

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CASSIANO DA SILVA TAVARES

Seleção de Fornecedores sob Incertezas  
via Otimização Robusta

SÃO CARLOS -SP

2019

CASSIANO DA SILVA TAVARES

Seleção de Fornecedores sob Incertezas via Otimização Robusta

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção

Orientador: Pedro Augusto Munari Júnior

Coorientador: Moacir Godinho Filho

São Carlos-SP

2019





**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

**Folha de Aprovação**

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Cassiano da Silva Tavares, realizada em 25/04/2019:

---

Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto  
UFSCar

---

Prof. Dr. Pedro Augusto Munari Junior  
UFSCar

---

Prof. Dr. Moacir Godinho Filho  
UFSCar

---

Prof. Dr. Cleber Damião Rocco  
UNICAMP

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Pedro Augusto Munari Junior e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

---

Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto



## Resumo

Este trabalho estuda o problema de seleção de fornecedores sob incertezas, motivado pela atual situação econômica do comércio mundial. A busca acirrada entre as organizações pela responsividade no atendimento à demanda de mercado vem direcionando esforços para a otimização na cadeia de suprimentos. Um dos principais elos neste contexto é o fornecimento das matérias primas. A ruptura do fornecimento de uma matéria prima pode ocasionar o bloqueio ou paralisação de todo o sistema organizacional, levando a um insucesso operacional no atendimento de uma determinada demanda, prejudicando a imagem da organização perante o mercado. A decisão da melhor escolha de fornecimento tornou-se uma atividade vital para as organizações no panorama atual, pois o desempenho operacional da cadeia está fortemente atrelado a este elo fundamental. Com isso, a decisão de seleção de fornecedores se torna uma atividade muito complexa, exigindo um nível de precisão e assertividade elevado. O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver e aplicar abordagens de otimização que incorporem as incertezas no contexto em que o fornecimento de matérias primas mundial está inserido, por meio da abordagem de Otimização Robusta. São propostos dois modelos de programação linear inteira mista para o problema determinístico, a partir dos quais são obtidas as contrapartes robustas que modelam o problema sob incertezas. Os modelos foram implementados utilizando um *software* de otimização de propósito geral. Simulações de Monte Carlo foram realizadas para conhecer os desempenhos dos modelos determinísticos e robustos em amostras de diversos cenários, bem como o nível de robustez das soluções. Os experimentos computacionais apontaram que a abordagem de Otimização Robusta potencializa o nível de robustez das soluções em aversão aos riscos, quando parâmetros incertos estão envolvidos. Isto foi comprovado pelo nível de oneração promovida nos valores das soluções quando uma proteção à incerteza foi empregada, pois o incremento no valor ótimo da função objetivo no pior caso sempre é menor que o desvio dos parâmetros incertos.

Palavras chave: Seleção de Fornecedores, Otimização Sob Incertezas, Otimização Robusta.

## **Abstract**

*This paper studies the problem of selection of suppliers under uncertainties, motivated by the current economic situation of world trade. The fierce search among the organizations for responsiveness in meeting the market demand has been directing efforts for optimization in the supply chain. One of the main links in this context is the supply of raw materials. The rupture of the supply of a raw material can cause the blockade or paralysis of the entire organizational system, leading to an operational failure to meet a demand, damaging the image of the organization to the market. The decision of the best choice of supply has become a vital activity for organizations in the current scenario, as the chain's operational performance is strongly tied to this fundamental link. With this, the decision to select suppliers becomes a very complex activity, requiring a high level of precision and assertiveness. The objective of this work is to develop and apply optimization approaches that incorporate the uncertainties in the context in which the global supply of raw materials is inserted through the Robust Optimization approach. Two models of mixed integer linear programming are proposed for the deterministic problem, from which the robust counterparts that model the problem under uncertainties are obtained. The models were implemented using general purpose optimization software. Monte Carlo simulations were performed to determine the performances of the deterministic and robust models in samples of different scenarios, as well as the level of robustness of the solutions. The computational experiments pointed out that the Robust Optimization approach enhances the robustness of solutions in risk aversion when uncertain parameters are involved. This was evidenced by the level of encumbrance promoted in the values of the solutions when a protection to the uncertainty was employed, since the increase in the optimal value of the objective function in the worst case is always smaller than the deviation of the uncertain parameters.*

*Keywords: Supply Selection, Uncertainty Optimization, Robust Optimization.*

## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer os meus pais, Ilson e Nice, por sempre dedicarem todo o esforço possível em minha educação e sempre acreditarem no meu potencial investindo tempo, dinheiro e saúde em minha jornada. Sem esta fagulha educacional e todo amor de vocês nada disso seria possível!

Gostaria de agradecer imensamente a minha esposa Jéssica que sempre me apoiou em toda esta jornada de muitos obstáculos compilada neste trabalho. Ela teve a paciência, empatia, compaixão e muito amor de estar ao meu lado nos momentos mais difíceis e mais prazerosos ao longo desses dois anos de projeto. Ela me deu forças para continuar quando tudo parecia impossível e teve uma enorme participação no sucesso deste trabalho!

A empresa que trabalhei durante este projeto também merece um agradecimento especial por investir em minha capacitação e acreditar que o mestrado traria um avanço tecnológico a organização e a minha pessoa. Ressalto que a empresa me liberou para assistir as disciplinas e as reuniões de projetos com meus orientadores apostando neste projeto em uma iniciativa inovadora. Eu espero ter retribuído tal investimento da melhor forma possível.

Aos meus orientadores Pedro Munari Júnior e Moacir Godinho Filho, deixo todo o meu carinho e gratidão por todo o conhecimento que me foi transmitido ao longo do projeto e da minha vida acadêmica. Agradeço também por toda a paciência que vocês tiveram comigo devido as minhas limitações técnicas, acadêmicas e problemas pessoais que tive ao longo do projeto.

Os professores Reinaldo Morabito Neto e Cleber Damião Rocco agradeço por todas as contribuições para o projeto nos exames de qualificação e defesa. E por toda a cordialidade, respeito pelo trabalho e motivação empregada para com os alunos no campo da ciência que me apaixonei: a Pesquisa Operacional.

Como colegas do laboratório GPO deixo a minha enorme admiração e carinho por toda ajuda dada nos meus primeiros passos como pesquisador e como programador matemático. Agradeço em especial os pesquisadores Jonathan Justen de La Vega Martinez e Alfredo Daniel Moreno Arteaga por me guiarem na estruturação

dos primeiros programas deste projeto e pelo ponta pé inicial na escrita científica. E agradeço também o colega Leandro Resende Mundin pela cooperação nos trabalhos em equipe das disciplinas e por me apresentar uma empresa disposta a encarar os desafios do mundo real, utilizando a ferramentas da Pesquisa Operacional levando mais tecnologia as organizações, provando que é possível otimizar processos em diversos cenários e formas de negócio.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

“This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001”

## Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de MCT.....	27
Figura 2 - O problema da Seleção de Fornecedores Intercontinentais. ....	30
Figura 3 - Representação geométrica da abordagem de Soyster. ....	45
Figura 4 - Representação geométrica da abordagem de Ben-Tal e Nemirosvski com $\Omega = 1$ . ....	47
Figura 5 - Representação geométrica da abordagem de Ben-Tal e Nemirosvski com $\Omega = \sqrt{2}$ . ....	47
Figura 6 - Representação Geométrica da abordagem de Bertsimas e Sim com $\Gamma = 1$ . ....	48
Figura 7- Representação Geométrica da abordagem de Bertsimas e Sim com $\Gamma = 2.48$	
Figura 8 - Influência da baixa oferta no modelo SSDSC. ....	71

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados gerados aleatoriamente para o período $t = 1$ (3P-2T-4S). .....	64
Tabela 2 - Dados gerados aleatoriamente para o período $t = 2$ (3P-2T-4S). .....	64
Tabela 3 - Dados da criação das instâncias.....	64
Tabela 4 - Comparação entre os modelos determinísticos. ....	67
Tabela 5 - Perturbação no custo de estoque do MODELO SSDSC. ....	70
Tabela 6 – Resultados do modelo RSSDSC - classe 5P-10T-15S.....	74
Tabela 7 – Resultados do modelo RSSDSC - classe 10P-20T-30S.....	74
Tabela 8 - Resultados do modelo RSSDSC - classe 15P-30T-45S. ....	76
Tabela 9 - Resultados do modelo RSSDSC - classe 20P-40T-60S.....	77
Tabela 10 - Simulação de Monte Carlo da classe 5P-10T-15S- desvio 10%. ....	84
Tabela 11 – Simulação de Monte Carlo da classe 10P-20T-30S- desvio 10%.....	85
Tabela 12 – Simulação de Monte Carlo da classe 15P-30T-45S- desvio 10%.....	86
Tabela 13 – Simulação de Monte Carlo da classe 20P-40T-60S- desvio 10%.....	87
Tabela 14 - Simulação de Monte Carlo da classe 5P-10T-15S- desvio 25%. ....	100
Tabela 15 – Simulação de Monte Carlo da classe 5P-10T-15S- desvio 50%.....	101
Tabela 16 – Simulação de Monte Carlo da classe 10P-20T-30S- desvio 25%.....	102
Tabela 17 – Simulação de Monte Carlo da classe 10P-20T-30S- desvio 50%.....	103
Tabela 18 – Simulação de Monte Carlo da classe 15P-30T-45S- desvio 25%.....	104
Tabela 19 – Simulação de Monte Carlo da classe 15P-30T-45S- desvio 50%.....	105
Tabela 20 – Simulação de Monte Carlo da classe 20P-40T-60S- desvio 25%.....	106
Tabela 21 – Simulação de Monte Carlo da classe 20P-40T-60S- desvio 50%.....	107

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

SSP – *Supplier Selection Problem*

SSDC – *Supplier Selection with Demand Control*

SSDSC – *Supplier Selection with Demand and Stock Control*

OR – Otimização Robusta

TBC – *Time Based Competition*

SAA - *Sample Average Aproximation*

CVAR - *Condition Value-at-Risk*

RM - *Risk Measure*

MIP - Programação Linear Inteira Mista

MP – Matérias primas

FI – *Full-Interval*

AR – Aumento Médio Relativo

PR – Preço da Robustez

GS – *Global Sourcing*

MCT - *Manufacturing Critical-path Time*

QRM - *Quick Response Manufacturing*

## Sumário

1. Introdução .....	12
1.1 Contextualização .....	12
1.2 Objetivos da pesquisa .....	18
1.3 Justificativa .....	18
1.4 Estrutura do trabalho .....	20
2. Referencial Teórico .....	21
2.1 <i>The Global Sourcing</i> .....	21
2.2 O QRM e sua visão a respeito de fornecimento globalizado .....	24
2.2.1 Uma visão geral da abordagem QRM .....	24
2.2.2 O impacto do fornecedor com longo MCT .....	26
2.3 O Problema de Seleção de Fornecedores (SSP) .....	29
2.4 Modelos para o SSP determinístico .....	31
2.5 Modelos para o SSP sob incertezas .....	32
2.6 Outras abordagens para o SSP .....	34
2.7 Considerações finais sobre o capítulo .....	35
3. Modelagem Matemática .....	37
3.1 Modelo SSDC .....	37
3.2 Modelo SSDSC .....	40
3.3 Considerações finais sobre o capítulo .....	42
4. Modelos de Seleção de Fornecedores via Otimização Robusta .....	43
4.1 Fundamentos de Otimização Robusta .....	43
4.1.1 Abordagem de Soyster .....	44
4.1.2 Abordagem de Ben-Tal e Nemirovski .....	46
4.1.3 Abordagem de Bertsimas e Sim .....	48
4.2 Modelos de OR para a seleção de fornecedores .....	51
4.2.1 Modelo RSSDC com incertezas nos custos e tempo de entrega .....	51

4.2.2 Modelo RSSDSC com incertezas nos custos e tempo de entrega .....	56
4.3 Considerações finais sobre o capítulo.....	62
5. Resultados.....	63
5.1 Criação das instâncias.....	63
5.2 Testes computacionais da fase 1 .....	65
5.2.1 Comparação entre os modelos determinísticos.....	65
5.2.2 Análise de sensibilidade do modelo SSDSC .....	67
5.2.3 Influência da baixa oferta .....	69
5.3 Testes computacionais da fase 2 .....	72
5.3.1 Testes com o modelo RSSDSC .....	72
5.3.2 Análise do Risco da Solução Robusta do modelo SSDC com incerteza nos custos via Simulação de Monte Carlo.....	80
6. Conclusões e próximos passos.....	92
6.1 Conclusões.....	92
6.2 Próximos Passos .....	94
APÊNDICE A - Modelo de Ware et al. (MIPNL).....	97
APÊNDICE B - Simulação de Monte Carlo do modelo RSSDSC com incerteza nos custos .....	100

## 1. Introdução

As características do ambiente em que o mercado competitivo global atualmente está inserido, no qual os ciclos de vida dos produtos estão cada vez menores e dinâmicos (ROSENFELD et al., 2006), exigem que as organizações possuam uma alta eficiência produtiva e um baixo custo operacional, levando-as a buscarem formas de inovação nas maneiras de realizar novos negócios (PAN & NAGI, 2010). Isto tem forçado as organizações a otimizarem suas cadeias de suprimentos, promovendo melhor gestão de seus recursos. Com isso, a gestão dos relacionamentos com os fornecedores torna-se um fator competitivo crucial para o desempenho de toda a cadeia (PARK et al., 2010).

### 1.1 Contextualização

A competição baseada no tempo (*Time Based Competition* - TBC) está em destaque no panorama econômico e comercial na atualidade devido à sua expansão em uma velocidade exponencial, superando os limites geográficos entre os continentes, por meio da tecnologia da informação, tornando a competição pelas parcelas de mercado mais acirrada nos últimos vinte anos (SURI, 1998). Nesta competição, o foco dos *stakeholders* é direcionado a três indicadores de desempenho: preço, qualidade e prazo de entrega (MARTINS & COSTA NETO, 1998). O indicador qualidade é também um indicador qualificador, ou seja, estar abaixo de um nível estipulado ideal para o mercado consumidor significa que o fornecedor estará fora da competição pela fatia de mercado (SLACK, 2002). Já o indicador preço é um indicador definido como uma técnica de precificação, que reflete o quanto o mercado está disposto a pagar por aquele bem ou serviço (BALLOU, 1993). E, por fim, o indicador prazo de entrega sinaliza se o cliente será fidelizado se for atendido dentro do prazo combinado ou abandonará o sistema em função do tamanho da fila de espera para o recebimento do produto ou serviço (LARSON & ODoni, 1981).

Como a qualidade é um pré-requisito de mercado, o preço é definido pelo mercado e o prazo de entrega é o indicador que determina o número de usuários no sistema, torna-se mais atrativo aos fornecedores concorrentes lutar pelos dois últimos indicadores. No indicador preço, os concorrentes podem lutar pela redução de custos, a fim de obter vantagem econômica interna (WOMACK et al., 1990). E no indicador prazo

de entrega é iniciada uma TBC, onde a parcela de mercado é proporcional aos usuários do sistema que forem atendidos nos prazos combinados. Se o prazo combinado for respeitado, a variável demanda tende a aumentar devido ao fator satisfação/fidelização do cliente (LARSON & ODoni, 1981; SURI, 2010). Esta relação pode ser evidenciada em um estudo de filas que consiste em uma área da Pesquisa Operacional que observa sistemas e as relações entre atendimento da demanda e razão do tamanho da fila de processamento. Se a demanda for superior à capacidade de processamento do produto ou serviço, haverá formação de filas aguardando este processamento. Com isso, o tamanho desta fila pode influenciar a percepção do consumidor em relação do nível de serviço prestado. Esta abordagem é amplamente empregada no dimensionamento de serviços como: bancos, supermercados, postos de gasolina, entre outros, quanto em sistemas de manufatura como: dimensionamento do maquinário e das estações de trabalho (ARENALES et al., 2007).

Neste contexto, as organizações podem obter uma expressiva vantagem competitiva, direcionando os seus esforços na otimização do tempo do atravessamento em sua cadeia de suprimentos, buscando a redução de prazos de entregas de seus fornecedores e buscas contínuas pela redução de custos no fornecimento de suas matérias primas (MP).

O *Quick Response Manufacturing* (QRM) idealizado por Suri (1998), é fundamentado na redução do tempo de atravessamento de todas as operações de uma organização, combatendo desperdícios através de um processo investigativo, a fim de melhorar a qualidade, reduzir custos, eliminar os tempos de valor não agregado e aumento de receita. Diversas aplicações da teoria demonstraram que combatendo os longos tempos de atravessamento, torna-se possível atender as necessidades dos clientes, produzindo itens customizados, seriais, discretos e serviços em um menor espaço de tempo e dentro dos padrões e especificações estabelecidas pelo mercado consumidor. Alguns exemplos destas aplicações podem ser encontrados em Saes; Godinho Filho (2011), Godinho Filho et al. (2011), Lima et al. (2013), Godinho Filho et al. (2016) e Godinho Filho et al. (2017).

Apesar de suas origens estarem enraizadas na filosofia do *Time-Based Competition* (TBC), o QRM possui como foco cadeias produtivas e de serviços realizando análises através do método de dinâmica dos sistemas proposto por Forster em 1961. Estas análises possuem o objetivo de encontrar meios de organizar as companhias, promovendo maior responsividade nos atendimentos das demandas de mercado, além de

evidenciar as falhas gerenciais ou produtivas possibilitando a elaboração de um novo planejamento de gestão, seja de bens de consumo ou de serviços (SURI, 1998).

Para realizar as quebras dos paradigmas tradicionais e tornar possível a implementação do QRM, deve haver um entendimento, por parte da organização, dos seus conceitos e princípios da abordagem. Estes princípios consistem na dinâmica dos sistemas de manufatura, além de compreender que o espírito do QRM deve estar presente em todos os setores da companhia e não apenas em determinados. Isso deve ser feito por meio da implantação de células promovendo *empowerment* aos colaboradores envolvidos.

Tendo em vista as dificuldades oriundas com essa mudança, é fundamental que seja feito um treinamento que possui dois objetivos: para auxiliar a todos e também para definir os passos do processo em conjunto. Suri (2010) propôs quatro conceitos-chave para implementar a abordagem do QRM com sucesso:

- criação de *layout* organizado por células QRM dedicando todos os recursos disponíveis para atacar uma oportunidade de mercado ou uma ameaça de mercado externo;
- criação de células independentes, possuindo total responsabilidade, para lidar com todas as decisões e realizações de metas;
- realizar um investimento significativo na força de trabalho de treinamento cruzado para alcançar novos níveis de flexibilidade e desempenho por meio de pessoas capazes de realizar várias tarefas;
- e para apoiar estes três conceitos prévios, a organização precisa mudar todas as métricas tradicionais focadas em metas de custo/eficiência para uma nova métrica focada na redução do *lead time*, que é um foco incansável na abordagem QRM. Além disso, todo esse foco na redução do *lead time* deve ser expandido para todas as operações da empresa, incluindo as operações dentro da cadeia de suprimentos como os departamentos de compras, planejamento e controle da produção, vendas, engenharia, entre outros.

*Quadro 1 - Custos envolvidos em uma transação de seleção de fornecedores intercontinentais.*

<b>Custos estáticos</b>	<b>Custos dinâmicos</b>	<b>Custos escondidos</b>
(1) Preço de compra fora da fábrica	(1) Aumento de pulmões e estoque de segurança para atendimento de flutuações de demanda e variabilidade de produtos	(1) Inflação no custo da mão de obra devido ao aumento nos padrões de vida no mercado de trabalho dos operadores da cadeia
(2) Custo de transporte unitário, assumindo atrasos nas entregas e problemas de qualidade.	(2) Estoque obsoleto devido aos longos <i>lead times</i> de entrega	(2) Flutuações econômicas e variações de câmbio
(3) Custos alfandegários para remessa de exportação	(3) Custo de vendas perdidas e abandonos, pela cadeia não atender a demanda.	(3) Aumento nos combustíveis: preço do óleo e taxa de emissão de carbono
(4) Seguro da carga e custo de transação	(4) Carregamentos não programados para atender ordens urgências para evitar rupturas na cadeia	(4) Custo de overhead para transações internacionais como: viagem, hospedagem, transporte para negociação como os fornecedores.
(5) Custo de controle de qualidade e conformidade para atender normas de segurança e legislações ambientais		(5) Perda de capital intelectual e sigilo industrial
(6) Custo de procura e taxas de agência para manter contato com os fornecedores locais		(6) Risco de instabilidade política

Fonte: adaptado de Holweg et al. (2011).

O presente estudo se encaixa exatamente dentro desse contexto, visando investigar as operações de seleção de fornecedores em ambientes intercontinentais em um cenário incerto. Nessa situação, um risco que deve ser combatido é o de *lead time* de entrega das MPs que está diretamente ligado ao tempo de atravessamento da cadeia de suprimentos. A abordagem QRM propõe uma ferramenta para promover suporte a decisões similares neste contexto, chamada *Time-Based Dual Sourcing* que auxilia o tomador de decisão na difícil escolha entre baixo custo versus tempo de entrega. Inclusive, esta ferramenta foi a motivação para a ideia inicial do presente trabalho.

Outro ponto chave no contexto deste tipo de cadeia de suprimentos que possuem transações intercontinentais são os custos envolvidos em toda a operação.

Holweg et al. (2011) resumiu os custos de maior importância na operação de seleção de fornecedores pelo mundo, conforme resumido no Quadro 1.

A esses custos, Suri (2010) acrescenta também os seguintes pontos:

- Custo de alterações de projeto não planejadas, criando estoque obsoleto: neste tipo de situação não se pode apenas considerar o estoque de produtos acabados em mãos e sim em toda a cadeia de suprimentos. Para cada fornecedor do produto devem ser considerados potenciais lotes: em trânsito para entrega, em estoques intermediários em processo de produção, e componentes dos produtos em todas as plantas (organização compradora e fornecedores). Devido a esta alteração inesperada e a criação deste estoque obsoleto, será necessária a inserção de ordens de compra urgentes (*rush orders*), com altos custos de carregamentos e entregas para atender todos os requisitos da cadeia, de modo, a evitar rupturas.
- Fornecedores muito distantes geograficamente: se a cadeia de suprimentos for muito extensa e houver fornecedores dispersos e geograficamente distantes, existirá um alto custo operacional para comunicação entre os elos da cadeia. Os fornecedores potencialmente podem pertencer aos segundos e terceiros elos de fornecimento, sendo assim, eles também terão outros fornecedores que atuam e suas cadeias. Então neste cenário, devido ao alto número de atravessadores, torna-se mais complexo obter informações em tempo real sobre a situação: das ordens de compra, dos status dos carregamentos, da logística de entrega, dos problemas alfandegários entre outros. Esta situação também reduz a flexibilidade e o tempo de resposta da organização compradora quando ocorrem variações acentuadas de demanda.

Com base nos pontos apresentados anteriormente, o presente trabalho visa propor modelos quantitativos visando abordar incertezas, provendo proteções para as soluções contra alguns desvios de parâmetros considerados incertos que possam ocorrer após o planejamento e as ordens de compras firmes. Tais modelos buscam incorporar alguns custos apresentados por Holweg et al. (2011), como os custos estáticos (1)-(6), os custos dinâmicos (1) e (3) e os custos escondidos (1)-(3).

A complexidade do gerenciamento de decisões no processo de compra de MP no ambiente de mercados intercontinentais devido ao *trade-off* entre custo e prazo de

entrega corrobora para o emprego de ferramentas de suporte à decisão que consigam otimizar este *trade-off*, de modo a otimizar estes dois indicadores conflitantes.

A Pesquisa Operacional possui uma ampla variedade de métodos e técnicas que auxiliam este tipo de tomada de decisão complexa, utilizando modelos matemáticos que visam otimizar, simular e analisar sistemas (DE BOER et al., 2001). Esta disciplina tem se tornado cada vez mais importante com a crescente complexidade e incerteza no século XXI. A economia eletrônica global requer decisões operacionais e táticas mais eficientes e ágeis. O mercado global, auxiliado pela tecnologia da informação, define novas relações entre clientes, fornecedores, parceiros e competidores (ARENALES et al., 2007).

Este cenário de mercado globalizado possui características peculiares que influenciam o desempenho do sistema de uma cadeia de suprimentos nos primeiros elos como: incerteza de custo, demanda e prazo de entrega. A incerteza de custos pode ser definida como a influência na variação do câmbio internacional devido ao mercado financeiro global ser volátil e sensível a diversos fatores, como decisões políticas, desastres naturais, ataques terroristas, entre outros, afetando as decisões de quanto e onde comprar.

Já a incerteza de demanda pode ser definida como a realização da programação de pedidos de compras com vários horizontes de planejamento à frente devido aos altos prazos de entregas atribuídos às transações intercontinentais, com base em previsões, projetando as demandas futuras. Com a volatilidade do mercado essas previsões podem não ser muito assertivas. Uma pequena variação de demanda dos clientes finais ocasiona um efeito chicote em todos os elos da cadeia de suprimentos (FORRESTER, 1961).

Por fim, a incerteza no prazo de entrega pode ser definida pelo sistema de transações intercontinentais. Como em uma transação intercontinental um país será o fornecedor e o outro será o cliente, a transação está sujeita às legislações de ambos os países que estão comercializando. Isto infere que toda a documentação para transporte destes produtos atenda à exigência do país no qual o produto será enviado. Como as legislações dos países não são unificadas, muitas vezes este tipo de transação encara problemas alfandegários, aduaneiros, judiciais, logísticos, entre outros. Estes entraves alteram o prazo de entrega destes produtos, ocasionando insatisfação ao mercado consumidor.

Estas incertezas tornam mais complexa a decisão da seleção de fornecedores, levando à seguinte questão de pesquisa: Como apoiar a tomada de decisão eficiente (assertiva) no processo de compra de MP, selecionando fornecedores no mercado global, de modo a otimizar os resultados operacionais de toda a cadeia de suprimentos em um ambiente com incertezas?

## **1.2 Objetivos da pesquisa**

Este trabalho possui como objetivo o desenvolvimento de modelos matemáticos para o apoio à tomada de decisão na seleção de fornecedores sob incertezas. Esta decisão é desafiadora e complexa, pois tem impacto sobre o desempenho de toda a cadeia de suprimentos, já que o atraso das MP pode levar as organizações a terem rupturas em seu processo, atrasos nas entregas de seus produtos, perda de vendas, contratos e clientes e afetar a sua imagem no mercado em consequência dos atrasos (CORRÊA, 1993; TUBINO, 1997; SURI, 2010).

A gravidade no erro na tomada deste tipo de decisão e os atrasos consequentes deste erro, suportam a necessidade do emprego de uma abordagem robusta para este problema. Por este motivo e pelas limitações encontradas em outros paradigmas foi selecionada a Otimização Robusta (OR) para tratar incertezas junto ao problema de seleção de fornecedores. Essa abordagem tem sido pouco explorada na literatura de seleção de fornecedores (KISOMI et al., 2016; GUO et al., 2016).

Além disso, este trabalho possui uma relevância de caráter prático ao modelar uma situação real vivenciada diariamente por diversos segmentos industriais de todos os portes. Por fim, não foi encontrado pelo autor nenhum trabalho na literatura que incorpore todas as características contempladas na composição deste trabalho. Dessa forma, as abordagens propostas têm o potencial de contribuir com o estado-da-arte, bem como resultar em ferramentas computacionais que possam de fato auxiliar na tomada de decisão em situações reais.

## **1.3 Justificativa**

Como já foi apontado anteriormente, a seleção de fornecedores globais sob incertezas é uma decisão complexa. Este tipo de decisão é vivenciada atualmente por

diversos segmentos industriais de todos os portes em todo o mundo. Isto ressalta a frequência, o volume e o nível de importância na assertividade da tomada de decisões envolvendo o quê, onde e como comprar. Para isso, torna-se necessário o emprego de ferramentas de apoio à decisão que deem suporte a este ambiente complexo.

Neste trabalho, o suporte para este tipo de decisão será obtido usando-se as técnicas de Pesquisa Operacional, visando atender o objetivo de apoiar tomadores de decisão, como analistas, coordenadores, supervisores, gerentes, entre outros profissionais ligados à cadeia de suprimentos no aumento na eficiência da organização, principalmente nos elos iniciais das cadeias logísticas. Atualmente existem diferentes abordagens na literatura que promovem apoio à tomada de decisão em um ambiente incerto, como Programação Estocástica, lógica *Fuzzy*, OR, dentre outras. Em particular, a OR tem apresentado vantagens interessantes em relação às demais, como será detalhado adiante neste texto, sendo, portanto, o paradigma escolhido para o tratamento de incertezas no presente trabalho.

Assim, as lacunas que a presente dissertação de mestrado pretende preencher correspondem ao desenvolvimento de modelos matemáticos de apoio à tomada de decisão para a seleção de fornecedores sob incertezas, visando a otimização de resultados, análise da incerteza nos custos, a influência da incerteza no *lead time* de entrega e a mitigação dos riscos para o aumento da eficiência global da cadeia de suprimentos. Neste contexto, aborda-se:

- 1) Incertezas nos custos: como este trabalho está inserido em um ambiente de transações intercontinentais nos quais os prazos de entrega são altos e voláteis devido a distâncias, modais, entre outros, torna-se necessário programar-se e fechar os contratos de compra de MP vários horizontes de planejamento à frente. Como a tarefa de prever a oscilação do câmbio em um intervalo de tempo grande é muito difícil, esta decisão se torna uma atividade muito crítica e complexa.
- 2) Incerteza no tempo de entrega: esta incerteza possui duas principais causas: devido a algum problema de na cadeia de suprimentos na cadeia de suprimentos da organização fornecedora ou devido à falta de unificação nas leis pelos países participantes no processo de importação. Na segunda causa podem ocorrer falhas nos tempos de entrega se a documentação do produto que será

enviado ao país da organização compradora não estiver respeitando todas as normas do país em que a mercadoria estiver percorrendo durante o trajeto de entrega.

Como as legislações dos países não são unificadas, muitas vezes este tipo de transação encara problemas alfandegários, aduaneiros, judiciais, logísticos, entre outros. Estes entraves alteram o prazo de entrega destes produtos, ocasionando insatisfação ao mercado consumidor e um efeito chicote na cadeia de suprimentos.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

As demais seções deste trabalho estão organizadas da seguinte forma. No Capítulo 2, é apresentado o Referencial Teórico. No Capítulo 3, são apresentados os modelos de Programação Linear Inteira Mista para duas variantes determinísticas do problema de seleção de fornecedores. No Capítulo 4, são apresentados os modelos de OR para as mesmas variantes abordadas no Capítulo 3. No Capítulo 5, são apresentados os resultados de experimentos computacionais. Por fim, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões finais e propostas de trabalhos futuros.

## 2. Referencial Teórico

Neste capítulo, apresentam-se primeiramente as características mais relevantes da cadeia de fornecimento global, bem como a visão da abordagem *Quick Response Manufacturing* a respeito da importância de se avaliar cuidadosamente as decisões de fornecimento global. Posteriormente, descrevem-se as características mais relevantes no âmbito de estudo da Pesquisa Operacional sobre o problema de seleção de fornecedores (SSP, do inglês *Supplier Selection Problem*). Para isso, é primeiramente apresentado um panorama geral sobre o tema e são apresentadas abordagens de solução determinísticas e estocásticas, exatas e heurísticas, utilizadas na resolução do problema em questão.

### 2.1 *The Global Sourcing*

A cadeia de fornecimento global conhecida como *Global Sourcing* (GS) é definida como um dos estágios finais de evolução estratégica da cadeia de suprimentos, buscando inserir novos fornecedores estrangeiros como parte da estratégia geral do departamento de compras, de modo, a alcançar vantagem competitiva perante o mercado. Existem três fatores fundamentais que motivam a decisão de construir uma GS: redução de custo para a intensificação na TBC global, estabelecimento em novos mercados, e a manutenção relacionamento com o mercado externo para obter acesso à novas tecnologias (HOLWEG et al., 2011).

A evolução crescente da importância da GS no cenário mundial devido a acirrada TBC global, leva à contínua diminuição das barreiras internacionais estreitando os laços entre as nações que participam da negociação. Os grandes blocos econômicos mundiais, como NAFTA, Mercosul, União Europeia e WTO, têm empregado grandes esforços para as reduções destas barreiras, levando uma diminuição da complexidade neste tipo de transação. Apesar dos longos *lead-times* envolvidos nestas negociações, a proximidade entre os países cria uma interação entre os envolvidos, promovendo um avanço sociocultural e humanitário.

O termo GS vem sendo amplamente abordado na literatura desde a década de 1980 e os trabalhos apontam diversos tipos de benefícios alcançados em toda operação, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Fundamentação da GS (em ordem de importância).

Monczka and Giunipero (1984)	Monczka and Trent (1991)	Nassimbeni (2006)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preços baixos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de custo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiais comprados e seus componentes a um baixo custo</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empresa possuir operações em todo mundo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de qualidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Encontrar recursos não disponíveis no país de origem</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilidade de produtos estrangeiros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior exposição a tecnologia mundial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de redução de custos de mão de obra</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de qualidade dos produtos estrangeiros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento na confiabilidade de entrega</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Competição Global</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnologia disponível nos fornecedores estrangeiros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introdução de uma competição entre os fornecedores locais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demonstrar as ações globais da companhia</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atendimento das demandas locais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabelecimento na presença de novos mercados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade da aquisição de novas tecnologias</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Devido ao desenvolvimento da competição global</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requisitos de logísticas de entrega atendo as especificações</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução das barreiras comerciais</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento na eficácia de entrega dos produtos estrangeiros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento no número de fornecedores disponíveis no mercado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de desenvolvimento em mercados externos</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medida de reação as práticas de terceirização dos concorrentes de mercado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presença de plantas da companhia em países estrangeiros</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de venda de produtos no mercado fornecedor</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tributação mais favorável</li> </ul>

Fonte: adaptado de Holweg et al. (2011).

Por outro lado, a operação de GS possui um complexo contexto de custos atrelado que pode ser dividido em três classes, sendo estáticos, dinâmicos e escondidos, que devem ser conhecidos previamente antes da estruturação de uma GS e são definidos da seguinte forma:

- Custos estáticos: são os custos aplicados e percebidos diretamente, como custos de mão de obra externa, custo unitário da mercadoria fora da fábrica, custo de transporte, custo aduaneiro, seguro da carga, custo de transbordos, custo para lidar com alterações logísticas que possam

ocorrer regularmente, custo de controle de qualidade obedecendo os padrões de segurança e ambientais, custo de procura e taxas agenciais para realizar *networking* com os fornecedores estrangeiros.

- Custos dinâmicos: são os custos associados ao atendimento de efeitos inesperados na cadeia, como criação de pulmões e estoques de segurança para o atendimento de flutuações acentuadas de demanda, altos volumes de estoques de itens e componentes para o atendimento da variabilidade de demanda, obsolescência em função de alterações de projeto ou inovações de produtos, vendas perdidas em função das alterações de projeto que não atendem a um ponto de corte factível com o tempo de entrega da cadeia, custos para entregar ordens urgentes demandando carregamentos e fretes internacionais inesperados para o atendimento de uma demanda não prevista com o objetivo de evitar rupturas, garantindo o nível de serviço.
- Custos escondidos: são custos que não estão relacionados com a operação da cadeia de suprimento, porém são afetados pela volatilidade do cenário econômico global, como flutuações econômicas, alterações nos custos de energia, mudanças climáticas, alterações na taxa de emissão de carbono ou alterações nas legislações vigentes. Geralmente, estes são custos difíceis de serem previstos e ocorrem de maneira irregular. Como exemplo, pode-se observar que as flutuações econômicas influenciam o câmbio. Então, viagens não programadas para solucionar problemas de engenharia em campo, podem onerar significativamente o custo de toda cadeia, afetando o resultado econômico da companhia. Outro custo potencial a ser considerado é o de propriedade intelectual. Nas transações internacionais é necessário prover um suporte tecnológico para o desenvolvimento e pós-venda nos mercados em que as transações ocorrem. Estas operações podem oferecer um *know-how* técnico aos fornecedores sobre as tecnologias empregadas nos produtos. Esta condição permite que estes fornecedores incorporem estas tecnologias e deem um salto evolutivo na cadeia de suprimentos, passando de fornecedores para competidores, e por consequência, acabam competindo no mesmo mercado com seus clientes do passado que forneceram a tecnologia.

Todo este contexto de altos *lead times*, custos envolvidos, altos riscos e flutuações inesperadas de demanda, motivam o departamento de compras a buscar solicitar grandes lotes de compra para obter vantagem econômica a partir de faixas econômicas de descontos. Esta visão tradicionalista para abordar um tipo de situação complexa pode prejudicar todo o desempenho operacional da cadeia de suprimentos.

## **2.2 O QRM e sua visão a respeito de fornecimento globalizado**

### **2.2.1 Uma visão geral da abordagem QRM**

O mercado consumidor moderno e o avanço tecnológico têm criado consumidores cada vez mais impacientes, sempre em busca de novos produtos, novos serviços, novas ferramentas, novas atualizações, entre outros, para satisfazer suas necessidades. Este cenário tem impulsionado as organizações a se tornarem mais ágeis e eficientes em sua cadeia de suprimentos, bem como sua cadeia logística de distribuição. Com isso, os fornecedores tanto de itens, bem como de componentes, também devem reagir rapidamente às solicitações de seus clientes (organização compradora). Este gatilho também impulsiona estes fornecedores de primeiro nível a exigir de seus fornecedores a mesma resposta em tempo ágil. E isso se repetindo por todos os níveis ao longo de toda a cadeia, criando um ciclo vicioso.

O QRM é uma abordagem cujo principal objetivo é a redução do tempo de atravessamento pela cadeia de suprimentos e logística. Para tal, a abordagem age em dois cenários: externamente à organização atuando na percepção, satisfação e fidelização do consumidor; e internamente na organização criando novas práticas, pensamentos e políticas de controle. Esta última frente é apresentada para ambientes fabris, escritórios e serviços.

O ponto chave que diferencia esta abordagem das tradicionais, como *Lean Manufacturing* e *Six Sigma*, é que o QRM direciona todo o seu esforço para combater somente um tipo de desperdício: o longo tempo de atravessamento (*lead time*). O pensamento que impulsiona as práticas da abordagem é: “*para alcançar os melhores prazos de entrega do mercado para atender uma fatia de mercado maior, é necessário ser muito eficiente em toda a operação. Se a organização conseguir atingir esta meta,*

significa que ela atacou eficientemente todos os seus desperdícios, otimizando o tempo de atravessamento por toda as cadeias de suprimento e logística.” (SURI, 2010).

Quadro 3 - Pensamento Tradicional x Princípios do QRM.

#	Pensamento Tradicional	Princípio do QRM
1	As pessoas devem trabalhar mais rápido e em maiores jornadas de modo a produzir mais em menos tempo	Encontre novas formas de completar um trabalho, com foco a reduzir o <i>lead time</i>
2	Para produzir mais deve-se manter pessoas e máquinas ocupadas todo o tempo	Planeje operar entre 70 e 80% da capacidade crítica dos recursos.
3	Para reduzir o <i>lead time</i> deve se melhorar a eficiência	Meça a redução do <i>lead time</i> e torne-a como sua medida de desempenho
4	Deve se dar importância nas entregas em dia de cada departamento e fornecedor	Apegue-se a medir e premiar as reduções de <i>lead time</i>
5	Adotar um sistema MRP irá ajudar a reduzir <i>lead time</i>	Utilize o MRP para planejar a demanda de materiais. Reestruture a organização da manufatura em células e complemente com um método de controle de material que combine o melhor das estratégias de produção
6	Realizando pedido de grandes quantidades junto aos fornecedores, pode se negociar descontos	Motive os fornecedores a implementar o QRM resultando em pequenos lotes, baixo custo, melhor qualidade e <i>lead time</i> mais curto
7	Os clientes devem ser estimulados a comprar em grandes quantidades, oferecendo, para isso, descontos	Apresente o método QRM ao seu cliente e negocie uma agenda de entrega de pequenos lotes e preços razoáveis
8	O QRM pode ser implementado formando times em cada departamento	Elimine habilidades funcionais estimulando a multifuncionalidade, treinamento, time responsável por família de produtos e estimule o <i>empowerment</i>
9	A razão de se adotar o QRM é que ao fazer as entregas mais rapidamente, pode se cobrar mais dos clientes	A razão de se adotar o QRM é que ele permite conceber a verdadeira produção enxuta e um futuro mais seguro
10	Implementar QRM demanda altos investimentos em tecnologia	O maior obstáculo na implantação do QRM é a mudança de mentalidade e não a tecnologia

Fonte: Adaptado de Suri (1998).

Para alcançar este objetivo, Suri (1998) apresentou os 10 princípios que vão contra o pensamento tradicional de gestão das cadeias de suprimentos e serviços que não favorecem a redução do tempo de atravessamento em função das métricas tradicionais baseadas prioritariamente em custos. O Quadro 3 apresenta a comparação entre

os dois. Este pensamento foi muito inovador na época, e acabou rompendo com diversos paradigmas de gestão e controle em vigência naquele tempo, levando o *estado da arte* a um novo nível.

### 2.2.2 O impacto do fornecedor com longo MCT

Suri (2010) define o *Manufacturing Critical-path Time* (MCT) ou "tempo crítico de manufatura" como o número de dias do calendário, desde a entrada do pedido até o dia em que a primeira peça do pedido seja entregue ao cliente, passando através do caminho crítico, ou seja, aquele que possui mais processos e gasta mais tempo para sua conclusão. O MCT é um elemento gráfico que pretende representar o tempo estimado gasto para entregar a solicitação. Na ferramenta representam-se os "*touch times*" ou horas de trabalho, ou seja, são aqueles tempos que agregam valor ao produto, e tempos de espera, também chamados de "*blank spaces*" ou espaços em branco, que são aqueles que não agregam valor. Geralmente, há muitos espaços em branco na produção e a ferramenta auxilia nessa identificação para que sejam descobertas suas possíveis causas.

A Figura 1 apresenta uma situação hipotética de uma indústria que produz transmissões para veículos automotores. Esta indústria possui três células de fabricação em sua planta que podem ser tratadas como ciclos: Fabricação das engrenagens, Fabricação das caixas de transmissão e Montagem e logística para entrega. Analisando a Figura 1 se pode observar que cada ciclo possui um tempo de atravessamento específico, já que, os itens que passam por aquela célula podem ter roteiros de fabricação diferentes, tempos de fila de processamento diferentes entre outras razões. As células de Fabricação de engrenagens e Fabricação das caixas de transmissão devem atuar paralelamente para atender a célula de Montagem e logística para que os prazos acordados com os clientes no processo de Vendas sejam cumpridos.

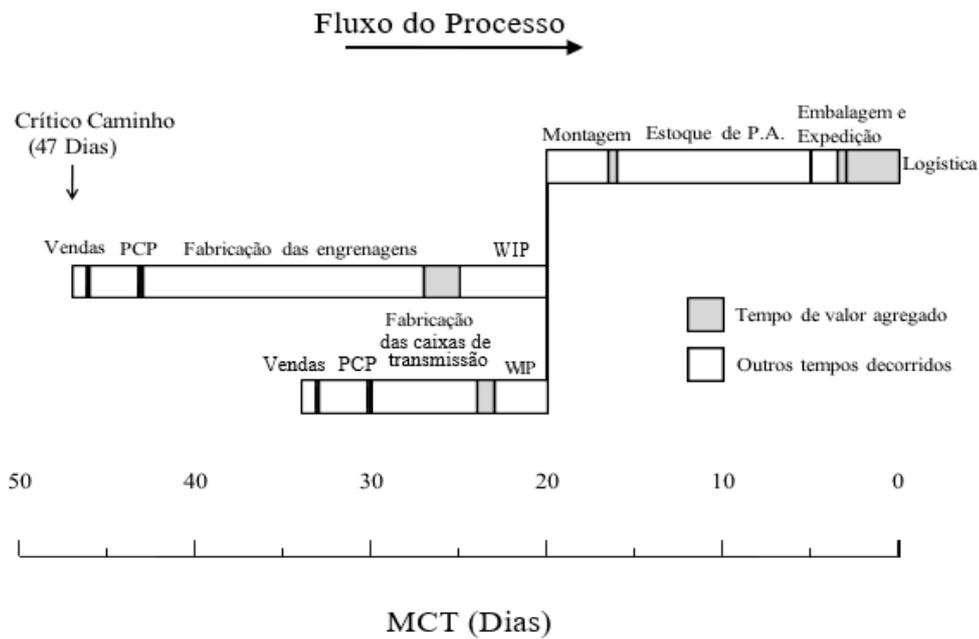


Figura 1 - Exemplo de MCT.

Fonte: Adaptado de Suri (2010).

O principal motivo para que o MCT seja construído da direita para esquerda, no sentido contrário ao Fluxo de Processo, é que esta orientação permite facilmente que o acúmulo do tempo sem valor agregado (Outros tempos decorridos) possa ser rastreado ao longo de cada ciclo, através de toda a cadeia de suprimentos, e o caminho crítico pelo qual o produto ou serviço está destinado a percorrer seja identificado rapidamente para ser tratado.

Fornecedores que possuem longos MCTs potencializam os custos estáticos, dinâmicos e escondidos envolvidos na cadeia, conforme definidos anteriormente. Estes custos são provenientes das ineficiências na cadeia de suprimentos dos fornecedores e são transportados como custos para os seus clientes. Apesar disso, muitas empresas subestimam estes custos se baseando em pensamentos e métricas tradicionais, acreditando que as faixas econômicas de descontos, que são obtidas através de grandes lotes, trarão vantagem competitiva à sua operação. Este pensamento pode ser ilusório, uma vez que, a maior parcela dos custos totais da cadeia de suprimentos em uma transação GS são do tipo custos escondidos (Suri, 2010).

As métricas tradicionais utilizadas para a avaliação dos fornecedores em uma seleção são preço, qualidade e prazo de entrega. Estas métricas podem esconder diversos custos, por exemplo:

- no indicador qualidade o fornecedor pode esconder suas ineficiências em seu processo produtivo, adicionando diversos pontos de inspeção de qualidade para manter o padrão de qualidade exigido pela organização compradora. Os diversos pontos de inspeção não agregaram valor ao produto do fornecedor e aumentam o seu custo operacional;
- no indicado preço o fornecedor pode esconder suas ineficiências apresentando um orçamento de valor baixo no ato da cotação. Esta ação leva a organização compradora inferir que o fornecedor possua alta eficiência em função do seu baixo custo. Porém o fornecedor consegue atingir um orçamento melhor, reduzindo suas margens de contribuição para evitar a perda da venda. Esta situação parece benéfica ao primeiro momento para a organização compradora, mas pode ser prejudicial a operação dela se o fornecedor não possuir uma controladoria forte na gestão de seus contratos. Uma avalanche de contratos com margem de contribuição negativas podem levar o fornecedor a encerrar as atividades, podendo promover rupturas no processo produtivo da organização compradora;
- no indicador prazo de entrega o fornecedor pode esconder as suas ineficiências através de grandes lotes de entregas de produtos acabados em seu estoque a pronta entrega. Obviamente que esta ação só favorece a empresa compradora, pois manter altos estoques de produtos acabados para esconder ineficiências onera severamente o desempenho da cadeia do fornecedor em função do baixo giro de estoque.

Estas métricas tracionais somente apontam os esforços do fornecedor no atendimento aos padrões exigidos pelos indicadores fundamentais (preço, prazo e qualidade) e não apontam sua eficiência de fato. Como no MCT o fornecimento de MP exerce influência no tempo de atravessamento crítico, a motivação e esforços conjuntos para que os fornecedores reduzam seus MCTs, buscando lotes de fabricação pequenos, baixos custos, melhores índices de qualidade e tempos de entrega curtos, possui uma importância fundamental para o sucesso operacional de toda a cadeia (Suri, 2010).

### 2.3 O Problema de Seleção de Fornecedores (SSP)

A decisão da melhor escolha de fornecimento tornou-se uma atividade vital para as organizações no panorama atual, pois o desempenho operacional da cadeia está fortemente atrelado a este elo fundamental (THRULOGACHANTAR; ZAILANI, 2011). Com isso, a decisão de seleção de fornecedores se torna uma atividade muito complexa, exigindo um nível de precisão e assertividade muito alto. A complexidade desta atividade pode ser evidenciada nos inúmeros fatores a serem analisados na tomada de decisão (HO et al., 2010).

Por ser uma decisão complexa, o processo de seleção de fornecedores pode ser tratado em etapas: definição do processo, formulação dos critérios de seleção, qualificação e seleção final. Na etapa de definição do processo, a organização necessita definir o objetivo central naquele momento sobre a seleção de fornecimento (desenvolvimento de novos parceiros, desenvolvimento de novos produtos, entre outros). Já na etapa de formulação dos critérios, a organização direciona esforços para a definição dos requisitos que serão avaliados na etapa posterior. Na etapa de qualificação, são avaliados os critérios definidos na etapa anterior e um *ranking* é criado para a seleção. Por fim, na etapa de escolha final, são selecionados os fornecedores com maior pontuação da etapa anterior e os pedidos são alocados para eles. (DE BOER; LABRO; MORLACCHI, 2001; AISSAOUI; HAOUARI; HASSIN, 2007). Neste trabalho serão abordadas a terceira e quarta etapa, uma vez que as etapas anteriores serão consideradas como dados de entrada definidos nos modelos.

Para realizar as atividades apresentadas, o SSP vem propor soluções para contornar estas adversidades. Isso consiste na busca pelo pedido de compra ótimo, visando a minimização de todos os custos envolvidos na cadeia de suprimentos. Para isto, o SSP necessita conhecer todos os custos, demandas e a estimativa da capacidade de fornecimento dos potenciais fornecedores que estarão envolvidos no processo de decisão.

Então o SSP pode ser definido como um processo de seleção, dado um conjunto de fornecedores disponíveis em diferentes regiões geográficas e seus respectivos custos, no qual busca-se determinar quais deles contratar e em qual período de tempo, de modo a satisfazer uma demanda por MP, em um horizonte de tempo finito, inserido em ambiente multi-períodos e multi-itens. Algumas variantes do SSP incluem diferentes faixas de preço promovendo economia de escala, controle de estoque podendo carregar (ou atrasar) o estoque em excesso (ou em atraso) devido a economia de escala,

seleção do transportador para a entrega das matérias-primas em função dos seus custos e das capacidades de seus veículos, entre outras características.

A busca contínua pelos pedidos de compra ótimos entre diversos fornecedores com preços e prazos de entregas diversos, promove um *trade-off* que envolve decisões pela busca de produtos mais caros com o prazo de entrega menor e vice e versa. Este tipo de decisão é exemplificado pela Figura 2.

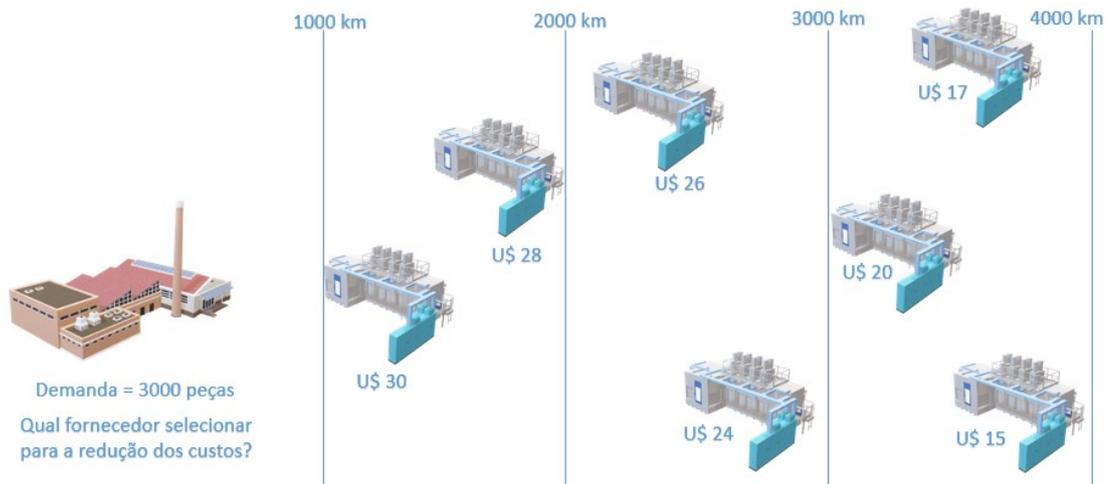


Figura 2 - O problema da Seleção de Fornecedores Intercontinentais.

Fonte: Autor (2019).

A Figura 2 apresenta uma situação hipotética onde uma determinada indústria possui a necessidade de 3.000 unidades de um determinado item e diversos fornecedores homologados dispersos pelo mundo. Os fornecedores mais próximos possuem um *lead time* de entrega menores e custos mais elevados. À medida que a distância vai aumentando, os preços dos fornecedores vão decaindo, porém o tempo de entrega vai aumentando. Então o *trade-off* consiste em fracionar esta demanda entre diversos fornecedores, buscando a minimização de todos os custos envolvidos na operação, cumprindo todos os prazos acordados com os clientes da organização compradora.

## 2.4 Modelos para o SSP determinístico

Vários autores propõem o uso de modelos de otimização para tratar o problema de seleção de fornecedores determinístico, usando Programação Inteira Mista (MIP, do inglês *Mixed Integer Programming*) e Programação Não-Linear Inteira Mista (MINLP, do inglês *Mixed Integer Non-linear Programming*). Nessas abordagens, existem variáveis que designam qual produto será comprado de qual fornecedor, que faixa de desconto será aplicada ao pedido de compra e o modal a ser utilizado.

Purohit et al. (2013) apresentam um modelo que incorpora o estoque de segurança em sua formulação, além da decisão sobre qual tamanho de lote de compra que será destinado ao fornecedor escolhido em um dado cenário. A proposta do trabalho é mitigar riscos de ruptura em função da variação na demanda. O modelo proposto é multi-períodos e mono-item, com dimensionamento de lotes de compra, considerando que a demanda é conhecida em todo o horizonte de planejamento. Os autores constataram que o problema é NP-completo e, em função disto, desenvolveram um Algoritmo Genético para a resolução de uma instância selecionada.

No trabalho de Ware et al. (2014) é abordado o SSP em um ambiente dinâmico em que está situada uma organização comercial, a qual deseja otimizar os seus custos nas suas decisões de aquisição de MP, maximizando o seu resultado operacional. Foi proposto um modelo de MILNP, que está inserido em um cenário multi-fornecedores, multi-item, multi-períodos e multi-objetivos. Também são considerados custos de transporte (fixos em todo o horizonte), nível de qualidade dos fornecedores, tempo médio de atraso na entrega dos fornecedores e a capacidade de fabricação dos fornecedores. Para a validação do modelo, foram gerados dados aleatórios para todos os parâmetros. Foram realizados diversos testes computacionais, por meio do *software* LINGO, em função do mesmo permitir a resolução de modelos não-lineares.

Já em Choudhary & Shankar (2013), os autores propõem um modelo MIP inserido em um cenário multi-fornecedores, multi-transportadores, mono-item, multi-períodos e multi-objetivos, onde também são considerados custos de transporte, nível de qualidade dos fornecedores, economia de escala (faixas de descontos), capacidade de produção dos fornecedores, local de armazenagem dos fornecedores e a capacidade dos veículos dos transportadores. O modelo é do tipo integrado, unindo três classes de problemas muito estudados na literatura: dimensionamento de lotes, modelo de transporte e controle de estoque. Uma análise de sensibilidade detalhada sobre o impacto

de cada parâmetro foi realizada e pôde-se constatar que é muito vantajoso otimizar as decisões simultaneamente, uma vez que estes tipos de decisões sofrem uma interdependência hierárquica. Essa otimização simultânea nestas decisões é benéfica pois economiza tempo e esforço computacional.

No trabalho de Cunha et al. (2018) é apresentado um modelo combinado de SSP e dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção em uma indústria química brasileira. No SSP são considerados diversos fornecedores com custos e taxas de descontos diferentes. No dimensionamento dos lotes são considerados diversos tamanhos de lotes em função dos locais de armazenamento, que no caso são tanques. Já na decisão de sequenciamento da produção são considerados operadores polivalentes, produtos com diversos roteiros, produtos com níveis de estrutura, restrições de *setup* e restrições de empacotamento. O objetivo do trabalho foi comparar duas formulações: uma onde todas as decisões eram tomadas simultaneamente e a outra onde as decisões eram tomadas sequencialmente. Diversos testes computacionais provaram que neste contexto, o modelo integrado obteve soluções melhores em todos os cenários analisados, alcançando uma redução de custos na ordem de 10 a 20% em média.

## 2.5 Modelos para o SSP sob incertezas

A Programação Estocástica é constituída por modelos matemáticos nos quais alguns parâmetros estão inertes às incertezas e, por isso, são substituídos por variáveis aleatórias restritas a uma distribuição de probabilidade conhecida. Neste contexto, os modelos de Programação Estocástica adquirem vantagem sob os modelos determinísticos, pois conseguem realizar um agrupamento de cenários sujeitos a incertezas, calculando a melhor transição de estado possível para a variável aleatória dada a sua probabilidade de ocorrência associada (ARENALES et al., 2007).

No trabalho de Coronado (2007) é desenvolvido um modelo não-linear de programação estocástica, que aborda o mercado de distribuidores de combustível fóssil para veículos automotivos. Este trabalho foi realizado junto a uma empresa buscando uma inovação tecnológica em sua cadeia de fornecimento. No primeiro estágio deste modelo, são consideradas decisões do nível de estoque, considerando estoque de segurança, em função da incerteza de fornecimento, buscando minimizar o custo total esperado em toda a cadeia de suprimentos. A autora utilizou o método de Monte Carlo

para a geração dos cenários e um procedimento de *Sample Average Approximation* (SAA) para resolver as instâncias próximas à otimalidade. Para evoluir as resoluções, foi proposta uma heurística que contorna o problema da não linearidade das variáveis de primeiro e segundo níveis. O principal achado deste trabalho foi a extensa análise desenvolvida do impacto das rupturas causadas pelo fornecimento de MP sujeitas a incertezas em um ambiente estocástico e de como as decisões de SSP, dividindo a demanda entre diversos fornecedores, podem ser estratégicas para contornar este problema.

Purohit et al. (2016) propõem um modelo de dimensionamento de lotes combinado com seleção de fornecedores com demanda dinâmica e estocástica. Este modelo também considera decisões de economia de escala, nível de estoque, níveis de serviço e seleções sucessivas do mesmo fornecedor em um horizonte de planejamento. A última decisão mencionada é mais crítica na percepção dos autores, uma vez que a incerteza neste trabalho está direcionada nas demandas futuras do horizonte do planejamento. Uma heurística foi criada para o cálculo de todos os parâmetros de primeiro estágio, considerando a demanda estocástica. Foram realizados diversos testes computacionais, utilizando a análise de sensibilidade para o conhecimento do comportamento e impacto na variação dos parâmetros no modelo. O principal achado do trabalho foi a compreensão de como a variação da demanda pode influenciar na seleção dos fornecedores por meio da lei da oferta e procura. Quando há muita disponibilidade de oferta no mercado, a concorrência se torna mais acirrada e os fornecedores acabam oferecendo taxas de descontos mais atrativas. Isso direciona as decisões do modelo para a compra de lotes menores, otimizando o fluxo de caixa da organização.

Já em Sawik (2014) foi proposto um modelo coordenado de seleção de fornecedores em função da programação de entrega dos pedidos em carteira, na presença de riscos de ruptura na cadeia de suprimentos. Este estudo avaliou as vantagens do fornecimento por meio de estratégias de escolha de somente um fornecedor ou diversos, para o mesmo lote de compra, visando atender o sequenciamento das entregas dos pedidos em carteira ao longo do horizonte de planejamento. Uma característica muito interessante deste trabalho foi que ele considerou os fornecedores dispersos ao longo de diferentes localizações geográficas pelo mundo. Com isso, o autor teve que considerar as variáveis aleatórias de ruptura regionais para um dado fornecedor e variáveis aleatórias globais quando era considerado um conjunto de fornecedores. Neste trabalho também foi considerado que os fornecedores locais, semi-locais e globais estavam

sujeitos a desastres naturais que podem afetar o seu nível de serviço. Para mensurar estes riscos, foram utilizadas as seguintes medidas de controle: *Condition Value-at-Risk* (CVAR) e *Risk Measure* (RM). O principal resultado deste trabalho foi observar que quando o nível de serviço é baixo, a estratégia de escolha de diversos fornecedores dispersos pelo mundo é mais favorável para a mitigação de riscos, uma vez que a probabilidade de ocorrer vários desastres naturais simultaneamente é muito baixa. Quando o nível de serviço é elevado, o modelo busca selecionar os fornecedores locais, para minimizar o risco.

O trabalho de Curcio (2017) apresenta um modelo estocástico de dois estágios combinado, envolvendo decisões de dimensionamento de lotes, programação da produção e SSP. O trabalho é modelado sob a ótica de uma fábrica de alimentos que deseja obter diversas MP como leite, laranjas, tomates, entre outros. Como estas MP são perecíveis e possuem um prazo de validade curto, esta decisão se torna mais crítica neste cenário. A decisão de SSP está no primeiro estágio do modelo. A decisão consiste na escolha entre comprar no mercado local, podendo selecionar apenas um fornecedor com uma pequena infraestrutura que poderá afetar o fornecimento, ou comprar no mercado externo podendo ser penalizado pela volatilidade de prazo de entrega do mercado internacional. Quando a segunda opção é selecionada, a demanda poderá ser dividida entre dois fornecedores, para evitar rupturas. São consideradas cinco fontes de incerteza: demanda, capacidade de fornecimento, disponibilidade de fornecimento, *lead time* de entrega e custo alvo. Como o modelo se tornou muito difícil de ser resolvido, foram propostas algumas estratégias para resolver o modelo próximo à otimalidade como decomposição de Benders moderna e a decomposição de Benders clássica. As técnicas de decomposição se mostraram eficientes na aceleração da resolução do modelo e o trabalho pôde provar que quando as decisões são tomadas em conjunto é possível obter um ganho de redução de custo muito significativo em toda a cadeia produtiva.

## 2.6 Outras abordagens para o SSP

Outros métodos frequentemente empregados para tratar o problema estudado são heurísticas. O principal objetivo das heurísticas é o fornecimento relativamente rápido de soluções boas e factíveis, nem sempre ótimas, para os problemas de otimização.

Este conjunto de técnicas foi empregado por Rabbani et al. (2014); Aouadni & Rebai (2013); Cao et al. (2013); Cao et al. (2012) através de Algoritmos Genéticos para apoiar métodos de decisão para o SSP. Outra conhecida técnica heurística é a Busca Tabu, encontrada nos trabalhos de Guo et al. (2016) e Wang; Zhong (2010).

Já os trabalhos de Dweiri et al. (2016); Yadav & Sharma (2015, 2016) empregaram a técnica *Analytical Hierarchy Process (AHP)* para a seleção de fornecedores nas cadeias automotivas. O método de Pareto foi empregado no trabalho de Konur; Cambell; Monfared (2017) para a seleção de fornecedores de segunda ordem a partir de um varejista. Uma variação do método VIKOR com variáveis linguísticas foi empregado por You et al. (2015). E, por fim, o método de Newton foi adaptado por Yang et al. (2007) para abordar o problema de demanda e de parceiros de terceirização.

## 2.7 Considerações finais sobre o capítulo

O presente capítulo inicialmente apresentou uma visão geral a respeito do GS, bem como a visão do QRM sobre esse assunto. Disso, basicamente conclui-se que existem as seguintes classes de custos: custos estáticos, custos dinâmicos e custos escondidos.

Porém a literatura específica sobre GS no nível qualitativo somente aborda tais questões de forma superficial. Por exemplo, Suri (2010) afirma que é necessário avaliar o verdadeiro custo de um fornecedor com *lead time* longo para a redução do tempo de atravessamento pela cadeia, ao longo de sua extensão completa, passando de clientes à fornecedores de primeiros, segundos, terceiros, entre outros, níveis. Holweg et al. (2011) discute a respeito dos custos escondidos concluindo que apesar destes custos serem difíceis de serem estimados e apropriados aos serviços e produtos, estes custos exercem um impacto muito significativo em todo desempenho operacional da cadeia.

Estas pesquisas apontam pontos críticos para o sucesso na operação de SSP, porém, nenhuma das pesquisas promove *insights* para a aplicação prática dos conceitos, permanecendo predominante no âmbito qualitativo, possuindo pouca abrangência no cenário quantitativo. Por outro lado, existem diversas pesquisas dentro do âmbito do campo da Pesquisa Operacional que vem tangenciando tal questão no âmbito quantitativo, com objetivo de auxiliar nas tomadas de decisão em ambientes complexos. O SSP é um problema bastante relacionado a esse assunto. Dentro desse problema, a literatura evoluiu primeiramente propondo dois modelos de Programação Linear

Inteira Mista, após isso, surgiram os modelos de Programação Estocástica e, por fim, surgiram outros métodos com *Fuzzy*, Heurísticas e outras abordagens. As abordagens utilizadas para abordar o SSP utilizadas na revisão da literatura deste trabalho, são apresentadas de forma resumida pelo Quadro 4 em ordem cronológica.

É exatamente tentando conectar ambos os campos do saber que o presente trabalho se encaixa, desenvolvendo modelos de OR para apoiar a decisão de SSP em um ambiente sujeito a incertezas como custos e *lead time*. Desta forma, a presente pesquisa contribui duplamente para o estado-da-arte.

Quadro 4 - Abordagens utilizadas no SSP

Autores	Abordagens utilizadas				
	Mixed integer linear programming	Stochastic programming	Linear Programming	Heuristics	Mixed integer nonlinear programming
Coronado (2007)		.		.	
Yang et al. (2007)		.		.	.
Wang & Zhong (2010)				.	
Cao et al. (2012)				.	.
Cao et al. (2013)				.	
Choudhary & Shankar (2013)	.				
Aouadni & Rebai (2013)	.			.	
Purohit et al. (2013)					
Rabbani et al. (2014)	.		.	.	
Sawik (2014)	.	.			
Ware et al. (2014)					.
Guo et al. (2016)		.		.	
Yadav & Sharma (2015)				.	
You et al. (2015)				.	
Dweiri et al. (2016)				.	
Konur; Cambell; Monfared (2017)					.
Purohit et al. (2016)		.	.		
Yadav & Sharma (2016)				.	
Curcio (2017)		.			
Cunha et al. (2018)	.				

### 3. Modelagem Matemática

Este capítulo apresenta alguns modelos de otimização para o SSP, os quais são adequados para a aplicação da técnica de OR. O capítulo está dividido em duas partes: na primeira parte é apresentado o modelo de Seleção de Fornecedores com Controle de Demanda e, na segunda parte, é apresentada uma extensão desse modelo que inclui também o controle de estoque de MP. Todos os modelos são de Programação Linear Inteira Mista (MIP).

#### 3.1 Modelo SSDC

O modelo de Seleção de Fornecedores com Controle de Demanda (SSDC, do inglês *Supplier Selection with Demand Control*) é uma adaptação realizada neste trabalho, baseando-se no modelo de Ware et al. (2014) que é apresentado no Apêndice A. O SSDC está definido em um cenário multi-fornecedores, multi-itens e multi-períodos, cuja função objetivo consiste em custos de aquisição, custos de transporte, nível de qualidade dos fornecedores e o tempo médio estimado de atraso na entrega dos fornecedores (baseado no histórico). Para a definição deste modelo, considere os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão:

##### Conjuntos

- T Conjunto de períodos;
- S Conjunto de fornecedores;
- P Conjunto de produtos;

##### Parâmetros

- $cc_{tsp}$  Custo unitário de compra do produto  $p$  no fornecedor  $s$  e período  $t$ ;
- $ct_{ts}$  Custo unitário de transporte de um produto, vindo do fornecedor  $s$  no período  $t$ ;
- $G_{tsp}$  Capacidade do fornecedor  $s$  para fornecer o produto  $p$  no período  $t$ ;
- $d_{tp}$  Demanda do produto  $p$  no período  $t$ ;
- $q_{tsp}$  Custo unitário operacional do fornecedor  $s$  para o produto  $p$  no período  $t$ ;

- $l_{tsp}$  Custo unitário de atraso do fornecedor  $s$  para o produto  $p$  no período  $t$ ;  
 $dl_{tsp}$  Tempo estimado de atraso de entrega do fornecedor  $s$  para o produto  $p$  no período  $t$ ;  
 $M$  Número suficientemente grande, definido pela demanda acumulada;  
 $\theta$  Nível de serviço exigido pela organização.

Variáveis

- $X_{tsp}$  Quantidade do produto  $p$  obtida no fornecedor  $s$ , no período  $t$ ;  
 $Y_{ts}$  Variável binária igual a 1 se, e somente se, o fornecedor  $s$  é utilizado no período  $t$ ;

A partir dessas definições, o modelo SSDC é dado por:

$$\begin{aligned} \min \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} cc_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} ct_{ts} Y_{ts} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} (1 - \theta) q_{tsp} X_{tsp} \\ + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} l_{tsp} dl_{tsp} X_{tsp} \end{aligned} \quad (3.1)$$

s. a

$$X_{tsp} \leq C_{tsp} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S, \quad \forall p \in P \quad (3.2)$$

$$\sum_{s \in S} X_{tsp} \geq d_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.3)$$

$$\sum_{p \in P} X_{tsp} \leq MY_{ts} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (3.4)$$

$$Y_{ts} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (3.5)$$

$$X_{tsp} \geq 0 \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S, \quad \forall p \in P. \quad (3.6)$$

A função objetivo (3.1) consiste em minimizar o custo total do sistema, dado pelo custo de compras dos produtos, custo de transporte para todos os fornecedores, custo operacional em realizar uma compra com qualquer fornecedor mediante um nível de serviço imposto e custo de atraso na entrega do produto de qualquer fornecedor. As restrições (3.2) impõem a capacidade de cada fornecedor para cada produto. As restrições (3.3) asseguram que a aquisição de cada produto irá atender a sua respectiva demanda em cada período. As restrições (3.4) garantem que poderá haver uma compra

de um dado fornecedor  $s$ , apenas se esse fornecedor for selecionado no período  $t$ . De fato, se o fornecedor  $s$  for selecionado no período  $t$ , então  $Y_{ts}$  deverá assumir o valor 1; caso contrário, assumirá o valor 0. O conjunto de restrições (3.5) e (3.6) impõem o domínio das variáveis do problema.

O parâmetro  $q_{tsp}$  é composto por custos escondidos como variações de câmbio, aumento nos combustíveis envolvidos na cadeia (petróleo, gás e taxa de emissão de carbono), custos com viagens não programadas para prospecção e pós-venda, risco de perda de capital intelectual e o custo estático de manter escritórios e agências locais, nos mercados fornecedores, para manter contato e negociar com os fornecedores dispersos pelo globo. Já o parâmetro  $l_{tsp}$  é composto por custos de perda distribuídos pelas três classes de custos, apropriando os valores de custos de obsolescência devido a alterações de projeto não alinhadas com o *lead time* de entrega e custo de vendas perdidas em função de prazos não respeitados e problemas de qualidade. Como estes dois parâmetros são voláteis e altamente influenciáveis por diversas variáveis atuantes na cadeia logística, se tornam complexas as atividades de estimação e apropriação correta destes valores nos produtos ou serviços. Então o terceiro termo da função objetivo:

$$\sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} (1 - \theta) q_{tsp} X_{tsp}$$

representa o custo operacional por aquela operação, restrito a um nível de serviço imposto pela organização compradora. E o quarto termo da função objetivo:

$$\sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} l_{tsp} dl_{tsp} X_{tsp}$$

representa o custo que a organização compradora terá de arcar se algum fornecedor atrasar a entrega das MPs no prazo acordado, sob o risco de perdas de vendas em função deste atraso.

Para se obter o modelo (3.1) -(3.6) foi primeiramente proposta uma linearização do modelo de Ware et al. (2014), para que fosse possível a resolução do modelo através de *softwares* de propósito geral como GAMS/CPLEX. Também foi realizada uma eliminação de um conjunto de restrições envolvendo os níveis de qualidade dos fornecedores e da organização que está realizando as compras. A restrição impõe que no processo de seleção sejam apenas considerados fornecedores que fornecem os produtos ao nível mínimo de qualidade estabelecido pela organização. Esta restrição ( $\theta_{tsp} \geq$

$\theta_0 \forall t \in T, \forall s \in S, \forall p \in P$ ) é composta somente por parâmetros ( $\theta_{tsp}$  - nível de serviço do produto  $p$ , fornecido pelo fornecedor  $s$  no período  $t$ ;  $\theta_0$ - nível de serviço exigido pela organização) e, no estudo realizado neste trabalho de pesquisa, foi considerado que este conjunto de restrições pode ser tratado como um pré-processamento. Observe que o modelo proposto pode ser decomponível em  $t$  períodos, uma vez que não existe nenhuma restrição que realiza o acoplamento entre os períodos.

### 3.2 Modelo SSDSC

Visando uma proposta de aperfeiçoamento do modelo SSDC, tornando-o mais próximo da realidade, propõem-se neste trabalho incorporar o controle de estoque dos produtos obtidos dos fornecedores (MPs), permitindo atender a demanda de um dado período, por meio de produtos obtidos em períodos anteriores. Com isso, foi proposto o modelo de Seleção de Fornecedores com Controle de Demanda e Estoque (SSDSC do inglês *Supplier Selection with Demand and Stock Control*).

Para adicionar o controle de estoque, foi necessário criar dois novos parâmetros  $h_{tp}^+$  e  $h_{tp}^-$  para apreciar os níveis de estoque e duas variáveis de decisão inteiras positivas,  $I_{tp}^+$  e  $I_{tp}^-$ , que indicam o nível de estoque. O parâmetro  $h_{tp}^+$  representa o custo unitário de manter em estoque o produto  $p$  no período  $t$ , enquanto o parâmetro  $h_{tp}^-$  representa o custo unitário para atrasar a entrega do produto  $p$  no período  $t$ . A variável  $I_{tp}^+$  representa a quantidade de produtos  $p$  em estoque no período  $t$ , enquanto a variável  $I_{tp}^-$  representa a quantidade de produtos  $p$  em atraso no período  $t$ . Com isso, pode-se adicionar os custos de estoque na função objetivo, por meio das parcelas, a seguir:

$$\sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^+ I_{tp}^+ + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^- I_{tp}^- \quad (3.7)$$

Além disso, é necessário criar as restrições de balanceamento de estoque a seguir, as quais são usadas para substituir as restrições (3.3):

$$\sum_{s \in S} X_{tsp} + I_{t-1,p}^+ - I_{tp}^+ + I_{tp}^- - I_{t-1,p}^- = d_{tp} \quad \forall t \in T, \forall p \in P. \quad (3.8)$$

Para controlar os níveis de estoque foi necessário criar mais dois conjuntos de restrições. Nas restrições (3.9), que regulam o tamanho do estoque em mãos, foi

necessário criar um parâmetro  $w_{tp}$  que indica o tamanho físico destinado para a armazenagem do produto  $p$  no período  $t$ :

$$I_{tp}^+ \leq w_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P. \quad (3.9)$$

No segundo conjunto de restrições foi necessário utilizar o parâmetro  $\Phi$  que é estipulado pela organização compradora com o objetivo de regular o nível de estoque em atraso. A criação deste conjunto de restrições se fez necessária para que fosse estipulada a seguinte restrição: “a decisão sobre atrasar o estoque pode ocorrer, contanto que ela não afete o nível de serviço exigido pela organização.” Após esta definição, o conjunto de restrições foi modelado da seguinte forma:

$$I_{tp}^- \leq \Phi d_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P. \quad (3.10)$$

Analisando o conjunto de restrições (3.10) se pode observar que se em um determinado período  $t$ , o valor da demanda para algum produto  $p$  for nulo, não se poderá carregar estoque em atraso (*backlog*). Esta premissa foi adotada seguindo a abordagem da filosofia QRM e foi tratada cuidadosamente nos testes computacionais da Seção 5, de modo a, não se ter nenhum período sem demanda para nenhum produto. Então, se o pesquisador que estiver utilizando este trabalho como base tiver um exemplar com esta característica específica, recomenda-se alterar o parâmetro demanda ( $d_{tp}$ ) por um parâmetro que incorpore a demanda máxima dos produtos ( $\max_p d_{tp}$ ).

Com tudo isso definido, o modelo de Seleção de Fornecedores com Controle de Demanda e Estoque (SSDSC) pode ser representado por:

$$\begin{aligned} \min \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} cc_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} ct_{ts} Y_{ts} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} (1 - \theta) q_{tsp} X_{tsp} \\ + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} l_{tsp} dl_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^+ I_{tp}^+ + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^- I_{tp}^- \end{aligned} \quad (3.11)$$

s. a

$$\sum_{s \in S} X_{tsp} + I_{t-1,p}^+ - I_{tp}^+ + I_{tp}^- - I_{t-1,p}^- = d_{tp} \quad \forall t \in T, \forall p \in P \quad (3.8)$$

$$I_{tp}^+ \leq w_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.9)$$

$$I_{tp}^- \leq \Phi d_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.10)$$

$$I_{tp}^- \geq 0 \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.12)$$

$$I_{tp}^+ \geq 0 \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.13)$$

restrições (3.2), (3.4) – (3.6)

O quarto  $\left( \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} l_{tsp} dl_{tsp} X_{tsp} \right)$  e sexto  $\left( \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^- I_{tp}^- \right)$  termos da função ob-

jetivo estão relacionados aos custos de atraso, porém existem algumas considerações a respeito da atuação de cada termo. A divergência entre ambos é que o custo  $h_{tp}^-$  é ativo quando a organização compradora opta por atrasar algum(s) pedido(s) para obter vantagem econômica com fretes, desembaraços aduaneiros, duplicatas, entre outros. Já o custo  $l_{tsp}$  foge do poder de decisão da organização compradora, pois se encontra ativo quando um pedido é realizado e acordado para atender a data de entrega do(s) cliente(s) porém o(s) fornecedor(es) atrasa(m) a entrega dos produtos por algum motivo como quebra de máquinas, falha de planejamento, falta de MP, entre outros.

Observe que o modelo SSDC é um caso especial do modelo SSDSC. Este caso ocorre quando os níveis de estoque em mãos e em atraso não são permitidos.

### 3.3 Considerações finais sobre o capítulo

Neste capítulo, foi apresentada a construção de modelos de Programação Linear Inteira Mista (MIP), onde o primeiro modelo (SSDC) é uma proposta de linearização do modelo apresentado por Ware et al. (2014) e o segundo modelo é uma extensão do primeiro. Na extensão, foram inseridas novas restrições de controle de estoque, limitações físicas de armazenagem e nível de atraso máximo da demanda. Essas novas restrições foram criadas para aproximar a modelagem ao ambiente real, onde diversas organizações ao redor do mundo estão inseridas.

## 4. Modelos de Seleção de Fornecedores via Otimização Robusta

A OR é atribuída à Soyster em 1973 devido ao seu trabalho *Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming* que propôs o uso de soluções ótimas que permaneçam factíveis, mesmo quando alguns parâmetros que estão inerentes às incertezas atinjam seu pior caso. Para isso, esta abordagem restringe os parâmetros incertos a um conjunto restrito e limitado, conhecido como *conjunto de incertezas*. Na abordagem aqui tratada, considera-se que este conjunto é limitado por um parâmetro, conhecido como *budget* de incerteza, que é utilizado para determinar o nível de incerteza e o risco que o tomador de decisão deseja assumir. Este parâmetro pode variar de zero até o número de componentes sujeitas à incerteza, onde zero representa a solução nominal do modelo (sem nenhuma proteção contra incerteza) e o valor máximo representa o pior caso, onde o modelo está munido de proteção máxima contra as incertezas dos dados, promovendo uma aversão total ao risco. Com isso, a abordagem garante que solução permaneça imune aos riscos, em qualquer realização dos dados incertos, dentro do conjunto de incertezas, em detrimento à piora do valor da função objetivo (BERTSIMAS; SIM, 2004).

Neste contexto, a OR se baseia em uma análise de *pior caso*, buscando sempre a melhor solução possível, assumindo que a natureza dos dados de entrada se comportará da pior maneira possível (ALEM; MORABITO, 2012). O termo “Otimização Robusta” foi apresentado pela primeira vez no trabalho de Mulvey et al. (1995) onde os autores buscaram definir um novo conceito para uma nova técnica de Otimização por Metas com incerteza nos dados de entrada. A partir deste trabalho, houve uma enorme evolução da abordagem na literatura, cabendo destacar os trabalhos de El-Ghaoui et al. (1997, 1998), Ben-Tal e Nemirovski (1998, 1999, 2000), Bertsimas e Sim (2003, 2004), Bertsimas e Thiele (2006), entre outros.

### 4.1 Fundamentos de Otimização Robusta

Considere um modelo de programação linear escrito na seguinte forma geral:

$$\min c^T x \quad (4.1)$$

s. a

$$Ax \leq b \quad (4.2)$$

$$l \leq x \leq u \quad (4.3)$$

Considere que a matriz  $\mathbf{A}$  possui incerteza em seus dados de entrada. Com esta consideração, pode-se definir um conjunto  $J_i$  formado pelo índice de coeficientes sujeitos à incerteza na  $i$ -ésima linha da matriz de recursos  $\mathbf{A}$ . Pode-se modelar estes coeficientes incertos como variáveis aleatórias independentes, simétricas e limitadas do tipo  $\tilde{a}_{ij}$ . Cada variável pertence ao intervalo fechado  $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ , centrado no valor nominal  $a_{ij}$ . Selecionando um dado incerto da matriz recursos  $\mathbf{A}$ , pode-se conhecer o seu comportamento através do seu desvio em relação ao valor nominal, modelando-o por meio de uma variável aleatória:

$$\zeta_j = \frac{(\tilde{a}_{ij} - a_{ij})}{\hat{a}_{ij}}, \quad (4.4)$$

tal que:  $\zeta_j \in [-1, 1]$ .

Atualmente, a OR possui diversas abordagens que se diferenciam entre si de acordo com a representação do conjunto incerto, sendo as mais usadas: representação do tipo caixa (SOYSTER, 1973), representação do tipo elipsoidal (BEN-TAL; NEMIROVSKI, 2000) e a representação do tipo poliédrica (BERTSIMAS; SIM, 2004).

#### 4.1.1 Abordagem de Soyster

A abordagem de Soyster (1973) estabelece um conjunto fechado de incerteza do tipo:

$$U = \{\zeta \mid \|\zeta\|_\infty \leq 1\} = \{\zeta \mid |\zeta_j| \leq 1, \forall j \in J_i\} \quad (4.5)$$

Considerando que o modelo (4.1) -(4.3) possui os dados da matriz  $\mathbf{A}$  sujeitos à incerteza, pode-se considerar que as restrições podem ser modeladas como um conjunto de variáveis aleatórias ( $\zeta_j$ ). Para prover a proteção máxima, a representação do pior caso nesta abordagem é quando os parâmetros incertos atingem o seu desvio máximo:

$$\max_{\zeta \in U} \left\{ \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j \zeta_j : |\zeta_j| \leq 1, \forall j \in J_i \right\} = \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j. \quad (4.6)$$

Este tipo de proteção é denominada como representação do tipo caixa, pois considera que todos os parâmetros incertos atingem o seu pior caso simultaneamente conforme apresenta a Figura 3.

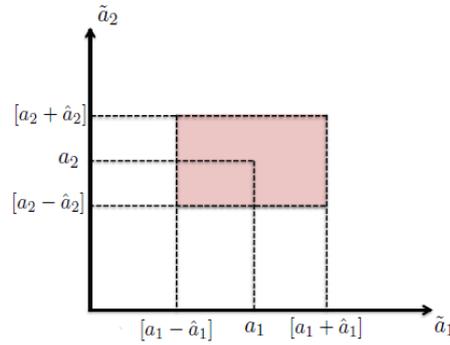


Figura 3 - Representação geométrica da abordagem de Soyster.

Fonte: Oliveira (2013).

Fazendo a substituição das restrições (4.6) nas restrições (4.2) do modelo (4.1)-(4.3), pode-se prover imunidade às restrições de capacidade contra as incertezas:

$$\sum_{j \in J} a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j \leq b_i \quad \forall i. \quad (4.7)$$

Estas novas restrições são denominadas **Contraparte Robusta**, onde o primeiro termo representa os valores nominais e o segundo a proteção contra os valores incertos.

Com isso, pode-se definir a abordagem de Soyster através do modelo (4.8):

$$\begin{aligned} & \min c^T x \\ & \text{s. a} \\ & \sum_j a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j \leq b_i \quad \forall i \\ & l \leq x \leq u. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Por considerar que todos os parâmetros incertos irão para o pior caso simultaneamente, a abordagem de Soyster é considerada muito conservadora. Por esta razão, o valor da função objetivo é muito deteriorado em detrimento da robustez. Uma solução ótima deste modelo permanece factível para qualquer realização possível das variáveis aleatórias. Com isso, a solução se torna muito cara. Para superar esta desvantagem, no ano 2000, Ben-Tal e Nemirovski, propuseram uma formulação alternativa que é muito utilizada até hoje.

#### 4.1.2 Abordagem de Ben-Tal e Nemirovski

A abordagem de Ben-Tal e Nemirovski (2000) estabelece um conjunto fechado de incerteza do tipo:

$$U = \{\zeta \mid \|\zeta\|_2 \leq \Omega\} = \left\{ \zeta \mid \sum_{j \in J_i} \zeta_j^2 \leq \Omega^2 \right\} \quad (4.9)$$

Retornando ao modelo (4.1) -(4.3), mantendo a premissa que os dados da matriz  $\mathbf{A}$  continuam sujeitos à incerteza, pode-se considerar que as restrições podem ser modeladas como um conjunto de variáveis aleatórias ( $\zeta_j$ ). Para prover a proteção máxima, a representação do pior caso nesta abordagem é quando os parâmetros incertos atingem o seu desvio máximo:

$$\begin{aligned} & \max_{\zeta \in U} \left\{ \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j \zeta_j : \sum_{j \in J_i} \zeta_j^2 \leq \Omega^2 \right\} \\ &= \max_{\zeta \in U} \left\{ \sqrt{\left( \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j \zeta_j \right)^2} : \sum_{j \in J_i} \zeta_j^2 \leq \Omega^2 \right\} \\ &= \max_{\zeta \in U} \left\{ \sqrt{\left( \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j \right)^2 \left( \sum_{j \in J_i} \zeta_j \right)^2} : \sum_{j \in J_i} \zeta_j^2 \leq \Omega^2 \right\} \\ &= \Omega \left\{ \sqrt{\sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij}^2 x_j^2} \right\} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Este tipo de proteção é denominado como representação do tipo elipsoidal, pois considera que nem todos os parâmetros incertos atingem seu pior caso simultaneamente, pois a probabilidade da ocorrência deste cenário muito baixa. Então a abordagem permite que o nível de conservadorismo possa ser controlado através do parâmetro  $\Omega$  que determina o diâmetro do elipsoide (OLIVEIRA, 2013), conforme representado pelas Figuras 3 e 4.

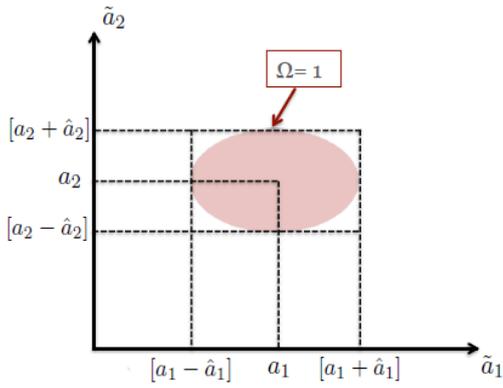


Figura 4 - Representação geométrica da abordagem de Ben-Tal e Nemirovski com  $\Omega = 1$ .

Fonte: Oliveira (2013).

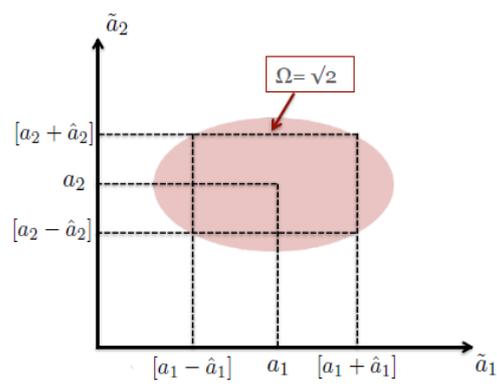


Figura 5 - Representação geométrica da abordagem de Ben-Tal e Nemirovski com  $\Omega = \sqrt{2}$ .

Fonte: Oliveira (2013).

Substituindo as restrições (4.10) nas restrições (4.2) do modelo (4.1) -(4.3), pode-se prover imunidade às restrições contra as incertezas, criando a contraparte robusta da abordagem:

$$\sum_{j \in J} a_{ij}x_j + \Omega \sqrt{\sum_{j \in J_i} a_{ij}^2 x_j^2} \leq b_i \quad \forall i. \quad (4.11)$$

Com isso, pode-se definir a abordagem de Ben-Tal e Nemirovski por meio do modelo (4.12):

$$\begin{aligned} & \min c^T x \\ & \text{s. a} \\ & \sum_{j \in J} a_{ij}x_j + \Omega \sqrt{\sum_{j \in J_i} a_{ij}^2 x_j^2} \leq b_i \quad \forall i \\ & l \leq x_j \leq u. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Esta abordagem tem vantagem sobre a abordagem de Soyster, uma vez que a solução não se deteriora ao extremo com os valores de todos os parâmetros incertos indo para o pior caso. Porém esta abordagem aumenta a complexidade de resolução dos modelos por possuir uma desigualdade quadrática, podendo não tornar possível a resolução de certos modelos em um tempo computacional aceitável. Para superar esta dificuldade, no ano de 2004 os autores Bertsimas e Sim propuseram uma nova

abordagem que é a mais utilizada atualmente na literatura, pela sua simplicidade na implementação e por não aumentar a complexidade computacional.

### 4.1.3 Abordagem de Bertsimas e Sim

A abordagem de Bertsimas e Sim, estabelece um conjunto fechado de incerteza do tipo:

$$U = \{ \zeta \mid \|\zeta\|_1 \leq \Gamma \} = \left\{ \zeta \mid \sum_{j \in J_i} \zeta_j \leq \Gamma_i \right\} \quad (4.13)$$

A abordagem prega que a probabilidade de todos os parâmetros irem para o pior caso simultaneamente é muito baixa. Então os autores propuseram um número máximo de variáveis aleatórias que vão para o pior caso. Este parâmetro ficou conhecido como *budget de incerteza*, representado por  $\Gamma_i$ . Este parâmetro limita todos os elementos incertos da matriz de recursos incertos  $\mathbf{A}$ , variando em um intervalo fechado  $[0, |J_i|]$ . Este tipo de proteção é denominado como representação do tipo poliédrica ou do tipo guarda-chuva, pois este método garante que sempre serão considerados os  $\Gamma_i$  que mais causam detrimento na função objetivo (OLIVEIRA, 2013). A representação geométrica do método é apresentada pelas Figuras 5 e 6.

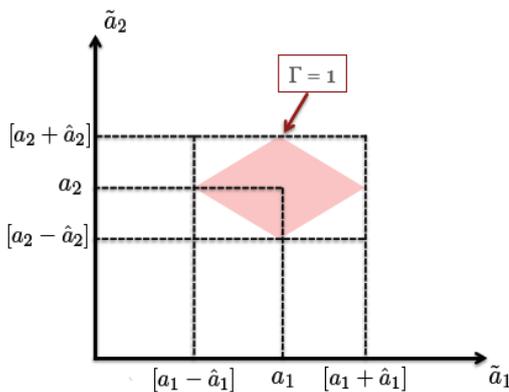


Figura 6 - Representação Geométrica da abordagem de Bertsimas e Sim com  $\Gamma = 1$ .

Fonte: Oliveira (2013).

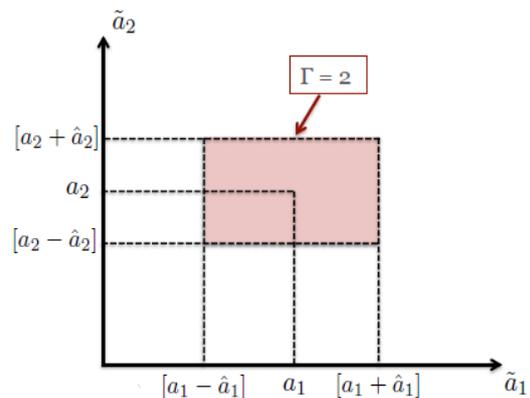


Figura 7- Representação Geométrica da abordagem de Bertsimas e Sim com  $\Gamma = 2$ .

Fonte: Oliveira (2013).

Considerando novamente que a matriz  $\mathbf{A}$  do modelo (4.1) -(4.3), possui dados sujeitos à incerteza, pode-se considerar que as restrições podem ser modeladas como um conjunto de variáveis aleatórias ( $\zeta_j$ ). Para prover a proteção máxima, a representação do pior caso nesta abordagem é obtida quando os parâmetros incertos atingem o seu desvio máximo:

$$\max_{\zeta} \left\{ \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j \zeta_j : |\zeta_j| \leq \Gamma_i, \forall j \in J_i \right\} \quad (4.14)$$

Assim, a abordagem de Bertsimas e Sim resulta no seguinte modelo:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{j \in J} c_j x_j \\ & \text{s. a} \\ & \sum_{j \in J} a_{ij} x_j + \max_{\zeta \in U} \left\{ \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} x_j \zeta_j \right\} \leq b_i, \forall i \\ & l \leq x \leq u \end{aligned} \quad (4.15)$$

A princípio, esse modelo não apresenta fácil resolução através de *softwares* de propósito geral como GAMS/CPLEX, pois é um modelo não-linear. Essa não linearidade se dá pelo produto de variáveis  $x_j \zeta_j$  e a dificuldade na resolução se agrava pela maximização interna apresentados em (4.15). Para tratar estas dificuldades, a abordagem de Bertsimas e Sim se baseou no conceito de dualidade. Pelo teorema da dualidade forte, como o modelo (4.14) é factível e limitado, o mesmo possui um problema dual com mesmo valor ótimo. Seja a função de proteção  $\beta_i(x^*, \Gamma_i)$ , definida por:

$$\beta_i(x^*, \Gamma_i) = \max_{\zeta} \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j^*| \zeta_j \quad (4.16)$$

s. a

$$\sum_{j \in J_i} \zeta_j \leq \Gamma_i \quad (4.17)$$

$$0 \leq \zeta_j \leq 1, \quad \forall j \in J_i. \quad (4.18)$$

Considere as variáveis duais  $\lambda_i$  e  $\mu_{ij}$  relacionadas respectivamente ao conjunto de restrições (4.17) e (4.18). Com isso, podemos encontrar o modelo dual de (4.16) - (4.18), apresentado pelo modelo (4.19).

$$\beta_i(x^*, \Gamma_i) = \min_{\lambda, \mu} \Gamma_i \lambda_i + \sum_{j \in J_i} \mu_{ij}$$

s. a

$$\lambda_i + \mu_{ij} \geq \hat{a}_{ij} |x_j^*|, \quad \forall j \in J_i \quad (4.19)$$

$$\lambda_i \geq 0$$

$$\mu_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in J_i.$$

Como modelo dual equivalente é linear (4.19), pode-se substituir o mesmo no modelo (4.15), obtendo a sua contraparte robusta (4.20):

$$\min \sum_{j \in J} c_j x_j$$

s. a

$$\sum_{j \in J} a_{ij} x_j + \Gamma_i \lambda_i + \sum_{j \in J_i} \mu_{ij} \leq b_i, \quad \forall i \quad (4.20)$$

$$\lambda_i + \mu_{ij} \geq \hat{a}_{ij} x_j, \quad \forall i, \forall j \in J_i$$

$$l \leq x_j \leq u$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad \forall i$$

$$\mu_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in J_i.$$

O sucesso da abordagem ocorre pela facilidade da incorporação de incertezas aos modelos em ambientes contínuos ou discretos, pois a contraparte robusta pertence à mesma classe de complexidade do modelo nominal. Embora o tamanho do modelo cresça com o número de incertezas associadas, não é esperado que a contraparte robusta seja significativamente mais custosa de se resolver do que a resolução do problema nominal.

Para tratar a situação em que o modelo (4.20) pode conter fontes de incertezas em seus custos na função objetivo, Bertsimas e Sim (2003) propuseram uma nova formulação do mesmo modelo para tratar este caso especial, utilizando a abordagem de programação por metas, onde a função objetivo com custos incertos entra como uma restrição e a nova função objetivo fica composta por um valor de meta que não deve ser violado. Por estas razões apresentadas, neste trabalho optou-se por adotar esta abordagem para a proposição de modelos robustos para o problema de seleção de fornecedores. Diversos trabalhos da literatura demonstram a eficiência da abordagem. Alguns

exemplos podem ser encontrados em: Bertsimas e Thiele (2006); Alem e Morabito (2013); Munhoz e Morabito (2013); Paiva e Morabito (2014); Righetto, Morabito e Alem (2016); Rocco e Morabito (2016); Martins de Sá, Morabito e De Camargo (2018); De La Vega, Munari e Morabito (2019).

## 4.2 Modelos de OR para a seleção de fornecedores

Nesta seção são apresentadas abordagens para o tratamento de incertezas nos modelos SSDC e SSDSC. Para o conhecimento dos parâmetros críticos dos modelos foram realizados diversos testes computacionais conforme descritos à frente, no Capítulo 5. Esses testes tiveram como objetivo conhecer o comportamento dos modelos, quando alguns parâmetros eram perturbados. Conhecendo os parâmetros críticos, foram realizadas modelagens matemáticas utilizando a abordagem de OR a fim de propor soluções robustas.

### 4.2.1 Modelo RSSDC com incertezas nos custos e tempo de entrega

Nesta formulação, considera-se que os custos considerados na função objetivo e tempo de atraso na entrega não são conhecidos a priori, mas sim sujeitos a incertezas. Para a formulação, necessita-se retomar o modelo SSDC apresentado na Seção 3.1 deste trabalho:

$$\begin{aligned} \min \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} cc_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} ct_{ts} Y_{ts} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} (1 - \theta) q_{tsp} X_{tsp} \\ + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} l_{tsp} dl_{tsp} X_{tsp} \end{aligned} \quad (3.1)$$

s. a

$$X_{tsp} \leq C_{tsp} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S, \quad \forall p \in P \quad (3.2)$$

$$\sum_{s \in S} X_{tsp} \geq d_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.3)$$

$$\sum_{p \in P} X_{tsp} \leq M Y_{ts} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (3.4)$$

$$Y_{ts} \in \{0,1\} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (3.5)$$

$$X_{tsp} \geq 0 \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S, \quad \forall p \in P \quad (3.6)$$

Para incorporar as três classes de incerteza nos custos (custo unitário, custo de transporte e custo da ordem) e a incerteza no atraso das entregas, primeiramente considere os conjuntos  $J^\varphi$ , onde estão alocados todos os elementos dos parâmetros incertos, com  $\varphi = [cc, ct, q, dl]$ . Quando  $\Gamma^\varphi = 0$ , a solução atinge o seu valor nominal, do modelo original, não considerando a incerteza na formulação. Agora, quando  $\Gamma^\varphi = |J^\varphi|$  a solução atinge o seu pior caso, oferecendo a máxima proteção à solução para o(s) parâmetro(s) incerto(s) perturbado(s), levando em consideração que mais de um parâmetro incerto possa ir para o seu pior caso simultaneamente. Com isso, torna-se atraente variar os parâmetros  $\Gamma^\varphi$  nos intervalos  $(0, |J^\varphi|)$ , permitindo uma maior flexibilidade para o modelo robusto, sem degenerar significativamente o valor ótimo da solução.

Para iniciar a construção do modelo robusto, considere o seguinte conjunto de incerteza  $U$ , que contém todas as realizações possíveis para os parâmetros incertos pertencentes aos conjuntos  $J^\varphi$ :

$$U = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{c}c_{tsp}, \tilde{c}t_{ts}, \tilde{q}_{tsp}, \tilde{d}l_{tsp} \in R^+ | \\ \tilde{c}c_{tsp} = cc_{tsp} + \hat{c}c_{tsp} \zeta_{tsp}^{cc}, \quad \forall (t, s, p) \in J^{cc}; \\ \tilde{c}t_{ts} = ct_{ts} + \hat{c}t_{ts} \zeta_{ts}^{ct}, \quad \forall (t, s) \in J^{ct}; \\ \tilde{q}_{tsp} = q_{tsp} + \hat{q}_{tsp} \zeta_{tsp}^q, \quad \forall (t, s, p) \in J^q; \\ \tilde{d}l_{tsp} = dl_{tsp} + \hat{d}l_{tsp} \zeta_{tsp}^{dl}, \quad \forall (t, s, p) \in J^{dl}; \\ \sum_{(t,s,p) \in J^{cc}} \zeta_{tsp}^{cc} \leq \Gamma^{cc}; \quad 0 \leq \zeta_{tsp}^{cc} \leq 1, \forall (t, s, p) \in J^{cc}; \\ \sum_{\forall (t,s) \in J^{ct}} \zeta_{ts}^{ct} \leq \Gamma^{ct}; \quad 0 \leq \zeta_{tsp}^{cc} \leq 1, \forall (t, s) \in J^{ct}; \\ \sum_{(t,s,p) \in J^q} \zeta_{tsp}^q \leq \Gamma^q; \quad 0 \leq \zeta_{tsp}^q \leq 1, \forall (t, s, p) \in J^q; \\ \sum_{(t,s,p) \in J^{dl}} \zeta_{tsp}^{dl} \leq \Gamma^{dl}; \quad 0 \leq \zeta_{tsp}^{dl} \leq 1, \forall (t, s, p) \in J^{dl} \end{array} \right. \quad (4.21)$$

Os *budgets* de incertezas apresentados em (4.21) apenas indicam como as variáveis aleatórias estão modeladas nesta formulação, considerando a independências

entre as variáveis aleatórias. Na análise do pior caso para este conjunto, pode-se constatar que o mesmo é atingido quando todos os parâmetros incertos, limitados por  $\Gamma^\psi$ , atingem o seu desvio máximo. Então, a contraparte robusta para esta formulação, onde todas as incertezas estão alocadas na função objetivo, é obtida pela resolução de um problema min-max, apresentado em (4.22), onde deseja-se minimizar a máxima deterioração do valor da função objetivo, quando os parâmetros incertos vão para o pior caso, de acordo com o conjunto de incertezas  $U$ .

$$\min_{X,Y} \left\{ \max_{\tilde{c}_{tsp}, \tilde{c}_{ts}, \tilde{q}_{tsp}, \tilde{d}_{tsp}} \left( \sum_{\substack{t \in J^{cc} \\ s \in J^{cc} \\ p \in J^{cc}}} \tilde{c}_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in J^{ct} \\ s \in J^{ct}}} \tilde{c}_{ts} Y_{ts} \right. \right. \quad (4.22)$$

$$\left. \left. + \sum_{\substack{t \in J^q \\ s \in J^q \\ p \in J^q}} \tilde{q}_{tsp} (1 - \theta_{tsp}) X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in J^{dl} \\ s \in J^{dl} \\ p \in J^{dl}}} l_{tsp} \tilde{d}_{tsp} X_{tsp} \right) \right\}$$

Dada uma solução  $X^*, Y^*$  do problema (4.22), é possível reescrever a maximização interna de (4.22) da seguinte forma, usando a relação dada em (4.21):

$$\max_{\zeta_{tsp}^{cc}, \zeta_{ts}^{ct}, \zeta_{tsp}^q, \zeta_{tsp}^{dl}} \sum_{\substack{t \in J^{cc} \\ s \in J^{cc} \\ p \in J^{cc}}} (\hat{c}_{tsp} \zeta_{tsp}^{cc}) X_{tsp}^* +$$

$$\sum_{\substack{t \in J^{ct} \\ s \in J^{ct}}} (\hat{c}_{ts} \zeta_{ts}^{ct}) Y_{ts}^* +$$

$$\sum_{\substack{t \in J^q \\ s \in J^q \\ p \in J^q}} (\hat{q}_{tsp} \zeta_{tsp}^q) (1 - \theta) X_{tsp}^* + \quad (4.23)$$

$$\sum_{\substack{t \in J^{dl} \\ s \in J^{dl} \\ p \in J^{dl}}} (\hat{d}_{tsp} \zeta_{tsp}^{dl}) (l_{tsp}) X_{tsp}^*$$

s.a.

$$\sum_{\substack{t \in J^{cc} \\ s \in J^{cc} \\ p \in J^{cc}}} \zeta_{tsp}^{cc} \leq \Gamma^{cc} \quad (4.24)$$

$$\sum_{\substack{t \in J^{ct} \\ s \in J^{ct}}} \zeta_{ts}^{ct} \leq \Gamma^{ct} \quad (4.25)$$

$$\sum_{\substack{t \in J^q \\ s \in J^q \\ p \in J^q}} \zeta_{tsp}^q \leq \Gamma^q \quad (4.26)$$

$$\sum_{\substack{t \in J^{dl} \\ s \in J^{dl} \\ p \in J^{dl}}} \zeta_{tsp}^{dl} \leq \Gamma^{dl} \quad (4.27)$$

$$0 \leq \zeta_{tsp}^{cc} \leq 1, \quad \forall (t, s, p) \in J^{cc} \quad (4.28)$$

$$0 \leq \zeta_{ts}^{ct} \leq 1, \quad \forall (t, s) \in J^{ct} \quad (4.29)$$

$$0 \leq \zeta_{tsp}^q \leq 1, \quad \forall (t, s, p) \in J^q \quad (4.30)$$

$$0 \leq \zeta_{tsp}^{dl} \leq 1, \quad \forall (t, s, p) \in J^{dl} \quad (4.31)$$

Os termos multiplicados por valores nominais ( $cc_{tsp}, ct_{ts}, q_{tsp}, dl_{tsp}$ ) não foram incluídos em (4.23) por serem constantes e, assim, são tratados fora da maximização.

Dado que o problema (4.23) -(4.31) é factível e limitado, podemos aplicar o conceito de dualidade, para obter um problema de minimização e, assim, substituí-lo em (4.21):

$$\begin{aligned} & \min_{\left( \begin{array}{c} \lambda^{cc}, \lambda^{ct}, \lambda^q, \lambda^{dl} \\ \mu_{tsp}^{cc}, \mu_{ts}^{ct}, \mu_{tsp}^q, \mu_{tsp}^{dl} \end{array} \right)} \Gamma^{cc} \lambda^{cc} + \Gamma^{ct} \lambda^{ct} + \Gamma^q \lambda^q + \Gamma^{dl} \lambda^{dl} \\ & + \sum_{\substack{t \in J^{cc} \\ s \in J^{cc} \\ p \in J^{cc}}} \mu_{tsp}^{cc} + \sum_{\substack{t \in J^{ct} \\ s \in J^{ct}}} \mu_{ts}^{ct} + \sum_{\substack{t \in J^q \\ s \in J^q \\ p \in J^q}} \mu_{tsp}^q + \sum_{\substack{t \in J^{dl} \\ s \in J^{dl} \\ p \in J^{dl}}} \mu_{tsp}^{dl} \end{aligned} \quad (4.32)$$

s.a.

$$\lambda^{cc} + \mu_{tsp}^{cc} \geq \widehat{c}_{tsp} X_{tsp}^*, \quad \forall (t, s, p) \in J^{cc} \quad (4.33)$$

$$\lambda^{ct} + \mu_{ts}^{ct} \geq \widehat{c}_{ts} Y_{ts}^*, \quad \forall (t, s) \in J^{ct} \quad (4.34)$$

$$\lambda^q + \mu_{tsp}^q \geq \widehat{q}_{tsp} (1 - \theta) X_{tsp}^*, \quad \forall (t, s, p) \in J^q \quad (4.35)$$

$$\lambda^{dl} + \mu_{tsp}^{dl} \geq \widehat{d}_{tsp} l_{tsp} X_{tsp}^*, \quad \forall (t, s, p) \in J^{dl} \quad (4.36)$$

$$\lambda^{cc} \geq 0 \quad \forall (t, s, p) \quad (4.37)$$

$$\lambda^{ct} \geq 0 \quad \forall (t, s) \quad (4.38)$$

$$\lambda^q \geq 0 \quad \forall (t, s, p) \quad (4.39)$$

$$\lambda^{dl} \geq 0 \quad \forall (t, s, p) \quad (4.40)$$

$$\mu_{tsp}^{cc} \geq 0, \quad \forall (t, s, p) \in J^{cc} \quad (4.41)$$

$$\mu_{ts}^{ct} \geq 0, \quad \forall (t, s) \in J^{ct} \quad (4.42)$$

$$\mu_{tsp}^q \geq 0, \quad \forall (t, s, p) \in J^q \quad (4.43)$$

$$\mu_{tsp}^{dl} \geq 0, \quad \forall (t, s, p) \in J^{dl} \quad (4.44)$$

Assim, dado que (4.32) -(4.44) é o problema dual de (4.23) -(4.31), tem-se que também é factível e limitado e possui mesmo valor ótimo. Ao incorporá-lo ao modelo SSDC original, obtém-se a contraparte robusta RSSDC com custos e tempo de atraso nas entregas incertos:

$$\begin{aligned} \min \left( \begin{array}{c} \lambda^{cc}, \lambda^{ct}, \lambda^q, \lambda^{dl}, \\ \mu_{tsp}^{cc}, \mu_{ts}^{ct}, \mu_{tsp}^q, \mu_{tsp}^{dl} \\ X, Y \end{array} \right) & \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} cc_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} ct_{ts} Y_{ts} + \\ & \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} (1 - \theta) q_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} dl_{tsp} l_{tsp} X_{tsp} \\ & + \Gamma^{cc} \lambda^{cc} + \Gamma^{ct} \lambda^{ct} + \Gamma^q \lambda^q + \Gamma^{dl} \lambda^{dl} \\ & + \sum_{\substack{t \in J^{cc} \\ s \in J^{cc} \\ p \in J^{cc}}} \mu_{tsp}^{cc} + \sum_{\substack{t \in J^{ct} \\ s \in J^{ct}}} \mu_{ts}^{ct} + \sum_{\substack{t \in J^q \\ s \in J^q \\ p \in J^q}} \mu_{tsp}^q + \sum_{\substack{t \in J^{dl} \\ s \in J^{dl} \\ p \in J^{dl}}} \mu_{tsp}^{dl} \end{aligned} \quad (4.45)$$

s. a

$$X_{tsp} \leq C_{tsp} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S, \quad \forall p \in P \quad (3.2)$$

$$\sum_{s \in S} X_{tsp} \geq d_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.10)$$

$$\sum_{p \in P} X_{tsp} \leq M Y_{ts} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (3.8)$$

$$\lambda^{cc} + \mu_{tsp}^{cc} \geq \hat{c}_{tsp} X_{tsp}, \quad \forall (t, s, p) \in J^{cc} \quad (4.33)$$

$$\lambda^{ct} + \mu_{ts}^{ct} \geq \hat{c}_{ts} Y_{ts}, \quad \forall (t, s) \in J^{ct} \quad (4.34)$$

$$\lambda^q + \mu_{tsp}^q \geq \hat{q}_{tsp}(1 - \theta)X_{tsp}, \quad \forall (t, s, p) \in J^q \quad (4.35)$$

$$\lambda^{dl} + \mu_{tsp}^{dl} \geq \hat{d}l_{tsp}l_{tsp}X_{tsp}, \quad \forall (t, s, p) \in J^{dl} \quad (4.36)$$

$$Y_{ts} \in \{0,1\} \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (3.6)$$

$$X_{tsp} \geq 0 \text{ e inteiro} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S, \quad \forall p \in P \quad (3.7)$$

restrições (4.37) – (4.44)

#### 4.2.2 Modelo RSSDSC com incertezas nos custos e tempo de entrega

Nesta formulação, considera-se que, além dos parâmetros incertos já considerados na seção anteriores, tem-se que os custos relacionados aos níveis de estoque em mãos e estoque em atraso na função objetivo não são conhecidos *a priori* e sujeitos a incertezas.

Para a formulação, necessita-se retomar o modelo SSDSC apresentado na Seção 3.2 deste trabalho:

$$\begin{aligned} \min \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} cc_{tsp}X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} ct_{ts} Y_{ts} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} (1 - \theta) q_{tsp}X_{tsp} \\ + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} dl_{tsp} l_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^+ I_{tp}^+ + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^- I_{tp}^- \end{aligned} \quad (3.11)$$

s. a

$$\sum_{s \in S} X_{tsp} + I_{t-1,p}^+ - I_{tp}^+ + I_{tp}^- - I_{t-1,p}^- = d_{tp} \quad \forall t \in T, \forall p \in P \quad (3.8)$$

$$I_{tp}^+ \leq w_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.9)$$

$$I_{tp}^- \leq \Phi d_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.10)$$

$$I_{tp}^- \geq 0 \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.12)$$

$$I_{tp}^+ \geq 0 \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (3.13)$$

restrições (3.2), (3.4) – (3.6)

Para incorporar incerteza nas cinco classes de custos: custo unitário, custo de transporte, custo operacional do pedido de compra, custo de estoque em mãos e custo de estoque em atraso; e a incerteza no tempo de atraso das entregas dos produtos, analogamente à Seção 4.2.1, considere que existem os conjuntos  $J^\varphi$ , onde estão alocados todos os índices das matrizes tecnológicas dos parâmetros incertos, com  $\varphi = [cc, ct, q, dl, h^+, h^-]$ . Então, tem-se o seguinte conjunto incerto  $U$ :

$$U = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{c}c_{tsp}, \tilde{c}t_{tsp}, \tilde{q}_{tsp}, \tilde{d}l_{tsp}, \tilde{h}_{tp}^+, \tilde{h}_{tp}^- \in R^+ | \\ \tilde{c}c_{tsp} = cc_{tsp} + \hat{c}c_{tsp} \zeta_{tsp}^{cc}, \quad \forall (t, s, p) \in J^{cc}; \\ \tilde{c}t_{ts} = ct_{ts} + \hat{c}t_{ts} \zeta_{ts}^{ct}, \quad \forall (t, s) \in J^{ct}; \\ \tilde{q}_{tsp} = q_{tsp} + \hat{q}_{tsp} \zeta_{tsp}^q, \quad \forall (t, s, p) \in J^q; \\ \tilde{d}l_{tsp} = dl_{tsp} + \hat{d}l_{tsp} \zeta_{tsp}^{dl}, \quad \forall (t, s, p) \in J^{dl}; \\ \tilde{h}_{tp}^+ = h_{tp}^+ + \hat{h}_{tp}^+ \zeta_{tp}^{h^+}, \quad \forall (t, p) \in J^{h^+}; \\ \tilde{h}_{tp}^- = h_{tp}^- + \hat{h}_{tp}^- \zeta_{tp}^{h^-}, \quad \forall (t, p) \in J^{h^-}; \\ \sum_{(t,s,p) \in J^{cc}} \zeta_{tsp}^{cc} \leq \Gamma^{cc}; \quad 0 \leq \zeta_{tsp}^{cc} \leq 1, \forall (t, s, p) \in J^{cc}; \\ \sum_{(t,s) \in J^{ct}} \zeta_{ts}^{ct} \leq \Gamma^{ct}; \quad 0 \leq \zeta_{ts}^{ct} \leq 1, \forall (t, s) \in J^{ct}; \\ \sum_{(t,s,p) \in J^q} \zeta_{tsp}^q \leq \Gamma^q; \quad 0 \leq \zeta_{tsp}^q \leq 1, \forall (t, s, p) \in J^q; \\ \sum_{(t,s,p) \in J^{dl}} \zeta_{tsp}^{dl} \leq \Gamma^{dl}; \quad 0 \leq \zeta_{tsp}^{dl} \leq 1, \forall (t, s, p) \in J^{dl}; \\ \sum_{(t,p) \in J^{h^+}} \zeta_{tp}^{h^+} \leq \Gamma^{h^+}; \quad 0 \leq \zeta_{tp}^{h^+} \leq 1, \forall (t, p) \in J^{h^+}; \\ \sum_{(t,p) \in J^{h^-}} \zeta_{tp}^{h^-} \leq \Gamma^{h^-}; \quad 0 \leq \zeta_{tp}^{h^-} \leq 1, \forall (t, p) \in J^{h^-}; \end{array} \right. \quad (4.45)$$

O *budget* de incertezas apresentado em (4.45) apenas indica como as variáveis aleatórias estão modeladas nesta formulação, considerando a independência das variáveis aleatórias, analogamente a formulação (4.21). Na análise do pior caso para este conjunto pode-se constatar que ele é atingido quando todos os parâmetros incertos atingem o seu desvio máximo. Então a contraparte robusta para esta formulação, na qual todas as incertezas estão alocadas na função objetivo, é obtida pela resolução de

um problema min-max, apresentado em (4.46), onde se deseja minimizar o detrimento do valor da função objetivo, quando os parâmetros incertos vão para o pior caso.

$$\min_{X, Y, I^+, I^-} \left\{ \max_{\tilde{c}_{tsp}, \tilde{c}_{ts}, \tilde{q}_{tsp}, \tilde{d}_{tsp}, \tilde{h}_{tp}^+, \tilde{h}_{tp}^-} \left( \sum_{\substack{t \in J^{cc} \\ s \in J^{cc} \\ p \in J^{cc}}} \tilde{c}_{tsp} X_{tsp} \right. \right. \\
 + \sum_{\substack{t \in J^{ct} \\ s \in J^{ct}}} \tilde{c}_{ts} Y_{ts} + \sum_{\substack{t \in J^q \\ s \in J^q \\ p \in J^q}} \tilde{q}_{tsp} (1 - \theta) X_{tsp} \\
 \left. \left. + \sum_{\substack{t \in J^l \\ s \in J^l \\ p \in J^l}} \tilde{d}_{tsp} l_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} \tilde{h}_{tp}^+ I_{tp}^+ + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} \tilde{h}_{tp}^- I_{tp}^- \right) \right\} \quad (4.46)$$

Considere que  $X^*, Y^*, I^{+*}, I^{-*}$  são uma solução do problema (4.46), com estes vetores, pode-se reescrever o modelo (4.46) da seguinte maneira:

$$\min_{\zeta_{tsp}^{cc}, \zeta_{ts}^{ct}, \zeta_{tsp}^q, \zeta_{tsp}^{dl}, \zeta_{tp}^{h+}, \zeta_{tp}^{h-}} \sum_{\substack{t \in J^{cc} \\ s \in J^{cc} \\ p \in J^{cc}}} (\hat{c}_{tsp} \zeta_{tsp}^{cc}) X_{tsp}^* \\
 + \sum_{\substack{t \in J^{ct} \\ s \in J^{ct}}} (\hat{c}_{ts} \zeta_{ts}^{ct}) Y_{ts}^* + \sum_{\substack{t \in J^q \\ s \in J^q \\ p \in J^q}} (\hat{q}_{tsp} \zeta_{tsp}^q) (1 - \theta) X_{tsp}^* + \\
 + \sum_{\substack{t \in J^{dl} \\ s \in J^{dl} \\ p \in J^{dl}}} (\hat{d}_{tsp} \zeta_{tsp}^{dl}) (l_{tsp}) X_{tsp}^* + \\
 + \sum_{\substack{t \in J^{h+} \\ p \in J^{h+}}} (\hat{h}_{tp}^+ \zeta_{tp}^{h+}) I_{tp}^{+*} \quad (4.47)$$

$$\sum_{\substack{t \in J^{h-} \\ p \in J^{h-}}} (\hat{h}_{tp}^- \zeta_{tp}^{h-}) I_{tp}^{-*}$$

s.a.

restrições (4.24) – (4.31)

$$\sum_{\substack{t \in J^{h+} \\ p \in J^{h+}}} \zeta_{tp}^{h+} \leq \Gamma^{h+} \quad (4.48)$$

$$\sum_{\substack{t \in J^{h-} \\ p \in J^{h-}}} \zeta_{tp}^{h-} \leq \Gamma^{h-} \quad (4.49)$$

$$0 \leq \zeta_{tp}^{h+} \leq 1, \quad \forall (t, p) \in J^{h+} \quad (4.50)$$

$$0 \leq \zeta_{tp}^{h-} \leq 1, \quad \forall (t, p) \in J^{h-} \quad (4.51)$$

Como o problema (4.47) -(4.51) é factível e limitado, através do conceito de Dualidade, pode-se obter um problema de minimização equivalente que pode ser substituído em (4.46), sem perda de generalidade:

$$\begin{aligned} & \min_{\left( \begin{array}{l} \lambda_{tsp}^{cc}, \lambda_{tsp}^{ct}, \lambda_{tsp}^q, \lambda_{tsp}^{dl}, \lambda_{tsp}^{h+}, \lambda_{tsp}^{h-} \\ \mu_{tsp}^{cc}, \mu_{tsp}^{ct}, \mu_{tsp}^q, \mu_{tsp}^{dl}, \mu_{tsp}^{h+}, \mu_{tsp}^{h-} \end{array} \right)} \Gamma^{cc} \lambda_{tsp}^{cc} + \Gamma^{ct} \lambda_{tsp}^{ct} \\ & + \Gamma^q \lambda_{tsp}^q + \Gamma^{dl} \lambda_{tsp}^{dl} + \Gamma^{h+} \lambda_{tsp}^{h+} + \Gamma^{h-} \lambda_{tsp}^{h-} + \\ & \sum_{\substack{t \in J^{cc} \\ s \in J^{cc} \\ p \in J^{cc}}} \mu_{tsp}^{cc} + \sum_{\substack{t \in J^{ct} \\ s \in J^{ct}}} \mu_{tsp}^{ct} + \sum_{\substack{t \in J^q \\ s \in J^q \\ p \in J^q}} \mu_{tsp}^q + \sum_{\substack{t \in J^{dl} \\ s \in J^{dl} \\ p \in J^{dl}}} \mu_{tsp}^{dl} + \sum_{\substack{t \in J^{h+} \\ p \in J^{h+}}} \mu_{tsp}^{h+} \\ & + \sum_{\substack{t \in J^{h-} \\ p \in J^{h-}}} \mu_{tsp}^{h-} \end{aligned} \quad (4.52)$$

s.a.

restrições (4.33) – (4.36)

$$\lambda_{tp}^{h+} + \mu_{tp}^{h+} \geq I_{tp}^+ \hat{h}_{tp}^+ \quad \forall (t, p) \in J^{h+} \quad (4.53)$$

$$\lambda_{tp}^{h-} + \mu_{tp}^{h-} \geq I_{tp}^- \hat{h}_{tp}^- \quad \forall (t, p) \in J^{h-} \quad (4.54)$$

restrições (4.37) – (4.40)

$$\lambda_{tp}^{h+} \geq 0 \quad \forall (t, p) \quad (4.55)$$

$$\lambda_{tp}^{h-} \geq 0 \quad \forall (t, p) \quad (4.56)$$

restrições (4.41) – (4.44)

$$\mu_{tp}^{h+} \geq 0, \quad \forall (t, p) \in J^{h+} \quad (4.57)$$

$$\mu_{tp}^{h-} \geq 0, \quad \forall (t, p) \in J^{h-} \quad (4.58)$$

Este novo modelo (4.52) -(4.58) é factível e limitado. Ao incorporá-lo ao modelo SSDSC original, obtém-se a contraparte robusta RSSDSC com custos e tempos de entrega incertos:

$$\begin{aligned} \min \left( \begin{array}{c} \lambda_{tsp}^{cc}, \lambda_{tp}^{ct}, \lambda_{tsp}^q, \lambda_{tsp}^{dl}, \lambda_{tp}^h \\ \mu_{tsp}^{cc}, \mu_{ts}^{ct}, \mu_{tsp}^q, \mu_{tsp}^{dl}, \mu_{tp}^h \\ X, Y, I^+, I^- \end{array} \right) & \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} cc_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} ct_{ts} Y_{ts} \\ & + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} (1 - \theta) q_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} dl_{tsp} l_{tsp} X_{tsp} \\ & + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^+ I_{tp}^+ + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^- I_{tp}^- \\ & + \Gamma^{cc} \lambda_{tsp}^{cc} + \Gamma^{ct} \lambda_{ts}^{ct} + \Gamma^q \lambda_{tsp}^q + \Gamma^{dl} \lambda_{tsp}^{dl} \Gamma^{h+} \lambda_{tp}^{h+} + \Gamma^{h-} \lambda_{tp}^{h-} + \\ & \sum_{\substack{t \in J^{cc} \\ s \in J^{cc} \\ p \in J^{cc}}} \mu_{tsp}^{cc} + \sum_{\substack{t \in J^{ct} \\ s \in J^{ct}}} \mu_{ts}^{ct} + \sum_{\substack{t \in J^q \\ s \in J^q \\ p \in J^q}} \mu_{tsp}^q + \sum_{\substack{t \in J^{dl} \\ s \in J^{dl} \\ p \in J^{dl}}} \mu_{tsp}^{dl} + \sum_{\substack{t \in J^{h+} \\ p \in J^{h+}}} \mu_{tp}^{h+} \\ & + \sum_{\substack{t \in J^{h-} \\ p \in J^{h-}}} \mu_{tp}^{h-} \end{aligned} \quad (4.59)$$

s.a

restrições (3.2), (3.6) – (3.16)

restrições (3.12) – (3.15)

restrições (4.33) – (4.36)

$$\lambda_{tp}^{h+} + \mu_{tp}^{h+} \geq \hat{h}_{tp}^+ I_{tp}^+ \quad \forall (t, p) \in J^{h+} \quad (4.60)$$

$$\lambda_{tp}^{h-} + \mu_{tp}^{h-} \geq \hat{h}_{tp}^- I_{tp}^- \quad \forall (t, p) \in J^{h-} \quad (4.61)$$

restrições (4.37) – (4.40)

$$\lambda_{tp}^{h+} \geq 0 \quad \forall (t, p) \quad (4.62)$$

$$\lambda_{tp}^{h-} \geq 0 \quad \forall (t, p) \quad (4.63)$$

restrições (4.41) – (4.44)

$$\mu_{tp}^{h+} \geq 0, \quad \forall (t,p) \in J^{h+} \quad (4.64)$$

$$\mu_{tp}^{h-} \geq 0, \quad \forall (t,p) \in J^{h-} \quad (4.65)$$

Com apontado ao final da Seção 4.1.3, o modelo pode ser abordado por meio da programação por metas, de modo a se encaixar exatamente na descrição originalmente apresentada por Bertsimas e Sim (2003), em que os parâmetros incertos pertencem à matriz de coeficientes dos modelos. Assim, transformando a função objetivo com custos incertos em uma nova restrição e criando um parâmetro  $(\omega)$  que restringe o valor da função objetivo em função do valor da meta estabelecido, obtém-se o modelo equivalente:

$$\min (\omega) \quad (4.66)$$

s.a

$$\begin{aligned} (\omega) \geq & \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} cc_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} ct_{ts} Y_{ts} \\ & + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} (1 - \theta) q_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} dl_{tsp} l_{tsp} X_{tsp} \\ & + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^+ I_{tp}^+ + \sum_{\substack{t \in T \\ p \in P}} h_{tp}^- I_{tp}^- \\ & + \Gamma^{cc} \lambda_{tsp}^{cc} + \Gamma^{ct} \lambda_{ts}^{ct} + \Gamma^q \lambda_{tsp}^q + \Gamma^{dl} \lambda_{tsp}^{dl} \Gamma^{h+} \lambda_{tp}^{h+} + \Gamma^{h-} \lambda_{tp}^{h-} + \\ & \sum_{\substack{t \in J^{cc} \\ s \in J^{cc} \\ p \in J^{cc}}} \mu_{tsp}^{cc} + \sum_{\substack{t \in J^{ct} \\ s \in J^{ct}}} \mu_{ts}^{ct} + \sum_{\substack{t \in J^q \\ s \in J^q \\ p \in J^q}} \mu_{tsp}^q + \sum_{\substack{t \in J^{dl} \\ s \in J^{dl} \\ p \in J^{dl}}} \mu_{tsp}^{dl} + \sum_{\substack{t \in J^{h+} \\ p \in J^{h+}}} \mu_{tp}^{h+} \\ & + \sum_{\substack{t \in J^{h-} \\ p \in J^{h-}}} \mu_{tp}^{h-} \\ & \text{restrições (3.2), (3.6) – (3.16)} \\ & \text{restrições (3.12) – (3.15)} \\ & \text{restrições (4.33) – (4.36)} \end{aligned} \quad (4.67)$$

*restrições (4.60) – (4.66)*

Esta formulação pode avaliar a probabilidade de uma meta  $\omega$  estipulada por um tomador de decisão (por exemplo, um gerente, supervisor ou analista) ser infactível no cenário analisado. Uma alternativa que pode exemplificar a situação é a seguinte: no planejamento estratégico anual de todas as organizações são estipulados *budgets* para a compra de MPs. Os tomadores de decisão podem avaliar se as suas previsões de consumo e compra de MPs estão alinhadas com tal planejamento estratégico através desta formulação. Esta abordagem refletirá se os parâmetros informados ao modelo estão bem alinhados com o *budget*, ou se a empresa compradora necessitará realizar um desembolso maior naquele planejamento. Cabe ressaltar que esta abordagem para o modelo RSSDC é análoga.

### **4.3 Considerações finais sobre o capítulo**

Neste capítulo, inicialmente foi abordada a origem da OR e as três principais abordagens utilizadas na literatura atualmente. Quando as formulações de Soyster (1973), Ben-Tal e Nemirovski (2000) e Bertsimas e Sim (2003) foram apresentadas, as vantagens, desvantagens e a representação geométrica de todas as formulações puderam ser observadas. Mediante isso, foi apresentado que para o presente trabalho, optou-se em adotar a formulação proposta por Bertsimas e Sim (2003) pelas vantagens na implementação, tempo computacional e relevância prática. Por fim, foram apresentados todos os passos realizados para a construção da modelagem dos modelos robustos RSSDC e RSSDC com incertezas nos custos e tempos de entrega, os quais serão abordados no próximo capítulo.

## 5. Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de experimentos computacionais com os modelos determinísticos e robustos descritos nos Capítulos 3 e 4. Todos os experimentos foram realizados no *software* GAMS 26.0.0 e resolvidos com o software de otimização de propósito geral CPLEX 12.8, em um computador com 15,9 GB de memória RAM, processador Intel® Core™ i7-3537U 2.00 GHz e sistema operacional Windows 10. Foi estabelecido como critério de parada um limite de tempo de 3600 segundos ou um GAP de 0% de otimalidade.

Os testes computacionais utilizaram instâncias criadas conforme descrito na Seção 5.1 e foram executados em duas grandes fases apresentadas nas Seções 5.2 e 5.3. Os testes da fase 1 foram realizados para conhecimento dos limites computacionais dos modelos determinísticos do Capítulo 3. Enquanto os testes da fase 2 foram realizados para o conhecimento do desempenho da abordagem da OR, usando os modelos propostos no Capítulo 4.

### 5.1 Criação das instâncias

Para a criação das instâncias foram definidas diferentes classes que indicam o tamanho das instâncias em função da cardinalidade de seus conjuntos. As instâncias são constituídas por variações dentro das classes obedecendo as distribuições de probabilidade estabelecidas e as cardinalidades dos conjuntos. Para isso foi selecionada uma situação-exemplo apresentada por Ware et al. (2014) contendo três produtos, dois períodos e quatro fornecedores (3P-2T-4S), sendo que  $aP-bT-cS$  significa  $a$  número de produtos,  $b$  número de períodos e  $c$  número de fornecedores. A instância original foi gerada pelos autores do artigo mencionado, atribuindo valores aleatórios, dentro de uma distribuição de probabilidade uniforme para todos os parâmetros. As características desta instância são fornecidas na Tabela 1 e Tabela 2, sendo que cada sequência de valores em um dado bloco de células da Tabela 1 corresponde aos valores dos parâmetros  $C_{tsp}$ ,  $cc_{tsp}$ ,  $q_{tsp}$ ,  $l_{tsp}$  e  $dl_{tsp}$  para os fornecedores  $s_1$  a  $s_4$  e produtos  $p_1$  a  $p_3$ , no período  $t_1$ . Na última coluna são apresentados os valores do parâmetro  $ct_{1s}$  e na última linha são apresentados os valores das demandas  $d_{1p}$ . A mesma sequência de dados é apresentada na Tabela 2 se referindo ao período  $t_2$ .

Tabela 1 - Dados gerados aleatoriamente para o período  $t = 1$  (3P-2T-4S).

$t_1$	$p_1$					$p_2$					$p_3$					$ct_{1s}$
	$C_{1s1}$	$cc_{1s1}$	$q_{1s1}$	$l_{1s1}$	$dl_{1s1}$	$C_{1s2}$	$cc_{1s2}$	$q_{1s2}$	$l_{1s2}$	$dl_{1s2}$	$C_{1s3}$	$cc_{1s3}$	$q_{1s3}$	$l_{1s3}$	$dl_{1s3}$	
$s_1$	600	30	4	2	10	1000	15	3	0	12	2000	30	5	3	15	600
$s_2$	1000	35	4	1	10	700	14	3	1	12	1500	22	5	0	15	750
$s_3$	800	32	4	4	10	800	20	3	1	12	2000	25	5	2	15	650
$s_4$	800	35	4	3	10	800	22	3	2	12	2000	30	5	0	15	650
$d_{1p}$	1000					1600					2200					

Fonte: Adaptado de Ware et al., (2014).

Tabela 2 - Dados gerados aleatoriamente para o período  $t = 2$  (3P-2T-4S).

$t_2$	$p_1$					$p_2$					$p_3$					$ct_{2s}$
	$C_{2s1}$	$cc_{2s1}$	$q_{2s1}$	$l_{2s1}$	$dl_{2s1}$	$C_{2s2}$	$cc_{2s2}$	$q_{2s2}$	$l_{2s2}$	$dl_{2s2}$	$C_{2s3}$	$cc_{2s3}$	$q_{2s3}$	$l_{2s3}$	$dl_{2s3}$	
$s_1$	1200	40	5	2	13	1800	25	7	0	11	2200	40	6	3	12	1000
$s_2$	2000	45	5	1	13	1600	24	7	1	11	1500	32	6	0	12	1200
$s_3$	1400	42	5	4	13	1200	30	7	1	11	1500	35	6	2	12	1500
$s_4$	1500	45	5	3	13	3000	32	7	2	11	1500	40	7	0	12	1200
$d_{2p}$	2500					3200					4500					

Fonte: Adaptado de Ware et al., (2014).

Esta instância original foi usada como base para os parâmetros e, a partir destes valores, novas classes de instâncias foram geradas. Foram criadas as seguintes classes: 5P-10T-15S, 10P-20T-30S, 15P-30T-45S e 20P-40T-60S. A forma com que os parâmetros foram gerados é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados da criação das instâncias

Parameter	Distribution
$cc_{tsp}$	$\sim Uniform [3,7]$
$ct_{ts}$	$\sim Uniform [500,2500]$
$C_{tsp}$	$\sim Uniform [500,2500]$
$d_{tp}$	$\sim Uniform [1000,5000]$
$q_{tsp}$	$\sim Uniform [3,10]$
$l_{tsp}$	$\sim Uniform [8,17]$
$dl_{tsp}$	$\sim Uniform [0,4]$
$h_{tp}^+$	$\sim Uniform [3.3,7.7]$

Após o dimensionamento das classes de instâncias foram construídos cinco exemplares para cada classe que foram gerados aleatoriamente utilizando o software GAMS. Após todas as definições das instâncias, os testes computacionais puderam ser realizados.

## **5.2 Testes computacionais da fase 1**

Nesta fase os modelos determinísticos foram resolvidos com o objetivo de analisar seus desempenhos e identificar o custo computacional e o nível de qualidade das soluções. Estes testes também tiveram por objetivo a avaliação do impacto da decisão do controle de estoque no modelo SSDSC. Essas análises ofereceram *insights* para os testes da fase 2.

### **5.2.1 Comparação entre os modelos determinísticos**

Para a realização do teste computacional de comparação dos modelos SSDC e SSDSC, apresentados na Seção 3 deste trabalho, foram realizados experimentos computacionais que tiveram como objetivo o conhecimento do grau de impacto em que as decisões adicionais eram integradas aos modelos sucessivamente e o desempenho computacional necessário para que estas decisões fossem incorporadas. Este *trade-off* possui um impacto no tempo e na qualidade da solução apresentada para a análise do tomador de decisão em uma situação real. Então, este trabalho de pesquisa buscou iniciar com as decisões mais simples para o SSP até as mais complexas.

Cabe lembrar que no modelo SSDC são tomadas apenas as decisões de dimensionamento de lotes de compra e a seleção dos fornecedores em cada período. Já no modelo SSDSC são adicionadas as decisões sobre os níveis de estoques dos períodos, podendo-se antecipar ou atrasar as compras em função dos custos. Então o modelo SSDSC é mais flexível que o modelo SSDC pois ele permite a antecipação da produção de uma demanda futura e o carregamento deste estoque para os períodos futuros, demonstrando claramente uma vantagem perante o modelo SSDC. Outra vantagem do modelo SSDSC é que ele também permite a decisão de não realizar a entrega do produto  $p$  em um período  $t$  (retardar a entrega) para obtenção de uma vantagem estratégica, como a economia de um frete, por exemplo.

Do ponto de vista prático em uma situação real, o último modelo exerce vantagem sobre o primeiro pois incorpora mais decisões, permitindo ao tomador de decisão obter soluções mais abrangentes e estratégias de negócio como promoções, queimas de estoque, entre outros. Por outro lado, nem sempre é possível obter todos os dados necessários para alimentar este modelo e resolver instâncias grandes em um tempo computacional aceitável em função da quantidade de variáveis de decisão e restrições do modelo.

Outro ponto que deve ser considerado é que o modelo SSDC é um caso mais restrito que o modelo SSDSC. Então, por definição, o desempenho do modelo SSDC pode ser no máximo igual e na maioria dos casos pior que o desempenho do modelo SSDSC. Após todas estas premissas, se pôde dar início aos testes computacionais.

Para os testes computacionais foram usados os cinco exemplares de cada classe de instância, conforme descrito na Seção 5.1. Também foi estipulado um nível de serviço de 95% ( $\theta = 95\%$ ); que haveria uma limitação física de armazenagem do almoxarifado de 3000 produtos de cada tipo em cada período ( $w_{tp} = 3000$ ) e a parcela máxima de pedidos em atraso seria inferior a dez por cento de todos os pedidos em carteira ( $\Phi = 0.90$ ). Por fim, todos os estoques iniciais de todos os produtos foram considerados iguais a zero e o custo para atrasar a entrega de um item ( $h_{tp}^-$ ) foi considerado como o valor máximo do parâmetro  $l_{tsp}$ , obtido por  $\max_s l_{tsp}$ . Após todas estas definições, os testes computacionais com os modelos determinísticos SSDC e SSDSC foram realizados.

Nos experimentos, os modelos foram resolvidos na otimalidade em todas as instâncias e os resultados são apresentados na Tabela 4, onde a primeira coluna indica a instância utilizada em cada experimento, a segunda coluna indica o tempo computacional em segundos gasto para obter a solução do modelo SSDC, a terceira coluna indica o valor da função objetivo da solução obtida para o modelo SSDC. Da quarta a quinta colunas são apresentados os resultados análogos ao modelo SSDC, obtidos nos experimentos em que o modelo SSDSC foi avaliado. E, por fim, é apresentada na sexta coluna o valor relativo de ganho que a solução do modelo SSDSC obteve em relação à solução do modelo SSDC, processando a mesma instância, calculado da seguinte maneira:

$$ganho = 100\% - \frac{(z_{SSDSC} * 100\%)}{z_{SSDC}}$$

Tabela 4 - Comparação entre os modelos determinísticos.

Instância	Modelo SSDC		Modelo SSDSC		
	Tempo(s)	Solução Final	Tempo(s)	Solução Final	Ganho
5P-10T-15S_1	1	1.221.499,5500	1	1.125.148,6100	7,89%
5P-10T-15S_2	1	1.634.344,6500	1	1.481.846,2430	9,33%
5P-10T-15S_3	1	1.206.598,0500	1	1.169.803,3400	3,05%
5P-10T-15S_4	1	1.233.438,1000	1	1.161.260,6657	5,85%
5P-10T-15S_5	1	1.055.822,0500	1	976.361,1180	7,53%
10P-20T-30S_1	5	3.631.385,0500	6	3.600.409,3810	0,85%
10P-20T-30S_2	4	3.487.805,8500	4	3.332.651,2170	4,45%
10P-20T-30S_3	5	3.696.669,7000	4	3.618.067,9350	2,13%
10P-20T-30S_4	4	3.346.202,3000	9	3.329.252,2010	0,51%
10P-20T-30S_5	4	3.570.893,2500	17	3.547.913,0530	0,64%
15P-30T-45S_1	30	6.924.673,4000	41	6.903.985,1900	0,30%
15P-30T-45S_2	20	6.957.455,1000	38	6.949.501,5970	0,11%
15P-30T-45S_3	17	6.841.279,6000	38	6.819.385,8400	0,32%
15P-30T-45S_4	13	6.737.570,2500	39	6.718.721,2630	0,28%
15P-30T-45S_5	18	6.743.311,2500	46	6.704.606,1470	0,57%
20P-40T-60S_1	15	11.211.103,8499	60	11.205.111,2860	0,05%
20P-40T-60S_2	15	11.005.132,5500	90	10.994.446,8000	0,10%
20P-40T-60S_3	14	10.703.743,4500	37	10.697.814,7360	0,06%
20P-40T-60S_4	13	11.103.526,1000	31	11.098.125,0820	0,05%
20P-40T-60S_5	14	10.886.029,0498	43	10.880.631,0990	0,05%

Analisando a Tabela 4 pode-se concluir que ao final dos quarenta testes computacionais realizados, em todas as instâncias analisadas o modelo SSDSC obteve soluções melhores que o modelo SSDC, como esperado. Analisando o controle de estoque como uma decisão estratégica, pode-se concluir que o modelo SSDSC alcançou um ganho variando em um intervalo de 0,05% a 9,33%, sendo que, o maior ganho foi obtido no processamento da instância 5P-10T-15S\_2. Estes ganhos ocorreram nas decisões sobre a antecipação do atendimento à demanda por meio de estoques adquiridos para o atendimento da demanda futura, visando uma economia estratégica. Em contrapartida, o custo computacional do modelo SSDSC foi maior em quatorze instâncias, embora tenha sido bastante baixo em ambos os modelos.

### 5.2.2 Análise de sensibilidade do modelo SSDSC

Os resultados apontados no primeiro teste indicaram um ganho na decisão estratégica sobre armazenar ou atrasar pedidos para obter vantagem econômica. Como foi

apresentado na Seção 5.2.1 o custo para carregar estoque em mãos é superior ao custo de compra direta do bem ou serviço. Então, para o segundo teste computacional da Fase 1 foram propostos dois cenários, perturbando o custo de estoque com objetivo de avaliar a sua influência nas soluções.

No primeiro cenário foi considerada uma situação hipotética vivenciada por vários mercados, onde o câmbio é favorável ao lado da organização compradora (moeda mais forte) e o custo para carregar estoque é baixo. Este cenário foi denominado como Valor de Estoque Baixo (LSV, do inglês *Low Stock Value*). Para os testes, o valor considerado baixo para carregar estoque foi de trinta por cento do valor nominal ( $LSV = 0,3 * h_{tp}$ ).

No segundo cenário também foi considerada uma situação hipotética em que a empresa compradora não possui condições favoráveis para manter estoque de um produto por diversas situações, como risco de obsolescência, situação de câmbio desfavorável, armazém e logística em poder de terceiros, onerando significativamente o valor deste custo. Este cenário foi denominado Valor de Estoque Alto (HSV, do inglês *High Stock Value*). Para os testes, o valor considerado alto para carregar estoque foi de cento e trinta por cento do valor nominal ( $HSV = 1,3 * h_{tp}$ ).

Os resultados do teste são apresentados na Tabela 5, possuindo a mesma estrutura da Tabela 4 com dois novos blocos: SSDSC-LSV e SSDSC-HVL. A métrica *ganho* também foi mantida e sempre foi utilizada como referência a solução do modelo SSDC para a comparação do valor do ganho no cenário analisado.

Como se pode observar na Tabela 5 o modelo SSDSC se mostrou mais eficiente em todos cenários analisados, sendo eles com custos de estoque nominais, baixos e altos, obtendo sempre soluções melhores que o modelo SSDC. No cenário em que o custo de estoque era baixo (SSDSC-LSV) o modelo obteve ganhos que variaram em um intervalo de 1,34% a 17,28%. Já no cenário em que o custo de estoque era alto (SSDSC-HSV), o modelo alcançou um ganho que permaneceu em um intervalo de 0,01% a 6,97%. Em contrapartida, o custo computacional das variações do SSDSC permaneceu maior em 48,75% das amostras analisadas.

Em função dos resultados obtidos nos testes até o momento, nos experimentos computacionais que seguem adiante neste trabalho somente o modelo SSDSC é avaliado. Esta decisão também foi corroborada pela forma com que o modelo consegue

representar mais aspectos em sua modelagem que aproximam situações vivenciadas em um cenário real.

### 5.2.3 Influência da baixa oferta

Ao analisar as soluções obtidas nos testes anteriores, observa-se que as instâncias possuem folga na capacidade de fornecimento. Estas folgas possuem duas causas: o número de fornecedores é sempre superior ao número de produtos (este critério foi adotado para estimular a competição entre os fornecedores); e a ordem de grandeza dos parâmetros de entrada – como as instâncias foram criadas a partir da instância utilizada em Ware et. al. (2014) estas grandezas se mantiveram, então o somatório das capacidades de cada fornecedor sempre excede a demanda.

Para abordar este ponto, um teste computacional foi proposto buscando simular uma situação real onde o bem ou serviço a ser comprado é muito específico e customizado, possuindo poucos fornecedores acessíveis ao longo do mundo. Para tal, foi selecionada a amostra 5P-10T-15S\_1 que foi a amostra que possuiu o menor tempo de processamento em todos os testes realizados anteriormente, com o objetivo de avaliar o impacto da baixa oferta no modelo.

Este teste consistiu em cenários com a capacidade de fornecimento reduzida, a fim de avaliar o comportamento do modelo. Para isso, foi criado um parâmetro artificial  $\alpha$ , com o valor inicial de uma unidade, responsável pela perturbação no parâmetro  $C_{tsp}$ . A perturbação ocorreu de acordo com o com o procedimento descrito no Algoritmo 1.

Como o foco deste teste foi avaliar o impacto da variação da capacidade de fornecimento nos custos do modelo, apresenta-se o comportamento de cada um dos termos da função objetivo na Figura 8, de modo a se obter quanto o custo de compra, custo de transporte, custo de estoque, entre outros, foram influenciados por esta perturbação.

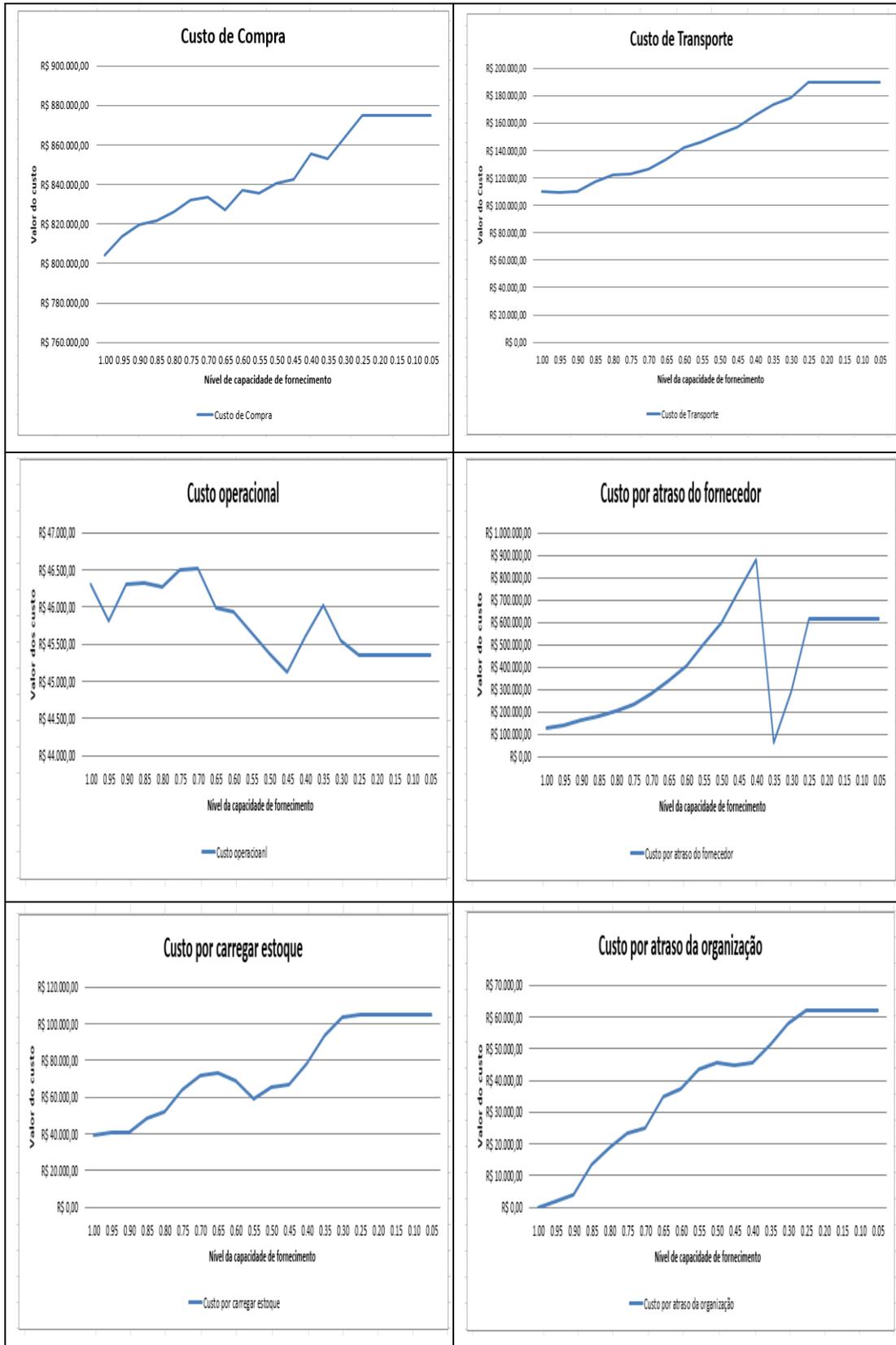
*Algoritmo 1 - Perturbação no parâmetro  $C_{tsp}$ .*

- 
- |      |  |
|------|--|
| i.   | Para cada faixa de capacidade de fornecimento, faça {    |
| ii.  | $\alpha = \alpha - 0,05;$                                |
| iii. | $\bar{C}_{tsp} = C_{tsp} * \alpha;$                      |
| iv.  | Resolver o modelo SSDSC com o parâmetro $\bar{C}_{tsp};$ |
|      | Fim-Para}.   |
-

Tabela 5 - Perturbação no custo de estoque do MODELO SSDSC.

Instância	Modelo SSDC			Modelo SSDSC			Modelo SSDSC - LSV			Modelo SSDSC - HSV				
	Tempo(s)	Solução Final	Tempo(s)	Solução Final	Tempo(s)	Ganho	Tempo(s)	Solução Final	Tempo(s)	Ganho	Tempo(s)	Solução Final	Tempo(s)	Ganho
5P-10T-15S_1	1	1.221.499,5500	1	1.125.148,6100	1	7,89%	1	1.064.047,5653	1	12,89%	1	1.136.389,8953	1	6,97%
5P-10T-15S_2	1	1.634.344,6500	1	1.481.846,2430	1	9,33%	1	1.351.935,2734	1	17,28%	1	1.517.653,0517	1	7,14%
5P-10T-15S_3	1	1.206.598,0500	1	1.169.803,3400	1	3,05%	1	1.098.960,2130	1	8,92%	1	1.181.117,2596	1	2,11%
5P-10T-15S_4	1	1.233.438,1000	1	1.161.260,6657	1	5,85%	1	1.059.585,8170	1	14,09%	1	1.184.040,9618	1	4,00%
5P-10T-15S_5	1	1.055.822,0500	1	976.361,1180	1	7,53%	1	904.884,2965	1	14,30%	1	996.892,6519	1	5,58%
10P-20T-30S_1	5	3.631.385,0500	6	3.600.409,3810	6	0,85%	4	3.471.806,4084	4	4,39%	9	3.613.622,9245	9	0,49%
10P-20T-30S_2	4	3.487.805,8500	4	3.332.651,2170	4	4,45%	18	3.231.808,9023	7	7,34%	4	3.343.328,3140	4	4,14%
10P-20T-30S_3	5	3.696.669,7000	4	3.618.067,9350	4	2,13%	6	3.444.889,2274	6	6,81%	5	3.642.040,2582	5	1,48%
10P-20T-30S_4	4	3.346.202,3000	9	3.329.252,2010	9	0,51%	5	3.218.336,0519	3	3,82%	15	3.338.516,4170	15	0,23%
10P-20T-30S_5	4	3.570.893,2500	17	3.547.913,0530	17	0,64%	4	3.432.018,2690	3	3,89%	7	3.560.214,3454	7	0,30%
15P-30T-45S_1	30	6.924.673,4000	41	6.903.985,1900	41	0,30%	44	6.714.164,3083	3	3,04%	39	6.915.900,6093	39	0,13%
15P-30T-45S_2	20	6.957.455,1000	38	6.949.501,5970	38	0,11%	40	6.805.464,4267	2	2,18%	40	6.956.208,7187	40	0,02%
15P-30T-45S_3	17	6.841.279,6000	38	6.819.385,8400	38	0,32%	41	6.651.934,5487	2	2,77%	43	6.832.261,3246	43	0,13%
15P-30T-45S_4	13	6.737.570,2500	39	6.718.721,2630	39	0,28%	53	6.544.487,7942	2	2,87%	46	6.729.896,0337	46	0,11%
15P-30T-45S_5	18	6.743.311,2500	46	6.704.606,1470	46	0,57%	52	6.516.840,3587	3	3,36%	44	6.723.829,2103	44	0,29%
20P-40T-60S_1	15	11.211.103,8499	60	11.205.111,2860	60	0,05%	46	11.052.806,9257	1	1,41%	304	11.209.695,4035	304	0,01%
20P-40T-60S_2	15	11.005.132,5500	90	10.994.446,8000	90	0,10%	50	10.849.929,9026	1	1,41%	46	11.001.738,6337	46	0,03%
20P-40T-60S_3	14	10.703.743,4500	37	10.697.814,7360	37	0,06%	53	10.533.573,2816	1	1,59%	606	10.701.679,9247	606	0,02%
20P-40T-60S_4	13	11.103.526,1000	31	11.098.125,0820	31	0,05%	48	10.908.294,4903	1	1,76%	33	11.101.338,6025	33	0,02%
20P-40T-60S_5	14	10.886.029,0498	43	10.880.631,0990	43	0,05%	43	10.739.999,6967	1	1,34%	36	10.884.923,3102	36	0,01%

Figura 8 - Influência da baixa oferta no modelo SSDSC.



Analisando os gráficos da Figura 8 pode-se observar que o parâmetro  $C_{tsp}$  é crítico ao desempenho do modelo SSDSC, pois realiza influência em todos os outros custos da cadeia, apesar do modelo conseguir encontrar soluções ótimas em tempos computacionais relativamente baixos, variando de um a cinco segundos. Esta característica do modelo é motivada pela relaxação da integralidade das variáveis de decisão e pela liberação dos valores dos estoques finais.

Os custos de compra foram onerados em um intervalo de 1,17% a 8,80%, os custos de transporte em um intervalo de 6,78% a 72,99%, carregamento de estoque em um intervalo de 2,70% a 165,47% e atraso pela organização em um intervalo de R\$ 2.000,00 a R\$ 61.817,50, apresentado aqui em escala absoluta pois o valor inicial era nulo.

Já o custo operacional teve um comportamento diferente, ele decaiu em um intervalo que possuiu uma oscilação de 0,46% a -2,06% tendo uma melhora em relação à solução inicial em 80% dos cenários analisados. Por fim o custo por atraso do fornecedor teve um comportamento que deve ser analisado por partes. No primeiro intervalo onde  $\alpha \geq 0,40$  houve uma taxa de crescimento, onerando a solução em um intervalo de 13,12% a 602,44%. Após isso houve uma queda brusca levando a melhora em relação à solução inicial em 51,06%. Imediatamente após isso, a solução volta a ser onerada em um valor de 132,95% quando  $\alpha = 0,30$  e, então o valor estabiliza onerando o valor da função objetivo em 388,67% em relação ao cenário inicial.

### 5.3 Testes computacionais da fase 2

Nesta fase, a versão robusta do modelo SSDSC foi avaliada com o objetivo do conhecimento do seu comportamento quando dados incertos são assumidos e a técnica de OR é aplicada.

#### 5.3.1 Testes com o modelo RSSDSC

Foram realizados experimentos computacionais separados por classes de instâncias. Para cada parâmetro incerto, foi considerado que poderia haver até cinco ocorrências de pior caso, ou seja,  $\Gamma^\varphi = \{0,1,2, \dots, 5\}$  em cada experimento, onde  $\varphi = [cc, ct, q, dl, h^+, h^-]$ . Também foi considerado que os parâmetros incertos assumiriam

um desvio controlado  $\gamma$ , assumindo os seguintes valores de variação: 10%, 25% e 50%, onde  $\hat{c}_{tsp} = \gamma c_{tsp}$  e, assim por diante, com os demais custos. Neste contexto quando os parâmetros que ajustam os *budgets* de incerteza assumiram valores nulos ( $\Gamma^\varphi = 0$ ), apenas a parte determinística do modelo era ativa, nestes casos no valor final da função objetivo, temos a solução do modelo determinístico somente. Já quando os valores dos parâmetros que ajustam os *budgets* de incerteza assumiram valores diferentes de zero, a contraparte do modelo robusto estava ativa. Sendo assim, o pior caso possível equivalente ao modelo de Soyster (1973) é obtida pela multiplicação da cardinalidade dos conjuntos dos índices. As Tabelas 6 a 9 apresentam todos os resultados obtidos nestes testes.

Da primeira à sexta coluna de cada bloco das Tabelas 6 a 9 são apresentados os valores dos *budgets* de incerteza considerados para a execução do experimento. Da sétima à décima coluna são apresentadas as médias aritméticas que os valores das funções objetivo que cada exemplar assumiu quando o modelo foi resolvido naquele cenário em unidade monetárias, de acordo com os valores que os desvios dos parâmetros assumiram em cada cenário, variando no conjunto  $\{0,1; 0,25; 0,5\}$ . Todas estas soluções atingiram a otimalidade em cada cenário de cada classe, que é composta por cinco exemplares cada.

Analisando as Tabelas 6 a 9 pode-se observar que nas soluções onde o parâmetro custo de estoque em atraso ( $h_{tp}^-$ ) se altera ocorrem duas situações: ou ocorrem pequenas variações nos valores da função objetivo e o valor estabilizou rapidamente, ou o valor já atingiu o pior caso já na primeira ocorrência do seu *budget*, permanecendo assim constante ao longo dos outros cenários. Esta baixa influência e variação deste custo também foram motivadas pelo conjunto de restrições (3.10) que impõem uma taxa de atraso máximo da parcela da demanda em detrimento do nível de serviço.

Ainda analisando as Tabelas 6 a 9 pode-se concluir que as soluções obtidas pelo modelo RSSDSC com incertezas nos custos demonstram que nos cenários analisados, o incremento no valor ótimo da função objetivo, no pior caso, sempre é menor que o desvio dos parâmetros incertos. Isso indica a obtenção de soluções satisfatórias do ponto de vista financeiro. Realizando uma análise por classe de exemplares, pode-se observar que:

Tabela 6 – Resultados do modelo RSSDSC - classe 5P-10T-15S.

$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$	desvio = 10%	desvio = 25%	desvio = 50%
0	0	0	0	0	0	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
1	0	0	0	0	0	1.185.074,25	1.188.303,30	1.193.622,16
2	0	0	0	0	0	1.187.082,63	1.193.241,03	1.203.314,94
3	0	0	0	0	0	1.188.983,17	1.197.908,33	1.212.503,42
4	0	0	0	0	0	1.190.766,90	1.202.262,31	1.221.121,68
5	0	0	0	0	0	1.192.492,38	1.206.511,11	1.229.475,91
0	0	0	0	0	0	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
0	1	0	0	0	0	1.183.133,31	1.183.507,44	1.184.130,99
0	2	0	0	0	0	1.183.380,09	1.184.124,39	1.185.364,89
0	3	0	0	0	0	1.183.626,01	1.184.739,19	1.186.594,49
0	4	0	0	0	0	1.183.867,79	1.185.343,64	1.187.803,39
0	5	0	0	0	0	1.184.102,67	1.185.930,84	1.188.977,79
0	0	0	0	0	0	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
0	0	1	0	0	0	1.182.995,20	1.183.162,17	1.183.439,96
0	0	2	0	0	0	1.183.103,18	1.183.432,12	1.183.979,79
0	0	3	0	0	0	1.183.206,83	1.183.691,25	1.184.497,97
0	0	4	0	0	0	1.183.307,68	1.183.943,37	1.185.001,93
0	0	5	0	0	0	1.183.405,81	1.184.188,25	1.185.490,74
0	0	0	0	0	0	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
0	0	0	1	0	0	1.184.835,06	1.187.271,78	1.191.168,81
0	0	0	2	0	0	1.186.328,72	1.190.839,65	1.198.041,98
0	0	0	3	0	0	1.187.656,13	1.193.944,42	1.202.971,56
0	0	0	4	0	0	1.188.822,49	1.196.588,37	1.207.309,98
0	0	0	5	0	0	1.189.773,30	1.198.913,71	1.210.896,51
0	0	0	0	0	0	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
0	0	0	0	1	0	1.184.336,19	1.186.469,51	1.189.956,88
0	0	0	0	2	0	1.185.571,62	1.189.539,17	1.195.900,32
0	0	0	0	3	0	1.186.627,59	1.192.044,06	1.200.596,24
0	0	0	0	4	0	1.187.476,78	1.193.896,81	1.203.803,84
0	0	0	0	5	0	1.188.134,63	1.195.447,71	1.206.609,51
0	0	0	0	0	0	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
0	0	0	0	0	1	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
0	0	0	0	0	2	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
0	0	0	0	0	3	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
0	0	0	0	0	4	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
0	0	0	0	0	5	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
0	0	0	0	0	0	1.182.883,89	1.182.883,89	1.182.883,89
1	1	1	1	1	1	1.189.159,90	1.197.786,32	1.211.598,78
2	2	2	2	2	2	1.194.275,34	1.210.353,15	1.236.246,56
3	3	3	3	3	3	1.198.913,05	1.221.642,48	1.257.475,78
4	4	4	4	4	4	1.203.076,54	1.231.482,25	1.276.028,56
5	5	5	5	5	5	1.206.811,27	1.240.554,82	1.293.634,68

Tabela 7 – Resultados do modelo RSSDSC - classe 10P-20T-30S.

$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$	desvio = 10%	desvio = 25%	desvio = 50%
0	0	0	0	0	0	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
1	0	0	0	0	0	3.487.641,57	3.490.459,21	3.494.924,49
2	0	0	0	0	0	3.489.410,36	3.494.800,48	3.503.403,91
3	0	0	0	0	0	3.491.112,21	3.499.005,89	3.511.501,02
4	0	0	0	0	0	3.492.757,95	3.503.037,52	3.519.303,87
5	0	0	0	0	0	3.494.355,64	3.506.951,23	3.526.776,61
0	0	0	0	0	0	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
0	1	0	0	0	0	3.485.908,32	3.486.282,66	3.486.906,56
0	2	0	0	0	0	3.486.157,52	3.486.905,66	3.488.152,56
0	3	0	0	0	0	3.486.405,82	3.487.526,41	3.489.394,06
0	4	0	0	0	0	3.486.653,24	3.488.144,96	3.490.631,16
0	5	0	0	0	0	3.486.898,82	3.488.758,91	3.491.859,06
0	0	0	0	0	0	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
0	0	1	0	0	0	3.485.780,48	3.485.963,06	3.486.267,36
0	0	2	0	0	0	3.485.900,85	3.486.263,98	3.486.869,21
0	0	3	0	0	0	3.486.015,65	3.486.551,00	3.487.443,24
0	0	4	0	0	0	3.486.126,95	3.486.829,23	3.487.999,70
0	0	5	0	0	0	3.486.235,56	3.487.100,77	3.488.542,78
0	0	0	0	0	0	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
0	0	0	1	0	0	3.486.607,90	3.487.834,44	3.489.362,58
0	0	0	2	0	0	3.487.078,50	3.488.872,19	3.490.707,56
0	0	0	3	0	0	3.487.251,02	3.489.097,48	3.491.194,73
0	0	0	4	0	0	3.487.262,59	3.489.122,66	3.491.194,73
0	0	0	5	0	0	3.487.271,55	3.489.122,66	3.491.194,73
0	0	0	0	0	0	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
0	0	0	0	1	0	3.486.810,74	3.488.412,43	3.490.781,82
0	0	0	0	2	0	3.487.482,05	3.490.052,84	3.493.886,49
0	0	0	0	3	0	3.488.072,50	3.491.452,63	3.496.371,42
0	0	0	0	4	0	3.488.566,38	3.492.589,52	3.498.234,43
0	0	0	0	5	0	3.488.974,87	3.493.533,51	3.499.873,15
0	0	0	0	0	0	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
0	0	0	0	0	1	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
0	0	0	0	0	2	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
0	0	0	0	0	3	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
0	0	0	0	0	4	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
0	0	0	0	0	5	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
0	0	0	0	0	0	3.485.658,76	3.485.658,76	3.485.658,76
1	1	1	1	1	1	3.490.165,49	3.496.547,60	3.506.372,01
2	2	2	2	2	2	3.493.467,74	3.504.550,08	3.521.394,80
3	3	3	3	3	3	3.496.306,35	3.511.455,76	3.534.859,00
4	4	4	4	4	4	3.498.842,60	3.517.760,96	3.547.052,06
5	5	5	5	5	5	3.501.225,81	3.523.577,92	3.558.308,72

Tabela 8 - Resultados do modelo RSSDSC - classe 15P-30T-45S.

$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$	desvio = 10%	desvio = 25%	desvio = 50%
0	0	0	0	0	0	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
1	0	0	0	0	0	6.821.011,99	6.823.522,34	6.827.611,00
2	0	0	0	0	0	6.822.677,23	6.827.608,33	6.835.443,38
3	0	0	0	0	0	6.824.313,85	6.831.549,58	6.842.674,10
4	0	0	0	0	0	6.825.905,16	6.835.223,56	6.849.527,43
5	0	0	0	0	0	6.827.432,90	6.838.773,39	6.856.142,76
0	0	0	0	0	0	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
0	1	0	0	0	0	6.819.489,64	6.819.864,11	6.820.488,21
0	2	0	0	0	0	6.819.738,77	6.820.486,90	6.821.733,80
0	3	0	0	0	0	6.819.986,87	6.821.107,16	6.822.974,30
0	4	0	0	0	0	6.820.234,60	6.821.726,51	6.824.213,01
0	5	0	0	0	0	6.820.482,06	6.822.345,16	6.825.450,30
0	0	0	0	0	0	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
0	0	1	0	0	0	6.819.355,29	6.819.528,23	6.819.816,45
0	0	2	0	0	0	6.819.469,18	6.819.812,93	6.820.385,86
0	0	3	0	0	0	6.819.582,11	6.820.095,27	6.820.950,53
0	0	4	0	0	0	6.819.694,04	6.820.375,10	6.821.510,20
0	0	5	0	0	0	6.819.803,94	6.820.649,85	6.822.059,69
0	0	0	0	0	0	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
0	0	0	1	0	0	6.819.418,83	6.819.591,02	6.819.621,03
0	0	0	2	0	0	6.819.439,86	6.819.613,30	6.819.622,63
0	0	0	3	0	0	6.819.439,89	6.819.613,30	6.819.622,63
0	0	0	4	0	0	6.819.439,89	6.819.613,30	6.819.622,62
0	0	0	5	0	0	6.819.439,89	6.819.613,30	6.819.622,62
0	0	0	0	0	0	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
0	0	0	0	1	0	6.820.296,68	6.821.823,81	6.824.018,07
0	0	0	0	2	0	6.821.121,57	6.823.847,40	6.827.665,14
0	0	0	0	3	0	6.821.776,81	6.825.394,69	6.829.991,28
0	0	0	0	4	0	6.822.253,61	6.826.515,73	6.831.472,30
0	0	0	0	5	0	6.822.662,09	6.827.329,89	6.832.574,36
0	0	0	0	0	0	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
0	0	0	0	0	1	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
0	0	0	0	0	2	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
0	0	0	0	0	3	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
0	0	0	0	0	4	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
0	0	0	0	0	5	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
0	0	0	0	0	0	6.819.240,01	6.819.240,01	6.819.240,01
1	1	1	1	1	1	6.822.612,36	6.827.369,48	6.834.936,86
2	2	2	2	2	2	6.825.486,61	6.834.410,98	6.848.406,39
3	3	3	3	3	3	6.828.140,48	6.840.817,00	6.860.261,58
4	4	4	4	4	4	6.830.569,27	6.846.615,25	6.870.841,61
5	5	5	5	5	5	6.832.866,42	6.851.992,83	6.880.670,65

Tabela 9 - Resultados do modelo RSSDC - classe 20P-40T-60S.

$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$	desvio = 10%	desvio = 25%	desvio = 50%
0	0	0	0	0	0	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
1	0	0	0	0	0	11.206.608,89	11.208.826,09	11.212.437,54
2	0	0	0	0	0	11.208.055,99	11.212.437,54	11.219.570,25
3	0	0	0	0	0	11.209.500,13	11.216.044,52	11.225.851,04
4	0	0	0	0	0	11.210.942,67	11.219.567,83	11.231.811,84
5	0	0	0	0	0	11.212.370,36	11.222.741,91	11.237.679,77
0	0	0	0	0	0	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
0	1	0	0	0	0	11.205.361,19	11.205.736,03	11.206.360,79
0	2	0	0	0	0	11.205.610,69	11.206.359,78	11.207.608,29
0	3	0	0	0	0	11.205.860,09	11.206.983,28	11.208.855,29
0	4	0	0	0	0	11.206.109,09	11.207.605,78	11.210.100,29
0	5	0	0	0	0	11.206.357,99	11.208.228,03	11.211.344,79
0	0	0	0	0	0	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
0	0	1	0	0	0	11.205.236,24	11.205.423,66	11.205.736,04
0	0	2	0	0	0	11.205.356,69	11.205.724,78	11.206.338,29
0	0	3	0	0	0	11.205.476,44	11.206.024,16	11.206.937,04
0	0	4	0	0	0	11.205.595,19	11.206.321,03	11.207.530,79
0	0	5	0	0	0	11.205.712,84	11.206.615,16	11.208.119,04
0	0	0	0	0	0	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
0	0	0	1	0	0	11.205.130,04	11.205.138,56	11.205.138,56
0	0	0	2	0	0	11.205.131,29	11.205.138,56	11.205.138,56
0	0	0	3	0	0	11.205.131,29	11.205.138,56	11.205.138,56
0	0	0	4	0	0	11.205.131,29	11.205.138,56	11.205.138,56
0	0	0	5	0	0	11.205.131,29	11.205.138,56	11.205.138,56
0	0	0	0	0	0	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
0	0	0	0	1	0	11.205.912,95	11.207.115,44	11.208.134,99
0	0	0	0	2	0	11.206.221,65	11.207.711,42	11.208.681,26
0	0	0	0	3	0	11.206.350,25	11.208.000,59	11.209.073,60
0	0	0	0	4	0	11.206.460,86	11.208.263,62	11.209.412,48
0	0	0	0	5	0	11.206.564,63	11.208.469,83	11.209.680,65
0	0	0	0	0	0	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
0	0	0	0	0	1	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
0	0	0	0	0	2	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
0	0	0	0	0	3	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
0	0	0	0	0	4	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
0	0	0	0	0	5	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
0	0	0	0	0	0	11.205.111,29	11.205.111,29	11.205.111,29
1	1	1	1	1	1	11.207.804,15	11.211.794,67	11.217.365,48
2	2	2	2	2	2	11.209.931,65	11.216.932,47	11.226.883,07
3	3	3	3	3	3	11.211.874,60	11.221.754,52	11.235.981,41
4	4	4	4	4	4	11.213.796,76	11.226.498,80	11.244.571,81
5	5	5	5	5	5	11.215.706,53	11.230.953,57	11.252.825,43

- Classe 5P-10T-15S: analisando os custos individualmente, o custo que exerce maior impacto no valor da solução é o custo de compra, promovendo um aumento da grandeza de 0,19% a 0,81% quando o desvio está em 10%; quando o desvio é aumentado para 25%, este valor cresce no intervalo 0,46% a 2,00%; já quando o desvio atinge o seu valor máximo em 50%, o incremento no valor da solução chega a variar entre 0,91% e 3,94%. O segundo maior impacto nos valores da solução ocorre quando o tempo de atraso na entrega é perturbado. Quando o desvio está em 10%, o valor da solução cresce no intervalo 0,16% a 0,58%; quando o desvio atinge o valor de 25%, a oneração permanece no intervalo de 0,37% a 1,36%; por fim, quando o desvio está em 50%, o incremento fica no intervalo de 0,70% a 2,37%. Estes resultados foram surpreendentes, pois o custo com o maior valor, correspondente ao custo de transporte não proporcionou o maior valor de degradação na função objetivo, como era esperado. Isto ocorreu devido a três fatores: às restrições de satisfação do nível de qualidade de serviço fixado em 95%; ao nível máximo de atraso de atendimento à demanda fixado em 10% para todas as instâncias avaliadas; e por fim as decisões de estocar MPs para os horizontes futuros evitando transportes em todos os horizontes de planejamento. Quando todos os custos foram analisados simultaneamente indo para o pior caso, o maior impacto ocorreu quando o desvio estava em 50%, como esperado, de modo que o aumento ocorreu no intervalo de 2,43% a 9,36%.
- Classe 10P-20T-30S: analisando os custos individualmente, o cenário da classe anterior se mantém, permanecendo o custo de compra como o custo de maior impacto na função objetivo. A variação deste custo promoveu um aumento da grandeza de 0,06% a 0,25% quando o desvio estava em 10%; quando o desvio foi aumentado para 25%, este valor cresceu no intervalo 0,14% a 0,61%; já quando o desvio atingiu o seu valor máximo em 50%, o incremento no valor da solução chegou a variar entre 0,27% e 1,18%. O segundo maior impacto no valor da solução permaneceu quando o parâmetro de tempo de atraso na entrega foi perturbado. Quando os parâmetros incertos são permitidos pelo tomador de decisão, o custo de atraso na entrega promoveu um aumento da

grandeza de 0,11% a 0,16%, quando o desvio estava em 50%. Já os demais custos promoveram pequenos incrementos, não alterando significativamente os valores das soluções. Agora, analisando quando todos os custos vão para o pior caso simultaneamente, o pior caso ocorre quando o desvio está em 50%, onerando o valor da solução em um intervalo entre 0,59% e 2,08%.

- Classe 15P-30T-45S: analisando os custos individualmente, o único custo que exerce impacto significativo no valor da solução é o custo de compra, promovendo um aumento da grandeza de 0,06% a 0,29%, quando o desvio está em 25%, e um aumento da grandeza de 0,12% a 0,54% quando o desvio atinge o seu valor máximo. Já quando todos os custos são analisados simultaneamente, o impacto quando o desvio está em 50% permanece no intervalo de 0,23% e 0,90%, e o impacto quando o desvio está em 25% onera a solução em um intervalo de 0,12% a 0,41%. Estes resultados favoráveis à organização compradora foram obtidos com o aumento da oferta de fornecedores que competiam entre si, e o aumento dos horizontes de planejamento, em relação às classes anteriores, permitindo ao modelo encontrar soluções menos custosas.
- Classe 20P-40T-60P: analisando os custos individualmente, o modelo consegue atingir soluções satisfatórias, uma vez que ele consegue fracionar a demanda entre diversos fornecedores, não onerando significativamente o valor da solução. O pior caso ocorre quando o custo de compra, é perturbado. A perturbação promove o incremento no intervalo 0,07% a 0,23% quando o desvio está em seu valor máximo. Quando todos os custos vão para o pior caso simultaneamente, quando o desvio está em 25%, o valor da função objetivo é onerado no intervalo 0,06% a 0,23%. Quando o desvio atinge o seu valor máximo, os valores das soluções aumentam em um intervalo de 0,10% a 0,43%. Novamente, conforme apresentado no resultado da classe anterior, o aumento da oferta e dos horizontes de planejamento contribuíram para que o modelo conseguisse alcançar soluções melhores.

### 5.3.2 Análise do Risco da Solução Robusta do modelo SSDSC com incerteza nos custos via Simulação de Monte Carlo

Para comprovar a robustez das soluções obtidas pelo modelo SSDSC com incerteza nos custos foi proposta uma série de testes computacionais para a avaliação do risco das soluções se deteriorarem em um cenário real. Estes testes foram realizados utilizando o método de Simulação de Monte Carlo. Nos testes foram realizadas simulações distintas para avaliar as ocorrências das variáveis quando incertezas nos parâmetros foram consideradas, contendo 1000 amostras cada, selecionando a primeira instância de cada classe apenas, totalizando 324.000 exemplares avaliados.

Essas amostras foram geradas aleatoriamente utilizando três distribuições de probabilidade distintas, sendo elas a distribuição normal, triangular e uniforme, geradas pelo *software* GAMS, com objetivo da expansão de cenários pelos quais o modelo poderia ser avaliado e a eliminação de qualquer viés obtido por somente uma distribuição. Nas simulações foi selecionado um intervalo controlado em que o valor de cada amostra aleatória permaneceria restrito. Este intervalo assumiu que o desvio controlado poderia possuir variações acima ou abaixo do desvio original, pertencendo ao intervalo  $[\psi - \hat{\psi}, \psi + \hat{\psi}]$ , onde  $\psi$  representa o valor nominal do parâmetro e  $\hat{\psi}$  representa o desvio pelo qual o parâmetro está sujeito ( $\hat{\psi} = \gamma \psi$ ), analogamente a formulação utilizada na construção do conjunto de incertezas  $U$  em (4.1), apresentado na Capítulo 4 deste trabalho. O intervalo corresponde a todo o espaço amostral que a variável aleatória pode assumir, e é conhecido como intervalo todo (cuja abreviação em inglês é FI – *Full-Interval*). Este pressuposto foi adotado, pois, em um cenário real, são comuns oscilações positivas e negativas de custos (p.ex. devido ao câmbio).

Nas simulações onde foi adotada a distribuição normal, foram considerados os seguintes parâmetros para a distribuição: o valor médio do parâmetro, dado pelo seu valor nominal ( $\psi$ ) e o desvio padrão ao qual este parâmetro seria submetido ( $\gamma$ ). Já nas simulações onde a distribuição triangular foi avaliada foram informados os parâmetros: valor inferior do parâmetro sujeito ao desvio ( $\hat{\psi} - \psi$ ), valor superior do parâmetro sujeito ao desvio ( $\hat{\psi} + \psi$ ) e o valor nominal do parâmetro ( $\psi$ ). E, por fim, nos cenários onde a distribuição de probabilidade uniforme foi empregada foram

adotados como limitantes para a distribuição: o valor inferior do parâmetro sujeito ao desvio ( $\hat{\psi} - \psi$ ) e valor superior do parâmetro sujeito ao desvio ( $\hat{\psi} + \psi$ ).

O principal objetivo das simulações foi a mensuração do impacto dos parâmetros incertos no valor da solução e a análise do risco de se deteriorar esse valor (isto é, deixar a solução infactível em relação à meta) em diversos cenários e distribuições de probabilidades variadas. Para a análise foram propostas três medidas de desempenho: a probabilidade da solução se deteriorar (Risco), o preço da robustez (PR) e uma medida de desempenho que mensurou o impacto médio no valor da solução quando o cenário teve valor deteriorado (AR). Optou-se por adotar uma medida empírica de desempenho (Risco), ao contrário do limitante teórico sugerido por Bertsimas e Sim (2003), pois em muitas ocasiões esse limitante oferece algumas probabilidades muito distantes da realidade. O cálculo dessas medidas é realizado da seguinte forma:

- Probabilidade da solução se deteriorar (Risco): foram geradas 1000 amostras obtidas a partir do sorteio de números aleatórios para os parâmetros incertos dentro do intervalo do desvio controlado e da distribuição de probabilidade avaliada. Para cada amostra e solução, os valores sorteados foram utilizados como valores de realização dos parâmetros incertos para calcular o valor dessa solução, sendo este valor representado por  $\bar{z}_{rob}^*$ . Os valores obtidos foram comparados aos valores das soluções obtidas na Seção 5.3.1 deste trabalho ( $z_{rob}^*$ ), isto é, usando a função objetivo do modelo. Se o valor  $\bar{z}_{rob}^*$  fosse maior que o valor da solução obtida na seção anterior, um contador que contabilizou estes cenários deteriorados era incrementado. Ao final da simulação, pode-se contabilizar o valor final deste contador e encontrar a sua proporção perante a população das 1000 amostras, obtendo assim a frequência de deterioração do valor da função objetivo (ou de violação da meta).
- Preço da Robustez (PR): esta medida apresenta a diferença relativa entre os valores das soluções ótimas obtidas pelos modelos robusto e determinístico e foi obtida da seguinte forma:  $PR = \left( \frac{z_{rob}^* - z_{det}^*}{z_{det}^*} \right) \cdot 100\%$ , onde  $z_{rob}^*$  e  $z_{det}^*$  representam os valores ótimos dos modelos robustos e determinísticos, respectivamente. Esta medida tem como objetivo

apresentar o impacto no valor da solução, que a função de proteção promove, deteriorando o valor da solução em aversão ao risco.

- Aumento Médio Relativo (AR): todas as soluções com valores maiores do que os valores obtidos na Seção 5.3.1 foram armazenadas em uma variável que acumulou a soma de todos estes valores. Ao final, pode-se obter um valor médio relativo de aumento das soluções ( $\bar{z}_{rob}^*$ ) em função do valor anterior ( $z_{rob}^*$ ).

Todo o procedimento realizado na simulação é descrito pelo Algoritmo 2.

*Algoritmo 2 - Simulação de Monte Carlo*

- 
- i. Para cada distribuição, faça {
  - ii. Para cada valor de desvio, faça {
  - iii. Ler uma solução, seu respectivo valor  $z_{rob}^*$  e os parâmetros utilizados para obtê-la;
  - iv. Para  $g = 1$  to 1000, faça {
  - v. Definir  $\tilde{\varphi}$  usando valores aleatórios no intervalo informado na distribuição;
  - vi. Encontrar o valor atual da solução ( $\bar{z}_{rob}^*$ ), utilizando  $\tilde{\varphi}$  como valor dos parâmetros incertos;
  - vii. Se  $\left\{ \begin{array}{l} \bar{z}_{rob}^* > z_{rob}^*, \text{ então:} \\ cont\_RISCO = cont\_RISCO + 1; \\ soma\_AR = soma\_AR + (\bar{z}_{rob}^* - z_{rob}^*) \end{array} \right. ;$   
 Fim-Para}.  
 Fim-Para}.  
 Fim-Para}.
- 

As simulações foram realizadas para as quatro classes de instâncias 5P-10T-15S, 10P-20T-30S, 15P-30T-45S e 20P-40T-60S, utilizando os valores encontrados na Seção 5.3.1 deste trabalho. Os resultados das análises para experimentos usando o desvio de 10% estão apresentados nas Tabelas 10 a 13, enquanto os demais experimentos estão disponíveis no Apêndice B deste trabalho. Cada bloco de colunas em todas as tabelas apresenta as medidas de desempenho Risco, PR e AR, demonstrando todos os respectivos valores na unidade de medida percentual com duas casas decimais. Valores iguais à zero foram representados por “----” e correspondem aos casos

em que cem por cento das amostras apresentaram valores superiores em qualidade de solução em relação às soluções anteriores. Alguns valores são apresentados como 0,00% por duas razões: em alguns cenários o valor significativo se encontra além das duas casas decimais, não podendo serem classificados como zero; e em outros cenários, o valor do desvio ( $\hat{\psi}$ ) foi nulo, sendo assim, a contraparte robusta sujeita a incerteza não possuiu efeito sobre estas soluções.

Na primeira linha de cada tabela apresenta-se o desvio pelo qual as amostras foram submetidas. Da primeira à sexta coluna de cada bloco do conjunto de Tabelas 10 a 13 são apresentados os budgets de incerteza referentes aos parâmetros que foram considerados no pior caso:  $\Gamma^{cc}$ ,  $\Gamma^{ct}$ ,  $\Gamma^q$ ,  $\Gamma^{dl}$ ,  $\Gamma^{h+}$  e  $\Gamma^{h-}$ . O segundo bloco de colunas, compreendido pelas colunas de 7 a 9, corresponde aos valores obtidos pelas medidas de desempenho Risco, PR e AR quando a distribuição de probabilidade normal foi empregada, os blocos subsequentes apresentam as mesmas medidas de desempenho para as distribuições de probabilidade triangular e uniforme. Todos os valores de cada célula, apresentam uma média aritmética de 1.000 resultados, lembrando-se que apenas a primeira instância de cada classe foi utilizada.

Tabela 10 - Simulação de Monte Carlo da classe 5P-10T-15S- desvio 10%.

							desvio = 10%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		50,80%	0,00%	0,62%	50,20%	0,00%	0,27%	52,80%	0,00%	0,36%
1	0	0	0	0	0		39,10%	0,21%	0,57%	26,90%	0,21%	0,20%	33,20%	0,21%	0,30%
2	0	0	0	0	0		30,80%	0,39%	0,51%	11,80%	0,39%	0,16%	20,00%	0,39%	0,25%
3	0	0	0	0	0		23,10%	0,56%	0,49%	4,40%	0,56%	0,14%	12,10%	0,56%	0,21%
4	0	0	0	0	0		17,40%	0,72%	0,46%	1,80%	0,72%	0,09%	6,30%	0,72%	0,18%
5	0	0	0	0	0		13,30%	0,88%	0,42%	0,30%	0,88%	0,10%	3,10%	0,88%	0,13%
0	0	0	0	0	0		50,40%	0,00%	0,09%	51,00%	0,00%	0,04%	48,70%	0,00%	0,05%
0	1	0	0	0	0		44,70%	0,02%	0,08%	31,40%	0,02%	0,03%	35,40%	0,02%	0,05%
0	2	0	0	0	0		36,60%	0,04%	0,07%	18,20%	0,04%	0,02%	23,50%	0,04%	0,04%
0	3	0	0	0	0		28,60%	0,07%	0,07%	7,90%	0,07%	0,02%	15,00%	0,07%	0,04%
0	4	0	0	0	0		22,10%	0,09%	0,07%	2,60%	0,09%	0,02%	8,90%	0,09%	0,04%
0	5	0	0	0	0		17,10%	0,11%	0,06%	1,00%	0,11%	0,01%	5,40%	0,11%	0,03%
0	0	0	0	0	0		51,10%	0,00%	0,04%	48,00%	0,00%	0,01%	53,50%	0,00%	0,02%
0	0	1	0	0	0		41,80%	0,01%	0,03%	26,70%	0,01%	0,01%	37,80%	0,01%	0,02%
0	0	2	0	0	0		35,00%	0,02%	0,03%	10,70%	0,02%	0,01%	23,70%	0,02%	0,01%
0	0	3	0	0	0		27,50%	0,03%	0,02%	4,40%	0,03%	0,01%	13,00%	0,03%	0,01%
0	0	4	0	0	0		20,10%	0,04%	0,02%	1,20%	0,04%	0,01%	6,90%	0,04%	0,01%
0	0	5	0	0	0		14,40%	0,05%	0,02%	0,30%	0,05%	0,00%	3,50%	0,05%	0,01%
0	0	0	0	0	0		50,40%	0,00%	0,30%	50,70%	0,00%	0,13%	49,70%	0,00%	0,18%
0	0	0	1	0	0		28,20%	0,23%	0,23%	7,50%	0,23%	0,07%	15,40%	0,23%	0,11%
0	0	0	2	0	0		16,10%	0,38%	0,20%	1,00%	0,38%	0,05%	4,20%	0,38%	0,08%
0	0	0	3	0	0		7,70%	0,53%	0,19%	0,00%	0,53%	----	0,60%	0,53%	0,03%
0	0	0	4	0	0		4,40%	0,67%	0,15%	0,00%	0,67%	----	0,00%	0,67%	----
0	0	0	5	0	0		2,90%	0,75%	0,13%	0,00%	0,75%	----	0,00%	0,75%	----
0	0	0	0	0	0		48,60%	0,00%	0,12%	49,00%	0,00%	0,05%	54,10%	0,00%	0,07%
0	0	0	0	1	0		25,50%	0,10%	0,09%	5,20%	0,10%	0,03%	14,40%	0,10%	0,04%
0	0	0	0	2	0		9,80%	0,19%	0,07%	0,30%	0,19%	0,01%	1,50%	0,19%	0,02%
0	0	0	0	3	0		4,80%	0,24%	0,06%	0,00%	0,24%	----	0,10%	0,24%	0,00%
0	0	0	0	4	0		2,70%	0,28%	0,06%	0,00%	0,28%	----	0,00%	0,28%	----
0	0	0	0	5	0		1,80%	0,30%	0,06%	0,00%	0,30%	----	0,00%	0,30%	----
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	1		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	2		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	3		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	4		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	5		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		53,70%	0,00%	0,73%	57,60%	0,00%	0,34%	55,20%	0,00%	0,45%
1	1	1	1	1	1		28,60%	0,56%	0,55%	10,60%	0,56%	0,17%	17,70%	0,56%	0,28%
2	2	2	2	2	2		13,90%	1,00%	0,48%	0,60%	1,00%	0,11%	3,60%	1,00%	0,25%
3	3	3	3	3	3		6,70%	1,39%	0,41%	0,00%	1,39%	----	1,00%	1,39%	0,11%
4	4	4	4	4	4		3,10%	1,77%	0,33%	0,00%	1,77%	----	0,00%	1,77%	----
5	5	5	5	5	5		1,00%	2,07%	0,44%	0,00%	2,07%	----	0,00%	2,07%	----

Tabela 11 – Simulação de Monte Carlo da classe 10P-20T-30S- desvio 10%.

							desvio = 10%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		49,30%	0,00%	0,33%	47,60%	0,00%	0,14%	50,50%	0,00%	0,20%
1	0	0	0	0	0		44,10%	0,05%	0,31%	36,00%	0,05%	0,12%	42,30%	0,05%	0,18%
2	0	0	0	0	0		40,40%	0,10%	0,28%	26,10%	0,10%	0,11%	34,80%	0,10%	0,16%
3	0	0	0	0	0		35,20%	0,15%	0,27%	17,70%	0,15%	0,10%	28,10%	0,15%	0,14%
4	0	0	0	0	0		30,90%	0,20%	0,26%	12,50%	0,20%	0,08%	21,50%	0,20%	0,13%
5	0	0	0	0	0		26,40%	0,24%	0,26%	7,80%	0,24%	0,08%	16,30%	0,24%	0,12%
0	0	0	0	0	0		48,30%	0,00%	0,05%	53,00%	0,00%	0,02%	49,00%	0,00%	0,03%
0	1	0	0	0	0		43,40%	0,01%	0,05%	40,90%	0,01%	0,02%	39,80%	0,01%	0,03%
0	2	0	0	0	0		39,60%	0,01%	0,05%	31,60%	0,01%	0,02%	34,40%	0,01%	0,03%
0	3	0	0	0	0		37,20%	0,02%	0,04%	24,00%	0,02%	0,02%	29,00%	0,02%	0,03%
0	4	0	0	0	0		34,00%	0,03%	0,04%	15,90%	0,03%	0,02%	23,70%	0,03%	0,02%
0	5	0	0	0	0		29,80%	0,03%	0,04%	11,20%	0,03%	0,01%	18,10%	0,03%	0,02%
0	0	0	0	0	0		50,40%	0,00%	0,02%	50,20%	0,00%	0,01%	50,00%	0,00%	0,01%
0	0	1	0	0	0		45,30%	0,00%	0,02%	37,90%	0,00%	0,01%	41,70%	0,00%	0,01%
0	0	2	0	0	0		41,10%	0,01%	0,02%	26,90%	0,01%	0,01%	34,30%	0,01%	0,01%
0	0	3	0	0	0		37,00%	0,01%	0,02%	18,80%	0,01%	0,01%	28,10%	0,01%	0,01%
0	0	4	0	0	0		32,30%	0,01%	0,02%	11,30%	0,01%	0,01%	21,60%	0,01%	0,01%
0	0	5	0	0	0		28,30%	0,02%	0,02%	7,70%	0,02%	0,01%	15,80%	0,02%	0,01%
0	0	0	0	0	0		75,30%	0,00%	0,02%	93,50%	0,00%	0,01%	82,40%	0,00%	0,02%
0	0	0	1	0	0		23,60%	0,03%	0,01%	3,90%	0,03%	0,00%	12,70%	0,03%	0,01%
0	0	0	2	0	0		8,60%	0,04%	0,01%	0,00%	0,04%	----	0,10%	0,04%	0,00%
0	0	0	3	0	0		7,50%	0,05%	0,01%	0,00%	0,05%	----	0,00%	0,05%	----
0	0	0	4	0	0		6,40%	0,05%	0,01%	0,00%	0,05%	----	0,00%	0,05%	----
0	0	0	5	0	0		5,60%	0,05%	0,01%	0,00%	0,05%	----	0,00%	0,05%	----
0	0	0	0	0	0		54,20%	0,00%	0,04%	58,40%	0,00%	0,02%	55,80%	0,00%	0,02%
0	0	0	0	1	0		30,20%	0,03%	0,03%	9,60%	0,03%	0,01%	16,70%	0,03%	0,01%
0	0	0	0	2	0		17,40%	0,05%	0,02%	0,20%	0,05%	0,00%	4,20%	0,05%	0,01%
0	0	0	0	3	0		8,50%	0,07%	0,02%	0,00%	0,07%	----	0,50%	0,07%	0,01%
0	0	0	0	4	0		6,10%	0,08%	0,02%	0,00%	0,08%	----	0,20%	0,08%	0,00%
0	0	0	0	5	0		3,70%	0,09%	0,02%	0,00%	0,09%	----	0,00%	0,09%	----
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	1		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	2		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	3		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	4		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	5		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		51,40%	0,00%	0,34%	50,60%	0,00%	0,15%	52,00%	0,00%	0,21%
1	1	1	1	1	1		38,70%	0,12%	0,31%	25,80%	0,12%	0,11%	34,90%	0,12%	0,16%
2	2	2	2	2	2		30,50%	0,22%	0,28%	11,70%	0,22%	0,09%	21,20%	0,22%	0,14%
3	3	3	3	3	3		24,10%	0,30%	0,26%	5,10%	0,30%	0,08%	13,30%	0,30%	0,12%
4	4	4	4	4	4		19,40%	0,38%	0,24%	1,70%	0,38%	0,09%	6,80%	0,38%	0,12%
5	5	5	5	5	5		15,90%	0,44%	0,22%	1,00%	0,44%	0,06%	4,10%	0,44%	0,11%

Tabela 12 – Simulação de Monte Carlo da classe 15P-30T-45S- desvio 10%.

							desvio = 10%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		50,00%	0,00%	0,23%	51,00%	0,00%	0,09%	49,30%	0,00%	0,14%
1	0	0	0	0	0		46,30%	0,02%	0,22%	41,20%	0,02%	0,08%	44,40%	0,02%	0,13%
2	0	0	0	0	0		43,00%	0,05%	0,21%	32,40%	0,05%	0,08%	39,10%	0,05%	0,12%
3	0	0	0	0	0		39,40%	0,07%	0,21%	26,10%	0,07%	0,08%	33,60%	0,07%	0,11%
4	0	0	0	0	0		37,30%	0,09%	0,19%	20,30%	0,09%	0,07%	29,60%	0,09%	0,11%
5	0	0	0	0	0		34,20%	0,12%	0,19%	16,00%	0,12%	0,07%	25,20%	0,12%	0,10%
0	0	0	0	0	0		40,30%	0,00%	0,04%	22,70%	0,00%	0,01%	33,90%	0,00%	0,02%
0	1	0	0	0	0		49,00%	0,00%	0,04%	46,20%	0,00%	0,02%	46,60%	0,00%	0,03%
0	2	0	0	0	0		46,60%	0,01%	0,04%	39,10%	0,01%	0,01%	42,90%	0,01%	0,02%
0	3	0	0	0	0		44,10%	0,01%	0,04%	32,30%	0,01%	0,01%	39,10%	0,01%	0,02%
0	4	0	0	0	0		40,60%	0,01%	0,04%	25,50%	0,01%	0,01%	34,90%	0,01%	0,02%
0	5	0	0	0	0		37,50%	0,02%	0,04%	19,40%	0,02%	0,01%	31,50%	0,02%	0,02%
0	0	0	0	0	0		51,00%	0,00%	0,01%	53,20%	0,00%	0,00%	49,90%	0,00%	0,01%
0	0	1	0	0	0		48,00%	0,00%	0,01%	46,50%	0,00%	0,00%	43,00%	0,00%	0,01%
0	0	2	0	0	0		45,80%	0,00%	0,01%	37,10%	0,00%	0,00%	37,70%	0,00%	0,01%
0	0	3	0	0	0		43,50%	0,00%	0,01%	29,30%	0,00%	0,00%	31,70%	0,00%	0,01%
0	0	4	0	0	0		40,10%	0,00%	0,01%	21,90%	0,00%	0,00%	28,00%	0,00%	0,01%
0	0	5	0	0	0		36,10%	0,01%	0,01%	16,70%	0,01%	0,00%	23,70%	0,01%	0,01%
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	1	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	2	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	3	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	4	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	5	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		49,00%	0,00%	0,02%	49,10%	0,00%	0,01%	50,30%	0,00%	0,01%
0	0	0	0	1	0		28,10%	0,01%	0,01%	9,30%	0,01%	0,00%	17,00%	0,01%	0,01%
0	0	0	0	2	0		12,00%	0,03%	0,01%	0,40%	0,03%	0,00%	2,10%	0,03%	0,00%
0	0	0	0	3	0		6,00%	0,03%	0,01%	0,00%	0,03%	----	0,10%	0,03%	0,00%
0	0	0	0	4	0		3,90%	0,04%	0,01%	0,00%	0,04%	----	0,00%	0,04%	----
0	0	0	0	5	0		2,70%	0,04%	0,01%	0,00%	0,04%	----	0,00%	0,04%	----
0	0	0	0	0	0		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	1		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	2		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	3		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	4		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	5		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	0		51,00%	0,00%	0,23%	49,40%	0,00%	0,10%	49,70%	0,00%	0,14%
1	1	1	1	1	1		45,90%	0,04%	0,21%	34,20%	0,04%	0,09%	40,30%	0,04%	0,13%
2	2	2	2	2	2		39,40%	0,08%	0,20%	23,40%	0,08%	0,08%	30,70%	0,08%	0,12%
3	3	3	3	3	3		34,70%	0,12%	0,18%	15,80%	0,12%	0,07%	24,80%	0,12%	0,11%
4	4	4	4	4	4		30,40%	0,15%	0,18%	10,30%	0,15%	0,06%	20,40%	0,15%	0,09%
5	5	5	5	5	5		27,10%	0,18%	0,16%	7,00%	0,18%	0,05%	16,40%	0,18%	0,08%

Tabela 13 – Simulação de Monte Carlo da classe 20P-40T-60S- desvio 10%.

							desvio = 10%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		49,20%	0,00%	1,51%	49,90%	0,00%	0,62%	51,50%	0,00%	0,87%
1	0	0	0	0	0		47,00%	0,12%	1,45%	43,00%	0,12%	0,58%	47,60%	0,12%	0,81%
2	0	0	0	0	0		43,90%	0,24%	1,42%	37,60%	0,24%	0,54%	43,00%	0,24%	0,77%
3	0	0	0	0	0		41,80%	0,36%	1,37%	32,40%	0,36%	0,49%	37,80%	0,36%	0,75%
4	0	0	0	0	0		39,60%	0,48%	1,32%	27,20%	0,48%	0,46%	34,00%	0,48%	0,70%
5	0	0	0	0	0		37,60%	0,60%	1,27%	21,70%	0,60%	0,44%	30,40%	0,60%	0,66%
0	0	0	0	0	0		46,60%	0,00%	0,29%	44,20%	0,00%	0,12%	45,90%	0,00%	0,17%
0	1	0	0	0	0		46,30%	0,02%	0,30%	43,60%	0,02%	0,12%	45,80%	0,02%	0,17%
0	2	0	0	0	0		44,10%	0,04%	0,29%	39,50%	0,04%	0,11%	42,40%	0,04%	0,16%
0	3	0	0	0	0		42,20%	0,06%	0,28%	34,70%	0,06%	0,10%	38,90%	0,06%	0,15%
0	4	0	0	0	0		39,80%	0,08%	0,28%	31,00%	0,08%	0,09%	34,90%	0,08%	0,15%
0	5	0	0	0	0		38,20%	0,10%	0,27%	26,00%	0,10%	0,09%	31,30%	0,10%	0,14%
0	0	0	0	0	0		47,10%	0,00%	0,13%	52,80%	0,00%	0,05%	50,10%	0,00%	0,08%
0	0	1	0	0	0		44,60%	0,01%	0,12%	45,80%	0,01%	0,05%	45,80%	0,01%	0,07%
0	0	2	0	0	0		42,50%	0,02%	0,12%	40,20%	0,02%	0,05%	41,70%	0,02%	0,07%
0	0	3	0	0	0		39,20%	0,03%	0,12%	34,80%	0,03%	0,04%	37,40%	0,03%	0,07%
0	0	4	0	0	0		36,70%	0,04%	0,11%	29,70%	0,04%	0,04%	33,20%	0,04%	0,07%
0	0	5	0	0	0		35,00%	0,05%	0,11%	24,70%	0,05%	0,04%	30,00%	0,05%	0,06%
0	0	0	0	0	0		48,40%	0,00%	0,00%	49,60%	0,00%	0,00%	47,90%	0,00%	0,00%
0	0	0	1	0	0		16,50%	0,00%	0,00%	0,10%	0,00%	0,00%	3,60%	0,00%	0,00%
0	0	0	2	0	0		15,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	3	0	0		15,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	4	0	0		15,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	5	0	0		15,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	0		51,10%	0,00%	0,06%	52,30%	0,00%	0,03%	48,80%	0,00%	0,04%
0	0	0	0	1	0		19,30%	0,07%	0,04%	1,50%	0,07%	0,01%	5,90%	0,07%	0,01%
0	0	0	0	2	0		11,40%	0,09%	0,04%	0,00%	0,09%	----	0,40%	0,09%	0,00%
0	0	0	0	3	0		9,60%	0,10%	0,03%	0,00%	0,10%	----	0,00%	0,10%	----
0	0	0	0	4	0		7,40%	0,11%	0,03%	0,00%	0,11%	----	0,00%	0,11%	----
0	0	0	0	5	0		6,00%	0,12%	0,03%	0,00%	0,12%	----	0,00%	0,12%	----
0	0	0	0	0	0		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	1		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	2		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	3		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	4		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	5		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	0		49,30%	0,00%	1,52%	49,90%	0,00%	0,65%	50,90%	0,00%	0,90%
1	1	1	1	1	1		44,90%	0,22%	1,43%	40,10%	0,22%	0,55%	43,50%	0,22%	0,81%
2	2	2	2	2	2		40,40%	0,40%	1,41%	32,90%	0,40%	0,48%	37,60%	0,40%	0,74%
3	3	3	3	3	3		38,00%	0,56%	1,33%	25,20%	0,56%	0,44%	31,90%	0,56%	0,70%
4	4	4	4	4	4		35,10%	0,72%	1,27%	18,70%	0,72%	0,41%	27,00%	0,72%	0,65%
5	5	5	5	5	5		32,20%	0,88%	1,22%	13,20%	0,88%	0,39%	22,60%	0,88%	0,61%

Analisando o conjunto de Tabelas 10 a 13 pode-se observar a robustez das soluções obtidas pelo modelo RSSDSC, apresentadas na Seção 5.3.1, para os 324.000 exemplares analisados. Os incrementos das medidas de desempenho PR e AR são sempre menores do que o desvio dos parâmetros incertos e a medida Risco sempre decai, à medida que mais proteção é oferecida ao modelo, chegando a valores considerados relativamente baixos mesmo para os budgets de incerteza variando até 5 apenas. Este

*trade-off* entre estas medidas de desempenho (PR x Risco), mostra as vantagens de se utilizar a abordagem de OR no apoio à tomada de decisão.

Também se pode observar que a OR promoveu soluções muito satisfatórias, não onerando significativamente os valores das soluções, quando os parâmetros foram perturbados no desvio controlado  $[\hat{\psi} - \psi, \hat{\psi} + \psi]$ .

Um último ponto que também deve ser levado em consideração é que apesar das variáveis aleatórias possuírem diferentes comportamentos de acordo com cada distribuição de probabilidade, a abordagem considerada na modelagem do RSSDSC permanece válida, pois não houve mudanças de comportamento drásticas nas soluções e as conclusões obtidas se mantêm.

Realizando uma análise por classe de exemplares, pode-se observar que:

- Classe 5P-10T-15S: analisando os custos individualmente, quando o desvio está em 10%, o maior preço pago pela robustez é fornecido pelo custo de compra atingindo o intervalo de 0,21% a 0,81% nas três distribuições. O segundo maior preço pago pela robustez é fornecido pelo custo no atraso de entrega atingindo o intervalo de 0,23% a 0,75% nas três distribuições. Isto ocorreu, pois, o parâmetro está diretamente ligado à manutenção do nível de serviço, que foi fixado em 95% para todos os testes computacionais deste trabalho. Quando o desvio é aumentado para 25% (ver tabelas no Apêndice B), a situação se mantém, porém, o nível de oneração no preço da robustez sobe para 0,52% a 2,12% quando o custo de compra é perturbado e 0,48% a 1,76%, quando o custo no atraso na entrega é perturbado. Quando o desvio atinge o seu valor máximo (50%), as soluções são mais oneradas, variando em um intervalo de 1,01% a 4,09% quando o custo de compra é perturbado e 0,87% a 2,96% quando o custo no atraso na entrega é perturbado. Quando todos os custos são avaliados foi realizada uma análise adicional. Foi verificado se a soma dos preços pagos pelas robustezes dos testes dos parâmetros individuais é exatamente igual ao preço da robustez pago quando todos os custos são analisados simultaneamente indo para o pior caso, esta análise foi realizada para conhecermos qual parâmetro está onerando em maior peso o valor da função objetivo. Para exemplificar esta situação, considere  $\Gamma^{\varphi} = 1$  para todos os casos quando os testes foram realizados com os parâmetros indo para o pior caso

separadamente, e o desvio foi considerado igual a o valor de 10%, os preços da robustez apresentadas na Tabela 10 são: 0,21%, 0,02%, 0,01%, 0,10% e 0,0% respectivamente. A soma de todos estes resultados individuais é equivalente a 0,57% que excede em 0,1% (0,56%) o valor obtido pela medida de desempenho PR quando todos os custos são analisados simultaneamente e apenas um parâmetro de cada custo pode ir para o pior caso (esta análise é análoga para as demais classes). E a situação se mantém quando  $\Gamma^\varphi > 1$ , de modo que as soluções vão melhorando sucessivamente, ficando menos custosas a cada variável indo para o pior caso, ou seja, quando  $\Gamma^\varphi = 2, 3$  e 4 a solução melhora 0,03%, e quando  $\Gamma^\varphi = 5$ , a solução melhora 0,02%. Já quando o desvio está em 25%, a situação se mantém; quando  $\Gamma^\varphi = 1$  a solução melhora 0,06%, quando  $\Gamma^\varphi = 2, 3$  e 4 a solução melhora 0,09%, quando  $\Gamma^\varphi = 5$ , a solução melhora 0,08%. E quando o desvio atinge o valor de 50%, quando  $\Gamma^\varphi = 1, 2$ , a solução melhora 0,09% e quando  $\Gamma^\varphi = 3$  a solução melhora 0,05%, quando  $\Gamma^\varphi = 4$  as soluções são idênticas, e por fim, quando  $\Gamma^\varphi = 5$  a solução melhora 0,08%.

- Classe 10P-20T-30S: quando os custos são analisados individualmente, o maior preço pela robustez é oferecido pelo custo de compra, permanecendo nos intervalos de 0,05% a 0,24% quando o desvio foi de 10%; 0,13% a 0,60% quando o desvio foi de 25% e 0,26% a 1,18% quando o desvio foi de 50%, respectivamente. Isto ocorreu pelo alto volume de demanda de produtos apresentado nesta classe, observando que este custo é diretamente proporcional à demanda de consumo, e como nesta classe o horizonte de planejamento foi estendido, este custo teve maior impacto nesta classe. O segundo maior preço pela robustez é pago pelo quando o custo para carregar estoque é perturbado, permanecendo no intervalo de 0,03% a 0,09%, 0,07% a 0,21% e 0,13% a 0,40% respectivamente. Esta situação ocorreu, pois nesta classe o número de períodos é superior aos tempos de entregas das MPs, então, torna-se vantajoso carregar estoques para demandas futuras em aversão ao pagamento de fretes (custo mais oneroso de toda a cadeia) em todos os horizontes de planejamento. Já quando todos os

custos são analisados simultaneamente, foi identificado que o somatório do preço da robustez de todos os custos incertos individuais, quando  $\Gamma^\varphi = 1$  e  $2$  foi exatamente igual ao valor obtido quando todos os foram avaliados simultaneamente. Quando  $\Gamma^\varphi = 3$ , a solução melhora 0,01%, quando  $\Gamma^\varphi = 4$ , a solução melhora 0,02% e quando  $\Gamma^\varphi = 5$ , a solução melhora 0,01%. Isso é justificado pela estabilização no aumento do valor de  $\Gamma^{dl}$  na medida de desempenho AR, quando o seu valor esteve no conjunto  $\Gamma^{dl} = \{2,3,4,5\}$  de acordo com a distribuição. A estabilização do parâmetro  $\Gamma^{h+}$ , no conjunto  $\{3,4,5\}$  também contribuiu para anulação do valor da medida de desempenho Risco nesta classe.

- Classe 15P-30T-45S: novamente, quando os custos são analisados individualmente, a maior relevância ocorre quando o parâmetro custo de compra é perturbado. O preço pago pela robustez permaneceu nos intervalos de: 0,02% a 0,12%; 0,06% a 0,28% e 0,12% a 0,54%, respectivamente. Quando todos os custos são analisados simultaneamente, a situação permanece análoga à classe anterior. Quando  $\Gamma^\varphi = 1$  e  $2$  foi exatamente igual ao valor obtido quando todos os foram avaliados simultaneamente. Quando  $\Gamma^\varphi = 3$ , a solução melhora 0,01%, e quando  $\Gamma^\varphi = 4$  e  $5$ , as soluções são idênticas. Nesta classe, a estabilização dos valores começa a ser influenciada quando os custos para carregar estoque em mãos e custo de estoque para atrasar entregas são perturbados. Sendo assim, as suas respectivas estabilizações se iniciam nos conjuntos  $\Gamma^{h+} = \{3, 4, 5\}$  e  $\Gamma^{h-} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ .
- Classe 20P-40T-60S: mais uma vez, quando os custos são analisados individualmente o maior preço pela robustez é promovido quando o custo de compra é perturbado. O preço pago pela robustez permaneceu nos intervalos de: 0,12% a 0,60%; 0,31% a 0,46% e 0,17% a 0,31%, respectivamente. O segundo maior preço pago foi alcançado quando o custo para carregar estoque foi perturbado, permanecendo no intervalo de: 0,7% a 0,12%; 0,17% a 0,28% e 0,25% a 0,38%, respectivamente. Quando todos os custos são analisados simultaneamente, foi identificado que o somatório do preço

da robustez de todos os custos incertos individuais foi exatamente igual ao valor obtido quando todos os foram avaliados simultaneamente em todas as ocorrências. Nesta classe a estabilização se inicia quando  $\Gamma^q \geq 2$ ,  $\Gamma^{h+} > 2$  e  $\Gamma^{h-} \geq 0$ .

## 6. Conclusões e próximos passos

Neste capítulo, são resumidos os principais resultados obtidos neste trabalho e discutidos os possíveis rumos para continuação desta pesquisa.

### 6.1 Conclusões

Este trabalho buscou apresentar soluções para tomadores de decisão, como gerentes, supervisores, coordenadores, analistas, entre outros, no que tange o problema de seleção de fornecedores, propondo modelos matemáticos que possam ser efetivos na prática. Por este motivo, o foco do trabalho foi contribuir tanto com o Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos Global, buscando modelar e analisar a maioria dos custos das três classes citadas por Holweg et. al. (2011) e Suri (2010), como também com a Pesquisa Operacional, buscando desenvolver e analisar modelos de otimização robusta para modelar o SSP.

Inicialmente foram propostos dois modelos determinísticos, onde o primeiro modelo teve a proposta de linearização do modelo de Ware et al. (2014) e o segundo modelo é uma extensão do primeiro, considerando controle de estoque, restrições de armazenagem e nível de atraso máximo de demanda. Além disso, foram propostas duas formulações robustas com incertezas nos custos e tempos de entrega para os dois modelos.

Os testes computacionais com os modelos determinísticos, apresentados na Seção 5.2, demonstram que o modelo SSDC é eficiente em diversos cenários, apesar de não representar fielmente um cenário real. Este ponto negativo se dá pela simplicidade considerada em seus conjuntos de restrições, não considerando todas as decisões importantes envolvidas no SSP como controle de estoque podendo carregar (ou atrasar) o estoque em excesso (ou em atraso), entre outras características.

Já o modelo SSDSC provou ser mais fiel em sua modelagem ao cenário real, pois incorpora restrições de controle de estoque e restrições físicas de armazenagem. Além disso, pode-se constatar que o modelo SSDSC obteve maior custo computacional em todos os experimentos, porém sempre alcançou soluções menos custosas que o modelo SSDC em todos os cenários analisados. Estes pontos provam que o modelo SSDSC é mais interessante que o modelo SSDC. Esta afirmação é justificada pelo ganho que o

modelo SSDSC é capaz de alcançar, se utilizando das decisões de estocar MP com custos menores para atender horizontes de planejamentos futuros.

Os testes computacionais com o modelo RSSDSC com incerteza nos custos e tempos de entrega, apresentados na Seção 5.3.1 deste trabalho, demonstram que a abordagem de OR potencializa o nível de robustez das soluções em aversão aos riscos, quando parâmetros incertos estão envolvidos. Isto pode ser comprovado pelo nível de oneração promovida nos valores das soluções quando uma proteção à incerteza foi empregada, pois o incremento no valor ótimo da função objetivo no pior caso sempre é menor que o desvio dos parâmetros incertos. Isso demonstra que o modelo é robusto suficientemente à variação destes custos, apresentando soluções satisfatórias do ponto de vista financeiro.

Também se pode concluir que apesar dos custos de compra e atraso unitários dos produtos não serem os de maior valor na transação intercontinental, os mesmos podem comprometer todo o desempenho da cadeia na operação, uma vez que, o custo de compra está diretamente ligado proporcionalmente a unidades a serem compradas e o custo unitário de atraso está diretamente ligado à manutenção do nível de serviço, sendo portanto os custos mais sensíveis nos cenários analisados.

As simulações utilizando o método Monte Carlo, expandindo o universo amostral em distribuições de probabilidades distintas, apresentaram que apesar do comportamento das variáveis aleatórias serem diferentes em função das distribuições de probabilidades empregadas em cada cenário, não houve uma mudança de comportamento acentuado nas soluções. Em função disso, se pode inferir que as simulações corroboram e promovem um maior suporte a esta conclusão, uma vez que, a população de amostras foi expandida e as conclusões se mantiveram sem grandes alterações dos achados da Seção 5.3.2.

Durante as simulações, se pode observar que na classe 10P-20T-30S quando mais que duas variáveis aleatórias indo para o pior caso no custo de atraso, a solução se estabilizava. Assim como na classe 15P-30T-45S se pode observar o mesmo efeito quando alguma variável aleatória indo para o pior caso era permitida no custo de estoque em mãos em atraso e quando três ou mais variáveis aleatórias eram permitidas no custo de carregamento de estoque. Por fim, na classe 20P-40T-60S se observou que as estabilizações foram atendidas quando  $\Gamma^{h-} \geq 0$ ,  $\Gamma^{h+} > 2$  e  $\Gamma^q > 2$  demonstrando que o modelo conseguiu atingir a estabilidade na oneração no valor da função objetivo

com poucas variáveis aleatórias indo para o pior caso eram permitidas, provando a eficácia da abordagem OR na aplicação utilizada neste trabalho.

Cabe ressaltar que os modelos aqui propostos permitem considerar e analisar os custos citados por Holweg et. al. (2011) como: variações de câmbio, aumento nos combustíveis envolvidos na cadeia (petróleo, gás e taxa de emissão de carbono), custos com viagens não programadas para prospecção e pós-venda, e de perda de capital intelectual. Da mesma forma, é possível tratar os seguintes custos abordados por Suri (2010): custo de manter escritórios e agências locais para manter contato e negociar com os fornecedores dispersos pelo globo, custos de obsolescência devido a alterações de projeto não alinhadas com o *lead time* de entrega e custo de vendas perdidas em função de prazos não respeitados e problemas de qualidade.

Para isso, basta considerá-los como componentes do custo unitário operacional do fornecedor ( $q_{tsp}$ ) e do custo de atraso do fornecedor ( $l_{tsp}$ ). Como estes dois parâmetros são voláteis e altamente influenciados por diversas variáveis atuantes na cadeia logística, se tornam complexas as atividades de estimação e apropriação correta destes valores nos produtos ou serviços. Por este motivo, esses custos não haviam ainda sido matematicamente avaliados na literatura da área de maneira efetiva favorecendo a aplicação prática, a contribuição da presente pesquisa buscou preencher este *gap* e contribuindo com o estado da arte.

## 6.2 Próximos Passos

Primeiramente espera-se realizar futuramente uma análise dos desempenhos dos modelos em uma aplicação prática, a fim de avaliar quanto as soluções e as decisões dos modelos se alteram. Nesta análise, será avaliada a estratégia da estimação dos parâmetros relacionados aos custos escondidos, uma vez que, estes custos são considerados em muitas ocasiões como intangíveis. Também será avaliado o convencimento dos tomadores de decisão em relação aos valores das penalidades aplicadas aos custos na função objetivo. Por fim, o último ponto a ser considerado é que possivelmente no mundo prático, os tomadores de decisão elejam outras fontes de incertezas que não foram abordadas neste trabalho, como incertezas na capacidade de fornecimento, demanda, entre outros. Então, novas formulações serão propostas para o atendimento destas demandas.

Em segundo lugar, espera-se desenvolver modelos que contemplem um custo importante mencionado por Holweg et. al. (2011) devido a carregamentos urgentes não programados para atender pedidos urgentes, conhecidos como *rush orders*. Também é relevante, incluir o custo apontado por Suri (2010) de alterações de projeto não planejadas, gerando estoque obsoleto, tanto de produtos acabados, quanto de itens intermediários e MPs.

Em terceiro lugar, pôde-se constatar nos testes apresentados na Seção 5.2.3 deste trabalho que a capacidade de fornecimento de entrega dos fornecedores é um parâmetro crítico ao modelo. Com isso, uma proteção para estes conjuntos de restrições se faz necessária para prover robustez às soluções. Então, faz-se interessante propor um modelo robusto para suprir esta necessidade, podendo ser derivado do modelo SSDSC.

Por fim, ao longo dos testes computacionais pôde-se observar que outro parâmetro crítico aos modelos de SSP é a incerteza na demanda. Como um dos enfoques deste trabalho está em transações intercontinentais, se faz necessário realizar toda a parte de negociação de compra dos produtos, muitos períodos de planejamento à frente, em função de toda a logística de entrega das MPs. Com isso, podem ser propostas outras formulações robustas que buscarão proteger as soluções contra esta variação.



## APÊNDICE A - Modelo de Ware et al. (MIPNL)

O modelo de Ware et al. (2014) é um MINLP definido em um cenário multi-fornecedores, multi-itens e multi-períodos, cuja função objetivo consiste em custos de transporte (fixos em todo o horizonte), custos de aquisição, custo operacional e o tempo médio de atraso na entrega dos fornecedores. Para a definição deste modelo, considere os seguintes conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão:

### Conjuntos

- T Conjunto de períodos de tempo;
- S Conjunto de fornecedores;
- P Conjunto de produtos;

### Parâmetros

- $cc_{tsp}$  Custo unitário de compra do produto  $p$  no fornecedor  $s$  e período  $t$ ;
- $ct_{ts}$  Custo total para transporte de um produto (independentemente de qual tipo) vindo do fornecedor  $s$  no período  $t$ ;
- $C_{tsp}$  Capacidade do fornecedor  $s$  para fornecer o produto  $p$  no período  $t$ ;
- $d_{tp}$  Demanda do produto  $p$  no período  $t$ ;
- $q_{tsp}$  Custo unitário operacional do fornecedor  $s$  para o produto  $p$  no período  $t$ ;
- $l_{tsp}$  Custo unitário de atraso do fornecedor  $s$  para o produto  $p$  no período  $t$ ;
- $dl_{tsp}$  Tempo estimado de atraso do fornecedor  $s$  para o produto  $p$  no período  $t$ ;
- $\theta_{tsp}$  Nível de qualidade do fornecedor  $s$  para o produto  $p$  no período  $t$ ;

### Variáveis

- $X_{tsp}$  Quantidade do produto  $p$ , obtida no fornecedor  $s$ , no período  $t$ ,
- $Y_{ts}$  Variável binária igual a 1 se, e somente se, o fornecedor  $s$  é utilizado no período  $t$ ;

A partir dessas definições, o modelo de Seleção de Fornecedores com Controle de Demanda Não-Linear é dado por:

$$\begin{aligned} \min \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} cc_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} ct_{ts} Y_{ts} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} (1 - \theta_{tsp}) q_{tsp} X_{tsp} Y_{ts} \\ + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} l_{tsp} dl_{tsp} X_{tsp} Y_{ts} \end{aligned} \quad (7.1)$$

s. a

$$X_{tsp} \leq C_{tsp} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S, \quad \forall p \in P \quad (7.2)$$

$$\sum_{s \in S} X_{tsp} \leq d_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (7.3)$$

$$\sum_{s \in S} X_{tsp} Y_{ts} = d_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (7.4)$$

$$\theta_{tsp} \geq \theta_0 \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S, \quad \forall p \in P \quad (7.5)$$

$$Y_{ts} \in \{0,1\} \quad \forall s \in S \quad (7.6)$$

$$X_{tsp} \geq 0 \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S, \quad \forall p \in P \quad (7.7)$$

A função objetivo (7.1) consiste em minimizar o custo total do sistema, dado pelo custo de compras dos produtos, custo fixo de transporte para todos os fornecedores, custo de atraso na entrega do produto de qualquer fornecedor e custo de penalização devido à estimativa de atraso na entrega dos produtos. As restrições (3.2) impõem a capacidade de cada fornecedor para cada produto. As restrições (3.3) asseguram que a aquisição de cada produto não irá ultrapassar a sua respectiva demanda em cada período. As restrições (3.4) garantem a satisfação da demanda e que pelo menos um fornecedor seja selecionado em cada período. Se o fornecedor  $s$  for selecionado para fornecer o produto  $p$  no período  $t$ , então  $Y_{ts}$  deverá assumir o valor 1; caso contrário, assumirá o valor 0. As restrições (7.5) impõem a seleção de apenas fornecedores que fornecem os produtos ao nível mínimo de qualidade estabelecido pela organização. As restrições (3.5) e (7.7) impõem o domínio das variáveis do problema.

O modelo apresentado possui expressões não-lineares dadas pela multiplicação de duas variáveis de decisão ( $X_{tsp} Y_{ts}$ ) nas restrições (7.4) e na função objetivo (7.1). Com isso, optou-se por linearizá-lo para ser possível sua resolução por meio de softwares de otimização linear de propósito geral como o GAMS/CPLEX.

Para a linearização, foi necessário eliminar a multiplicação das variáveis, por meio da criação de um novo conjunto de restrições sem perda de generalidade. Essas

restrições foram criadas para garantir que a lógica de funcionamento da multiplicação destas variáveis fosse mantida. Foi criado um conjunto de restrições de modo a garantir que todas as demandas sejam satisfeitas, dado por:

$$\sum_{p \in P} X_{tsp} \leq MY_{ts} \quad \forall t \in T, \quad \forall s \in S \quad (7.8)$$

Esse novo conjunto de restrições necessitou da inserção de um novo parâmetro  $M$ . Este parâmetro é dado por um número suficientemente grande, tornando-se um limitante para a variável  $X_{tsp}$ . Como a variável  $Y_{ts}$  é utilizada no segundo somatório da função objetivo e todas as demandas possuem valores que são positivos, o lado direito da desigualdade em (7.8) força que a variável  $Y_{ts}$  assuma o valor 1 somente quando a variável  $X_{tsp}$  assumir valores positivos. Essas novas restrições (7.8) assumem o lugar das restrições (3.4) e alteram a função objetivo para uma nova função (7.9) sem a variável  $Y_{ts}$  nos terceiros e quarto termos, dada por:

$$\begin{aligned} \min \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} cc_{tsp} X_{tsp} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S}} ct_{ts} Y_{ts} + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} (1 - \theta_{tsp}) q_{tsp} X_{tsp} \\ + \sum_{\substack{t \in T \\ s \in S \\ p \in P}} l_{tsp} dl_{tsp} X_{tsp} \end{aligned} \quad (7.9)$$

Para que o modelo estivesse completo foi necessária mais uma adaptação. Como as novas restrições (7.8) não garantem que toda a demanda fosse atendida, foi necessário alterar as restrições (3.3), impondo esse requisito. Com isso, foram criadas novas restrições que substituem as restrições (3.3):

$$\sum_{s \in S} X_{tsp} \leq d_{tp} \quad \forall t \in T, \quad \forall p \in P \quad (7.10)$$

## APÊNDICE B - Simulação de Monte Carlo do modelo RSSDSC com incerteza nos custos

Tabela 14 - Simulação de Monte Carlo da classe 5P-10T-15S- desvio 25%.

							desvio = 25%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		52,10%	0,00%	1,63%	54,00%	0,00%	0,71%	51,80%	0,00%	0,91%
1	0	0	0	0	0		41,60%	0,52%	1,45%	29,40%	0,52%	0,55%	34,20%	0,52%	0,73%
2	0	0	0	0	0		33,50%	0,96%	1,29%	14,20%	0,96%	0,46%	19,40%	0,96%	0,69%
3	0	0	0	0	0		26,40%	1,36%	1,19%	6,60%	1,36%	0,36%	11,90%	1,36%	0,61%
4	0	0	0	0	0		20,50%	1,75%	1,10%	2,40%	1,75%	0,32%	7,10%	1,75%	0,54%
5	0	0	0	0	0		15,60%	2,12%	1,02%	0,90%	2,12%	0,31%	3,40%	2,12%	0,56%
0	0	0	0	0	0		62,50%	0,00%	0,28%	84,40%	0,00%	0,15%	73,50%	0,00%	0,18%
0	1	0	0	0	0		40,90%	0,06%	0,22%	33,40%	0,06%	0,08%	36,20%	0,06%	0,11%
0	2	0	0	0	0		33,80%	0,11%	0,20%	19,40%	0,11%	0,07%	25,00%	0,11%	0,09%
0	3	0	0	0	0		28,60%	0,17%	0,18%	9,30%	0,17%	0,06%	15,50%	0,17%	0,08%
0	4	0	0	0	0		22,50%	0,22%	0,17%	3,80%	0,22%	0,05%	8,90%	0,22%	0,07%
0	5	0	0	0	0		17,50%	0,27%	0,15%	1,30%	0,27%	0,05%	4,90%	0,27%	0,06%
0	0	0	0	0	0		49,10%	0,00%	0,09%	51,50%	0,00%	0,04%	50,20%	0,00%	0,05%
0	0	1	0	0	0		40,00%	0,03%	0,08%	29,30%	0,03%	0,03%	34,10%	0,03%	0,04%
0	0	2	0	0	0		30,80%	0,05%	0,08%	12,30%	0,05%	0,02%	20,20%	0,05%	0,04%
0	0	3	0	0	0		22,80%	0,08%	0,07%	5,00%	0,08%	0,02%	12,30%	0,08%	0,03%
0	0	4	0	0	0		18,00%	0,10%	0,07%	1,30%	0,10%	0,02%	6,50%	0,10%	0,02%
0	0	5	0	0	0		13,40%	0,13%	0,06%	0,40%	0,13%	0,01%	2,30%	0,13%	0,03%
0	0	0	0	0	0		73,70%	0,00%	0,81%	96,00%	0,00%	0,52%	88,20%	0,00%	0,59%
0	0	0	1	0	0		49,90%	0,48%	0,60%	50,40%	0,48%	0,24%	51,80%	0,48%	0,34%
0	0	0	2	0	0		30,80%	0,85%	0,48%	10,20%	0,85%	0,13%	19,80%	0,85%	0,23%
0	0	0	3	0	0		16,30%	1,22%	0,39%	0,70%	1,22%	0,07%	4,10%	1,22%	0,19%
0	0	0	4	0	0		7,20%	1,53%	0,37%	0,00%	1,53%	----	1,10%	1,53%	0,09%
0	0	0	5	0	0		4,60%	1,76%	0,29%	0,00%	1,76%	----	0,00%	1,76%	----
0	0	0	0	0	0		55,00%	0,00%	0,30%	52,50%	0,00%	0,13%	52,90%	0,00%	0,18%
0	0	0	0	1	0		27,00%	0,25%	0,23%	6,20%	0,25%	0,06%	15,00%	0,25%	0,09%
0	0	0	0	2	0		11,50%	0,47%	0,17%	0,00%	0,47%	----	1,10%	0,47%	0,06%
0	0	0	0	3	0		5,90%	0,60%	0,16%	0,00%	0,60%	----	0,10%	0,60%	0,08%
0	0	0	0	4	0		3,20%	0,70%	0,15%	0,00%	0,70%	----	0,00%	0,70%	----
0	0	0	0	5	0		2,60%	0,75%	0,13%	0,00%	0,75%	----	0,00%	0,75%	----
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	1		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	2		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	3		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	4		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	5		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		57,30%	0,00%	1,93%	69,20%	0,00%	0,91%	62,10%	0,00%	1,15%
1	1	1	1	1	1		35,50%	1,27%	1,46%	18,50%	1,27%	0,47%	23,70%	1,27%	0,75%
2	2	2	2	2	2		19,10%	2,36%	1,19%	1,20%	2,36%	0,37%	5,90%	2,36%	0,57%
3	3	3	3	3	3		9,10%	3,34%	1,02%	0,10%	3,34%	0,43%	0,90%	3,34%	0,46%
4	4	4	4	4	4		4,50%	4,22%	0,82%	0,00%	4,22%	----	0,10%	4,22%	0,91%
5	5	5	5	5	5		1,90%	4,95%	0,71%	0,00%	4,95%	----	0,10%	4,95%	0,21%

Tabela 15 – Simulação de Monte Carlo da classe 5P-10T-15S- desvio 50%.

							desvio = 50%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		51,10%	0,00%	2,96%	55,00%	0,00%	1,35%	52,80%	0,00%	1,86%
1	0	0	0	0	0		41,10%	1,01%	2,67%	30,40%	1,01%	1,00%	35,00%	1,01%	1,53%
2	0	0	0	0	0		32,20%	1,84%	2,55%	14,50%	1,84%	0,86%	23,60%	1,84%	1,23%
3	0	0	0	0	0		26,00%	2,63%	2,34%	5,80%	2,63%	0,77%	13,40%	2,63%	1,12%
4	0	0	0	0	0		20,10%	3,37%	2,18%	2,10%	3,37%	0,81%	7,60%	3,37%	1,02%
5	0	0	0	0	0		15,60%	4,09%	2,00%	1,00%	4,09%	0,54%	3,80%	4,09%	1,04%
0	0	0	0	0	0		55,20%	0,00%	0,48%	63,00%	0,00%	0,22%	62,80%	0,00%	0,31%
0	1	0	0	0	0		40,30%	0,11%	0,41%	29,50%	0,11%	0,15%	39,30%	0,11%	0,23%
0	2	0	0	0	0		33,00%	0,22%	0,38%	16,50%	0,22%	0,13%	28,40%	0,22%	0,20%
0	3	0	0	0	0		25,70%	0,33%	0,37%	7,00%	0,33%	0,13%	17,60%	0,33%	0,17%
0	4	0	0	0	0		20,70%	0,44%	0,34%	3,00%	0,44%	0,12%	10,80%	0,44%	0,14%
0	5	0	0	0	0		16,30%	0,54%	0,31%	1,30%	0,54%	0,12%	6,20%	0,54%	0,10%
0	0	0	0	0	0		48,30%	0,00%	0,19%	49,00%	0,00%	0,07%	50,50%	0,00%	0,10%
0	0	1	0	0	0		39,60%	0,05%	0,18%	26,10%	0,05%	0,06%	33,80%	0,05%	0,09%
0	0	2	0	0	0		32,10%	0,11%	0,16%	12,30%	0,11%	0,04%	20,10%	0,11%	0,07%
0	0	3	0	0	0		25,00%	0,16%	0,15%	4,10%	0,16%	0,04%	11,10%	0,16%	0,07%
0	0	4	0	0	0		18,80%	0,21%	0,14%	1,30%	0,21%	0,03%	6,10%	0,21%	0,05%
0	0	5	0	0	0		14,20%	0,25%	0,13%	0,40%	0,25%	0,03%	2,60%	0,25%	0,05%
0	0	0	0	0	0		77,50%	0,00%	1,54%	92,30%	0,00%	0,92%	86,50%	0,00%	1,08%
0	0	0	1	0	0		53,70%	0,87%	1,14%	47,50%	0,87%	0,43%	49,60%	0,87%	0,63%
0	0	0	2	0	0		33,60%	1,61%	0,87%	8,00%	1,61%	0,26%	18,40%	1,61%	0,38%
0	0	0	3	0	0		20,90%	2,09%	0,77%	1,20%	2,09%	0,17%	5,90%	2,09%	0,29%
0	0	0	4	0	0		12,90%	2,54%	0,67%	0,00%	2,54%	----	1,10%	2,54%	0,28%
0	0	0	5	0	0		7,10%	2,96%	0,65%	0,00%	2,96%	----	0,30%	2,96%	0,21%
0	0	0	0	0	0		64,10%	0,00%	0,67%	77,70%	0,00%	0,33%	70,30%	0,00%	0,42%
0	0	0	0	1	0		36,20%	0,50%	0,48%	17,20%	0,50%	0,14%	25,50%	0,50%	0,22%
0	0	0	0	2	0		16,20%	0,93%	0,40%	0,30%	0,93%	0,07%	2,60%	0,93%	0,09%
0	0	0	0	3	0		9,40%	1,18%	0,34%	0,00%	1,18%	----	0,30%	1,18%	0,03%
0	0	0	0	4	0		7,10%	1,32%	0,29%	0,00%	1,32%	----	0,00%	1,32%	----
0	0	0	0	5	0		6,10%	1,40%	0,25%	0,00%	1,40%	----	0,00%	1,40%	----
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	1		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	2		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	3		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	4		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	5		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		61,20%	0,00%	3,25%	69,90%	0,00%	1,83%	66,10%	0,00%	2,36%
1	1	1	1	1	1		37,40%	2,45%	2,70%	19,30%	2,45%	1,01%	27,20%	2,45%	1,49%
2	2	2	2	2	2		21,20%	4,61%	2,08%	2,30%	4,61%	0,62%	7,50%	4,61%	1,05%
3	3	3	3	3	3		10,50%	6,34%	1,83%	0,20%	6,34%	1,05%	1,30%	6,34%	0,70%
4	4	4	4	4	4		5,10%	7,87%	1,47%	0,00%	7,87%	----	0,20%	7,87%	0,52%
5	5	5	5	5	5		2,20%	9,33%	1,01%	0,00%	9,33%	----	0,00%	9,33%	----

Tabela 16 – Simulação de Monte Carlo da classe 10P-20T-30S- desvio 25%.

							desvio = 25%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		49,90%	0,00%	0,84%	52,00%	0,00%	0,36%	53,10%	0,00%	0,51%
1	0	0	0	0	0		45,40%	0,13%	0,79%	42,10%	0,13%	0,30%	44,00%	0,13%	0,47%
2	0	0	0	0	0		41,10%	0,25%	0,76%	31,30%	0,25%	0,26%	35,50%	0,25%	0,45%
3	0	0	0	0	0		37,10%	0,37%	0,72%	21,60%	0,37%	0,23%	29,40%	0,37%	0,42%
4	0	0	0	0	0		32,60%	0,48%	0,69%	13,60%	0,48%	0,21%	23,20%	0,48%	0,40%
5	0	0	0	0	0		29,00%	0,60%	0,67%	9,20%	0,60%	0,18%	18,60%	0,60%	0,37%
0	0	0	0	0	0		52,20%	0,00%	0,15%	56,40%	0,00%	0,06%	51,60%	0,00%	0,08%
0	1	0	0	0	0		45,10%	0,02%	0,14%	40,80%	0,02%	0,05%	41,50%	0,02%	0,07%
0	2	0	0	0	0		41,40%	0,03%	0,13%	33,20%	0,03%	0,05%	33,90%	0,03%	0,07%
0	3	0	0	0	0		37,30%	0,05%	0,13%	25,00%	0,05%	0,04%	27,90%	0,05%	0,06%
0	4	0	0	0	0		33,30%	0,07%	0,13%	17,80%	0,07%	0,04%	22,80%	0,07%	0,06%
0	5	0	0	0	0		29,80%	0,09%	0,12%	11,40%	0,09%	0,04%	18,30%	0,09%	0,05%
0	0	0	0	0	0		53,20%	0,00%	0,06%	48,00%	0,00%	0,02%	51,60%	0,00%	0,03%
0	0	1	0	0	0		48,70%	0,01%	0,05%	38,20%	0,01%	0,02%	43,50%	0,01%	0,03%
0	0	2	0	0	0		42,80%	0,02%	0,05%	27,40%	0,02%	0,02%	35,90%	0,02%	0,03%
0	0	3	0	0	0		38,00%	0,02%	0,05%	20,70%	0,02%	0,02%	29,00%	0,02%	0,03%
0	0	4	0	0	0		33,80%	0,03%	0,05%	13,90%	0,03%	0,02%	23,10%	0,03%	0,02%
0	0	5	0	0	0		29,40%	0,04%	0,05%	9,30%	0,04%	0,01%	18,60%	0,04%	0,02%
0	0	0	0	0	0		82,40%	0,00%	0,05%	99,30%	0,00%	0,04%	95,80%	0,00%	0,04%
0	0	0	1	0	0		37,00%	0,05%	0,03%	19,70%	0,05%	0,01%	32,10%	0,05%	0,01%
0	0	0	2	0	0		16,10%	0,08%	0,03%	0,00%	0,08%	----	1,90%	0,08%	0,00%
0	0	0	3	0	0		14,10%	0,09%	0,02%	0,00%	0,09%	----	0,30%	0,09%	0,00%
0	0	0	4	0	0		12,40%	0,09%	0,02%	0,00%	0,09%	----	0,00%	0,09%	----
0	0	0	5	0	0		12,40%	0,09%	0,02%	0,00%	0,09%	----	0,00%	0,09%	----
0	0	0	0	0	0		56,70%	0,00%	0,09%	56,90%	0,00%	0,04%	55,00%	0,00%	0,06%
0	0	0	0	1	0		30,60%	0,07%	0,07%	9,40%	0,07%	0,02%	17,90%	0,07%	0,03%
0	0	0	0	2	0		17,20%	0,12%	0,06%	0,60%	0,12%	0,02%	4,90%	0,12%	0,02%
0	0	0	0	3	0		10,90%	0,16%	0,05%	0,10%	0,16%	0,00%	0,50%	0,16%	0,02%
0	0	0	0	4	0		6,90%	0,19%	0,04%	0,00%	0,19%	----	0,10%	0,19%	0,02%
0	0	0	0	5	0		4,20%	0,21%	0,04%	0,00%	0,21%	----	0,00%	0,21%	----
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	1		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	2		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	3		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	4		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	5		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		52,30%	0,00%	0,86%	55,50%	0,00%	0,37%	54,20%	0,00%	0,54%
1	1	1	1	1	1		42,40%	0,28%	0,77%	30,60%	0,28%	0,28%	37,30%	0,28%	0,44%
2	2	2	2	2	2		33,90%	0,52%	0,70%	15,30%	0,52%	0,21%	23,50%	0,52%	0,40%
3	3	3	3	3	3		27,00%	0,71%	0,68%	6,20%	0,71%	0,18%	15,80%	0,71%	0,36%
4	4	4	4	4	4		21,90%	0,90%	0,63%	2,30%	0,90%	0,17%	10,30%	0,90%	0,31%
5	5	5	5	5	5		16,80%	1,07%	0,62%	1,10%	1,07%	0,11%	6,70%	1,07%	0,27%

Tabela 17 – Simulação de Monte Carlo da classe 10P-20T-30S- desvio 50%.

							desvio = 50%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		48,60%	0,00%	1,20%	53,70%	0,00%	0,70%	49,30%	0,00%	0,94%
1	0	0	0	0	0		43,60%	0,26%	1,17%	41,30%	0,26%	0,62%	42,30%	0,26%	0,88%
2	0	0	0	0	0		39,70%	0,49%	1,14%	31,70%	0,49%	0,53%	35,80%	0,49%	0,79%
3	0	0	0	0	0		35,90%	0,72%	1,11%	22,40%	0,72%	0,47%	29,40%	0,72%	0,71%
4	0	0	0	0	0		32,10%	0,95%	1,06%	14,20%	0,95%	0,44%	21,80%	0,95%	0,71%
5	0	0	0	0	0		27,80%	1,18%	1,02%	9,20%	1,18%	0,40%	16,30%	1,18%	0,69%
0	0	0	0	0	0		48,60%	0,00%	0,27%	44,20%	0,00%	0,11%	46,00%	0,00%	0,15%
0	1	0	0	0	0		46,90%	0,03%	0,26%	38,80%	0,03%	0,10%	42,90%	0,03%	0,14%
0	2	0	0	0	0		43,60%	0,07%	0,25%	30,70%	0,07%	0,09%	36,70%	0,07%	0,13%
0	3	0	0	0	0		39,70%	0,10%	0,24%	24,00%	0,10%	0,08%	30,20%	0,10%	0,12%
0	4	0	0	0	0		36,00%	0,14%	0,22%	16,30%	0,14%	0,07%	24,00%	0,14%	0,11%
0	5	0	0	0	0		32,50%	0,17%	0,21%	11,40%	0,17%	0,06%	18,60%	0,17%	0,10%
0	0	0	0	0	0		49,30%	0,00%	0,11%	50,80%	0,00%	0,05%	49,00%	0,00%	0,07%
0	0	1	0	0	0		45,40%	0,02%	0,11%	39,20%	0,02%	0,04%	41,90%	0,02%	0,06%
0	0	2	0	0	0		40,10%	0,03%	0,10%	27,90%	0,03%	0,04%	35,90%	0,03%	0,06%
0	0	3	0	0	0		35,80%	0,05%	0,10%	19,30%	0,05%	0,03%	28,20%	0,05%	0,05%
0	0	4	0	0	0		30,80%	0,07%	0,10%	12,30%	0,07%	0,03%	22,50%	0,07%	0,05%
0	0	5	0	0	0		26,70%	0,08%	0,09%	7,20%	0,08%	0,03%	17,30%	0,08%	0,05%
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,11%	100,00%	0,00%	0,11%	100,00%	0,00%	0,11%
0	0	0	1	0	0		100,00%	0,08%	0,03%	100,00%	0,08%	0,03%	100,00%	0,08%	0,03%
0	0	0	2	0	0		100,00%	0,11%	0,00%	100,00%	0,11%	0,00%	100,00%	0,11%	0,00%
0	0	0	3	0	0		100,00%	0,11%	0,00%	100,00%	0,11%	0,00%	100,00%	0,11%	0,00%
0	0	0	4	0	0		100,00%	0,11%	0,00%	100,00%	0,11%	0,00%	100,00%	0,11%	0,00%
0	0	0	5	0	0		100,00%	0,11%	0,00%	100,00%	0,11%	0,00%	100,00%	0,11%	0,00%
0	0	0	0	0	0		66,90%	0,00%	0,19%	85,00%	0,00%	0,10%	78,80%	0,00%	0,12%
0	0	0	0	1	0		39,70%	0,13%	0,13%	22,20%	0,13%	0,04%	32,60%	0,13%	0,07%
0	0	0	0	2	0		22,50%	0,23%	0,10%	2,30%	0,23%	0,03%	8,40%	0,23%	0,04%
0	0	0	0	3	0		11,40%	0,31%	0,09%	0,30%	0,31%	0,01%	1,50%	0,31%	0,04%
0	0	0	0	4	0		7,10%	0,36%	0,08%	0,00%	0,36%	----	0,40%	0,36%	0,04%
0	0	0	0	5	0		4,10%	0,40%	0,08%	0,00%	0,40%	----	0,10%	0,40%	0,02%
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	1		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	2		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	3		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	4		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	5		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		49,50%	0,00%	1,20%	58,10%	0,00%	0,79%	54,00%	0,00%	0,98%
1	1	1	1	1	1		41,10%	0,53%	1,11%	34,80%	0,53%	0,60%	38,70%	0,53%	0,84%
2	2	2	2	2	2		33,70%	0,97%	1,08%	19,00%	0,97%	0,47%	26,00%	0,97%	0,75%
3	3	3	3	3	3		28,00%	1,36%	1,05%	9,40%	1,36%	0,39%	17,20%	1,36%	0,65%
4	4	4	4	4	4		23,90%	1,73%	0,96%	3,80%	1,73%	0,37%	10,80%	1,73%	0,57%
5	5	5	5	5	5		18,90%	2,06%	0,89%	2,00%	2,06%	0,26%	6,50%	2,06%	0,57%

Tabela 18 – Simulação de Monte Carlo da classe 15P-30T-45S- desvio 25%.

							desvio = 25%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		47,70%	0,00%	0,51%	52,80%	0,00%	0,24%	51,80%	0,00%	0,32%
1	0	0	0	0	0		44,40%	0,06%	0,49%	44,80%	0,06%	0,22%	46,40%	0,06%	0,29%
2	0	0	0	0	0		41,90%	0,12%	0,47%	37,30%	0,12%	0,20%	40,90%	0,12%	0,27%
3	0	0	0	0	0		39,80%	0,18%	0,45%	29,80%	0,18%	0,19%	35,40%	0,18%	0,25%
4	0	0	0	0	0		37,20%	0,23%	0,43%	24,40%	0,23%	0,17%	31,00%	0,23%	0,22%
5	0	0	0	0	0		34,00%	0,28%	0,42%	18,10%	0,28%	0,17%	25,40%	0,28%	0,21%
0	0	0	0	0	0		46,10%	0,00%	0,10%	39,40%	0,00%	0,04%	47,40%	0,00%	0,06%
0	1	0	0	0	0		48,10%	0,01%	0,10%	44,00%	0,01%	0,04%	50,40%	0,01%	0,06%
0	2	0	0	0	0		45,80%	0,02%	0,10%	38,30%	0,02%	0,04%	46,30%	0,02%	0,05%
0	3	0	0	0	0		43,70%	0,03%	0,10%	32,30%	0,03%	0,04%	41,50%	0,03%	0,05%
0	4	0	0	0	0		40,50%	0,04%	0,09%	28,00%	0,04%	0,03%	37,20%	0,04%	0,05%
0	5	0	0	0	0		38,20%	0,05%	0,09%	22,80%	0,05%	0,03%	32,20%	0,05%	0,05%
0	0	0	0	0	0		49,60%	0,00%	0,03%	48,40%	0,00%	0,01%	49,20%	0,00%	0,02%
0	0	1	0	0	0		47,10%	0,00%	0,03%	41,00%	0,00%	0,01%	44,30%	0,00%	0,02%
0	0	2	0	0	0		44,70%	0,01%	0,03%	33,70%	0,01%	0,01%	38,90%	0,01%	0,02%
0	0	3	0	0	0		40,50%	0,01%	0,03%	26,30%	0,01%	0,01%	34,30%	0,01%	0,01%
0	0	4	0	0	0		37,20%	0,01%	0,02%	19,70%	0,01%	0,01%	29,30%	0,01%	0,01%
0	0	5	0	0	0		34,10%	0,01%	0,02%	14,70%	0,01%	0,01%	25,10%	0,01%	0,01%
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	1	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	2	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	3	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	4	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	5	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		53,40%	0,00%	0,05%	54,80%	0,00%	0,02%	53,10%	0,00%	0,03%
0	0	0	0	1	0		30,70%	0,03%	0,04%	11,20%	0,03%	0,01%	18,30%	0,03%	0,02%
0	0	0	0	2	0		14,80%	0,07%	0,03%	0,10%	0,07%	0,00%	2,10%	0,07%	0,01%
0	0	0	0	3	0		9,90%	0,08%	0,03%	0,00%	0,08%	----	0,20%	0,08%	0,02%
0	0	0	0	4	0		7,40%	0,10%	0,02%	0,00%	0,10%	----	0,10%	0,10%	0,02%
0	0	0	0	5	0		5,10%	0,11%	0,02%	0,00%	0,11%	----	0,10%	0,11%	0,01%
0	0	0	0	0	0		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	1		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	2		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	3		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	4		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	5		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	0		50,90%	0,00%	0,49%	55,00%	0,00%	0,26%	55,10%	0,00%	0,33%
1	1	1	1	1	1		44,30%	0,10%	0,48%	42,30%	0,10%	0,22%	46,00%	0,10%	0,28%
2	2	2	2	2	2		37,40%	0,21%	0,47%	29,40%	0,21%	0,19%	34,20%	0,21%	0,26%
3	3	3	3	3	3		34,50%	0,30%	0,43%	19,90%	0,30%	0,17%	27,00%	0,30%	0,23%
4	4	4	4	4	4		30,70%	0,37%	0,40%	13,20%	0,37%	0,16%	20,70%	0,37%	0,21%
5	5	5	5	5	5		39,00%	0,18%	0,47%	32,20%	0,18%	0,20%	38,00%	0,18%	0,26%

Tabela 19 – Simulação de Monte Carlo da classe 15P-30T-45S- desvio 50%.

							desvio = 50%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		52,50%	0,00%	0,62%	50,50%	0,00%	0,45%	51,60%	0,00%	0,54%
1	0	0	0	0	0		48,10%	0,12%	0,64%	41,90%	0,12%	0,42%	46,00%	0,12%	0,53%
2	0	0	0	0	0		45,40%	0,23%	0,61%	34,90%	0,23%	0,40%	40,30%	0,23%	0,52%
3	0	0	0	0	0		43,20%	0,34%	0,60%	27,80%	0,34%	0,37%	34,80%	0,34%	0,50%
4	0	0	0	0	0		40,70%	0,44%	0,60%	23,50%	0,44%	0,33%	31,20%	0,44%	0,46%
5	0	0	0	0	0		38,10%	0,54%	0,59%	18,30%	0,54%	0,33%	27,60%	0,54%	0,44%
0	0	0	0	0	0		52,10%	0,00%	0,22%	52,60%	0,00%	0,09%	51,90%	0,00%	0,13%
0	1	0	0	0	0		49,10%	0,02%	0,21%	44,20%	0,02%	0,08%	45,80%	0,02%	0,12%
0	2	0	0	0	0		45,90%	0,04%	0,20%	37,90%	0,04%	0,07%	40,80%	0,04%	0,11%
0	3	0	0	0	0		43,50%	0,05%	0,19%	31,50%	0,05%	0,07%	36,60%	0,05%	0,10%
0	4	0	0	0	0		41,30%	0,07%	0,19%	26,60%	0,07%	0,06%	31,70%	0,07%	0,10%
0	5	0	0	0	0		38,60%	0,09%	0,18%	21,20%	0,09%	0,06%	28,60%	0,09%	0,09%
0	0	0	0	0	0		51,00%	0,00%	0,06%	51,00%	0,00%	0,02%	49,60%	0,00%	0,03%
0	0	1	0	0	0		48,00%	0,01%	0,06%	41,40%	0,01%	0,02%	45,10%	0,01%	0,03%
0	0	2	0	0	0		45,30%	0,01%	0,05%	33,70%	0,01%	0,02%	39,70%	0,01%	0,03%
0	0	3	0	0	0		42,30%	0,02%	0,05%	26,70%	0,02%	0,02%	34,80%	0,02%	0,03%
0	0	4	0	0	0		39,40%	0,02%	0,05%	20,20%	0,02%	0,02%	30,10%	0,02%	0,02%
0	0	5	0	0	0		36,10%	0,03%	0,05%	16,50%	0,03%	0,02%	25,10%	0,03%	0,02%
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	1	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	2	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	3	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	4	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	5	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		71,10%	0,00%	0,09%	90,70%	0,00%	0,06%	82,50%	0,00%	0,06%
0	0	0	0	1	0		44,50%	0,07%	0,06%	33,00%	0,07%	0,02%	38,20%	0,07%	0,03%
0	0	0	0	2	0		21,90%	0,12%	0,05%	2,40%	0,12%	0,01%	6,60%	0,12%	0,02%
0	0	0	0	3	0		11,40%	0,16%	0,04%	0,00%	0,16%	----	0,70%	0,16%	0,01%
0	0	0	0	4	0		6,90%	0,18%	0,03%	0,00%	0,18%	----	0,10%	0,18%	0,01%
0	0	0	0	5	0		4,10%	0,19%	0,04%	0,00%	0,19%	----	0,00%	0,19%	----
0	0	0	0	0	0		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	1		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	2		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	3		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	4		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	5		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	0		53,10%	0,00%	0,61%	52,80%	0,00%	0,46%	51,60%	0,00%	0,56%
1	1	1	1	1	1		47,20%	0,21%	0,63%	38,90%	0,21%	0,39%	41,30%	0,21%	0,53%
2	2	2	2	2	2		42,30%	0,41%	0,61%	26,00%	0,41%	0,36%	32,80%	0,41%	0,50%
3	3	3	3	3	3		38,30%	0,58%	0,62%	16,30%	0,58%	0,35%	26,20%	0,58%	0,47%
4	4	4	4	4	4		34,20%	0,73%	0,63%	11,50%	0,73%	0,33%	20,90%	0,73%	0,44%
5	5	5	5	5	5		30,80%	0,87%	0,64%	8,80%	0,87%	0,27%	16,70%	0,87%	0,42%

Tabela 20 – Simulação de Monte Carlo da classe 20P-40T-60S- desvio 25%.

							desvio = 25%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		48,10%	0,00%	3,25%	56,70%	0,00%	1,58%	50,70%	0,00%	2,29%
1	0	0	0	0	0		45,30%	0,31%	3,25%	49,40%	0,31%	1,47%	46,50%	0,31%	2,20%
2	0	0	0	0	0		42,70%	0,61%	3,17%	42,90%	0,61%	1,37%	43,00%	0,61%	2,07%
3	0	0	0	0	0		40,10%	0,91%	3,10%	36,90%	0,91%	1,27%	38,90%	0,91%	1,97%
4	0	0	0	0	0		38,10%	1,20%	3,03%	31,40%	1,20%	1,17%	34,60%	1,20%	1,89%
5	0	0	0	0	0		35,70%	1,46%	3,04%	26,40%	1,46%	1,10%	31,20%	1,46%	1,82%
0	0	0	0	0	0		54,40%	0,00%	0,82%	61,60%	0,00%	0,36%	60,50%	0,00%	0,50%
0	1	0	0	0	0		47,00%	0,05%	0,76%	42,50%	0,05%	0,30%	46,70%	0,05%	0,43%
0	2	0	0	0	0		44,80%	0,10%	0,75%	37,50%	0,10%	0,28%	44,10%	0,10%	0,41%
0	3	0	0	0	0		42,20%	0,16%	0,74%	33,00%	0,16%	0,27%	40,50%	0,16%	0,39%
0	4	0	0	0	0		39,80%	0,21%	0,73%	28,00%	0,21%	0,26%	35,90%	0,21%	0,38%
0	5	0	0	0	0		38,00%	0,26%	0,71%	24,70%	0,26%	0,24%	31,80%	0,26%	0,38%
0	0	0	0	0	0		50,30%	0,00%	0,31%	54,60%	0,00%	0,13%	47,40%	0,00%	0,19%
0	0	1	0	0	0		46,90%	0,03%	0,31%	47,30%	0,03%	0,12%	42,50%	0,03%	0,19%
0	0	2	0	0	0		45,10%	0,05%	0,29%	40,50%	0,05%	0,11%	39,10%	0,05%	0,18%
0	0	3	0	0	0		42,40%	0,08%	0,29%	33,60%	0,08%	0,11%	36,00%	0,08%	0,17%
0	0	4	0	0	0		39,70%	0,10%	0,28%	28,50%	0,10%	0,10%	33,20%	0,10%	0,16%
0	0	5	0	0	0		37,30%	0,12%	0,27%	23,40%	0,12%	0,09%	28,90%	0,12%	0,15%
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	1	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	2	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	3	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	4	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	5	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		52,60%	0,00%	0,16%	63,40%	0,00%	0,07%	57,00%	0,00%	0,09%
0	0	0	0	1	0		20,70%	0,17%	0,10%	2,10%	0,17%	0,03%	8,10%	0,17%	0,03%
0	0	0	0	2	0		13,60%	0,22%	0,09%	0,20%	0,22%	0,03%	1,70%	0,22%	0,02%
0	0	0	0	3	0		10,70%	0,24%	0,09%	0,20%	0,24%	0,01%	0,60%	0,24%	0,02%
0	0	0	0	4	0		8,00%	0,26%	0,09%	0,00%	0,26%	----	0,30%	0,26%	0,01%
0	0	0	0	5	0		6,80%	0,28%	0,09%	0,00%	0,28%	----	0,00%	0,28%	----
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	1		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	2		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	3		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	4		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	5		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		47,60%	0,00%	3,35%	55,00%	0,00%	1,68%	51,80%	0,00%	2,26%
1	1	1	1	1	1		43,00%	0,55%	3,28%	45,60%	0,55%	1,41%	42,80%	0,55%	2,17%
2	2	2	2	2	2		39,60%	0,98%	3,20%	36,60%	0,98%	1,28%	36,40%	0,98%	2,08%
3	3	3	3	3	3		36,60%	1,38%	3,20%	27,80%	1,38%	1,22%	32,50%	1,38%	1,92%
4	4	4	4	4	4		34,80%	1,77%	2,98%	21,90%	1,77%	1,11%	28,30%	1,77%	1,78%
5	5	5	5	5	5		32,40%	2,14%	2,81%	16,50%	2,14%	1,05%	24,00%	2,14%	1,74%

Tabela 21 – Simulação de Monte Carlo da classe 20P-40T-60S- desvio 50%.

							desvio = 50%								
							Distribuição Normal			Distribuição Triangular			Distribuição Uniforme		
$\Gamma^{cc}$	$\Gamma^{ct}$	$\Gamma^q$	$\Gamma^{dl}$	$\Gamma^{h+}$	$\Gamma^{h-}$		Risco	PR	AR	Risco	PR	AR	Risco	PR	AR
0	0	0	0	0	0		53,40%	0,00%	3,46%	51,00%	0,00%	2,95%	51,20%	0,00%	3,23%
1	0	0	0	0	0		50,20%	0,61%	3,58%	51,00%	0,00%	2,95%	46,80%	0,61%	3,18%
2	0	0	0	0	0		48,00%	1,20%	3,39%	39,90%	1,20%	2,63%	42,00%	1,20%	3,10%
3	0	0	0	0	0		45,40%	1,72%	3,44%	35,20%	1,72%	2,56%	37,80%	1,72%	3,04%
4	0	0	0	0	0		43,70%	2,22%	3,39%	31,70%	2,22%	2,42%	34,80%	2,22%	2,99%
5	0	0	0	0	0		41,30%	2,70%	3,44%	26,90%	2,70%	2,32%	32,10%	2,70%	2,86%
0	0	0	0	0	0		53,20%	0,00%	1,61%	57,10%	0,00%	0,67%	54,80%	0,00%	0,92%
0	1	0	0	0	0		47,90%	0,10%	1,54%	45,20%	0,10%	0,59%	47,50%	0,10%	0,83%
0	2	0	0	0	0		45,90%	0,21%	1,50%	40,00%	0,21%	0,55%	43,70%	0,21%	0,79%
0	3	0	0	0	0		43,90%	0,31%	1,46%	35,00%	0,31%	0,52%	39,50%	0,31%	0,77%
0	4	0	0	0	0		41,90%	0,41%	1,43%	30,80%	0,41%	0,48%	36,50%	0,41%	0,72%
0	5	0	0	0	0		39,90%	0,52%	1,39%	25,90%	0,52%	0,46%	33,30%	0,52%	0,68%
0	0	0	0	0	0		50,80%	0,00%	0,65%	51,00%	0,00%	0,27%	48,30%	0,00%	0,38%
0	0	1	0	0	0		48,00%	0,05%	0,63%	45,20%	0,05%	0,25%	44,30%	0,05%	0,36%
0	0	2	0	0	0		45,30%	0,10%	0,62%	39,50%	0,10%	0,23%	39,70%	0,10%	0,34%
0	0	3	0	0	0		42,30%	0,15%	0,61%	33,60%	0,15%	0,21%	36,70%	0,15%	0,32%
0	0	4	0	0	0		40,00%	0,20%	0,60%	29,00%	0,20%	0,19%	32,60%	0,20%	0,31%
0	0	5	0	0	0		38,10%	0,25%	0,58%	24,10%	0,25%	0,18%	28,70%	0,25%	0,30%
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	1	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	2	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	3	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	4	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	5	0	0		100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
0	0	0	0	0	0		100,00%	0,00%	0,28%	100,00%	0,00%	0,29%	100,00%	0,00%	0,29%
0	0	0	0	1	0		70,80%	0,25%	0,07%	89,90%	0,25%	0,04%	81,30%	0,25%	0,05%
0	0	0	0	2	0		44,00%	0,30%	0,05%	34,60%	0,30%	0,02%	39,60%	0,30%	0,03%
0	0	0	0	3	0		24,60%	0,33%	0,04%	6,70%	0,33%	0,01%	14,00%	0,33%	0,02%
0	0	0	0	4	0		14,20%	0,36%	0,03%	0,90%	0,36%	0,01%	3,60%	0,36%	0,01%
0	0	0	0	5	0		7,50%	0,38%	0,03%	0,10%	0,38%	0,00%	0,70%	0,38%	0,01%
0	0	0	0	0	0		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	1		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	2		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	3		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	4		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	5		0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----	0,00%	0,00%	----
0	0	0	0	0	0		53,50%	0,00%	3,64%	52,70%	0,00%	3,00%	50,90%	0,00%	3,27%
1	1	1	1	1	1		49,50%	1,02%	3,48%	43,70%	1,02%	2,75%	45,30%	1,02%	3,27%
2	2	2	2	2	2		46,00%	1,81%	3,55%	35,50%	1,81%	2,58%	39,10%	1,81%	3,26%
3	3	3	3	3	3		42,90%	2,56%	3,67%	29,70%	2,56%	2,41%	34,70%	2,56%	3,00%
4	4	4	4	4	4		40,70%	3,27%	3,49%	24,20%	3,27%	2,28%	29,80%	3,27%	2,81%
5	5	5	5	5	5		37,20%	3,96%	3,47%	19,30%	3,96%	2,14%	25,30%	3,96%	2,82%

---

## Referências

AISSAOUI, N.; HAOUARI, M.; HASSINI, E. Supplier selection and order lot sizing modeling: A review. *Computers & Operations Research*, v. 34, p. 3516- 3540, 2007.

ALEM, D.J., MORABITO, R. Production planning in furniture settings via robust optimization. *Computers & Operations Research*. v.39(2), p. 139–150, 2012.

AOUADNI, S.; REBAI, A. Lot-sizing problem with supplier selection considering safety stock. *International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, CoDIT 2013, p. 766-769, 2013.

ARENALES, M.; ARMETANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. Pesquisa Operacional: para Cursos de Engenharia. São Paulo: *Campus*. 2007.

BALLOU, R. H.; Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física. São Paulo: *Atlas*, 1993.

BEN-TAL, A., NEMIROVSKI, A, Robust convex optimization, *Math. Operations Research*, v.23, p. 769–805, 1998.

BEN-TAL, A., NEMIROVSKI, A. Robust solutions to uncertain programs, *Operations Research. Letters*, v.25, p. 1-13, 1999.

BEN-TAL, A., NEMIROVSKI, A. Robust solutions of Linear Programming problems contaminated with uncertain data, *Math. Program.*, v.88, p. 411-424, 2000.

BERTSIMAS, D.; SIM, M. Robust discrete optimization and network flows. *Mathematical Programming Series B*, v. 98, n. 1-3, p. 49-71, 2003.

BERTSIMAS, D.; SIM, M. The price of robustness. *Operations Research*, v. 52, n. 1, p. 35-53, 2004.

---

BERTSIMAS, D.; THIELE, A. A robust optimization approach to supply chain management. *Operations Research*, v.54(1), p. 150-168, 2006.

CAO, Y.; LUO, X.G.; KWONG, C.K.; TANG, J.F. Research of integrating supplier selection into product family planning. 25th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2013, p. 4634-4639, 2013.

CAO, Y.; LUO, X.G.; KWONG, C.K.; TANG, J.F.; ZHOU, W. Joint optimization of product family design and supplier selection under multinomial logit consumer choice rule. *Concurrent Engineering Research and Applications*, v. 20, p. 335-347, 2012.

CHOUDHARY, D., SHANKAR, R. Joint Decision of Procurement Lot-size, Supplier Selection, and Carrier Selection. *Journal of Purchasing and Supply Management* v.19 (1), p. 16–26, 2013.

CORONADO, L. An optimization model for strategic supply chain design under stochastic capacity disruptions. *Phd thesis*, Texas A&M University, USA, 2007.

CORRÊA, H. L. Just in Time, MPR II e OPT: um enfoque estratégico. 2a ed. São Paulo: *Atlas*, 1993.

CUNHA, A.L.; SANTOS, M.O.; MORABITO, R.; BARBOSA-POVOA, A., An integrated approach for production lot sizing and raw material purchasing, *European Journal of Operational Research* v.1, p. 1-16, 2018.

CURCIO, E. F., Integrating Lot-Sizing Problems Under Uncertainty. *Phd thesis*, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2017.

DE BOER, L.; LABRO, E.; MORLACCHI, P. A review of methods supporting supplier selection. *European Journal of Purchasing; Supply Management*, v. 7, n. 2, p. 75–89, 2001.

- 
- DE LA VEGA, J.; MUNARI, P.; MORABITO, R. Robust optimization for the vehicle routing problem with multiple deliverymen. *Central European Journal of Operations Research*, v. 27, p. 905-936, 2019.
- DWEIRI, F.; KUMAR, S.; KHAN, S.A.; JAIN, V. Designing an integrated AHP based decision support system for supplier selection in automotive industry. *Expert Systems with Applications*, v. 62, p. 273-283, 2016.
- EL-GHAOUI, LEBRET, H. Robust solutions to least-square problems to uncertain data matrices, *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, v.18, p. 1035-1064, 1997.
- EL-GHAOUI, LEBRET, H. *Robust solutions to uncertain semidefinite programs*, *SIAM J. Optim.*, v.9, p. 33-52, 1998
- FORRESTER, J. W. Industrial Dynamics, *The M.I.T. Press*, 1961.
- GODINHO FILHO, M.; BOAT, C.F; SAGAWA, J.K; KINOSHITA, D.; PEIXOTO, M.G.M. Proposta de aplicação da abordagem Quick Response Manufacturing em uma empresa do setor automobilístico. ABEPRO 2011.
- GODINHO FILHO, M.; MARCHESINI, A.G.; RIEZEBOS, J; VANDAELE, N.; GANGA, G. M. D. *The application of Quick Response Manufacturing practices in Brazil, Europe, and the USA: An exploratory study*, *International Journal of Production Economics*, v193, 437-448, 2017.
- GUO, C.; LIU, X.; JIN, M.; LV, Z. The research on optimization of auto supply chain network robust model under macroeconomic fluctuations. *Chaos, Solitons and Fractals* v.89, p. 105-114, 2016.
- HOLWEG, M., REICHHART, A. HONG, W. On risk and cost in global sourcing. *International Journal of Production Economics*, v.131, 333-341p, 2011.

KISOMI, S. M.; SOLIMANPUR, M.; DONIAVI, A. An integrated supply chain configuration model and procurement management under uncertainty: A set-based robust optimization methodology. *Applied Mathematical Modelling*, v. 40, p. 7928-7947, 2016.

KONUR, D.; CAMPBELL, J.F.; MONFARED, S.A. Economic and environmental considerations in a stochastic inventory control model with order splitting under different delivery schedules among suppliers. *Omega (United Kingdom)*, v.71, p. 46-65, 2017.

LARSON, R. C.; ODONI, A.R, Urban Operations Research, *Prentice-Hall Inc*, New Jersey, 1981.

LIMA, A.D.; BACHEGA, S.J.; GODINHO FILHO, M.; CRUZ, V. J.S; ROSSI, J.M. Proposta de aplicação da abordagem *Quick Response Manufacturing* (QRM) para a redução de lead time em operações de escritório. *Produção*, São Paulo, v. 23, p. 1-19, 2013.

MARCHESINI, A.G.; GODINHO FILHO, M.; Estudo exploratório sobre a visão dos fundamentos da abordagem *Quick Response Manufacturing* em uma empresa do setor aeronáutico. In: XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (Enegep), 2016, João Pessoa (PB). Anais do XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (Enegep), 2016.

MARTINS, R. A.; COSTA NETO, P. L. O. Indicadores de desempenho para a gestão pela qualidade total: uma proposta de sistematização. *Gestão & Produção*, v. 5, n. 3, p. 298-311, 1998.

MARTINS DE SÁ, E.; MORABITO, R.; DE CAMARGO, R. S. Benders decomposition applied to a robust multiple allocation incomplete hub location problem. *Computers & Operations Research*, v. 89, p. 31-50, 2018.

- MUNHOZ, J. R.; MORABITO, R. Optimization approaches to support decision making in the production planning of a citrus company: A Brazilian case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 107, p. 45-57, 2014.
- MUNHOZ, J. R.; MORABITO, R. Uma abordagem de otimização robusta no planejamento agregado de produção na indústria cítrica. *Produção*, v. 23, p. 422-435, 2013.
- MULVEY, J.; VANDERBEI, R.; ZENIOS, S. Robust optimization of large scale systems. *Operations Research*, v. 43, n. 2, p. 264-281, 1995.
- OLIVEIRA, F. Introdução à Otimização sob Incerteza. In: Minicurso UNESP 2013, 3, Bauru. Disponível em [http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaelettrica/lapsee/curso\\_2013\\_fabricio\\_3.pdf](http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaelettrica/lapsee/curso_2013_fabricio_3.pdf). Acesso em 11/06/2017 às 14:00h.
- PAIVA, R. P. O; MORABITO, R. Planejamento hierárquico da produção em usinas de açúcar e álcool: modelagem de otimização robusta. *Produção*, v. 24, p. 644-663, 2014.
- PAN F., NAGI R., Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. *Computers & Operations Research* v.37, p. 668 – 683, 2010.
- PARK, J. et al. An integrative framework for supplier relationship management. *Industrial Management & Data Systems*, v. 110, n. 4, p. 495–515, 2010.
- PUROHIT, A.K.; CHOUDHARY, D.; SHANKAR, R. Inventory lot-sizing with supplier selection under non-stationary stochastic demand. *International Journal of Production Research*, v. 54, p.2459-2469, 2016.

---

RABBANI, M.; KHALILI, S.M.; JANANI, H.; SHIRIPOUR, M. Optimization of a dynamic supply portfolio considering risks and discount's constraints. *Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 7, p.218-253,2014.

RIGHETTO, G. M.; MORABITO, R.; ALEM, D. A robust optimization approach for cash flow management in stationery companies. *Computers & Industrial Engineering*, v. 99, p. 137-152, 2016.

ROCCO, C. D.; MORABITO, R. Robust optimisation approach applied to the analysis of production / logistics and crop planning in the tomato processing industry. *International Journal of Production Research*, v. 54, p. 5842-5861, 2016.

ROSENFELD, H. et al., Gestão de desenvolvimento de produtos. São Paulo: *Saraiva*, 2006.

SAWIK, T. Optimization of cost and service level in the presence of supply chain disruption risks: Single vs. multiple sourcing. *Computers & Operations Research*, v. 51, p.11-20, 2014.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSON, R., Administração da produção. 2a.ed. São Paulo: *Atlas*, 2002.

SOYSTER, A.L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming, *Operations Research*, v21, p. 1019-1175, 1973.

SURI, R. Quick Response Manufacturing: A Companywide Approach to Reducing Lead time. Portland: *Productivity Press*, 1998.

SURI, R. It's About Time: The Competitive Advantage of Quick Response Manufacturing. New York: *Productivity Press*, 2010.

- THRULOGACHANTAR, P.; ZAILANI, S. The influence of purchasing strategies on manufacturing performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 22, p. 641-663, 2011.
- TUBINO, D. F. Manual de planejamento e controle da produção. São Paulo: Atlas, 1997.
- YADAV, V.; SHARMA, M.K. Multi-criteria supplier selection model using the analytic hierarchy process approach. *Journal of Modelling in Management*, v. 11, p.326-354, 2016.
- YADAV, V.; SHARMA, M.K. An application of hybrid data envelopment analytical hierarchy process approach for supplier selection. *Journal of Enterprise Information Management*, v. 28, p.218-242, 2015.
- YANG, S.; YANGB, J.; ABDEL-MALEK, L. Sourcing with random yields and stochastic demand: A newsvendor approach. *Computers & Operations Research*, v. 34, p.3682 – 3690, 2007.
- YOU, X.-Y.; YOU, J.-X.; LIU, H.-C.; ZHEN, L. Group multi-criteria supplier selection using an extended VIKOR method with interval 2-tuple linguistic information. *Expert Systems with Applications*, v. 42, p.1906-1916, 2015.
- WANG, X.; ZHONG, S. Supplier selection model and its algorithm considering multi-period price rebate. *Proceedings 2010 IEEE 5th International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications*, p.241-245, 2010.
- WARE, N. R., SINGH, S. P.; BANWET, D. K., A Mixed-integer Non-linear Program to Model Dynamic Supplier Selection Problem. *Expert Systems with Applications* v. 41 (2), p.671–678, 2014.
- WOMACK, J.P.; JONES, D.T.; ROSS, D.; A máquina que mudou o mundo. Rio de Janeiro: Campus 1992.