplas opções de flexibilidade contribui ativamente com o gerenciamento eficiente e eficaz das operações (De Neufville e Scholtes, 2011). Além disso, estes sistemas viabilizam respostas rápidas a mudanças de circunstâncias e favorecem a resiliência da cadeia diante de incertezas ambientais. O estudo de Esmailikia et al. (2014) apresenta diversas categorias de avaliação de flexibilidade. Dentre elas destacamos:

1. Flexibilidade de volume: expansão de capacidade ou uso de horas-extra;
2. Flexibilidade operacional: mudar a lista de materiais ou pedidos à máquinas;
3. Flexibilidade de armazenamento: alterar estoques de segurança;
4. Flexibilidade de processos: manufaturar produtos em plantas específicas;
5. Flexibilidade logística: adotar diferentes estratégias logísticas de atendimento;
6. Flexibilidade de suprimento: adquirir produto acabado no fornecedor.

Elaboramos experimentos computacionais que permitem avaliar a flexibilidade da cadeia de suprimentos para um problema inteiro-misto. Para isso, adota-se a formulação de programação estocástica **PTCS-2HR**, apresentada na seção 3.4.2. Em problemas lineares, indicamos a formulação por programação estocástica robusta. A formulação

PTCS-OR possui os parâmetros λ e ω , que relacionam o *trade-off* entre o valor esperado e o nível de serviço, permitindo estilos variáveis de gerenciamento, uma flexibilidade extra em relação à programação estocástica.

Os experimentos apresentados nos permitem explorar todos os critérios de avaliação de flexibilidade citados acima em três dimensões: (i) *flexibilidade de suprimento*, que aborda decisões de produzir ou comprar e a escolha de fornecedores, (ii) *flexibilidade de manufatura*, que avalia uso de horas-extras, expansão de capacidade e a produção em plantas específicas e (iii) *flexibilidade de distribuição e logística*, relacionada ao transporte multi-modal e estratégias de armazenamento ao longo da rede.

Apresentamos um cenário base, contra o qual são avaliadas flexibilidades relativa ao suprimento, manufatura e logística. Os resultados financeiros e operacionais são disponibilizados nesta seção e nas seções 5.4.1 , 5.4.2 e 5.4.3 viabilizando, assim, a comparação entre os mesmos.

Consideramos um problema do tipo **H/MM/P** com três cenários e um horizonte de planejamento de 12 meses. Para avaliar a flexibilidade de manufatura e logística, adicionamos uma nova planta industrial e um modal alternativo ao modelo. O problema consiste em determinar o plano anual ótimo de uma cadeia de suprimentos com 3 fornecedores, 2 plantas industriais, 2 centros de distribuição e 10 clientes. Quatro tipos de matérias-primas são processadas em 5 máquinas diferentes em cada planta industrial, produzindo até 10 tipos de produtos acabados.

Neste modelo estocástico, adotamos as distribuições $D_{cpts} \sim U(6, 10)$ e $R_{ps} \sim N(100, 10)$ para demanda e preço, respectivamente. Dentre os parâmetros determinísticos, destacamos: o custo que aquisição e disponibilidade de produtos acabados nos fornecedores em \$85,00 e 20 unidades, respectivamente; os custos fixos de ativação de operações e variáveis em \$500,00 e \$20,00 em cada planta industrial; o custo de expansão de capacidade em \$875,00/h; o custo logístico de distribuição em \$2,50/km.t para ambos modais de transporte; o nível de estoque de segurança de matérias-primas nas fábricas em 10 unidades e o nível de produtos acabados nos centros de distribuição em 2 unidades.

Os parâmetros complementares são mantidos equivalentes nos próximos experimentos. Além disso, ressaltamos que as análises subsequentes de flexibilidade são avaliadas em relação ao cenário base desta seção. Os resultados financeiros e operacionais são apresentados na Tabela 5.17.

Sob esta configuração, a demanda total da cadeia é parcialmente atendida. Nos fornecedores, é realizada a aquisição de matéria-prima, apenas. Embora sejam disponibilizados 7.200 produtos acabados para cada fornecedor em todo período de planejamento, a aquisição destes nos fornecedores, sob o atual custo, não é compensatório. As operações de manufatura são ativadas nas plantas industriais e utilizadas ao máximo,

no entanto, a capacidade extra não é utilizada.

Relatório Financeiro	Valor (\$)	Relatório operacional	Valor (unid.)
Receita bruta	797.240,95	Compra de matéria-prima	180.768
Custo logístico	190.400,00	Compra de produto acabado	0
Custo fixo de produção	60.000,00	Volume estocado na cadeia	9.901
Custo variável de produção	152.440,00	Produção em planta-[1]	11.433
Custo de compras	30.128,00	Produção em planta-[2]	11.433
Custo de horas extras	0,00	Transporte em modal-[1]	172.746
Custo de estoques	3.300,33	Transporte em modal-[2]	55.734
Lucro total esperado	360.972,62		
Lucro cenário-[1]	361.959,75	Demanda total	30.703
Lucro cenário-[2]	374.603,85	Demanda atendida	24.246
Lucro cenário-[3]	346.354,25	Demanda não atendida	6.457

Tabela 5.17: Desempenho do exemplo base para avaliação de flexibilidade

O volume transportado é alocado no modal-[1], em seguida, no modal-[2]. Sob os mesmos custos, não há preferência de transporte entre um modal e outro.

5.4.1 Flexibilidade de suprimento

A flexibilidade de suprimento se relaciona tanto à avaliação de estratégias de produzir ou comprar o produto acabado diretamente de um fornecedor, quanto à escolha de fornecedores com base nos preços de matéria-prima ou disponibilidade da mesma.

No primeiro caso, a empresa atua como atravessadora, ativando apenas sua infraestrutura logística para realizar o atendimento da demanda. Tal situação ocorre quando os custos fixos de ativação operacional não compensam o volume de produção demandado. A empresa, no entanto, corre o risco de ter sua imagem prejudicada ao disponibilizar o produto do concorrente no mercado. No segundo caso, a empresa pode ampliar ou reduzir a gama de fornecedores de forma a reduzir o risco de esgotar o suprimento matéria-prima ou produto acabado. Tal estratégia, entretanto, pode comprometer programas de fidelização de fornecedores no longo prazo.

Relatório Financeiro	Valor (\$)	Relatório operacional	Valor (unid.)
Receita bruta	964.588,52	Compra de matéria-prima	172.568
Custo logístico	199.858,33	Compra de produto acabado	7.200
Custo fixo de produção	57.323,33	Volume estocado na cadeia	10.944
Custo variável de produção	145.606,67	Produção em planta-[1]	10.974
Custo de compras	136.761,33	Produção em planta-[2]	10.867
Custo de horas extras	0,00	Transporte em modal-[1]	186.799
Custo de estoques	3.648,00	Transporte em modal-[2]	53.031
Lucro total esperado	421.390,85		
Lucro cenário-[1]	418.951,60	Demanda total	30.703
Lucro cenário-[2]	442.929,84	Demanda atendida	30.421
Lucro cenário-[3]	402.291,12	Demanda não atendida	282

Tabela 5.18: Desempenho do exemplo com suprimento flexível

Neste experimento, avaliamos a flexibilidade de suprimento diante da redução do preço de aquisição do produto acabado de \$85,00 para \$45,00 em um dos fornecedores.

Os resultados, apresentados na Tabela 5.18, demonstram que, sob este custo, a empresa pode aumentar sua lucratividade em 16,74%. Ao adquirir todos os 7.200 produtos acabados disponíveis neste fornecedor, a empresa aumenta o nível de serviço global, pelo aumento do nível de atendimento da demanda. Tal aumento nas vendas gera o aumento de receita e a redução dos custos de produção e de aquisição de matéria-prima, pois, a decisão de comprar uma quantidade de produtos acabados ao invés de produzi-los, reduz tanto o consumo de recursos de manufatura, quanto a necessidade de aquisição de matéria-prima.

5.4.2 Flexibilidade de manufatura

A flexibilidade de manufatura está relacionada à flexibilidade de volume e à decisões operacionais. Nesse caso, são avaliados *trade-offs* de custos de produção extra frente aos custos de não atendimento da demanda. Emerge desta análise uma indicação de “especialização das fábricas”, pois são analisadas as possibilidades de manufaturar famílias de produtos em plantas industriais diferentes, de forma a evitar rupturas de estoque.

Neste experimento, avaliamos a flexibilidade de manufatura diante da redução do custo fixo de produção de \$500,00 para \$400,00 na planta-[2], da redução do custo de horas-extras de \$875,00 para \$500,00 e do aumento do estoque de segurança de matérias-primas de 10 para 20 nas fábricas. Os resultados financeiros e operacionais são apresentados na Tabela 5.19.

Relatório Financeiro	Valor (\$)	Relatório operacional	Valor (unid.)
Receita bruta	877.510,25	Compra de matéria-prima	203.476
Custo logístico	214.004,17	Compra de produto acabado	0
Custo fixo de produção	54.000,00	Volume estocado na cadeia	17.306
Custo variável de produção	171.163,33	Produção em planta-[1]	12.618
Custo de compras	33.912,67	Produção em planta-[2]	13.056
Custo de horas extras	23.404,17	Transporte em modal-[1]	178.953
Custo de estoques	5.768,83	Transporte em modal-[2]	77.852
Lucro total esperado	375.257,08		
Lucro cenário-[1]	376.319,75	Demanda total	30.703
Lucro cenário-[2]	392.915,10	Demanda atendida	27.054
Lucro cenário-[3]	356.536,40	Demanda não atendida	3.648

Tabela 5.19: Desempenho do exemplo com a manufatura flexível

Nesta configuração, o aumento de 3,96% de lucratividade média é resultante da redução do custo fixo total de operações e do aumento da vendas. Este último se deu pelo aumento do volume produção, que superou a capacidade disponível. A produção consumiu horas-extras e se concentrou na planta-[2], que possui custo fixo de operação reduzido em relação à planta-[1]. Percebemos que o custo variável de produção aumentou e os custos com horas-extras, que eram nulos, foram ativados. Com o uso de horas-extras, cresce o consumo de matérias-primas. A alteração foi operacional,

portanto, não gerou necessidade de adquirir produtos acabados do fornecedor. Com o aumento da produção nas fábricas, houve um aumento de estoque na cadeia e de produto transportado.

5.4.3 Flexibilidade de distribuição e logística

A flexibilidade de distribuição e logística se relaciona à habilidade em adotar estratégias alternativas de transporte e armazenamento de forma a atender o cliente final dentro do prazo. Busca-se, assim, reagir rapidamente evitando variabilidades pela cadeia, fenômeno referido como efeito chicoteamento, originalmente observado e estudado por Forrester (1961). Nesta dimensão, a empresa avalia custos, níveis de estoque de segurança nos centros de distribuição, capacidade de transporte e velocidade de diferentes modais.

Este experimento avalia a flexibilidade logística diante da redução do custo de distribuição de \$2,50 para \$2,40 no modal-[2]. Nos experimentos anteriores, os produtos eram alocados aos modais após avaliação de capacidade, apenas. Não havia diferença nos custos de transporte. Além disso, alteramos o nível de estoque de segurança de produtos acabados nos centros de distribuição de 2 para 5. Os resultados financeiros e operacionais são apresentados na Tabela 5.20.

Relatório Financeiro	Valor (\$)	Relatório operacional	Valor (unid.)
Receita bruta	792.132,80	Compra de matéria-prima	180.768
Custo logístico	184.345,60	Compra de produto acabado	0
Custo fixo de produção	60.000,00	Volume estocado na cadeia	11.727
Custo variável de produção	152.440,00	Produção em planta-[1]	11.433
Custo de compras	30.128,00	Produção em planta-[2]	11.433
Custo de horas extras	0,00	Transporte em modal-[1]	51.168
Custo de estoques	3.909,00	Transporte em modal-[2]	177.132
Lucro total esperado	361.310,20		
Lucro cenário-[1]	362.284,15	Demanda total	30.703
Lucro cenário-[2]	374.685,80	Demanda atendida	24.066
Lucro cenário-[3]	346.960,65	Demanda não atendida	6.637

Tabela 5.20: Desempenho do exemplo com a logística flexível

Como não houve aquisição de produtos ou uso de horas-extra, a receita, os custos de produção e de compras não se alteraram em relação ao cenário base. O volume transportado se concentrou no modal-[M2] por este apresentar menor custo. Por isso, o aumento do lucro total esperado foi consequência da redução de custos de distribuição. No entanto, parte da lucratividade extra foi consumida com custos de manutenção dos estoques de segurança de produtos acabados nos centros de distribuição, que foram elevados de 2 para 5.

Capítulo 6

Um Estudo de Caso

"It is interesting to note that the original problem that started my research is still outstanding – namely the problem of planning or scheduling dynamically over time, particularly planning dynamically under uncertainty. If such a problem could be successfully solved it could eventually through better planning contribute to the well-being and stability of the world."

George Dantzig

Este capítulo apresenta um estudo de caso relacionado à aplicação de programação estocástica para elaborar o plano tático anual da cadeia de suprimentos de um grupo siderúrgico. Seu resultado, o plano agregado, contribui para a confecção do orçamento anual e para o plano diretor de logística e manufatura por 12 meses. Este processo é conhecido como *Sales and Operations Planning* (S&OP).

Muitas vezes o planejamento de operações é feito sem levar em consideração as condições logísticas. Da mesma forma, o planejamento logístico não considera restrições tecnológicas operacionais, levando a planos independentes, demorados e irrealistas. Como há correlação entre as variáveis de suprimento, produção e logística, faz-se necessário avaliá-los de forma integrada por um procedimento único e ágil.

O capítulo é dividido em seções que abordam a descrição do processo, as estratégias de agrupamento adotadas, o desenvolvimento do modelo e as análises dos resultados.

6.1 Planejamento tático da cadeia de suprimentos

Estudar a cadeia de suprimentos da indústria siderúrgica em economias emergentes, como Brasil, Rússia, Índia e China (BRIC) é importante porque, coletivamente, eles representam quase 60% da produção global e continuam adicionando capacidade à uma rápida proporção. Globalmente, esta sobre-capacidade é um problema e contribui para reduzir a produtividade e a utilização de capacidade em todos os locais. Os países do BRIC foram incluídos na *Organization for Economic Co-operation and Development* (<http://www.oecd.org>) para participarem de discussões a respeito dos desenvolvimentos na indústria global de aço. Neste cenário está inserida a UsiminasTM, um grupo siderúrgico que produz aços para aplicações que exigem alto desempenho e *design* inovadores.

A UsiminasTM, líder do mercado brasileiro de aços planos, é um dos maiores complexos de produção de aços da América Latina, com capacidade nominal anual de produção de 9,5 milhões de toneladas de aço bruto e *expertise* em toda cadeia de produção, do minério ao produto acabado, como seu site (<http://www.usiminas.com>) descreve. No intuito de se adaptar a esse ambiente competitivo, a empresa tem investido na gestão eficiente da cadeia de suprimentos para viabilizar a entrega rápida de produtos e, ao mesmo tempo, manter baixo seus níveis de estoque.

O processo de produção e logística integrados é descrito da seguinte forma: periodicamente, o suprimento de minerais é realizado dos fornecedores às duas plantas industriais. Nestas, o minério é convertido em aço. Os produtos acabados são transportados por um modal logístico específico até os clientes, podendo passar ou não pelos centros de distribuição.

A siderurgia integrada possui processos contínuos e discretos de produção. São comercializados aproximadamente 40.000 tipos de produtos para 700 clientes nacionais e internacionais. Os produtos podem percorrer rotas tecnológicas em 146 diferentes máquinas localizadas em 2 plantas industriais. Em seguida, estes são transportados até os clientes por ferrovia, rodovia ou hidrovia e podem passar por um ou mais dos 26 pontos de transbordo.

A disponibilidade de dados e análises são cruciais para a execução das atividades, no entanto, a complexidade das conexões em uma rede que contemple a quantidade massiva dos dados descritos torna impraticável a análise de um resultado tanto do ponto de vista computacional, quanto em termos de tempo e custo. Por isso, a agregação dos dados é recomendada.

6.1.1 Agrupamento de recursos, produtos e clientes

Neste estudo de caso, a abordagem de agrupamento funcional de recursos, produtos e clientes é adotada. Este conceito se apresenta como uma tendência para facilitar o gerenciamento dos dados em sistemas de planejamento da cadeia de suprimento (Ng e Lam, 2014).

As regras de negócio da siderurgia nos permitem captar os elementos essenciais para representar o problema de decisão precedendo uma análise quantitativa. Por meio delas, recursos, produtos e clientes com características semelhantes são agregados. A criação de regiões de demanda, produto agregado e *hubs* de processamento, que representam múltiplas máquinas com propriedades similares, viabilizam a redução do tamanho do modelo e seu desenvolvimento sem perder a qualidade da informação disponível nos dados de operação, logística e de previsões.

6.1.2 Estimativa de parâmetros incertos

A previsão de demanda de cada produto agregado foi estimada após análise de tendência, sazonalidade e variância de oito anos de histórico de vendas do banco de dados da empresa. Sugerimos a combinação dos métodos estatísticos com projeções de analistas de vendas do tipo pessimista, mais provável e otimista como descrito em Franses (2011). A definição dos custos de transporte são baseadas em taxas médias de cargas de caminhões, vagões ou navios para servir as zonas de demanda. Custos de produção, parâmetros de capacidade, rotas e tempo unitário de produção foram estimados com analistas e engenheiros.

Nesta cadeia de suprimentos, as principais incertezas são provenientes da demanda, do custo do minério de ferro e do preço do produto acabado. Os valores desses parâmetros incertos seguem uma distribuição de probabilidade, como a distribuição normal. Para atribuir probabilidades ao espectro contínuo de possíveis realizações, é necessário prever cenários exatos. Assim, consideramos a demanda e preço normalmente distribuídos com média e desvio-padrão. Os valores médios desses parâmetros incertos são tipicamente provenientes da previsão, enquanto que a variância vem de dados históricos, como sugerido por You e Grossmann (2013). A normalidade da distribuição captura as características essenciais de incerteza. Além disso, ela é frequentemente adotada na literatura e conveniente para o desenvolvimento do modelo (Gupta e Maranas, 2003).

6.1.3 Desenvolvimento do modelo

Como toda empresa siderúrgica, a UsiminasTM é fortemente dependente de minério de ferro, sua principal matéria-prima, e carvão mineral. O suprimento do minério de ferro ocorre basicamente por dois fornecedores: ValeTM e Mineração UsiminasTM, enquanto que o carvão mineral é proveniente de fornecedores externos, como BHP BillitonTM. A empresa conta com 6 centros de distribuição e 7 centros de serviço, usados para a transformação e customização do aço aos pedidos dos clientes. Estes, por sua vez, se dividem em mercado interno e mercado externo. O transporte dos produtos é feito pelos modais rodoviário, ferroviário e marítimo. A demanda externa é concentrada nos portos de Praia Mole-ES e porto de Cubatão-SP, onde é feito o escoamento marítimo dos produtos.

Nas plantas industriais, o aço é obtido da mistura do ferro fundido e de elementos metálicos adicionais. O ferro fundido é fornecido pelos alto-fornos, enquanto que os elementos de liga são adquiridos externamente. A mistura é realizada em convertedores, entre 1500^oC. a 1600^oC. Em seguida, ele sofre transformação em processos siderúrgicos seguindo uma sequência tecnológica predeterminada em cada planta.

São considerados os seguintes processos: convertedores, RH, forno panela, escarfaagem, laminador de chapas grossas, tratamento térmico, ultra-som, tesoura de chapas grossas, corte a gás, laminação de tiras à quente, embalagem de bobinas à quente, laminador de acabamento de bobinas à quente, tesoura de tiras a quente, decapagem, laminação de tiras à frio, limpeza eletrolítica, recozimento, encruamento, recozimento contínuo, galvanização eletrolítica, galvanização por imersão à quente, tesoura de tiras à frio e laminação de acabamento. A planta-[1] possui 24 processos (Figura 6.1), enquanto que a planta-[2] possui 22 (Figura 6.2). Os aços planos são produzidos nas seguintes famílias: placas, chapas grossas, bobinas à quente, bobinas à frio, eletro-galvanizados e galvanizados por imersão à quente.

Pedidos em carteira ponderados pela previsão de demanda determinam o ritmo de operação. A produção é formada por processos contínuos, que possuem custos vultosos de operação, e processos discretos. Estes, por sua vez, são interligados à rede de distribuição logística. A cadeia de suprimentos da siderurgia, dessa forma, busca maximizar a lucratividade por meio do atendimento da demanda e da ocupação ótima dos recursos produtivos, ao mesmo tempo em que os custos operacionais e logísticos devem ser minimizados tanto no médio quanto no curto prazo.

A integração ao planejamento operacional, de curto prazo, ao planejamento tático anual da cadeia de suprimentos, de médio prazo, ocorre por meio de revisões mensais, seguindo a metodologia S&OP. Além disso, diante da incerteza, diretores e gerentes são incapazes de tomar uma decisão perfeita, ou seja, ótima, que represente a ope-

PTCS-2HR, apresentada na seção 3.4.2, que possui a flexibilidade necessária para representar as características desta cadeia de suprimentos, além de considerar as decisões do primeiro-estágio relativas ao planejamento da cadeia no primeiro mês ($t = 1$), e no segundo-estágio, decisões relativas aos meses subsequentes ($t > 1$).

Embora não haja a necessidade de alteração das restrições, rodadas de teste nos revelaram a necessidade de alteração da estrutura de fluxo nos conjuntos e parâmetros para adequar à política do negócio da empresa, tornando o modelo mais aderente. Neste caso, o nível mínimo de estoque de placas em cada planta deve ser equivalente à produção mensal das mesmas e a capacidade de transporte não deve limitar a capacidade de produção. Modelamos essa necessidade: (i) atualizando rotas tecnológicas dos produtos; (ii) alterando os níveis mensais de estoques de segurança e (iii) aumentando a capacidade de transporte rodoviário de acordo com os sistemas de distribuição terceirizados. A dependência destes sistemas dificulta ainda mais a coordenação da cadeia de suprimentos, como descrito em Rodrigue (2012). Além disso, a capacidade de transporte na ferrovia é limitada.

Adotamos o agrupamento funcional, como discutido na seção 6.1.1 e sugerido na literatura (Martin et al. (1993), Fleischmann et al. (2006), Mirzapour Al-E-Hashem et al. (2011), Hahn e Kuhn (2012) e Ng e Lam (2014)) focalizando os temas necessários ao planejamento tático desta cadeia de suprimentos. O modelo resultante considera 12 meses de planejamento da produção em 2 plantas industriais. Nestas, 30 famílias de produtos são produzidas por meio de 24 recursos na planta-[1] ou 22 recursos na planta-[2]. As matérias primas consideradas são minério e carvão, provenientes de 3 fornecedores. A infraestrutura logística é composta por 6 centros de distribuição, 2 pontos de transbordo em portos e 3 modais de transporte. São adotadas 34 regiões de demanda que englobam clientes internos, externos e centros de serviço. Uma representação esquemática da cadeia de suprimentos resultante é ilustrada na Figura 6.3

6.1.4 Resultados computacionais e análises

Nesta seção, avaliamos o desempenho computacional e a qualidade do método utilizado para resolver o problema abordado neste estudo de caso. O desempenho computacional é avaliado pelo tempo de resolução e pela dimensão do modelo tratado. A qualidade da solução estocástica é avaliada após comparação com o resultado do modelo determinístico. Em particular, são elaboradas análises de sensibilidade a partir de variações nos parâmetros de incerteza da seção 6.1.2 que mais impactam esta cadeia de suprimentos.

Por questões de sigilo e respeito à empresa, os dados originais foram preservados. A demanda foi gerada por um procedimento randômico seguindo a mesma distribuição dos valores históricos. Os resultados computacionais são apresentados na Tabela 6.1

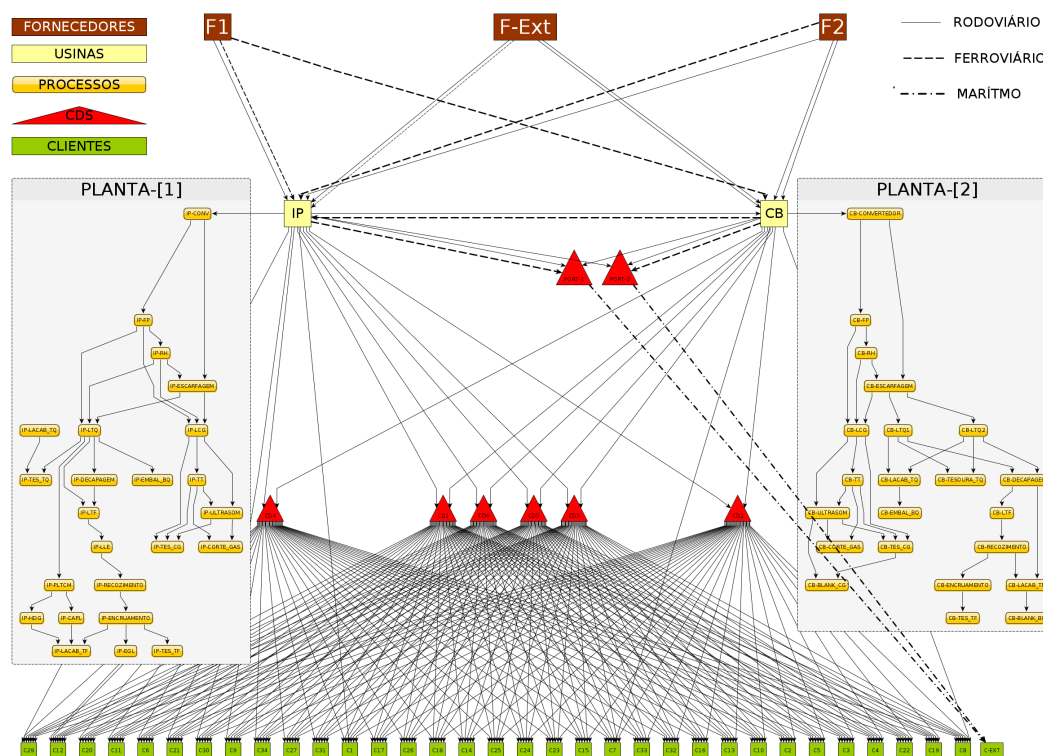


Figura 6.3: Estrutura da rede de suprimentos para 1 período de planejamento.

com valores proporcionais, de forma a validar a funcionalidade à qual o modelo se propõe. Em seguida, são avaliados os efeitos estratégicos e operacionais da cadeia de suprimentos em decorrência da alterações dos custos de matérias-primas, dos preços de produtos acabados e de oscilações de demanda.

Relatório Financeiro	Valor (\$)	Relatório operacional	Valor (t.)
Receita bruta	8.598.329.090,97	Produção em planta-[1]	2.979.420
Custo logístico	2.302.727.200,00	Produção em planta-[2]	1.507.900
Custo fixo de produção	26.942.333,33	Cap. extra em planta-[1](h)	3.593,52
Custo variável de produção	35.010.246,00	Cap. extra em planta-[2](h)	2.241,92
Custo de compras	1.976.365.139,00	Transporte em modal-[1]	7.557.859
Custo de horas extras	84.050,43	Transporte em modal-[2]	5.245.359
Custo de estoques	44.565.715,33	Transporte em modal-[3]	5.242.080
Lucro total esperado	4.212.634.406,87		
Lucro cenário-[1]	4.339.303.687,16	Demanda total	4.929.647
Lucro cenário-[2]	4.129.639.062,17	Demanda atendida	4.609.799
Lucro cenário-[3]	4.168.960.471,26	Demanda não atendida	319.848
Estatísticas do modelo			
Nº cenários	3	Estoque em planta-[1]	2.527.276
Nº variáveis	1.062.079	Estoque em planta-[2]	2.436.179
Nº v. inteiras	6.936	Estoque nos CDs	1.695.308
Nº v. binárias	1.632	Estoque nos Portos	636.521
Nº restrições	1.085.067	Compra de minério-[F1]	4.320.000
Tempo CPU(s)	10.000,00	Compra de minério-[F2]	2.080.000
Gap (%)	0,97	Compra de carvão-[FExt]	3.150.000

Tabela 6.1: Resultado financeiro e operacional do estudo de caso

O relatório financeiro e operacional apresenta o resultado agregado de três cenários aleatórios de planejamento. Nestes cenários, a demanda é menor que a capacidade nominal. A produção é concentrada na planta-[1] onde os custos fixos e variáveis são menores. Alguns recursos da planta-[1] e planta-[2] são utilizados à capacidade máxima, demandando expansão de capacidade, por meio de horas-extras, por exemplo. Tal fato é justificado quando o *mix* de produtos é muito variável, alterando os pontos de gargalo das operações. Ainda assim, 6,5% da demanda total não é atendida. Isso ocorre quando produtos possuem altos custos de operação e não compartilham recursos operacionais com outros produtos em seu roteiro tecnológico. A decisão matemática mais lucrativa, portanto, é desativar um recurso ao invés de ativá-lo e custear o atendimento da demanda.

Embora ainda agregado, apresentamos um detalhamento mensal das operações de suprimento, produção e distribuição. O suprimento de minério e carvão é feito em lotes múltiplos determinados pelas cargas de trens e navios. Os trens podem ser compostos por 170, 240 e 320 vagões do tipo GDE (em gôndola, metálico e projetado para ser usado por viradores de vagões) determinando lotes múltiplos de 17.000, 24.000 e 32.000 toneladas. Os fornecedores de minério não possuem disponibilidade ilimitada, portanto, o suprimento é feito por ambos, principalmente em momentos onde a demanda por minério é maior, como nos meses de abril e agosto da Figura 6.4.

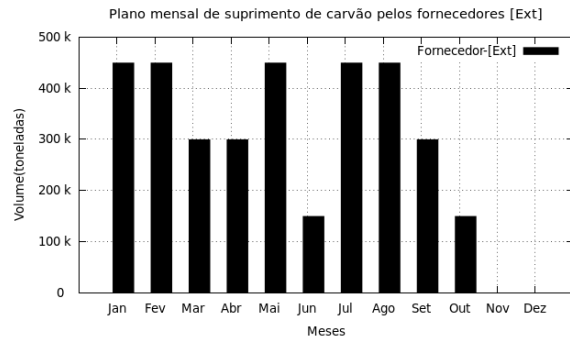
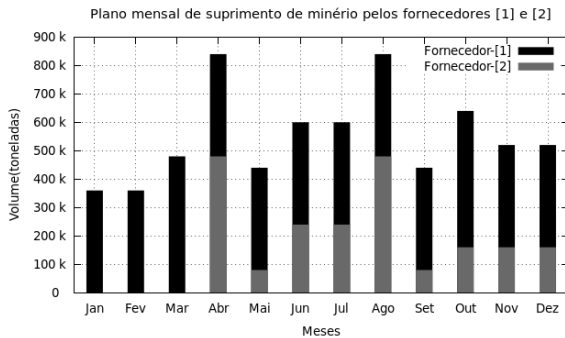


Figura 6.4: Plano mensal de suprimento de minério pelo fornecedor-[1] e fornecedor-[2] **Figura 6.5:** Plano mensal de suprimento de carvão pelo fornecedor-[Ext]

O suprimento de carvão é feito por navios, portanto, os lotes são múltiplos da capacidade destes. Os navios são do tipo: Handysize, Panamax e Capesize, e possuem a capacidade de transporte de 60.000, 120.000 e 200.000 toneladas, respectivamente. Percebemos, pela Figura 6.5, que não é necessário fazer compra de carvão nos dois últimos meses. Tal estratégia é justificada pelo modelo de otimização, que determina que a solução mais lucrativa é consumir o estoque de carvão até o último período ao invés de fazer um novo suprimento e incorrer em custos de estoque inutilizado ao final

do período de planejamento. Esta decisão, no entanto, não ocorre na prática, uma vez que o planejamento é feito em horizonte rolante e contemplado no modelo.

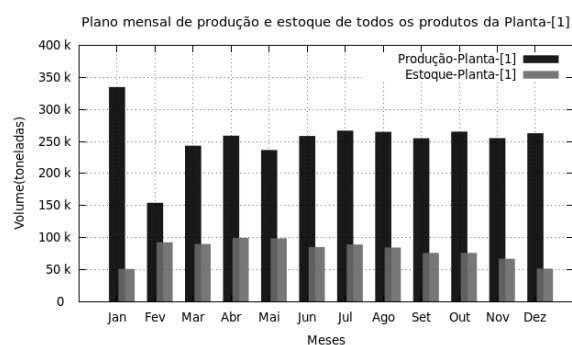


Figura 6.6: Plano mensal de produção e estoque da planta-[1]

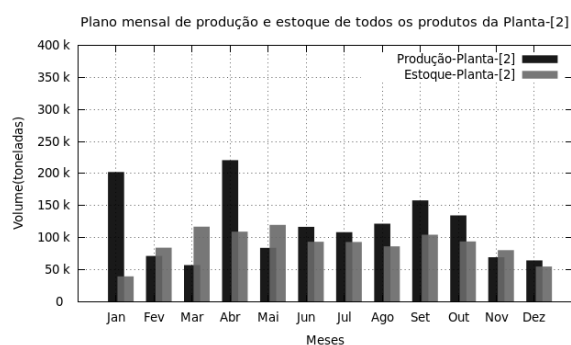


Figura 6.7: Plano mensal de produção e estoque da planta-[2]

O plano mensal de produção e armazenamento das plantas-[1] e [2] é apresentado nas Figuras 6.6 e 6.7. Neste cenário de planejamento, a demanda total é menor que a capacidade nominal das plantas, portanto, a estratégia dominante é utilizar o máximo de capacidade da planta-[1], que possui custos fixos e variáveis de operação menores. Os níveis de estoque aumentam ao longo dos meses, no entanto, eles não são totalmente consumidos no último mês, respeitando as restrições de estoque de segurança.

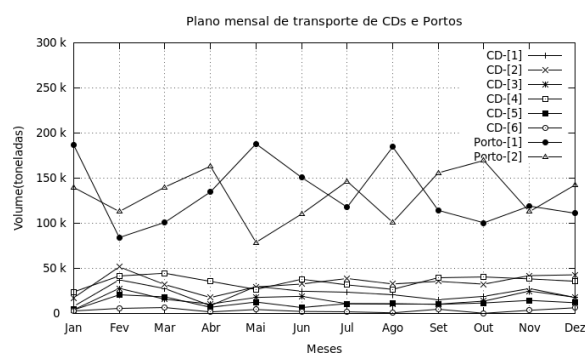


Figura 6.8: Plano mensal de transporte de CDs e Portos

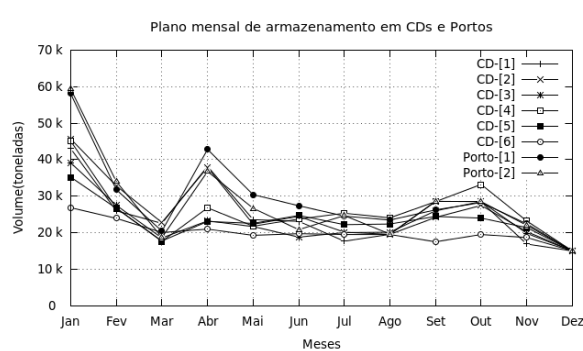


Figura 6.9: Plano mensal de armazenamento em CDs e Portos

Os planos de logística e de armazenamento nos pontos de transbordo são apresentados pelas Figuras 6.8 e 6.9. Nestes planos, percebemos que o volume transportado é proporcional ao volume estocado nos centros de distribuição. Nos portos, no entanto, o volume é maior, uma vez que nestes pontos de transbordo é concentrada toda demanda do mercado externo. No último período, assim como no plano de produção, o volume de estoque dos centros de distribuição e portos respeitam o nível mínimo estipulado pela gerência.

6.1.4.1 Avaliação do desempenho computacional do método adotado

Avaliamos o desempenho computacional da decomposição estocástica adotada para resolver o problema do estudo de caso. Os experimentos foram conduzidos para mostrar a eficiência do algoritmo proposto. Para isso, alteramos de 01 a 06 a quantidade de cenários de planejamento com o objetivo de avaliar a capacidade de resolução do método aplicado ao modelo estocástico de dois-estágios. O número de cenários é limitado a 06 por restrições de recursos computacionais. Sugere-se a elaboração de, pelo menos, 30 cenários, afim de se obter maior representatividade estatística para o valor esperado da função objetivo. Os experimentos foram rodados com considerando um tempo limite de 3600 segundos para ambos modelos. Os tempos computacionais do modelo decomposto são comparados ao tempo de resolução do modelo monolítico pelo *solver* Gurobi 6.0TM e apresentados na Tabela 6.2.

S	Restrições	Variáveis	Inteiras	Binárias	Monolítico (gap)	Decomposto (gap)
1	382.487	374.343	2.448	576	3600,00 (0,76%)	3600,00 (1,60%)
2	733.762	718.211	4.692	1.104	3600,00 (0,91%)	3600,00 (1,14%)
3	1.085.067	1.062.079	6.936	1.632	3600,00 (*,**%)	3600,00 (1,72%)
4	1.436.372	1.405.947	9.180	2.160	3600,00 (*,**%)	3600,00 (1,57%)
5	1.787.677	1.749.815	11.424	2.688	3600,00 (20,5%)	3600,00 (3,81%)
6	2.138.982	2.093.683	13.668	3.216	3600,00 (*,**%)	3600,00 (1,53%)

Tabela 6.2: Desempenho de 1 hora para $s = 6$ cenários. *Sem solução inicial.

Os resultados deste experimento nos permitem concluir que a solução ótima deste problema inteiro-misto de grande porte é de difícil obtenção, pois ela não foi encontrada pelo modelo monolítico, mesmo após 10.000 segundos de processamento. Além disso, em alguns experimentos, o modelo monolítico não encontrou, sequer, uma solução inicial viável.

O método de decomposição elaborado contribui para encontrar boas soluções em menor tempo computacional, mesmo para problemas com mais de dois milhões de variáveis e restrições. Em uma hora de processamento, o método de decomposição apresenta soluções próximas ao valor ótimo e com menos de 1% de *gap* do modelo monolítico. Além do mais, o método de decomposição apresenta boas soluções em situações em que o modelo monolítico não as encontra, como é o caso dos problemas estocásticos com três, quatro e seis cenários aleatórios.

6.1.4.2 Avaliação da solução por programação estocástica

Avaliamos a qualidade da solução do planejamento por programação estocástica de dois-estágios. A abordagem adotada assume a estratégia de maximizar o lucro esperado no médio prazo, adotando a condição de neutralidade sobre o risco. O modelo suporta um

método de planejamento aderente à realidade, pois assume a indisponibilidade imediata da informação perfeita nos parâmetros.

A incerteza, no entanto, acarreta a perda de lucro no planejamento. A perda estimada de lucratividade na presença de incerteza representa o *valor esperado da informação perfeita* (VEIP), ou seja, a diferença entre a média das soluções ótimas do problema determinístico com informação perfeita resolvido para cada cenário e a solução do modelo de programação estocástica. O VEIP do modelo PTCS-2HR desta cadeia de suprimentos é de R\$1.050.167.792,80. No entanto, este valor representa apenas um valor fictício de referência, pois a informação perfeita sobre todo período de planejamento não é disponível.

Avaliamos, portanto, o *valor da solução estocástica* (VSE), um indicador real que contabiliza o ganho provável ao adotar o modelo estocástico para realizar o planejamento. O VSE corresponde à diferença entre o resultado do modelo estocástico, que adota parâmetros aleatórios representados por distribuição de probabilidade, e o resultado do modelo determinístico quando se adotam valores médios. O decisor, quando assume uma demanda média, por exemplo, considera o *valor esperado do parâmetro* ao longo dos 12 períodos de planejamento, ao invés de valores aleatórios. Estes são considerados simultaneamente somente nos modelos estocásticos.

Em ambientes corporativos, gestores frequentemente elaboram cenários classificados em: pessimista, mais provável e otimista. Por isso, elaboramos três cenários aleatórios, cuja análises estão disponíveis na Tabela 6.3. Esta apresenta uma avaliação do VEIP e VSE para o planejamento da cadeia de suprimentos do estudo de caso avaliado pelo modelo de programação estocástica de dois-estágios. O VSE de R\$841.492.949,37 demonstra a superioridade da qualidade do planejamento elaborado pelo modelo estocástico inteiro-misto frente ao modelo determinístico.

Análise VEIP	Valor (\$)	Análise VSE	Valor (kt.)
Modelo determinístico		Modelo determinístico	
Lucro cenário-[1]	5.261.090.771,36	Lucro cenário-[Média]	3.371.141.457,50
Lucro cenário-[2]	5.265.907.656,01		
Lucro cenário-[3]	5.261.408.171,77		
(A) Lucro médio	5.262.802.199,7	(A) Lucro médio	3.371.141.457,50
<hr/>		<hr/>	
Modelo estocástico		Modelo estocástico	
Lucro cenário-[1]	4.339.303.687,16	Lucro cenário-[1]	4.339.303.687,16
Lucro cenário-[2]	4.129.639.062,17	Lucro cenário-[2]	4.129.639.062,17
Lucro cenário-[3]	4.168.960.471,26	Lucro cenário-[3]	4.168.960.471,26
(B) Lucro total esperado	4.212.634.406,87	(B) Lucro total esperado	4.212.634.406,87
<hr/>		<hr/>	
VEIP (A-B) :	1.050.167.792,8	VSE (B-A) :	841.492.949,37

Tabela 6.3: Análise VEIP e VSE do estudo de caso.

6.1.4.3 Impacto na estratégia de planejamento pela variação do custo da matéria-prima, do preço do produto acabado e da demanda

Neste trabalho, além de analisar o cenário original, investigamos o efeito da variação dos elementos que mais impactam o plano anual da cadeia de suprimentos desta siderurgia: custo das matérias-primas, o preço do produto acabado e a demanda. Estes parâmetros aleatórios são alterados proporcionalmente em -20%, -10%, +10% e +20% em relação ao cenário base. Particularmente, são avaliados os indicadores de lucro esperado, demanda atendida, demanda não atendida e volume total de estoque na cadeia.

Os resultados demonstram que a redução do preço do minério de ferro e carvão mineral favorece o aumento do lucro global da cadeia na mesma proporção. Além disso, percebemos um aumento em aproximadamente 10% no nível de estoques, contribuindo com a disponibilidade de matéria-prima para o processo produtivo, como apresentado na Figura 6.10. O aumento do preço das matérias-primas, por outro lado, pode provocar ruptura de estoque, levando à redução do nível de serviço pelo aumento da demanda não atendida. Assim, afetam a lucratividade global da cadeia.

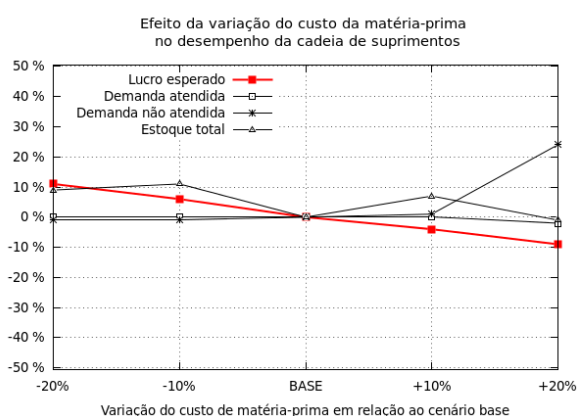


Figura 6.10: Efeito operacional e financeiro da variação do custo da matéria-prima

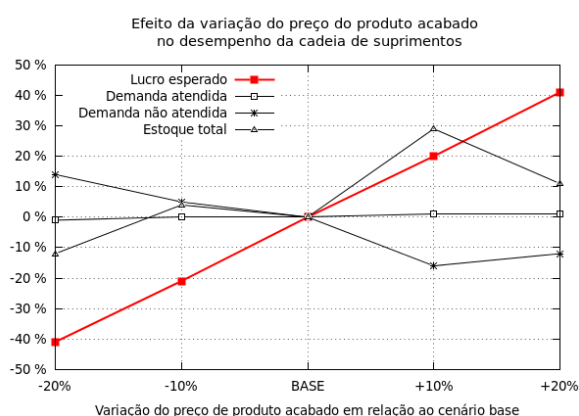


Figura 6.11: Efeito operacional e financeiro da variação do preço do produto acabado

A variação no preço do produto acabado, no entanto, tem impacto ainda maior sobre a lucratividade global. A Figura 6.11 ilustra o efeito devastador que a redução do preço dos produtos ocasiona no resultado da empresa. Esta redução pode ocorrer tanto por descontos em vendas, quanto por restrições políticas macroeconômicas. Por outro lado, políticas de agregação de valor ao produto acabado, que resultem no aumento do preço, impactam fortemente a lucratividade total da cadeia. Tal aumento de lucratividade é obtida pelo aumento dos níveis globais de estoque na cadeia. Assim, a redução da demanda não atendida é obtida pelo acúmulo de produtos acabados em períodos de capacidade ociosa.

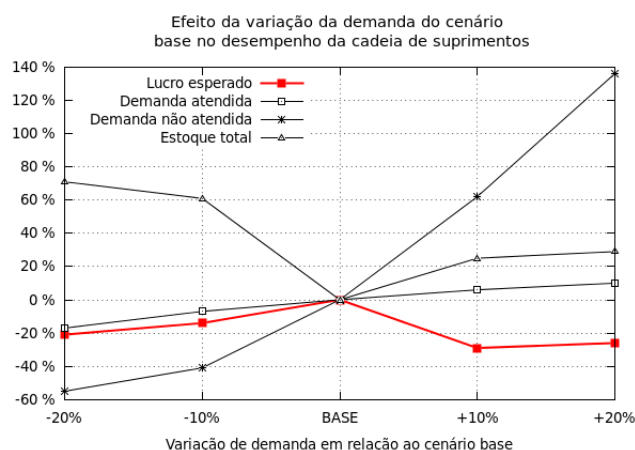


Figura 6.12: Efeito operacional e financeiro da variação do volume demandado

Ao interpretarmos a Figura 6.12, entendemos que a variação da demanda não produz efeitos proporcionais no resultado global da empresa, como no caso dos custos de matérias-primas e do preço de produtos acabados, conforme já discutido. Nesta simulação, por exemplo, o efeito da variação do volume e *mix* da demanda provocou perdas de lucratividade em relação ao cenário base. Em cada cenário, o planejamento ótimo da cadeia alterou significativamente os níveis de estoque, enquanto que o aumento da demanda provocou um aumento no percentual de demanda não atendida. Isso acontece quanto a empresa não tem poder de influenciar a demanda, adotando uma postura reativa, portanto, incapaz de alocar pedidos de produtos cujos roteiros tecnológicos ocupem recursos com capacidade ociosa.

Assim, concluímos que não há relação proporcional direta do volume de demanda com a lucratividade global da cadeia. Nestes casos, a postura pró-ativa do setor de vendas contribui quando atua de forma coesa com o setor de operações influenciando a demanda na aquisição do *mix* ideal.

Capítulo 7

Conclusão e Trabalhos Futuros

"I know nothing except the fact of my ignorance".

Sócrates

Nesta tese, a otimização do planejamento tático da cadeia de suprimentos em indústrias de manufatura é abordada. Apresentamos novas formulações por programação estocástica e programação estocástica robusta e elaboramos métodos de decomposição do problema estocástico de grande porte. As formulações e métodos são avaliadas por meio de um estudo computacional e aplicados a um estudo de caso envolvendo a cadeia de suprimentos de um grupo siderúrgico.

As formulações apresentadas são multi-produto, multi-modal, multi-período e integram decisões de médio prazo abordando o suprimento, produção e distribuição por quatro elos da cadeia: fornecedores, fábricas, centros de distribuição e clientes. A modelagem matemática unificada é capaz de capturar várias sinergias e *trade-offs* oriundos de objetivos conflitantes das divisões de negócio, como compras, manufatura, logística, finanças e *marketing*.

Um exemplo numérico é apresentado para ilustrar a formulação determinística. No entanto, em casos reais, os parâmetros dos modelos determinísticos não são conhecidos por completo. Portanto, são elaboradas formulações estocásticas por cenários e por dois-estágios. A formulação por cenários adota o princípio de não antecipação (Rockafellar e Wets, 1991), enquanto que as formulações por dois-estágios são caracterizadas por decisões do tipo “aqui e agora”, para o primeiro-estágio, enquanto que decisões do segundo-estágio são postergadas em uma forma “espera para ver”. Os modelos estocásticos são abordadas por programação estocástica e por programação estocástica robusta, do tipo *risk-averse*, ou seja, capturam o risco de tomada de decisão. A decisão envolve um *trade-off* entre o aumento da acurácia da solução e o aumento do modelo e sua complexidade computacional.

Para resolver os problemas estocásticos de grande porte, são elaborados métodos de

decomposição estocástica baseados em Benders (1962) seguindo a estratégia de decomposição temporal em uma formulação por dois-estágios, que atende simultaneamente às condições de planejamento por horizonte rolante e aos requisitos decomposição do problema com base em suas variáveis.

Os modelos preenchem *gaps* da literatura, pois abordam decisões simultâneas de suprimento, produção e distribuição; consideram finita a capacidade de produção, estocagem e transporte, além de contemplarem fornecedores e centros de distribuição como elementos da cadeia (Mula et al., 2010), (Fahimnia et al., 2012). As formulações e métodos são avaliados por meio de um estudo computacional. Este estudo, no entanto, vai além ao avaliar a flexibilidade da cadeia, uma abordagem pouco explorada na literatura, como discutido em Esmailikia et al. (2014).

Finalmente, um estudo de caso relacionado à aplicação de programação estocástica ao planejamento tático anual da cadeia de suprimentos de um grupo siderúrgico é apresentado. Descrevemos o processo logístico e operacional da cadeia e as estratégias de agrupamento adotadas para o desenvolvimento do modelo. Os resultados computacionais demonstram o desempenho superior do método de decomposição adotado em relação à formulação monolítica. A qualidade superior da solução por programação estocástica também é demonstrada por meio do VSE, quando comparada à solução do problema determinístico.

Além de analisar o cenário original, investigamos o efeito da variação dos elementos que mais impactam o plano anual da cadeia de suprimentos desta siderurgia: custo das matérias-primas, o preço do produto acabado e a demanda. Concluímos que a redução do preço do minério das matérias-primas favorece o aumento do lucro global da cadeia na mesma proporção, enquanto que, a variação no preço do produto acabado teve impacto quatro vezes maior que o preço de matérias-primas sobre a lucratividade global. Percebemos também que não há relação proporcional direta do volume de demanda com a lucratividade global da cadeia. Nestes casos, a postura pró-ativa do setor de vendas contribui quando atua de forma coesa com o setor de operações influenciando a demanda na aquisição de um *mix* favorável.

Os modelos de planejamento tático da cadeia de suprimentos propostos podem ser usados por tomadores de decisão viabilizando a reação antecipada à variações de mercado através de análises de cenários. O sistema também pode ser usado como ferramenta complementar à realização de: (i) análises de investimentos de longo prazo, (ii) avaliações relacionadas a remoção de gargalos, por meio de aumento de capacidade de produção ou transporte ou (iii) avaliações para evitar sobrecapacidades através da desativação de linhas de produção ou de centros de distribuição.

Embora a programação matemática tenha sido aplicada com sucesso várias vezes, ela não tem tido o impacto que os seus proponentes advogam. Muitos gerentes ainda

não tem a consciência dos benefícios potenciais de integração do planejamento por meio da otimização. A principal barreira para o melhor planejamento integrado não é a tecnologia, mas as pessoas. Organizações e indivíduos precisam entender as capacidades dos sistemas de apoio à decisão baseados em modelos de programação matemática e adaptar seus procedimentos de negócio para explorar essas oportunidades. Ao mesmo tempo, precisam saber que modelos não substituem seres humanos nem sua capacidade de gestão (Shapiro et al. (1993), Rudberg e Cederborg (2011)).

No futuro, diversos assuntos complementares podem ser estudados. Primeiro, elaborar cenários pelo método de amostragem de Monte Carlo (Dantzig e Infanger, 1991) para avaliar riscos e comparar as soluções com os métodos apresentados. Segundo, avaliar estratégias de modelagem que considerem temas recorrentes, como o *Green Supply Chain*, com formulações que abordem a logística reversa e os custos resultantes da flexibilidade (Sahinidis, 2004). Terceiro, estudar a correlação estatística dos parâmetros estocásticos adotados por meio de modelos robustos e considerar a dependência entre eles na formulação. Finalmente, avaliar o comportamento dinâmico da cadeia de suprimentos por meio de uma abordagem otimização-simulação (Tsai e Zheng, 2013) incluindo diversos elementos estocásticos como ocorrência de falhas e reparos nos equipamentos, e variações no *lead time* de suprimento, manufatura e logística.

Referências Bibliográficas

- Alem, D. (2011). *Programação estocástica e otimização robusta no planejamento da produção de empresas moveleiras*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- Alem, D. e Morabito, R. (2013). Risk-averse two-stage stochastic programs in furniture plants. *OR spectrum*, 35(4):773–806.
- Ang, J.; Meng, F. e Sun, J. (2014). Two-stage stochastic linear programs with incomplete information on uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 233(1):16–22.
- Arntzen, B. C.; Brown, G. G.; Harrison, T. P. e Trafton, L. L. (1995). Global supply chain management at Digital Equipment Corporation. *Interfaces*, 25(1):69–93.
- Awudu, I. e Zhang, J. (2013). Stochastic production planning for a biofuel supply chain under demand and price uncertainties. *Applied Energy*, 103:189–196.
- Bashiri, M. e Rezaei, H. (2013). Reconfiguration of Supply Chain: A Two Stage Stochastic Programming. *International Journal of Industrial Engineering*, 24(1):47–58.
- Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis::: Models and methods. *International journal of production economics*, 55(3):281–294.
- Ben-Tal, A.; El Ghaoui, L. e Nemirovski, A. (2009). *Robust optimization*. Princeton University Press.
- Ben-Tal, A. e Nemirovski, A. (1998). Robust convex optimization. *Mathematics of Operations Research*, 23(4):769–805.
- Ben-Tal, A. e Nemirovski, A. (1999). Robust solutions of uncertain linear programs. *Operations research letters*, 25(1):1–13.
- Ben-Tal, A. e Nemirovski, A. (2000). Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical programming*, 88(3):411–424.

- Benders, J. F. (1962). Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische mathematik*, 4(1):238–252.
- Bertsimas, D.; Brown, D. B. e Caramanis, C. (2011). Theory and applications of robust optimization. *SIAM review*, 53(3):464–501.
- Bertsimas, D. e Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations research*, 52(1):35–53.
- Beyer, H.-G. e Sendhoff, B. (2007). Robust optimization—a comprehensive survey. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 196(33):3190–3218.
- Bihlmaier, R.; Koberstein, A. e Obst, R. (2009). Modeling and optimizing of strategic and tactical production planning in the automotive industry under uncertainty. *OR spectrum*, 31(2):311–336.
- Bilgen, B. e Ozkarahan, I. (2007). A mixed-integer linear programming model for bulk grain blending and shipping. *International Journal of Production Economics*, 107(2):555–571.
- Birge, J. R. (1997). State-of-the-art-survey-stochastic programming: Computation and applications. *INFORMS journal on computing*, 9(2):111–133.
- Birge, J. R. e Louveaux, F. V. (1997). *Introduction to stochastic programming*. Springer.
- Biswal, M. e Acharya, S. (2013). Multi-choice multi-objective mathematical programming model for integrated production planning: a case study. *International Journal of Systems Science*, 44(9):1651–1665.
- Bitran, G. R. e Yanasse, H. H. (1982). Computational complexity of the capacitated lot size problem. *Management Science*, 28(10):1174–1186.
- Bredstrom, D. e Ronnqvist, M. (2002). Integrated production planning and route scheduling in pulp mill industry. In *System Sciences, 2002. HICSS. Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on*, pp. 1606–1614. IEEE.
- Chen, M. e Wang, W. (1997). A linear programming model for integrated steel production and distribution planning. *International Journal of Operations & Production Management*, 17(6):592–610.
- Chen, T.-L.; Lin, J. T. e Wu, C.-H. (2014). Coordinated capacity planning in two-stage thin-film-transistor liquid-crystal-display (TFT-LCD) production networks. *Omega*, 42(1):141–156.

- Christopher, M. (1992). *Logistics: the strategic issues*. Chapman & Hall.
- Clark, A. J. e Scarf, H. (1960). Optimal policies for a multi-echelon inventory problem. *Management science*, 6(4):475–490.
- Conceição, S.; Pedrosa, L.; Neto, A.; Vinagre, M. e Wolff, E. (2012). The facility location problem in the steel industry: a case study in Latin America. *Production Planning & Control*, 23(1):26–46.
- Dantzig, G. B. (1955). Linear programming under uncertainty. *Management science*, 1(3-4):197–206.
- Dantzig, G. B. e Infanger, G. (1991). Large-scale stochastic linear programs: Importance sampling and Benders decomposition. Technical report, DTIC Document.
- De Camargo, R. S. (2007). Sistemas eixo-raio de múltipla atribuição: modelos e algoritmos. *Tese de doutorado*.
- De Neufville, R. e Scholtes, S. (2011). *Flexibility in engineering design*. MIT Press.
- De Sá, E. M. (2011). Localização de concentradores aplicada ao transporte público. *Dissertação de mestrado*.
- Egging, R. (2013). Benders Decomposition for multi-stage stochastic mixed complementarity problems—Applied to a global natural gas market model. *European Journal of Operational Research*, 226(2):341–353.
- Ekşioğlu, S. D.; Edwin Romeijn, H. e Pardalos, P. M. (2006). Cross-facility management of production and transportation planning problem. *Computers & Operations Research*, 33(11):3231–3251.
- Escudero, L. (1994). CMIT, capacitated multi-level imlosion tool. *European Journal of Operational Research*, 76(3):511–528.
- Escudero, L. F.; Galindo, E.; Garcia, G.; Gomez, E. e Sabau, V. (1999). Schumann, a modeling framework for supply chain management under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 119(1):14–34.
- Esmailikia, M.; Fahimnia, B.; Sarkis, J.; Govindan, K.; Kumar, A. e Mo, J. (2014). Tactical supply chain planning models with inherent flexibility: definition and review. *Annals of Operations Research*, pp. 1–21.
- Fahimnia, B.; Farahani, R. Z.; Marian, R. e Luong, L. (2012). A review and critique on integrated production–distribution planning models and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*.

- Falk, J. E. (1976). Technical Note—Exact Solutions of Inexact Linear Programs. *Operations Research*, 24(4):783–787.
- Fernandes, L. J.; Relvas, S. e Barbosa Póvoa, A. (2014). Collaborative Design and Tactical Planning of Downstream Petroleum Supply Chains. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.
- Fleischmann, B.; Ferber, S. e Henrich, P. (2006). Strategic planning of BMW’s global production network. *Interfaces*, 36(3):194–208.
- Florian, M.; Lenstra, J. K. e Rinnooy Kan, A. (1980). Deterministic production planning: Algorithms and complexity. *Management science*, 26(7):669–679.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Cambridge: MIT Press.
- Fourer, R.; Gay, D. M. e Kernighan, B. W. (1993). *Ampl*. Boyd and Fraser.
- Franses, P. H. (2011). Averaging Model Forecasts and Expert Forecasts: Why Does It Work? *Interfaces*, 41(2):177–181.
- Frias, L. F.; Farias, I. A.; Wanke, P. F.; Corrêa, H. L. e Santos, L. (2014). Tax-related aspects of logistics network planning: a case study in the Brazilian petrochemical industry. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 17(2):114–135.
- Gabrel, V.; Murat, C. e Thiele, A. (2014). Recent advances in robust optimization: An overview. *European Journal of Operational Research*, 235(3):471–483.
- Gassmann, H. I. e Ireland, A. (1995). Scenario formulation in an algebraic modelling language. *Annals of Operations Research*, 59(1):45–75.
- Geoffrion, A. M. e Powers, R. F. (1995). Twenty years of strategic distribution system design: An evolutionary perspective. *Interfaces*, 25(5):105–127.
- Gereffi, G. e Lee, J. (2012). Why the world suddenly cares about global supply chains. *Journal of Supply Chain Management*, 48(3):24–32.
- Goetschalckx, M.; Vidal, C. J. e Dogan, K. (2002). Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European journal of operational research*, 143(1):1–18.
- Grossmann, I. E. (2012). Advances in mathematical programming models for enterprise-wide optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 47:2–18.

- Gupta, A. e Maranas, C. D. (2003). Managing demand uncertainty in supply chain planning. *Computers & Chemical Engineering*, 27(8):1219–1227.
- Gupta, A.; Maranas, C. D. e McDonald, C. M. (2000). Mid-term supply chain planning under demand uncertainty: customer demand satisfaction and inventory management. *Computers & Chemical Engineering*, 24(12):2613–2621.
- Gupta, N.; Dutta, G. e Fourer, R. (2014). A Multi-Period Two Stage Stochastic Programming Based Decision Support System for Strategic Planning in Process Industries: A Case of an Integrated Iron and Steel Company. Technical report, Indian Institute of Management Ahmedabad, Research and Publication Department.
- Hahn, G. e Kuhn, H. (2012). Simultaneous investment, operations, and financial planning in supply chains: A value-based optimization approach. *International Journal of Production Economics*.
- Higle, J. L. (2005). Stochastic programming: optimization when uncertainty matters. *Cole Smith J (ed) Tutorials in operations research*, pp. 30–53.
- Kallrath, J. (2002). Combined strategic and operational planning—an MILP success story in chemical industry. *Or Spectrum*, 24(3):315–341.
- Kallrath, J. e Maindl, T. I. (2006). *Real optimization with SAP APO*. Springer.
- Kelle, P.; Schneider, H. e Yi, H. (2014). Decision alternatives between expected cost minimization and worst case scenario in emergency supply—Second revision. *International Journal of Production Economics*.
- Kopanos, G. M.; Puigjaner, L. e Georgiadis, M. C. (2012). Simultaneous production and logistics operations planning in semicontinuous food industries. *Omega*, 40(5):634–650.
- Lalmazloumian, M.; Wong, K. Y.; Govindan, K. e Kannan, D. (2013). A robust optimization model for agile and build-to-order supply chain planning under uncertainties. *Annals of Operations Research*, pp. 1–36.
- Laporte, G. e Louveaux, F. V. (1993). The integer L-shaped method for stochastic integer programs with complete recourse. *Operations research letters*, 13(3):133–142.
- Litvinchev, I.; Rios, Y.; Özdemir, D. e Hernández-Landa, L. (2014). Multiperiod and stochastic formulations for a closed loop supply chain with incentives. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 53(2):201–211.
- Makhorin, A. (2008). GLPK (GNU linear programming kit).

- Martin, C. H.; Dent, D. C. e Eckhart, J. C. (1993). Integrated production, distribution, and inventory planning at Libbey-Owens-Ford. *Interfaces*, 23(3):68–78.
- Martínez-Costa, C.; Mas-Machuca, M.; Benedito, E. e Corominas, A. (2014). A review of mathematical programming models for strategic capacity planning in manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 153:66–85.
- Marufuzzaman, M.; Eksioğlu, S. D. e Huang, Y. (2014). Two-stage stochastic programming supply chain model for biodiesel production via wastewater treatment. *Computers & Operations Research*, 49:1–17.
- McLean, K. (2014). *Novel formulation and decomposition-based optimization for strategic supply chain management under uncertainty*. PhD thesis, Queen's University, <http://hdl.handle.net/1974/8668>.
- Meyr, H. e Mann, M. (2013). A decomposition approach for the General Lotsizing and Scheduling Problem for Parallel production Lines. *European Journal of Operational Research*, 229(3):718–731.
- Min, H. e Zhou, G. (2002). Supply chain modeling: past, present and future. *Computers & industrial engineering*, 43(1):231–249.
- Mirzapour Al-E-Hashem, S.; Malekly, H. e Aryanezhad, M. (2011). A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 134(1):28–42.
- Mula, J.; Peidro, D.; Díaz-Madroñero, M. e Vicens, E. (2010). Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3):377–390.
- Mula, J.; Poler, R.; Garcia-Sabater, J. e Lario, F. (2006). Models for production planning under uncertainty: A review. *International journal of production economics*, 103(1):271–285.
- Mulvey, J. M.; Vanderbei, R. J. e Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2):264–281.
- Munhoz, J. R. e Morabito, R. (2014). Optimization approaches to support decision making in the production planning of a citrus company: A Brazilian case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 107:45–57.

- Navid, B. e Ismaeli, S. (2012). Analyzing effective elements in agile supply chain. *Management Science Letters*, 2(1).
- Ng, W. P. Q. e Lam, H. L. (2014). A supply network optimisation with functional clustering of industrial resources. *Journal of Cleaner Production*, 71:87–97.
- Oliveira, F.; Grossmann, I. E. e Hamacher, S. (2014). Accelerating Benders stochastic decomposition for the optimization under uncertainty of the petroleum product supply chain. *Computers & Operations Research*, 49:47–58.
- Paiva, R. e Morabito, R. (2011). Programação estocástica robusta aplicada ao planejamento agregado de safra em usinas cooperadas do setor sucroenergético. *Gestão e Produção*, 18(4):719–738.
- Papageorgiou, L. G. (2009). Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities. *Computers & Chemical Engineering*, 33(12):1931–1938.
- Park, Y. (2005). An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management. *International Journal of Production Research*, 43(6):1205–1224.
- Piewthongngam, K.; Pathumnakul, S. e Homkhampad, S. (2012). An interactive approach to optimize production-distribution planning for an integrated feed swine company. *International Journal of Production Economics*.
- Pimentel, B. S.; Mateus, G. R. e Almeida, F. A. (2011). Stochastic capacity planning in a Global Mining Supply Chain. In *Computational Intelligence In Production And Logistics Systems (CIPLS), 2011 IEEE Workshop On*, pp. 1–8. IEEE.
- Pishvaei, M. S.; Rabbani, M. e Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2):637–649.
- Pochet, Y. e Wolsey, L. A. (2006). *Production planning by mixed integer programming*. Springer.
- Prajogo, D. e Sohal, A. (2013). Supply chain professionals: A study of competencies, use of technologies, and future challenges. *International Journal of Operations & Production Management*, 33(11/12):1532–1554.
- Rockafellar, R. T. e Wets, R. J.-B. (1991). Scenarios and policy aggregation in optimization under uncertainty. *Mathematics of operations research*, 16(1):119–147.

- Rodrigue, J.-P. (2012). The Geography of Global Supply Chains: Evidence from Third-Party Logistics. *Journal of Supply Chain Management*, 48(3):15–23.
- Rodriguez, M. A.; Vecchietti, A. R.; Harjunkski, I. e Grossmann, I. E. (2014). Optimal supply chain design and management over a multi-period horizon under demand uncertainty. Part I: MINLP and MILP models. *Computers & Chemical Engineering*, 62:194–210.
- Roghalian, E.; Sadjadi, S. e Aryanezhad, M. (2007). A probabilistic bi-level linear multi-objective programming problem to supply chain planning. *Applied Mathematics and computation*, 188(1):786–800.
- Rømo, F.; Tomasgard, A.; Hellemo, L.; Fodstad, M.; Eidesen, B. H. e Pedersen, B. (2009). Optimizing the Norwegian natural gas production and transport. *Interfaces*, 39(1):46–56.
- Roy, M. e Dasgupta, T. (2014). A Revisit to Decision Support System (DSS) through Optimization with Special Reference to Logistic and Supply Chain Management. *SIT Journal of Mangement*, 4(1):1–15.
- Rudberg, M. e Cederborg, O. (2011). APS for tactical planning in a steel processing company. *Industrial Management & Data Systems*, 111(4):608–628.
- Ryu, J.-H.; Dua, V. e Pistikopoulos, E. N. (2004). A bilevel programming framework for enterprise-wide process networks under uncertainty. *Computers & chemical engineering*, 28(6):1121–1129.
- Sahinidis, N. V. (2004). Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6):971–983.
- Santoso, T.; Ahmed, S.; Goetschalckx, M. e Shapiro, A. (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167(1):96–115.
- Schmidt, G. e Wilhelm, W. E. (2000). Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: a review and discussion of modelling issues. *International Journal of Production Research*, 38(7):1501–1523.
- Shah, N. (2005). Process industry supply chains: Advances and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 29(6):1225–1236.
- Shapiro, J. F. (2004). Challenges of strategic supply chain planning and modeling. *Computers & chemical engineering*, 28(6):855–861.

- Shapiro, J. F.; Singhal, V. M. e Wagner, S. N. (1993). Optimizing the value chain. *Interfaces*, 23(2):102–117.
- Simchi-Levi, D.; Chen, X. e Bramel, J. (2014). The logic of logistics. *Theory, Algorithms, and Applications for Logistics and Supply Chain Management*.
- Sinha, G. P.; Chandrasekaran, B.; Mitter, N.; Dutta, G.; Singh, S. B.; Choudhury, A. R. e Roy, P. (1995). Strategic and operational management with optimization at Tata Steel. *Interfaces*, 25(1):6–19.
- Sodhi, M. S. e Tang, C. S. (2009). Modeling supply-chain planning under demand uncertainty using stochastic programming: A survey motivated by asset–liability management. *International Journal of Production Economics*, 121(2):728–738.
- Soyster, A. L. (1973). Technical note—convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations research*, 21(5):1154–1157.
- Stadtler, H. (2005). Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges. *European journal of operational research*, 163(3):575–588.
- Timpe, C. H. e Kallrath, J. (2000). Optimal planning in large multi-site production networks. *European Journal of Operational Research*, 126(2):422–435.
- Tsai, S. C. e Zheng, Y.-X. (2013). A simulation optimization approach for a two-echelon inventory system with service level constraints. *European Journal of Operational Research*, 229(2):364–374.
- Van Slyke, R. M. e Wets, R. (1969). L-shaped linear programs with applications to optimal control and stochastic programming. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 17(4):638–663.
- Vidal, C. J. e Goetschalckx, M. (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98(1):1–18.
- Wallace, S. W. (2000). Decision making under uncertainty: Is sensitivity analysis of any use? *Operations Research*, 48(1):20–25.
- Womack, J. P.; Jones, D. T. e Roos, D. (2008). *The machine that changed the world*. Simon and Schuster.

- Ye, Y.; Li, J.; Li, Z.; Tang, Q.; Xiao, X. e Floudas, C. A. (2014). Robust optimization and stochastic programming approaches for medium-term production scheduling of a large-scale steelmaking continuous casting process under demand uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 66:165–185.
- You, F. e Grossmann, I. E. (2013). Multicut Benders decomposition algorithm for process supply chain planning under uncertainty. *Annals of Operations Research*, 210(1):191–211.
- Yu, C.-S. e Li, H.-L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International Journal of Production Economics*, 64(1):385–397.
- Zhang, J.; Osmani, A.; Awudu, I. e Gonela, V. (2013). An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain. *Applied Energy*, 102:1205–1217.