

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Daniel Writzl Zini

**MÉTODO PARA A ANÁLISE DE RISCOS EM CADEIAS
DE SUPRIMENTOS UTILIZANDO A SIMULAÇÃO DE
DINÂMICA DE SISTEMAS**

Porto Alegre

2015

Daniel Writzl Zini

Método para a análise de riscos em cadeias de suprimentos utilizando a simulação de Dinâmica de Sistemas

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Produção

Orientador: Prof. Ricardo Augusto Cassel,
PhD.

Porto Alegre

2015

Daniel Writzl Zini

Método para a análise de riscos em cadeias de suprimentos utilizando a simulação de Dinâmica de Sistemas

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Ricardo Augusto Cassel, *PhD.*

Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Michel José Anzanello, *PhD.* (PPGEP/UFRGS)

Professora Giovana Savitri Pasa, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Professora Joana Siqueira de Souza, Dr. (PUCRS)

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus, minha família e a todos que planejam e buscam uma preparação efetiva para manter a coesão em suas organizações nos tempos de crise.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço a meus pais, parentes e amigos pelo incentivo e encorajamento para seguir nesta jornada. Cada dia foi um desafio, mas, com a graça de Deus, pude vencer estes obstáculos.

Agradeço ao meu orientador Ricardo Augusto Cassel por ter sido um grande exemplo de professor com sua didática excelente. Suas ideias inovadoras e incentivos, que foram de grande enriquecimento para a minha formação em Engenharia de Produção da UFRGS, fazem deste um curso melhor.

Agradeço aos professores da banca Michel Anzanello, Giovana Pasa e Joana Siqueira pelos muitos conselhos e contribuições no trabalho. Também desejo agradecer à UFRGS pela oportunidade, e ao CNPQ pelo financiamento desta empreitada. Muito obrigado a todos!

RESUMO

O estudo de Gestão de Cadeias de Suprimentos (GCS) tem abrangência ampla no envolvimento de um importante número de companhias e também nos horizontes de tempo, sendo de grande custo o insucesso de ações neste âmbito (Brandenburg, 2013). Para a realização de estudos em GCS, são importantes ferramentas computacionais que auxiliem na representação, entendimento e estimativa dos resultados esperados em intervenções, sejam eles positivos ou negativos, a fim de que sejam adequadamente monitorados (Kontogiannis, 2012). Esta dissertação compreende o assunto de GCS na análise de riscos, os quais são tratados como eventos indesejados para a cadeia de suprimentos no futuro. Diversos trabalhos têm analisado riscos em GCS de forma individual e detalhada, mas sem uma abordagem coletiva de causalidades para os mesmos, o que demonstra uma lacuna no estudo de uma complexidade cada vez mais necessária (OECD, 2003). Essa necessidade emerge diretamente da conectividade e dependência dos sistemas de GCS, humanos, econômicos, sociais, que geram um efeito multiplicador para o caso da análise de riscos (Cox; Ricci, 2008). A fim de analisar as possíveis causas e resultados da ocorrência de diferentes riscos, esta dissertação se utiliza da ferramenta de simulação chamada Dinâmica de Sistemas, a qual é construída para lidar com causalidades no tempo, estando inserida dentro do paradigma do pensamento sistêmico (Senge, 1994). Dentro do estudo de Dinâmica de Sistemas, existe o conceito de arquétipos, os quais servem para uma rápida identificação de comportamentos nos sistemas humanos, cuja aplicação na análise de riscos ainda é pequena, embora seja importante para a análise de comportamentos futuros (Prusty et al., 2014). Assim, inicia-se com um artigo de revisão sistemática da literatura da Dinâmica de Sistemas em GCS, seguido de um artigo que adapta arquétipos da Dinâmica de Sistemas para a análise de riscos, logo após com um artigo de proposição de um método para lidar com riscos em GCS utilizando a Dinâmica de Sistemas e os arquétipos sistêmicos. Uma avaliação do método demonstra sua validade para lidar com ambientes futuros com diferentes riscos simultaneamente, levando em consideração as mútuas causalidades dos mesmos. Conclui-se que a visão proporcionada pelo pensamento sistêmico, juntamente com a simulação computacional da Dinâmica de Sistemas, possibilita um entendimento amplo das relações em um sistema de GCS para a análise de riscos.

PALAVRAS-CHAVE: Dinâmica de Sistemas; Análise de Riscos; Gestão de Cadeias de Suprimentos.

ABSTRACT

The failure in supply chain management has consequences in numerous companies, and it yields great losses at wide time horizons (Brandenburg, 2013). In order to deal with the possible outcomes, simulation tools favor the understanding, representation and estimation of actions and suitable control of systems (Kontogiannis, 2012). This study ensembles risk analysis as undesirable events for the supply chain taking place in the future. Although the growing interest in the upper causalities of supply chain systems interactions, most literature has presented mechanisist analysis of risks, individually, not focusing on relations between risks (OECD, 2003). In the supply chain, risks magnify through the dependency of social, economic and environmental variables (Cox; Ricci, 2008). System dynamics is a simulation tool that deals with these dependencies and causal relations over the time, and it upholds risk outcomes in the systems thinking paradigm (Senge, 1994). The system dynamics and systems thinking comprise the systems archetypes concept, which is intended to rapid behavioral identification in human and natural systems, but it still has little analysis effort for gathering risks in future scenario analysis identification (Prusty et al., 2014). For hence, this study begins with a systematic review article of system dynamics in supply chain management, followed by a second article of adaption of system dynamics archetypes to risk analysis, then completed by a third article that proposes a methodology comprehending risk analysis of supply chain risk management with system dynamics and its systemic archetypes. An evaluation of the methodology is presented, and the validity for dealing with simultaneous risks occurrences, and mutual causalities identification. The study concludes that risk analysis in the supply chain management can benefit from the wide analysis relations fostered by systems thinking and system dynamics simulation with a broad system relations understanding.

KEYWORDS: *System Dynamics; Risk Analysis; Supply Chain Management.*

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

Figura 1 – Distribuição dos artigos no tempo.....	20
Figura 2 – Ferramentas utilizadas junto com a DS.....	26

ARTIGO 2

Figura 1 – Três fatores para os riscos em GCS.....	49
Figura 2 – Tipos de relação entre variáveis.....	54
Figura 3 – Tipos de enlaces de comportamento circular.....	55
Figura 4 – Estrutura conceitual dos mecanismos geradores dos eventos.....	55
Figura 5 – Arquétipo Enlace Reforçador.....	57
Figura 6 – Arquétipo Limites para o Sucesso.....	58
Figura 7 – Arquétipo Sucesso ao bem sucedido.....	59
Figura 8 – Arquétipo Crescimento e Subinvestimento.....	60
Figura 9 – Arquétipo Tragédia dos Comuns.....	60
Figura 10 – Arquétipo Adversários acidentais.....	61
Figura 11 – Arquétipo Crescimento-S excessivo com Oscilação.....	62
Figura 12 – Arquétipo Enlace balanceador com Atraso.....	63
Figura 13 – Arquétipo Quebra galhos que não dão certo.....	63
Figura 14 – Arquétipo Escalada / Perseguição.....	64
Figura 15 – Arquétipo Metas declinantes.....	65
Figura 16 – Arquétipo Crescimento e Declínio.....	66

ARTIGO 3

Figura 1 – Variáveis utilizadas em diagramas de Dinâmica de Sistemas.....	78
Figura 2 – Método proposto para o estudo dinâmico dos riscos em GCS.....	81
Figura 3 – Figura rica com os agentes e elementos associados aos respectivos riscos.....	86
Figura 4 – Arquétipos de Dinâmica de Sistemas adaptados aos riscos de GCS na análise.....	89
Figura 5 – O modelo CLD poderia ser construído com um total de 59 variáveis.....	91
Figura 6 – Modelo de Dinâmica de Sistemas com os respectivos arquétipos e principais relações em um total de 75 variáveis.....	93
Figura 7 – Comportamentos que poderiam ser observados nos arquétipos.....	94
Figura 8 – Cenários intercalando a gravidade de ocorrência dos diferentes riscos.....	95
Figura 9 – Aumento de custos devido ao aumento populacional acelerado.....	96

LISTA DE TABELAS

INTRODUÇÃO

Tabela 1 – Algumas disciplinas com propostas integrativas no ambiente organizacional.....13

Tabela 2 – Dois paradigmas do pensamento científico.....14

ARTIGO 1

Tabela 1 – Etapas metodológicas, perguntas norteadoras e nº de artigos em cada etapa.....21

Tabela 2 – Comparação de perspectivas para resolver problemas dentro da GCS.....22

Tabela 3 – Vizinhança: vantagens e desvantagens de outras formas de estudar a dinamicidade de sistemas de GCS em relação à DS.....25

Tabela 4 – Trabalhos de integração da DS com outras abordagens na CS e seus objetivos.....27

Tabela 5 – Trabalhos práticos da DS em cadeias de suprimentos, classes, locais, modelos e assuntos.....30

ARTIGO 2

Tabela 1 – Classificações de Riscos em GCS e seus respectivos Métodos.....51

Tabela 2 – Classificação de Riscos em GCS: Convergência das Classificações.....52

Tabela 3 – Caracterização de Riscos nas Classificações.....53

Tabela 4 – Arquétipos utilizados para a Análise de Riscos.....56

ARTIGO 3

Tabela 1 – Princípios de modelagem com DS adaptados para riscos em GCS.....74

Tabela 2 – Riscos escolhidos, propósito dinâmico, elementos e limitações.....86

Tabela 3 – Eventos prejudiciais, variáveis representativas e horizontes dos riscos em estudo.....87

Tabela 4 – Variáveis para cada risco a ser analisado.....88

Tabela 5 – Enlaces identificados no CLD.....92

Tabela 6 – Obtenção de distribuições para as variáveis probabilísticas.....94

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução	13
1. Problema	15
2. Objetivos	15
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. Justificativa	16
4. Delimitação	16
5. Estrutura do trabalho	17
Capítulo 2: Simulação de Dinâmica de Sistemas na Gestão da Cadeia de Suprimentos:	
Revisão Sistemática.....	18
Resumo	18
<i>Abstract</i>	18
1. Introdução.....	18
2. Metodologia.....	19
3. Resultados	22
3.1 Posição do campo de pesquisa da DS em GCS	22
3.2 Vizinhança da DS em GCS.....	24
3.3 Ferramentas agregadas com a DS em GCS	26
3.4 Aplicações práticas de DS em GCS.....	28
3.5 Exercícios teóricos de DS em GCS	32
4. Análise dos resultados	34
5. Conclusão	35
Referências	35
Capítulo 3: A Utilização de Arquétipos da Dinâmica de Sistemas para o Estudo de	
Riscos na Gestão de Cadeias de Suprimentos	46
1. Introdução.....	47
2. Metodologia.....	48
3. Conceito de risco.....	49
4. Classes de riscos em GCS	50
5. Identificação dos riscos dentro das classes.....	53
6. A Dinâmica de Sistemas.....	54

7. Arquétipos de Dinâmica de Sistemas adaptados para os riscos de GCS.....	55
7.1 Enlace reforçador	57
7.2 Limites para o sucesso.....	58
7.3 Sucesso ao bem sucedido	58
7.4 Crescimento e subinvestimento.....	59
7.5 Tragédia dos comuns.....	60
7.6 Adversários acidentais.....	61
7.7 Crescimento-S excessivo com oscilação.....	62
7.8 Enlace balanceador com atraso	62
7.9 Quebra galhos que não dão certo	63
7.10 Escalada / perseguição.....	64
7.11 Metas declinantes	64
7.12 Crescimento e declínio	65
8. Conclusão.....	66
Referências.....	67
Capítulo 4: Método para Análise de Riscos na Gestão de Cadeia de Suprimentos	
utilizando Dinâmica de Sistemas.....	71
1. Introdução	72
2. Revisão	73
2.1 O estudo dinâmico de riscos.....	74
2.2 Eventos de riscos e eventos de sistemas dinâmicos	75
2.3 Resultados de riscos e resultados de sistemas dinâmicos.....	76
2.4 Uso de modelos conceituais de sistemas dinâmicos em riscos de GCS.....	76
2.5 Modelos conceituais do pensamento sistêmico em riscos de GCS	77
2.6 Simulação de Dinâmica de Sistemas em riscos de GCS.....	77
2.7 Testes de modelos dinâmicos para riscos de GCS	79
2.8 Estratégias para lidar com riscos de GCS em sistemas dinâmicos.....	79
3. Método Proposto	80
3.1 Primeiro: Riscos e delimitações	80
3.2 Segundo: Eventos prejudiciais	81
3.3 Terceiro: Resultados incertos	82
3.4 Quarto: Preparação para o modelo	82
3.5 Quinto: Modelo conceitual.....	83

3.6	Sexto: Modelo de simulação e dados.....	83
3.7	Sétimo: Testes.....	84
3.8	Oitavo: Estratégias.....	84
4.	Avaliação do método proposto.....	85
4.1	Definição dos riscos e delimitações.....	85
4.2	Eventos prejudiciais.....	87
4.3	Resultados incertos e variáveis chave.....	87
4.4	Preparação para o modelo: Arquétipos e comportamentos esperados.....	89
4.5	Modelos conceituais.....	90
4.6	Modelo de simulação.....	92
4.7	Testes.....	93
4.8	Estratégias.....	95
5.	Aplicabilidade do Método Proposto.....	96
6.	Conclusão.....	97
	Referências.....	97
	Capítulo 5: Conclusão.....	103
	Trabalhos futuros.....	105
	Apêndice I – Descrição dos Resultados do Modelo.....	107
	Apêndice II – Dados do modelo.....	115

Capítulo 1: Introdução

Diversos fatores influenciam os riscos na sociedade, os quais provêm desde indivíduos até grandes sistemas humanos e suas estruturas (OECD, 2003). Uma multiplicidade de forças vem afetando o desenvolvimento destes riscos, com grande potencial na mudança do estilo de vida das pessoas. Algumas das principais são o aumento na demografia e tensões devido a suas desigualdades (OECD, 2003), evolução e pervasividade tecnológica (Xia; Chen, 2011), aumento de mobilidade (Jamie et al, 2009), bem como uma maior volubilidade das percepções de risco do grande público em função da mídia de massas (Linden, 2015).

Nas organizações, a análise de riscos envolve uma preocupação presente principalmente no controle de rendimentos, custos e restrições operacionais (Soltanzadeh et al., 2014). Nestes casos, representam eventos imprevistos, sendo suas análises dependentes do entendimento de tendências sociais, ambientais e econômicas (Villaroto et al., 2014).

Na gestão de cadeias de suprimentos, a análise de riscos tem recebido crescente interesse nas empresas e pesquisa acadêmica (Tang; Musa, 2011). Este fator acrescenta uma necessidade de visão conjunta, que integra as preocupações e interesses de diversas organizações (Harland et al., 2003).

No contexto da Engenharia de Produção, existem diversas propostas que são integradoras de conhecimentos e atividades (Andrée; Hansson, 2015). Contudo, as organizações parecem resistir aos mecanismos de integração propostos, de forma que há uma aparente falta de conexão das propostas com os indivíduos, necessária para promover a mudança (Manuj; Mentzer, 2008). Algumas destas propostas integradoras estão na definição básica de disciplinas, como a Gestão por Processos, Gestão de Projetos, Engenharia de Produto e a própria Engenharia de Produção (Tabela 1). Todas estas disciplinas apresentam propostas integrativas, acompanhadas de mecanismos para permitir determinadas unificações, encontrando, no entanto, barreiras em virtude de algum tipo de falta de visão de todo.

Tabela 1 – Algumas disciplinas com propostas integrativas no ambiente organizacional

Disciplina	Proposta integrativa	Mecanismo unificador	Perda da visão de todo	Referência
Gestão por processos	Departamentos	Atividades de processos	Desconexão do contexto	Rosing et al., 2015
Gestão de projetos	Ideias de especialistas	Realização de projeto	Sem linguagem unificadora	Brook; Pagnanelli, 2014
Engenharia do produto	Empresas e especialistas	Requisitos do cliente	Causalidades não associadas	Hinckeldeyn et al, 2014
Engenharia de produção	Engenharias e gestão	Gestão da produção	Ambiente sócio-econômico	Andrée; Hansson, 2015

Fonte: Elaboração própria.

O pensamento sistêmico busca minimizar tais problemas por meio de um movimento para a compreensão do todo através de suas conexões, de forma holística (Tako; Robinson, 2012). Existem duas formas científicas para estudar os sistemas: o pensamento holístico e o pensamento reducionista (Senge, 1994). Na Tabela 2 foi feita uma comparação destas duas abordagens.

Tabela 2 – Dois paradigmas do pensamento científico

	Pensamento holístico	Pensamento reducionista
Método	Sistêmico	Sistemático
Esforço	Investiga o ambiente do problema	Reduz o problema em partes cada vez menores
Abordagem	Movimento para cima, relações entre as partes	Movimento para baixo, detalhes das partes
Resolução	Conectar múltiplas visões parciais	Quebrar o problema em partes mais simples

Fonte: Adaptado de White, 1995.

Este trabalho se insere no paradigma do pensamento holístico, referido na literatura como *systems thinking*, ou pensamento sistêmico. O pensamento sistêmico lida de forma holística com os sistemas, investigando-os através de suas variáveis e causalidades, as quais podem ser definidas matematicamente e simuladas através da Dinâmica de Sistemas, ferramenta que dispõe de uma importante sinergia com o próprio pensamento sistêmico. Enquanto este auxilia o levantamento conceitual das relações, a Dinâmica de Sistemas permite simular e verificar o efeito das soluções, propostas com base nas disfunções comportamentais identificadas, tanto no pensamento sistêmico quanto na Dinâmica de Sistemas (Andrade et al., 2006).

Além da Dinâmica de Sistemas, diversas outras ferramentas são utilizadas para modelagem de riscos na gestão de cadeias de suprimentos (Min; Zhou, 2002). Dentre estas, a Dinâmica de Sistemas se caracteriza como uma abordagem intermediária entre o qualitativo e quantitativo (Pidd, 2009), e híbrida entre os métodos estocásticos e determinísticos, podendo valer-se de ambos em uma abordagem mais completa.

Com base no pensamento holístico anteriormente referido, a teoria sistêmica se importa com as relações que são construídas ao longo do tempo, seus efeitos, e interações com o sistema natural, econômico e social (Serman, 2000). Efeitos como a globalização aumentaram a conectividade no mundo, em consequência aumentando também a dependência e necessidade de estudo e compreensão dessas relações (Linbom et al., 2015).

Neste contexto, os riscos organizacionais se amplificaram devido ao maior número de possibilidades de falha nos sistemas cada vez mais interconectados e dependentes (Bruijne;

Eeten, 2007). Mais especificamente, as relações presentes em cadeias de suprimentos revelam a formação de complexas redes e arranjos comerciais, onde tanto a diagramação como o entendimento da importância de cada relação são prejudicados pelas complexidades de processo, produto e mercado (Cox; Ricci, 2008).

Para auxiliar na identificação destas complexidades, um dos conceitos construídos no pensamento sistêmico e na Dinâmica de Sistemas são os arquétipos sistêmicos, os quais são comportamentos comuns encontrados em sistemas naturais e humanos (Senge, 1994). Esses comportamentos podem ser utilizados para facilitar o estudo de riscos em cadeias de suprimentos no paradigma sistêmico.

1. Problema

A análise de riscos é fundamental para uma condução correta do rumo nas organizações, pois determina a postura e sobrevivência destas em um ambiente de crescente complexidade (Cox; Ricci, 2008). Os riscos precisam ser analisados dinamicamente, pois muitos são fruto de acumulações no tempo (Kontogiannis, 2012). Comportamentos simples combinados geram complexidades nos sistemas que são difíceis para a racionalidade limitada do homem, sendo necessário o auxílio de ferramentas computacionais como a Dinâmica de Sistemas (Sterman, 2000).

Na Gestão de Cadeias de Suprimentos, existem muitos problemas considerados dinâmicos, cada um apresentando diversos riscos associados (Tako; Robinson, 2012). Apesar da presença de riscos, a literatura de Dinâmica de Sistemas em gestão da cadeia de suprimentos trouxe poucos trabalhos lidando diretamente com os riscos presentes nestes problemas (Minigishi; Thiel, 2000; Higushi; Troutt, 2004; Le Vo; Thiel, 2011; Peng et al., 2014). Além disso, não há uma metodologia específica em dinâmica de sistemas para tratar dos mesmos, havendo assim uma desconexão com o conceito de riscos e, conseqüentemente, com essa forma de estudo dinâmico dos riscos (Bueno-solano; Cedillo-campos, 2014).

2. Objetivos

Este trabalho apresenta um objetivo geral constituído por dois específicos. Para atingí-los, foram desenvolvidos dois artigos, respectivos a cada caso específico, além de um terceiro fechando o geral.

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é mostrar como uma análise de riscos na Gestão de Cadeias de Suprimentos pode ser realizada através da Dinâmica de Sistemas.

2.2 Objetivos específicos

Compreendendo os dois artigos iniciais, os objetivos específicos desta dissertação são:

- a) fornecer uma compreensão ampla da literatura de Dinâmica de Sistemas em Gestão de Cadeias de Suprimentos através de uma revisão sistemática;
- b) demonstrar a compatibilidade do estudo sistêmico nos riscos da gestão da cadeia de suprimentos com o uso de arquétipos sistêmicos.

3. Justificativa

Com uma metodologia específica, é possível incluir princípios básicos de modelagem da Dinâmica de Sistemas, objetivando o estudo de riscos em cadeias de suprimentos chegando uma análise dinâmica e causal dos riscos. Igualmente, etapas metodológicas da Dinâmica de Sistemas podem permitir um estudo mais adequado para entendimento da dinamicidade na área de análise de riscos. O estudo dinâmico pode compor a análise de riscos para a criação de planos de contingência na Gestão de Cadeias de Suprimentos.

O ambiente organizacional é caracterizado por constantes incertezas. Um estudo que avalie o entendimento dessas incertezas com suas causalidades e dinamicidades proporciona soluções mais amplas e potencialmente mais eficazes no tempo (Mazzarana; Fuchs, 2010). Neste caso, a adaptação de uma ferramenta do pensamento holístico científico na análise de riscos representa uma contribuição para o entendimento mais amplo do processo de construção e planejamento do futuro na cadeia de suprimentos.

4. Delimitação

No artigo de revisão sistemática, abordam-se apenas artigos do assunto de Dinâmica de Sistemas em cadeias de suprimentos. A fim de permitir uma ampliação da análise do escopo de dinamicidade de sistemas, textos contendo o assunto da dinamicidade em cadeias de suprimentos também são analisados.

No artigo dois, o escopo limitou-se a estudos que abordam riscos na Gestão de Cadeias de Suprimentos. Além disso, não foram adaptados todos os arquétipos de Dinâmica

de Sistemas para os riscos em cadeias de suprimentos, utilizando-se 12 considerados mais adequados, embora a adaptação de outros arquétipos também possa ser feita.

No artigo três, o método proposto limita-se à análise dinâmica de riscos com o uso da Dinâmica de Sistemas. Apenas conceitos relativos à simulação específica de Dinâmica de Sistemas são incluídos no método. A avaliação do método proposto foi realizada através de um piloto de natureza conceitual.

5. Estrutura do trabalho

Esta dissertação se desenvolve em três artigos, acrescidos de dois capítulos, um de introdução e outro de conclusão. O primeiro artigo trata de uma revisão sistemática de Dinâmica de Sistemas em Gestão de Cadeias de Suprimentos, o segundo adapta o conceito de arquétipos da Dinâmica de Sistemas para a área de riscos em Gestão de Cadeias de Suprimentos. O terceiro apresenta e avalia um método para a análise de riscos em Gestão de Cadeias de Suprimentos utilizando a Dinâmica de Sistemas.

Capítulo 2: Simulação de Dinâmica de Sistemas na Gestão da Cadeia de Suprimentos: Revisão Sistemática

DANIEL WRITZL ZINI

RICARDO AUGUSTO CASSEL

Resumo

Este artigo fornece uma revisão dos estudos de gestão da cadeia de suprimentos utilizando a Dinâmica de Sistemas. Para tal, são selecionados 114 artigos. Os principais resultados são uma conceitualização da Dinâmica de Sistemas na Gestão de Cadeias de Suprimentos, comparação com outras ferramentas que buscam tratar dos mesmos problemas dinâmicos. Também utilizações combinadas da Dinâmica de Sistemas com outras ferramentas, além de uma síntese dos assuntos tratados e linhas de pesquisa, divididos em modelagens com dados reais e conceituais. Verifica-se que a simulação da Dinâmica de Sistemas na gestão da cadeia de suprimentos ainda não é muito disseminada, apesar de seus mais de 50 anos de existência.

Palavras-chave: Gestão da cadeia de suprimentos; Dinâmica de Sistemas.

Abstract

This paper reviews the supply chain management issue tackled by system dynamics approach. 114 articles were selected and analyzed in a meta synthesis. The main results comprise five question answers, arguing the conceptual nature of system dynamics in supply chain studies, the comparison of equally dynamic approaches, system dynamics and other tools integration, and system dynamics conceptual and practical applications for supply chain management topic. Although the system dynamics study in supply chain is over 50 years old, there are considerable amount of untapped issues and areas of research.

Keywords: *Supply chain management; System dynamics.*

1. Introdução

O nascimento da ferramenta de simulação chamada Dinâmica de Sistemas (DS) ocorreu em um contexto de análise de cadeias de suprimentos (CS) (Forrester, 1961). Também em um exemplo de CS, um aluno de Forrester mostrou como a dinamicidade dos sistemas gera dificuldades para a gestão através do *Beer Game*, um jogo de simulação de previsão de demanda para uma rede de distribuição (Sterman, 1989). A ampliação da DS para as outras questões de negócios apareceu de forma mais destacada com Sterman em seu livro

Business Dynamics (Sterman, 2000), com aplicações práticas e exercícios sobre os comportamentos básicos encontrados em sistemas humanos. Além da área de negócios, a DS tem achado lugar nas mais diversas áreas, tais como biologia, engenharia e literatura, e como ferramenta de aprendizado inclusive em escolas desde as séries primárias (Forrester, 1992).

Por outro lado, a Gestão de Cadeias de Suprimentos (GCS) abrange questões logísticas, volatilidade de preços, sustentabilidade ambiental, políticas empresariais e públicas, além de questões sociais de ética, cultura e relacionamentos empresariais (Tang; Musa, 2011). A necessidade de uma GCS reside na efetividade e eficiência global dos sistemas, contrapondo as eficiências individuais que prejudicam o resultado coletivo (Holweg; Bicheno, 2002). Fala-se ainda da competição não ser mais entre empresas, mas entre cadeias de suprimentos, fazendo do tema um diferencial para a sobrevivência e sucesso empresarial (Marquez et al., 2004). Sendo assim, as ferramentas capazes de analisar globalmente são mais adequadas para análises na GCS, como é o caso da ferramenta de DS, a qual enfatiza as relações globais nos sistemas (Sterman, 2000). Estas análises globais, no caso da ferramenta DS, acrescentam uma análise temporal dos problemas dinâmicos (Forrester, 1996).

Na literatura de DS em GCS, há poucos trabalhos de revisão. Angerhofer e Angelides (2000) dividiram os estudos de DS na GCS em três categorias: artigos de construção da teoria, modelagens para a resolução de problemas e trabalhos para melhoria da abordagem de simulação. Tako e Robinson (2012) desenvolveram uma lista com 17 tipos de problemas de GCS abordados pela DS, analisando as frequências de ocorrência, a fim de estabelecer um comparativo com a simulação por eventos discretos.

Este trabalho tem o objetivo de realizar uma revisão da ferramenta DS na GCS. Para tal, propõe-se realizar uma conceitualização da DS na GCS, diferenciar a DS de outras ferramentas utilizadas para tratar problemas dinâmicos na GCS e destacar as linhas de pesquisa, conjuntamente às principais contribuições da DS na GCS.

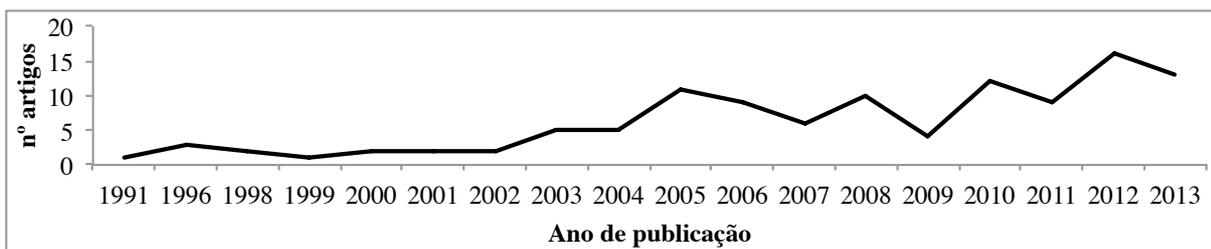
Após esta introdução, a seção dois explica a metodologia de revisão. Depois, seguem os resultados, encerrando o trabalho com uma discussão sobre as tendências e oportunidades identificadas.

2. Metodologia

Duas etapas definem o método utilizado para o trabalho. Primeiro, foi feita uma busca e seleção de artigos, onde foram utilizadas as bases da *Science Direct*, *Wiley Lybrary* e

Emerald, constando as expressões “*system dynamics*” e “*supply chain*” em títulos, resumos e palavras-chave. Incluiu-se os anos de 1991 até 2013. Inicialmente, encontrou-se 149 trabalhos. Destes, verificou-se através de uma leitura inicial que diversos não apresentavam relações com o tema de DS, e assim foram excluídos. O número de artigos reduziu para 114, que é a base final desta pesquisa. Sua distribuição no tempo é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Distribuição dos artigos no tempo



Fonte: Elaboração própria.

Dentre estes 114 artigos, alguns foram encontrados em revistas ou autores de destaque, em buscas exploratórias iniciais do tema de pesquisa da DS na GCS. Também analisaram-se obras de alguns autores com maior número de publicações e relevância nesse tema, a fim de não perder conteúdo pelo viés das expressões pesquisadas apenas em títulos, resumos e palavras-chave dos artigos.

A segunda etapa desta revisão consistiu em uma definição das diferenças entre os trabalhos para leitura e síntese de suas contribuições. Dentre muitas possibilidades de diferenciação entre artigos, cinco características se sobressaíram, a saber:

1. alguns artigos tratam de comparações da DS com grandes áreas de conhecimento. Estes artigos indicam um papel a ser desempenhado pela DS nas respectivas áreas, seja metodologicamente, seja classificando a DS de alguma maneira. Assim, foram separados para compor uma seção, explicando através de uma síntese como a DS se posiciona conceitualmente em seu campo de conhecimento na GCS;
2. diversos artigos citam a DS de forma secundária, não sendo seu tema principal, mas utilizando outras abordagens para tratar a dinamicidade dos problemas de GCS. Estes trabalhos podem ser utilizados para complemento ou substituição da DS, sendo abordagens alternativas, e por isso foram considerados áreas vizinhas

da DS. Assim, pelas características destes trabalhos, verificou-se que os mesmos poderiam mostrar vantagens e desvantagens ao uso da ferramenta DS. Foram sintetizadas as diferenças principais da DS em relação a abordagens alternativas para tratar a dinamicidade em problemas da GCS. tais abordagens ficaram denominadas como vizinhança da DS;

3. outros trabalhos mesclaram a ferramenta DS com outras ferramentas. Foram considerados à parte, a fim de mostrar a flexibilidade da DS para incorporar e trabalhar em conjunto com outras ferramentas. Este tipo de integração é recomendada para o correto funcionamento da DS (Serman, 2000; p104);
4. mais uma divisão foi utilizada para os artigos com aplicação da DS em sistemas reais de GCS, chamados de aplicações práticas para efeito deste trabalho. Incluiu-se uma Tabela com os dados principais dos modelos, países de aplicação, número de elos considerados na CS, bem como as linhas de pesquisa seguidas pelos autores, diferenciando-se os trabalhos em sete grupos;
5. por fim, os trabalhos de DS sem dados reais de GCS também foram separados em linhas de pesquisa. Tal qual a categoria de construção da teoria apresentada por Angerhofer; Angelides (2000), o objetivo desta última seção foi apresentar o avanço da teoria e desenvolvimento de soluções de GCS em aplicações teórico-conceituais da ferramenta DS.

Estes cinco tópicos diferenciadores dos artigos foram definidos como os itens de revisão. Sendo assim, foi realizada uma pergunta norteadora e uma síntese para cada um. A Tabela 1 traz estas divisões e perguntas norteadoras, incluindo a quantidade de artigos

Tabela 1 – Etapas metodológicas, perguntas norteadoras e nº de artigos em cada etapa

Itens de revisão	Perguntas norteadoras	Nº artigos
1. Posição do campo	Como a DS se posiciona como conceito em seu campo de conhecimento na GCS?	10
2. Vizinhança	Para trabalhar a dinamicidade em problemas de GCS, quais as vantagens e desvantagens de outras abordagens em relação à DS?	23
3. Ferramentas	Com que outras ferramentas a DS tem se integrado para soluções em GCS e quais as implicações?	16
4. Aplicações práticas	Que aplicações com dados reais já foram realizadas, em que lugares do mundo, com qual complexidade, e que linhas de pesquisa podem ser encontradas?	30
5. Exercícios teóricos	Que aplicações numérico-conceituais tem sido realizadas, e em que linhas de pesquisa essas aplicações tem se aprofundado?	35

Fonte: Elaboração própria.

utilizados como base para a resposta a cada pergunta. Esta revisão se classifica como uma metassíntese, pois, entre os trabalhos, destacou suas semelhanças e diferenças, bem como elementos textuais, assuntos e linhas de pesquisa (Tranfield et al, 2003).

3. Resultados

Esta seção divide-se em cinco, conforme os itens de revisão constantes na Tabela 1: (1) posição do campo de pesquisa; (2) vizinhança; (3) ferramentas; (4) aplicações práticas; (5) exercícios teóricos.

3.1 Posição do campo de pesquisa da DS em GCS

Além de ferramenta, a DS também é um conceito. Paralelamente a outras teorias, conceitos e ferramentas, a DS enfatiza a natureza comportamental e dinâmica nos problemas na GCS (Serman, 2000). Otto e Kotzab (2003) fizeram um comparativo da DS com outras cinco áreas de estudo aplicadas à GCS. Estas áreas não são excludentes, mas desenvolveram algumas diferenças em suas pesquisas, em especial no que diz respeito às suas ênfases, como é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação de perspectivas para resolver problemas dentro da GCS

Comparativo	Perspectiva para abordagem dos problemas da GCS
Ferramenta DS	Busca-se principalmente produzir comportamentos rapidamente adaptativos às mudanças do ambiente com entendimento holístico
Ferramenta de Pesquisa Operacional <i>hard</i>	Orienta-se para a otimização recursos atingindo um conjunto de objetivos de serviço
Disciplina de Logística	Procura-se principalmente refletir um modelo de processos compacto, estável, integrado e com interfaces otimizadas
Disciplina de <i>Marketing</i>	Enfatiza-se fundamentalmente o atendimento das características e nível de serviço em cada segmento de consumidores
Disciplina de Estratégia empresarial	Destaca-se a necessidade de que um novo produto chegue ao mercado a tempo, e com a companhia prospectivamente ocupando segmentos de alto potencial na cadeia (<i>moving target</i>)
Área de Estudo de Administração de Empresas	Permite-se a realização dos objetivos das organizações pela seleção e administração apropriada de relacionamentos entre as organizações e com seu ambiente.

Fonte: Adaptado de Otto e Kotzab (2003).

Além da perspectiva de adaptação, a DS constitui uma das formas de modelagem da CS, sendo, no caso, a simulação em tempo contínuo (Hennies et al., 2013). Algumas outras formas para modelagem da CS são o modelo SCOR, modelos da teoria dos jogos, modelos das redes de Petri e modelos de otimização matemática (Hennies et al., 2013). Em relação ao

tipo de simulação, a DS de tempo contínuo diferencia-se de outros três tipos: eventos discretos, agentes e ciências físicas (Jain et al., 2013).

Em sua operacionalização, a ferramenta DS é uma metodologia interpretativa, por depender fundamentalmente das experiências e percepções humanas em relação aos comportamentos dos sistemas (Giacomo; Patrizi, 2010). Neste sentido, a DS na GCS se diferencia das metodologias positivistas e instrumentalistas (Giacomo; Patrizi, 2010).

Na construção de modelos de DS, existe uma diferença entre os conceituais e os aplicados. O primeiro caso trata daqueles que não utilizam dados de sistemas reais de GCS, pendem para um lado mais agregado de informações e que têm relações globais em sistemas sociais, explicando estruturas, resultando no que pode ser chamado de teoria ampla da administração de operações, ou conhecimento estrutural (Größler et al., 2008). Por outro lado, com os modelos aplicados da DS há uma multiplicidade de detalhes a ser considerada, nos quais elementos humanos são os mais determinantes, seus relacionamentos, processos e efeitos, formando uma teoria específica que explica o conteúdo existente abaixo das estruturas de sistemas reais de GCS (Größler et al., 2008).

Em relação a outros domínios, a DS tem papel importante nas áreas de compressão temporal (Towill, 1996), reengenharia (Fowler, 1998) e sistemas de informação (Georgantzias; Katsamakias, 2008). Na compressão temporal, Towill (1996) construiu um compêndio aplicado à GCS, reunindo diversos conceitos e teorias, tais como reengenharia, efeito Burbidge (Burbidge, 1984), efeito Forrester (Forrester, 1961), entre outros. São listados resultados, auxiliando a resolver o problema temporal na CS. Na reengenharia da CS, Fowler (1998) identificou sinergias entre esta e a DS. Neste sentido, a DS seria utilizada para estudar o comportamento dos projetos de reengenharia ao longo do tempo, a fim de viabilizar um maior sucesso nestes projetos, muitos deles comprometidos pelos comportamentos inesperados dos sistemas (Fowler, 1998; Sterman, 2000). Em contrapartida, a reengenharia pode ser um fator estruturador para a DS para sistemas ideais de GCS através da sua abordagem de processos. Por fim, nos sistemas de informação, Georgantzias e Katsamakias (2008) propuseram as seguintes atividades em sinergia com a DS para a GCS: capturar os requisitos do sistema; projetar e desenvolver sistemas de informação de alta qualidade; aumentar o sucesso dos projetos de sistemas de informação; aumentar a satisfação do usuário; e adicionar valor ao negócio lidando com ambientes sócio técnicos dinâmicos e complexos.

Por fim, para entender os tipos de problemas de GCS abordados no campo de pesquisa da DS na GCS, diversos trabalhos construíram listagens para os respectivos problemas (Tako;

Robinson, 2012; Ivanov; Sokolov, 2013). Em Ivanov e Sokolov (2013), os autores identificaram sete classes de problemas dinâmicos no domínio da otimização da GCS, sugerindo diferentes usos para diversas ferramentas, com a DS sendo utilizável em todas as situações listadas. Outros casos foram identificados por Tako e Robinson (2012), com 17 classes de problemas no estudo geral de GCS.

3.2 Vizinhança da DS em GCS

Vizinhança refere-se a outras ferramentas e metodologias abordando a dinamicidade de sistemas em GCS. Estas incluíram planilhas (Disney; Towil, 2003; Potter; Lalwani, 2008), simulação por agentes (Mele et al., 2006); formulações matemáticas (Anderson Jr, 2001; Dejonckheere et al., 2003; Ouyang; Daganzo, 2008); descrições qualitativo-gerenciais (Bailey; Francis, 2008; Harland, 1996); simulação por eventos discretos (Rytilä; Spens, 2006; Rei et al., 2009); teoria de controle (Ovalle; Marquez, 2003; 2003b; Ge et al., 2004; Wikner, 2005; Naim, 2006; Saed, 2008; Shukla e Naim, 2009; Springer e Kim, 2010; Zhou et al., 2010; Chaudhari et al, 2011; Zhang et al., 2012); e outros métodos de modelagem por objetos (Hung et al., 2006; Hines et al., 2011). Cada um destes meios para abordar a dinamicidade de problemas na GCS apresenta vantagens e desvantagens em relação à DS na Tabela 3.

A partir destas vantagens e desvantagens, algumas particularidades da DS se sobressaem. Dessa forma, podem ser desprezadas três questões que são intrínsecas à abordagem da DS, cujo funcionamento é explicado a seguir: dependência da consulta a especialistas, aprendizado organizacional e simplificações.

No quesito dependência da consulta a especialistas, considerando-os como sendo aqueles com conhecimento específico do sistema em estudo, a DS é considerada uma ferramenta intermediária entre as abordagens *soft* e *hard* por oferecer uma forma de transição entre sistemas conceituais e sistemas numéricos. Sendo assim, em relação à vizinhança, a DS ficaria entre as formulações matemáticas e as descrições qualitativo gerenciais, nas quais estaria incluído o método *soft* (Pidd, 2009). A DS simula variáveis qualitativas que são difíceis de medir, como no caso da confiança em fornecedores, havendo dependência das percepções humanas para construção deste tipo de relação, sendo este também um diferencial seu em relação à sua vizinhança (Lorentz; Hilmola, 2012). Por outro lado, para modelagem das relações entre estas variáveis qualitativas, a dependência de especialistas aparece mais fortemente, embora esta dependência também se aplique a qualquer abordagem da

metodologia interpretativa, com os trabalhos qualitativos das abordagens *soft* (Bailey; Francis, 2008; Giacomo; Patrizi, 2010). Em contrapartida, uma utilização exclusiva de abordagens *hard*, tais como a teoria de controle e formulações matemáticas, limita-se devido à dinamicidade das modificações nos parâmetros do ambiente, as quais são típicas nos problemas de GCS (Hennies et al., 2013).

Tabela 3 – Vizinhança: vantagens e desvantagens de outras formas de estudar a dinamicidade de sistemas de GCS em relação à DS

Vizinhança da DS em GCS	Vantagens em relação à DS	Desvantagens em relação à DS	Referências
Planilhas	Mais simples, acessíveis e conhecidas que a DS	Necessário conceitos da teoria de controle para otimização e torna-se inviável com nº alto de variáveis	Potter; Lawani, 2008; Disney; Towil, 2003
Agentes	Podem incluir otimizações parciais nos módulos do modelo	Perda do controle sobre os comportamentos modelados	Mele et al., 2006
Formulações matemáticas	Mais adaptadas que a DS para encontrar soluções ótimas	Mais limitada para a dinamicidade de diversos parâmetros de entrada	Dejonckhere et al., 2003; Ouyang; Daganzo, 2008
Descrições qualitativo-gerenciais	Entendimento qualitativo e subjetivo mais desenvolvido acerca dos sistemas de GCS	Limitado para analisar maior número de causas e para determinar a natureza das relações	Baley; Francis, 2008; Harland, 2006
Eventos discretos	Menor uso computacional para maiores horizontes que a DS	Não captam a realimentação nem ampliações no tempo	Rei et al., 2009; Rytälä; Spens, 2006
Teoria de controle	Otimização é inerente aos métodos de teoria de controle	Tende a tecnicidade e distanciamento de questões maiores	Chaudhari et al., 2011; Zhang et al., 2012
Modelagem por objetos	Mais simples e com menos necessidade de modeladores experientes	Flexibilidade reduzida e tipicamente sem opções de otimização	Hung et al., 2006

Fonte: Elaboração própria.

Para o aprendizado da utilização rotineira da DS nas organizações, não obstante a flexibilidade da DS para lidar com problemas qualitativos, depende-se da proficiência do uso (Serman, 2000). O mesmo se verifica para as demais abordagens da vizinhança. No caso da DS, tentativas para tornar a ferramenta mais acessível têm sido realizadas (Hennies et al., 2013), bem como proposições para diferentes utilizações no trabalho operacional das empresas (Duggan, 2002) e controles em tempo real (Ivanov; Sokolov, 2012). Entretanto, a DS continua sendo mais utilizada para fornecer um entendimento de sistemas e diretrizes de gestão, ao invés de compor rotinas de trabalho na GCS (Baley; Francis, 2008). Verifica-se

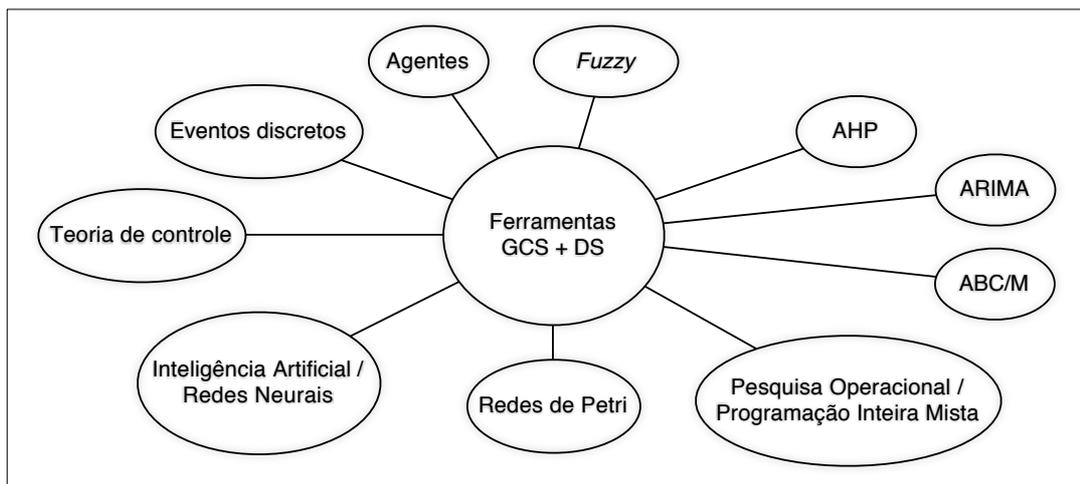
ainda que a DS tem um diferencial na construção de entendimento em grupos multifuncionais, com uma linguagem unificadora dos conhecimentos em suas causalidades, ampliando o escopo para resolução de problemas na GCS (Akkermans, 2001). A DS é especialmente indicada para promover este tipo de consenso, seja em grupos multi-funcionais, seja em plataformas por acesso remoto (Akkermans et al., 1999; Duggan, 2002).

No que tange a simplificações, considera-se que são inerentes a um processo de modelagem (Pidd, 2009). Isto se aplica a todas as abordagens, salientando-se que sem simplificações os modelos perdem o seu objetivo de resolver problemas (Sterman, 2000). No caso da análise da dinamicidade de problemas na GCS com outras abordagens, a simulação por eventos permite um detalhamento maior de dados em nível operacional que a DS (Rytilä; Spens, 2006; Rei et al., 2009).

3.3 Ferramentas agregadas com a DS em GCS

A integração da DS com outras abordagens tem tido diferentes níveis de aprofundamento e complexidade, havendo proposições para trabalhos futuros, modelos para gestão, aplicações com e sem dados reais. A Tabela 4 e Figura 2 mostram esses usos da DS com outras ferramentas.

Figura 2 – Ferramentas utilizadas junto com a DS



Fonte: Elaboração própria.

Os artigos com proposições para trabalhos futuros enfatizaram mecanismos de integração para as cadeias de suprimentos. Fiala (2005) propôs um modelo de GCS para

compartilhamento em tempo real. Akkermans e Dellaert (2005) apresentaram perspectivas para o estudo da DS na GCS com o uso de três formas de modelagem da primeira e com três formas da segunda. Ivanov e Sokolov (2012) reuniram orientações para gestão de CS *cyber-física*, onde a DS serve para modelar estruturas dinâmicas e multielios da cadeia, além da teoria de controle para questões operacionais detalhadas.

Tabela 4 – Trabalhos de integração da DS com outras abordagens na CS e seus objetivos

Autores	Tipos de trabalho	Outra abordagem (DS + ...)	Objetivo do trabalho
Akkermans; Dellaert, 2005		Teoria de controle; Eventos discretos	Superar as fraquezas inerentes a cada abordagem
Ivanov; Sokolov, 2012	Proposição trabalhos futuros	Teoria de controle; Pesquisa operacional; Inteligência artificial	Identificar uma perspectiva interdisciplinar para cadeias de suprimentos da nova geração, i.e. colaborativas e cyber-físicas
Fiala, 2005		Redes neurais artificiais (ANN); Redes de petri	Propor um modelo para compartilhamento de informações na cadeia
Khataie et al., 2011	Modelo para gestão	Programação inteira-mista (MIP); Gestão e custeio baseado em atividades (ABC/M)	Criar um sistema de suporte à decisão para a CS
Ip et al., 2010		ARIMA	Propor um método integrado para medição de performance e estabilidade na cadeia
Azadeh et al., 2013	Aplicação com dados reais	Redes neurais artificiais (ANN)	Criar um sistema de suporte para o modelo viável (VSM)
Jain et al., 2013		Simulação por eventos discretos (DES); Simulação por agentes (ABS)	Estimar o consumo de energia necessário para manter o fluxo de produtos
Rabelo et al., 2007		Simulação por eventos discretos (DES); <i>Analytic hierachy process</i> (AHP)	Modelar atividades de serviço e manufatura em uma empresa multinacional de equipamentos de construção
Wankhade; Dabade, 2006		Qualidade total (TQM)	Acrescentar uma dimensão de qualidade percebida à DS
Reiner, 2005		Simulação por eventos discretos (DES)	Avaliação de melhoria de processos para a satisfação do cliente
Hafeez et al, 1996		Teoria de controle	Criar um exemplo “ideal” de design total do sistema
Kristianto et al., 2012	Aplicação sem dados reais	Teoria de controle; Lógica <i>fuzzy</i>	Modelar um sistema de estoques administrado pelo fornecedor (VMI)
Mutingi; Mbohwa, 2012		Teoria de controle; Lógica <i>fuzzy</i>	Criar políticas robustas para situações de turbulência
Hussain et al., 2012		Teoria de controle; Projeto de experimentos de Taguchi	Melhor sistemática para a quantificação do impacto de políticas na CS
Campuzano et al., 2010		Teoria de controle; Lógica <i>fuzzy</i>	Avaliar o comportamento das estimativas de demanda com lógica <i>fuzzy</i> na CS
Anderson et al., 2005		Teoria de controle; Análise de sinais	Examinar sistematicamente diversas estratégias

Fonte: Elaboração própria.

Os artigos cujo produto foi um modelo para gestão visaram servir de suporte para decisões periódicas. Isto através da verificação dos efeitos das decisões na CS. Ip et al. (2010) incluindo a medição de performance e um modelo ARIMA para a antecipação e predição de

melhorias na cadeia. Khataie et al. (2011) utilizaram o ABC/M incorporado à DS para gerar previsões, onde a capacidade é ajustada de acordo com os pedidos, e estes são avaliados conforme tendências de compra, possibilitando decisões sensíveis a essas dinâmicas, com a programação inteira mista otimizando as entradas dos dados de simulação.

Por sua vez, as aplicações de integração da DS com outras abordagens seguiram duas tendências. Com exceção de Wankhade e Dabade (2006), que avaliaram conceitos da qualidade total pela DS, as demais integrações trabalharam, ou com DS e teoria de controle, ou com DS e simulação por eventos discretos. Azadeh et al. (2013), apesar de não simularem com eventos, utilizaram redes neurais de forma equivalente aos outros trabalhos de simulação por eventos com DS, para refinamento de dados.

Na utilização da teoria de controle em problemas dinâmicos da GCS, os trabalhos se mostraram mais teórico-conceituais (Hafeez et al., 1996). Fala-se da possibilidade de uma sinergia entre a teoria de controle e a DS para os estudos GCS, com aumento do rigor matemático na DS através da teoria de controle (Akkermans; Dellaert, 2005). Nestes trabalhos, a DS assumiu um papel qualitativo, por exemplo, com diagramas causais (Campuzano et al., 2010; Mutingi; Mbohwa, 2012), comparações (Kristianto et al. 2012), ou em etapas metodológicas iniciais (Hafeez et al., 1996). Por outro lado, Anderson et al. (2005) utilizaram equações da teoria de controle para a modelagem em DS. A lógica *fuzzy* incorporada aos modelos híbridos mostra a importância da sinergia entre as abordagens para a quantificação de percepções. Hussain et al. (2012) também estudaram teoria de controle na DS, porém incluindo projeto de experimentos de Taguchi.

Por fim, as integrações da DS com a simulação por eventos discretos apresentaram um cunho mais prático e aplicado. As abordagens deste tipo utilizaram a DS para a parte agregada, de alto nível, e utilizaram a simulação por eventos discretos para refinar os resultados (Reiner, 2005; Rabelo et al., 2007; Jain et al., 2013). Para esta integração, pode-se utilizar um software chamado GoldSim®, que simula a DS com blocos semelhantes aos da teoria de controle, com características da simulação por eventos discretos, possibilitando também a simulação de Monte Carlo, não realizada neste estudo (Kristianto et al., 2012).

Quanto aos usos das outras abordagens, Azadeh et al. (2013) utilizaram redes neurais para simular comportamentos humanos do sistema; Jain et al. (2013) simularam uma manufatura por eventos discretos; Reiner (2005) estimou as mudanças em parâmetros de entrada para a DS por eventos discretos; Rabelo et al. (2007) utilizaram simulação por eventos discretos iterativamente com a DS, recebendo e gerando entradas para o modelo.

3.4 Aplicações práticas de DS em GCS

Os artigos com dados reais de CS foram divididos em sete linhas de pesquisa, apresentados na Tabela 5. Conforme Größler et al. (2008), estes trabalhos práticos tendem a compor teorias específicas para os setores dessas cadeias. As linhas de pesquisa são temáticas centrais desenvolvidas nos artigos, as quais são descritas a seguir.

3.4.1 Colaborativo

O tema da colaboração consta na maioria dos artigos, embora seja central em apenas três. Ainda que colaboração seja um elemento importante para o sucesso da GCS, não é suficiente para isso, sendo necessários também outros fatores de diferenciação (Mason-Jones; Towill, 1998). O diferencial da abordagem da DS pode ser considerado a representação numérica dos resultados esperados em uma colaboração, aumentando o engajamento de negociação das firmas envolvidas (Akkermans, 2001). Outras formas de pensar a colaboração na GCS seriam nas relações de poder do processo de tomada de decisão (Kim; Oh, 2005) e na comparação de modelos existentes da DS com outras técnicas (Mason-Jones; Towill, 1998).

3.4.2 Financeiro

Diversos trabalhos modelaram fluxos financeiros. Alguns trataram de custos (Sachan et al., 2005; Torres e Maltz, 2010), outros arquitetaram conceitos como retorno sobre investimento (Ashayeri; Lemmes, 2006) e valor econômico agregado (De Marco et al, 2012). De Marco et al. (2012) simularam a tecnologia de RFID para aumentar o valor econômico agregado em uma loja de vestuário. Mafakheri e Nasiri (2013) estudaram a coordenação do retorno de itens entre lojas e manufaturas de cartuchos, avaliando os efeitos de incentivos e recompensas pelas devoluções.

3.4.3 Global

As questões internacionais também foram abordadas. Perdana e Kusnandar (2012) modelaram um segmento da economia Indonésia, numa relação conhecida como hélice tripla, constando de uma parceria entre governo, bancos e universidades para estruturação econômica de setores, no caso a exportação de frutos e vegetais de pequenos agricultores. Enquanto a avaliação de Perdana e Kusnandar (2012) ficou apenas no âmbito qualitativo, Teimoury et al. (2013) realizaram uma simulação multiobjetivo, mostrando a interação dos

Tabela 5 – Trabalhos práticos da DS em cadeias de suprimentos, classes, locais, modelos e assuntos

Autor	Classe	Local	Extensão	Cadeia estudada	Modelo de...	Sector
Akkermans, 2001		Holanda	3 elos	<i>High-tech</i>	<i>Renga</i> : colaboração na CS	Eletrônicos
Kim; Oh, 2005	Colaborativo	Coréia	3 elos	Telecomunicações	Performance colaborativa em manufatura, decisão	Manufatura
Mason-Jones; Towill, 1998		Reino Unido	4 elos	n.a.	Compressão do tempo	Compartilhamento de informação
Mafakheri; Nasiri, 2013		Reino Unido	3 elos	Tinta para cartuchos	Compartilhamento de receitas, cadeia reversa, <i>pareto optimal solutions</i>	Manufatura
De Marco et al., 2012	Financeiro	Itália	1 elo	Loja de vestuário	ROI, RFID, avaliação de investimentos	Geral
Ashayeria; Lemmes, 2006		Europa	5 elos	<i>LG Philips Displays</i>	Valor econômico agregado, lucratividade, planejamento	Eletrônicos
Torres; Maltz, 2010		México	5 elos	<i>North Electronics</i>	Custos, efeito chicote, ERP, APS, TOC, <i>kanban</i>	Geral
Sachan et al., 2005		Índia	6 elos	Cadeia de grãos	Custo total da cadeia, políticas	Alimentos
Teimoury et al., 2013		Irã	3 elos	Vegetais e frutos	Política de cotas de importação, <i>pareto frontier</i> , multi-objetivo, preços	Alimentos
Choi et al., 2012	Global	Coréia	5 elos	Automóveis	Desacoplamento, <i>postphonement</i>	Manufatura
Perdana; Kusnandar, 2012		Indonésia	n.a.	Vegetais e frutos	Cooperação <i>triple-helix</i> , exportações	Alimentos
Größler; Zock, 2010		Alemanha	1 elo	Indústria de serviços	Força de trabalho, recrutamento, treinamento, promoções	RH
Holweg; Bicheno, 2002	Humano	n.a.	7 elos	<i>Lean Leap Logistics</i>	Jogo educacional, <i>know-how</i> , valor	Educação
Bendoly, 2013		EUA	n.a.	Projetos de GCS	n.a.	RH
Sidola et al, 2012		Índia	1 elo	Ferramentas	Capacidade de TI, políticas	Manufatura
Verwater-Lukszo; Christina, 2005		Holanda	1 elo	Planta química	Batelada inteligente, multi-produto	Química
López; Zúñiga, 2013		Costa Rica	2 elos	Serviços jurídicos	<i>Backlogs</i> , incentivos, CS de serviços	Serviços
Low; Chen, 2013	Performance	China	2 elos	Componentes eletrônicos	<i>Taguchi, signal to noise ratio</i>	Geral
Park et al., 2011		Cingapura	2 elos	<i>Mix de concreto</i>	Filas, sincronização, sistema enxuto	Construção
Georgiadis et al., 2005		Grécia	3 elos	<i>Fast food</i>	Capacidade, estratégia, longo prazo	Alimentos
Gonçalves et al., 2005		Europa	3 elos	Semicondutores	Produção puxada-empurrada, serviços	Eletrônicos
Fan et al., 2010		China	7 elos	Armas militares	Manutenção, efeito chicote	Manutenção
Higuchi; Troutt, 2004		Japão	2 elos	<i>Tamagotchi</i>	Produtos com ciclo de vida curto	Eletrônicos
Minegishi; Thiel, 2000	Riscos	França	2 elos	Aves galineáceas	Infecção de dioxina, multi-produto	Alimentos
Le Vo; Thiel, 2011		França	3 elos	Aves galineáceas	Crise sanitária, flexibilidade, decisão	Alimentos
Peng et al., 2013		China	3 elos	Ajuda pós-sísmica	Auxílio a cidades, árvore de decisão	Sismologia
Poles, 2013		Austrália	3 elos	CEVA logística	Remanufatura, CS fechada, sistema puchado-empurrado	Logística
Besiou et al., 2012	Sustentabilidade	Grécia	5 elos	Perdas de energia	Catadores, reciclagem, deposição	Reciclagem
Georgiadis; Besiou, 2008		Grécia	5 elos	Equipamentos	CS fechada, reciclagem, inovação	Eletrônicos
Kumar; Yamaoka, 2007		Japão	7 elos	Automóveis	CS fechada, reuso, reciclagem, deposição	Automotivo

Fonte: Elaboração própria.

diversos patamares de cotas de importação para um produto. Choi et al. (2012) simularam o ponto de desacoplamento, embarque de automóveis em suas diversas fases de montagem, avaliando a variação nos custos de exportação, conforme o estado de acoplamento do produto e também segundo o grau de desenvolvimento do país de destino.

3.4.4 Humano

A classe “humano” contém modelagens para a captura e expressão de *know-how*. Holweg e Bicheno (2002) construíram um jogo chamado *lean leap game* com uma cadeia contendo sete elos, em uma modificação do *beer game*, de quatro elos (Sterman, 1989), chegando a mais produtos e opções de análise durante o jogo. O *lean leap* foi testado com diretores, avaliando o potencial educativo. No outro estudo, Größler e Zock (2010) simularam a evolução do aprendizado de trabalhadores e retenção de mão de obra.

3.4.5 Performance

A simulação de performance de sistemas com DS é conveniente por driblar dificuldades e avaliar as possíveis consequências comportamentais das formas de medição nas organizações. Os estudos relativos incluíram sistemas de manutenção (Fan et al., 2010), cadeias alimentícias (Georgiadis et al., 2005), serviço judicial (López; Zúniga, 2013), inventário para entregas (Low; Chen, 2013), custos e filas (Park et al., 2011), sistemas de TI (Sidola et al., 2012), bateladas (Verwater-Lukszo; Christina, 2005) e sistema híbrido puxado-empurrado (Gonçalves et al., 2005).

3.4.6 Riscos

As situações extremas nas CS também são alvo de simulação. Na DS em GCS, foram simuladas situações de crise sanitária (Minegishi; Thiel, 2000; Le Vo; Thiel, 2011), ampliação de capacidade de ciclo de vida curto (Higuchi; Troutt, 2004) e recuperação de cidades abaladas por terremotos (Peng et al., 2013).

3.4.7 Sustentabilidade

No tema de sustentabilidade, a simulação com DS em GCS buscou mostrar a magnitude de perdas econômicas, sociais e ambientais. Besiou et al. (2012) estudaram a influência dos catadores de lixo na reciclagem informal de elétricos e eletrônicos; Georgiadis

e Besiou (2008) estudaram o impacto da imagem verde e inovações tecnológicas em sistemas do berço ao berço; Kumar e Yamaoka (2007) investigaram a sustentabilidade na indústria automotiva do Japão, simulando o impacto de políticas do governo sobre o reuso, reciclagem e deposição; Poles (2013) abordou a remanufatura em conjunto com o planejamento da capacidade de distribuição.

3.5 Exercícios teóricos de DS em GCS

Ao contrário da seção anterior, onde os trabalhos compunham teoria específica (Größler et al., 2008) para as CS analisadas, os trabalhos conceituais apresentam finalidade estrutural, ou seja, servem de parâmetro para a análise externa de diversos tipos de cadeias (Größler et al., 2008). Como uma continuidade dos trabalhos práticos, os trabalhos conceituais seguem linhas de pesquisa semelhantes. Verifica-se que há um benefício mútuo entre os estudos teóricos e práticos devido a sua similaridade temática. Os principais assuntos abordados são apresentados na sequência.

3.5.1 Sustentabilidade

Das e Dutta (2013) desenvolveram um sistema de retorno de produtos de três vias: remanufatura ao estado original, reuso de componentes e recuperação de matéria prima. Georgiadis e Vlachos (2004) e Kamath e Roy (2007) estudaram os efeitos ambientais da recuperação de produtos de ciclo de vida curto. Outros trabalhos analisaram o impacto do planejamento do ciclo de vida combinado de dois produtos com remanufatura (Georgiadis et al., 2006; Vlachos et al., 2007; Georgiadis; Athanasiou, 2010; 2013).

3.5.2 Financeiro

Kim (2008; 2012) montou um modelo de DS para análise de investimentos em tecnologia de informação fornecedor-comprador. Marquez et al. (2004) fizeram um modelo compreensivo de integração da cadeia, avaliando a efetividade financeira e operacional na adoção de ferramentas eletrônicas de colaboração, enquanto Marquez e Blanchar (2006) desenvolveram um sistema de suporte à decisão para avaliar operações de investimentos em negócios de alta tecnologia.

3.5.3 Performance

Kumar e Nigmatullin (2011) fizeram um modelo para medir performance em cadeias de alimentos não perecíveis utilizando o *software* Powersim®. Ösbayrak et al. (2007) montaram um sistema de medidas chave para manufatura. Martínez-Olvera (2009) verificou a performance de modelos híbridos de negócio, incluindo experimentos para testes de sensibilidade, em uma interessante quantificação estratégica do negócio. Yuan et al. (2010) fizeram uma comparação de performance de sistemas estratégicos de colaboração para indústrias de alta tecnologia, entre os sistemas VMI (*vendor managed inventory*), JMI (*jointly managed inventory*) e CPFR (*collaborative planning, forecasting and replenishment*). Wikner et al. (1991) testaram estratégias básicas em uma cadeia genérica para melhoria de performance. Anderson et al. (2000) desenvolveram um modelo para avaliar a volatilidade da demanda por componentes de máquinas na cadeia a jusante.

3.5.4 Riscos

Kim e Springer (2008) analisaram a volatilidade na CS, ao passo que Marquez e Blanchar (2004) fizeram um sistema para análise de opções reais em portfólios de contratos. Em questões de ruptura na cadeia, Wilson (2007) estudou o fenômeno no transporte e Huang et al. (2012) simularam suprimentos de contingência. Lorentz e Hilmola (2012) desenvolveram um modelo automatizado de decisões chamado robô baseano, o qual identifica riscos de forma proativa e toma decisões de fornecimento. Croson e Donohue (2005) estudaram o efeito chicote na cadeia do *Beer Game* com a informação compartilhada acima ou abaixo na cadeia.

Além destes, outros trabalhos analisaram os riscos dinâmicos utilizando a teoria do caos. Larsen et al. (1999) estudaram o comportamento caótico e hiper-caótico presentes nas possibilidades de gestão no jogo *Beer Game*, revelando a dificuldade gerencial inerente de estabilização de uma CS. Também Hwarng e Xie (2008) estudaram a teoria do caos nestes sistemas, determinando intervalos de decisão entre políticas e objetivos.

3.5.5 Outros

Os artigos não categorizados, por fim, são estudos com caráter estratégico. Lin et al. (2006) trabalharam na representação do efeito cluster. Lee e Cung (2012) testaram a dinamicidade de um modelo matemático. Hussain e Drake (2011) fizeram teste de tamanhos

de lote grande descobrindo que a multiplicidade dos tamanhos de lote ao longo da cadeia como mais importantes que o tamanho dos lotes. Hedenstierna e Ng (2011) estudaram a localização do ponto de desacoplamento. Feng (2012) representou o compartilhamento de informações materiais. Duggan (2002) formulou uma programação de DS pela internet, permitindo simulação conjunta entre empresas sem necessidade de deslocamentos para resolução conjunta de problemas de GCS. Samuel et al. (2010) aplicaram os conceitos dinâmicos a uma unidade genérica para uma cadeia de serviços em hospitais. Kim e Park (2010) estudaram a colaboração VMI com a teoria dos jogos. Adamides e Pomonis (2009) estudaram os limites para a racionalidade em um contexto de evolução conjunta de produtos, produção e da cadeia de suprimentos. Li et al. (2011) modelaram um porto genérico.

4. Análise dos resultados

Os usos principais da DS na GCS são o entendimento acerca dos sistemas, isoladamente já sendo considerado um resultado; linguagem comum, uma unificação de pensamento na equipe de trabalho; quantificação de relações, ou mensuração de causalidades; quantificação de resultados globais do sistemas, vistos como estratégias percebidas pelos times de análise; educação, pelo conhecimento multidisciplinar quanti e qualitativo envolvido; transcrição de políticas humanas, por meio dos comportamentos humanos; representação e análise de sistemas naturais, ou ecossistemas; unificação de sistemas e valores, em sistemas de sistemas. Nestes usos principais onde a DS se mostra adequada há lacunas metodológicas, que são supridas por outras ferramentas, principalmente no intuito da ratificação das relações de causalidade a serem inseridas nos modelos de DS, feita através da utilização de outras ferramentas.

Uma agenda de pesquisa para a DS na área de GCS pode ser sugerida nos seguintes assuntos:

- Criação de interfaces para a DS em tempo real, com melhor usabilidade em equipes multifuncionais, analisando a curva de aprendizado com a ferramenta em diferentes setores;
- Melhoria de pontos fracos da DS na GCS pela inserção de métodos e ferramentas de diversas áreas dentro da administração de operações;
- Aplicação dos conceitos gerados na pesquisa teórica em sistemas de suprimento em setores e cadeias de suprimentos com dados reais;

- Avaliação de viabilidade dos estudos propositivos em diferentes sistemas de gestão de cadeias de suprimentos.

5. Conclusão

As possibilidades de estudo com a DS na GCS são amplas, sendo compatível sua agregação com outras teorias e ferramentas. As questões estratégicas de colaboração aparecem constantemente, o que pode ser atribuído tanto à natureza estratégica da GCS, como ao tipo de simulação da DS, determinando o comportamento de ações acumuladas no tempo.

O maior número de publicações conceituais pode ser entendido como um reflexo da dificuldade de superação da barreira existente entre os estudos qualitativos e quantitativos, aos quais a DS se propõe a conciliar. Apesar das dificuldades, a DS possibilita o entendimento e representação de relações com base em uma visão ampla dos problemas presentes nas relações dos sistemas de GCS.

Como conceito, a DS apresenta facilidade de integração com outras ferramentas e teorias, auxiliando principalmente nas representações temporais, simulação de comportamentos humanos, além de questões mais agregadas e amplas dos modelos. Comportamentos econômicos, sociais e naturais são incluídos para o entendimento de seu funcionamento conjunto, juntamente com a construção de políticas dentro das considerações e horizontes de análise.

Nesse processo, a DS tem o papel de explicitar ganhos e trazer entendimento para mitigar riscos. A conexão da DS é pouco explorada para a análise de riscos em GCS.

Com respeito à evolução na teoria, existem tendências para a utilização de tecnologias eletrônicas. Isto se aplicando a possibilidades mais automatizadas de construção de modelos, ao planejamento conjunto através de plataformas de conexão remota e à modernização da abordagem dos problemas cada vez mais complexos das cadeias de suprimentos. Com a crescente importância do entendimento e análise das relações entre as organizações e multidisciplinaridade de problemas, a DS pode ser utilizada para trazer consenso a respeito de problemas a serem enfrentados na prática da GCS.

Referências

ADAMIDES, Emanuel D.; POMONIS, Nikolaos. The co-evolution of product, production and supply chain decisions, and the emergence of manufacturing strategy. **International**

Journal of Production Economics, v. 121, n. 2, p. 301-312, 2009. doi: 10.1016/j.ijpe.2006.11.025.

AKKERMANS, Henk; DELLAERT, Nico. The rediscovery of industrial dynamics: the contribution of system dynamics to supply chain management in a dynamic and fragmented world. **System Dynamics Review**, v. 21, n. 3, p. 173-186, 2005. doi:10.1002/sdr.317.

AKKERMANS, Henk. Renga: a systems approach to facilitating inter-organizational network development. **System Dynamics Review**, v. 17, n. 3, p. 179-193, 2001. doi:10.1002/sdr.215.

ANDERSON, Edward G.; MORRICE, Douglas J.; LUNDEEN, Gary. The “physics” of capacity and backlog management in service and custom manufacturing supply chains. **System Dynamics Review**, v. 21, n. 3, p. 217-247, 2005. doi:10.1002/sdr.319.

ANDERSON JR, Edward G. Managing the impact of high market growth and learning on knowledge worker productivity and service quality. **European Journal of Operational Research**, v. 134, n. 3, p. 508-524, 2001. doi:10.2139/ssrn.1938442.

ANDERSON, Edward G.; FINE, Charles H.; PARKER, Geoffrey G. Upstream volatility in the supply chain: The machine tool industry as a case study. **Production and Operations Management**, v. 9, n. 3, p. 239-261, 2000. doi:0.2139/ssrn.1938442.

ASHAYERI, J.; LEMMES, L. Economic value added of supply chain demand planning: A system dynamics simulation. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 22, n. 5, p. 550-556, 2006. doi:10.1016/j.rcim.2005.11.010.

AZADEH, Ali; SHOUSHTARI, Kosar D.; SABERI, Morteza; TEIMOURY, Ebrahim. An Integrated Artificial Neural Network and System Dynamics Approach in Support of the Viable System Model to Enhance Industrial Intelligence: The Case of a Large Broiler Industry. **Systems Research and Behavioral Science**, v. 31, n. 2, 2013. doi:10.1002/sres.2199.

BAILEY, Kate; FRANCIS, Mark. Managing information flows for improved value chain performance. **International Journal of Production Economics**, v. 111, n. 1, p. 2-12, 2008. doi:10.1016/j.ijpe.2006.11.017.

BENDOLY, Elliot. System Dynamics Understanding in Projects: Information Sharing, Psychological Safety, and Performance Effects. **Production and Operations Management**, v. 23, n. 8, 2013. doi:10.1111/poms.12024.

BESIOU, Maria; GEORGIADIS, Patroklos; VAN WASSENHOVE, Luk N. Official recycling and scavengers: Symbiotic or conflicting?. **European journal of operational research**, v. 218, n. 2, p. 563-576, 2012. doi:10.2139/ssrn.1685277.

BURBIDGE, John L. Automated production control with a simulation capability. In: **Proceedings of IFIP conference WG**. 1984. p. 5-7. doi:.

CAMPUZANO, Francisco; MULA, Josefa; PEIDRO, David. Fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 161, n. 11, p. 1530-1542, 2010. doi:10.1016/j.fss.2009.12.002.

CHAUDHARI, Gaurav S.; STURGES, Robert H.; SANDU, Corina. Impact of Combined Feedback–Feedforward Control-Based Ordering Policies on Supply Chain Stability and Responsiveness. **Systems Research and Behavioral Science**, v. 28, n. 4, p. 340-352, 2011. doi:10.1002/sres.1085.

CHOI, Kanghwa; NARASIMHAN, Ram; KIM, Soo Wook. Postponement strategy for international transfer of products in a global supply chain: A system dynamics examination. **Journal of Operations Management**, v. 30, n. 3, p. 167-179, 2012. doi:10.1016/j.jom.2012.01.003.

CROSON, Rachel; DONOHUE, Karen. Upstream versus downstream information and its impact on the bullwhip effect. **System Dynamics Review**, v. 21, n. 3, p. 249-260, 2005. doi:10.1002/sdr.320.

DAS, Debabrata; DUTTA, Pankaj. A System Dynamics Framework for Integrated Reverse Supply Chain with Three Way Recovery and Product Exchange Policy. **Computers & Industrial Engineering**, v. 66, n. 4, p. 720-733, 2013. doi:10.1016/j.cie.2013.09.016.

DE MARCO, Alberto; CAGLIANO, Anna C.; NERVO, Mauro L.; RAFELE, Carlo. Using System Dynamics to assess the impact of RFID technology on retail operations. **International Journal of Production Economics**, v. 135, n. 1, p. 333-344, 2012. doi:10.1016/j.ijpe.2011.08.009.

DEJONCKHEERE, Jeroen; DISNEY, S. M.; LAMBRECHT, M. R.; TOWIL, D. R. Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach. **European Journal of Operational Research**, v. 147, n. 3, p. 567-590, 2003. doi:10.1016/S0377-2217(02)00369-7.

DI GIACOMO, Laura; PATRIZI, Giacomo. Methodological analysis of supply chains management applications. **European Journal of Operational Research**, v. 207, n. 1, p. 249-257, 2010. doi:10.1016/j.ejor.2010.05.003.

DISNEY, Stephen M.; TOWILL, Denis R. The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip Effect in supply chains. **International journal of production economics**, v. 85, n. 2, p. 199-215, 2003. doi:10.1016/S0925-5273(03)00110-5.

DUGGAN, Jim. A distributed computing approach to system dynamics. **System Dynamics Review**, v. 18, n. 1, p. 87-98, 2002. doi: 10.1002/sdr.228.

FAN, Chin-Yuan; FAN, Pei-Shu; CHANG, Pei-Chann. A system dynamics modeling approach for a military weapon maintenance supply system. **International Journal of Production Economics**, v. 128, n. 2, p. 457-469, 2010. doi:10.1016/j.ijpe.2010.07.015.

FENG, Yang. System dynamics modeling for supply chain information sharing. **Physics Procedia**, v. 25, p. 1463-1469, 2012. doi:10.1016/j.phpro.2012.03.263.

FIALA, Petr. Information sharing in supply chains. **Omega**, v. 33, n. 5, p. 419-423, 2005. doi:10.1016/j.omega.2004.07.006.

FORRESTER, Jay Wright. System Dynamics and Learner-Centered-Learning in Kindergarten through 12th Grade Education. **Text of remarks delivered December 12**, D-4337, 1992.

FORRESTER, Jay Wright. **System dynamics and K-12 teachers**. Retrieved August, v. 8, p. 1-34, 2008, 1996.

FORRESTER, Jay Wright. **Industrial dynamics**. Cambridge, MA: MIT press, 1961. ISBN-10:1614275335.

FOWLER, Alan. Operations management and systemic modelling as frameworks for BPR. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 18, n. 9/10, p. 1028-1056, 1998. doi:10.1108/01443579810225603.

GE, Y.; YANG, J. B.; PROUDLOVE, N.; SPRING, M. System dynamics modelling for supply-chain management: A case study on a supermarket chain in the UK. **International Transactions in Operational Research**, v. 11, n. 5, p. 495-509, 2004. doi:10.1111/j.1475-3995.2004.00473.x.

GEORGANTZAS, Nicholas C.; KATSAMAKAS, Evangelos G. Information systems research with system dynamics. **System Dynamics Review**, v. 24, n. 3, p. 247-264, 2008. doi:10.1002/sdr.420.

GEORGIADIS, Patroklos; ATHANASIOU, Efstratios. Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing. **European Journal of Operational Research**, v. 225, n. 1, p. 44-58, 2013. doi:10.1016/j.ejor.2012.09.021.

GEORGIADIS, Patroklos; ATHANASIOU, Efstratios. The impact of two-product joint lifecycles on capacity planning of remanufacturing networks. **European Journal of Operational Research**, v. 202, n. 2, p. 420-433, 2010. doi:10.1016/j.ejor.2009.05.022.

GEORGIADIS, Patroklos; BESIIOU, Maria. Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: a system dynamics approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 15, p. 1665-1678, 2008. doi:10.1016/j.jclepro.2008.04.019.

GEORGIADIS, Patroklos; VLACHOS, Dimitrios; TAGARAS, George. The Impact of Product Lifecycle on Capacity Planning of Closed-Loop Supply Chains with Remanufacturing. **Production and Operations management**, v. 15, n. 4, p. 514-527, 2006. doi:10.1111/j.1937-5956.2006.tb00160.x.

GEORGIADIS, Patroklos; VLACHOS, Dimitrios; IAKOVOU, Eleftherios. A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains. **Journal of food engineering**, v. 70, n. 3, p. 351-364, 2005. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.06.030.

GEORGIADIS, Patroklos; VLACHOS, Dimitrios. The effect of environmental parameters on product recovery. **European Journal of Operational Research**, v. 157, n. 2, p. 449-464, 2004. doi:10.1016/S0377-2217(03)00203-0.

GONÇALVES, Paulo; HINES, Jim; STERMAN, John. The impact of endogenous demand on push–pull production systems. **System dynamics review**, v. 21, n. 3, p. 187-216, 2005. doi:10.1002/sdr.318.

GRÖBLER, Andreas; ZOCK, Alexander. Supporting long-term workforce planning with a dynamic aging chain model: A case study from the service industry. **Human Resource Management**, v. 49, n. 5, p. 829-848, 2010. doi:10.1002/hrm.20382.

GRÖBLER, Andreas; THUN, Jörn-Henrik; MILLING, Peter M. System dynamics as a structural theory in operations management. **Production and operations management**, v. 17, n. 3, p. 373-384, 2008. doi:10.3401/poms.1080.0023.

HAFEEZ, K.; GRIFFITHS, M.; GRIFFITHS, J.; NAIM, M. M. Systems design of a two-echelon steel industry supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 45, n. 1, p. 121-130, 1996. doi:10.1016/0925-5273(96)00052-7.

HARLAND, Christine M. Supply chain management: relationships, chains and networks. **British Journal of management**, v. 7, n. s1, p. S63-S80, 1996. doi:10.1111/j.1467-8551.1996.tb00148.x.

HEDENSTIERNA, Philip; NG, Amos HC. Dynamic implications of customer order decoupling point positioning. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 22, n. 8, p. 1032-1042, 2011. doi:10.1108/17410381111177476.

HENNIES, Til; REGGELIN, Tobias; TOLUJEW, Juri; PICCUT, Pierre-Alain. Mesoscopic supply chain simulation. **Journal of Computational Science**, v. 5, n. 3, p. 463-470, 2013. doi:10.1016/j.jocs.2013.08.004.

HIGUCHI, Toru; TROUTT, Marvin D. Dynamic simulation of the supply chain for a short life cycle product—Lessons from the Tamagotchi case. **Computers & Operations Research**, v. 31, n. 7, p. 1097-1114, 2004. doi:10.1016/S0305-0548(03)00067-4.

HINES, James; MALONE, T.; GONÇALVES, P.; HERMAN, GEORGE, H.; QUIMBY, J.; MURPHY-HOYE, M.; RICE, J.; PATTEN, J.; ISHII, H. Construction by replacement: A new approach to simulation modeling. **System Dynamics Review**, v. 27, n. 1, p. 64-90, 2011. doi:10.1002/sdr.437.

HOLWEG, Matthias; DISNEY, Stephen M. The evolving frontiers of the bullwhip problem. In: **Proceedings of the Conference EurOMA: Operations and Global Competitiveness**. p. 707-716. 2005. ISBN:9789632184555.

HOLWEG, Matthias; BICHENO, John. Supply chain simulation—a tool for education, enhancement and endeavour. **International journal of production economics**, v. 78, n. 2, p. 163-175, 2002. doi: 10.1016/S0925-5273(00)00171-7.

HUANG, Minfang; YANG, Miaoying; ZHANG, Yuankai; LIU, Bingyi. System Dynamics Modeling-based Study of Contingent Sourcing under Supply Disruptions. **Systems Engineering Procedia**, v. 4, p. 290-297, 2012. pii:S2211381911002311.

HUNG, Wing Yan; SAMSATLI, Nouri J.; SHAH, Nilay. Object-oriented dynamic supply-chain modelling incorporated with production scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 169, n. 3, p. 1064-1076, 2006. doi:10.1016/j.ejor.2005.02.009.

HUSSAIN, Matloub; DRAKE, Paul R. Analysis of the bullwhip effect with order batching in multi-echelon supply chains. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 41, n. 10, p. 972-990, 2011. doi:10.1108/09600031111166438.

HUSSAIN, Matloub; DRAKE, Paul R.; LEE, Dong Myung. Quantifying the impact of a supply chain's design parameters on the bullwhip effect using simulation and Taguchi design of experiments. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 42, n. 10, p. 947-968, 2012. doi:10.1108/09600031211281448.

HWARNG, H. Brian; XIE, Na. Understanding supply chain dynamics: A chaos perspective. **European Journal of Operational Research**, v. 184, no. 3, p. 1163-1178, 2008. doi:10.1016/j.ejor.2006.12.014.

IP, W. H.; CHAN, S. L.; LAM, C. Y. Modeling supply chain performance and stability. **Industrial Management & Data Systems**, v. 111, n. 8, p. 1332-1354, 2011. doi:10.1108/02635571111171649.

IVANOV, Dmitry; SOKOLOV, Boris. Dynamic co-ordinated scheduling in the supply chain under a process modernisation. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 9, p. 2680-2697, 2013. doi:10.1080/00207543.2012.737950#.VO5gWLPF8y4.

IVANOV, Dmitry; SOKOLOV, Boris. Control and system-theoretic identification of the supply chain dynamics domain for planning, analysis and adaptation of performance under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 224, n. 2, p. 313-323, 2012. doi:10.1016/j.ejor.2012.08.021.

JAIN, Sanjay; LINDSKOG, Erik; ANDERSSON, Jon; JOHANSSON, Björn. A Hierarchical Approach for Evaluating Energy Trade-offs in Supply Chains. **International Journal of Production Economics**, v. 146, n. 2, p. 411-422, 2013. doi:10.1016/j.ijpe.2013.03.015.

KAMATH, Narasimha B.; ROY, Rahul. Capacity augmentation of a supply chain for a short lifecycle product: A system dynamics framework. **European Journal of Operational Research**, v. 179, n. 2, p. 334-351, 2007. doi:10.1016/j.ejor.2006.03.045.

KIM, Soo Wook. An investigation of information technology investments on buyer-supplier relationship and supply chain dynamics. **The Asian Journal on Quality**, v. 13, n. 3, p. 250-267, 2012. doi:10.1108/15982681211287793.

KIM, Soo Wook. The Effect of Information Technology on Arms-Length Buyer-Supplier Relationship. **The Asian Journal on Quality**, v. 9, n. 3, p. 57-69, 2008. doi:10.1108/15982688200800027.

KIM, Bowon; OH, Heungshik. The impact of decision-making sharing between supplier and manufacturer on their collaboration performance. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 10, n. 3, p. 223-236, 2005. doi:10.1108/13598540510606287.

KIM, Bowon; PARK, Chulsoon. Coordinating decisions by supply chain partners in a vendor-managed inventory relationship. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 29, n. 2-3, p. 71-80, 2010. doi:10.1016/j.jmsy.2010.09.002.

KIM, Ilhyung; SPRINGER, Mark. Measuring endogenous supply chain volatility: Beyond the bullwhip effect. **European Journal of Operational Research**, v. 189, n. 1, p. 172-193, 2008. doi:10.1016/j.ejor.2007.05.012.

KHATAIE, Amirhossein; DEFERSHA, Fantahun M.; BULGAK, Akif Asil. A multi-objective optimisation approach for order management: incorporating activity-based costing in supply chains. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 17, p. 5007-5020, 2011. doi:10.1080/00207540903095442.

KUMAR, Sameer; NIGMATULLIN, Anvar. A system dynamics analysis of food supply chains—Case study with non-perishable products. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 19, n. 10, p. 2151-2168, 2011. doi:10.1016/j.simpat.2011.06.006.

KUMAR, Sameer; YAMAOKA, Teruyuki. System dynamics study of the Japanese automotive industry closed loop supply chain. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 18, n. 2, p. 115-138, 2007. doi:10.1108/17410380710722854.

LARSEN, Erik R.; MORECROFT, John DW; THOMSEN, Jesper S. Complex behaviour in a production–distribution model. **European Journal of Operational Research**, v. 119, n. 1, p. 61-74, 1999. doi:10.1016/S0377-2217(98)90349-6.

LEE, Ching-Fang; CHUNG, Chien-Ping. An Inventory Model for Deteriorating Items in a Supply Chain with System Dynamics Analysis. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 40, p. 41-51, 2012. doi:10.1016/j.sbspro.2012.03.159.

LI, Jianfeng; LI, WeiHang; LIN, Yan. Port Supply Chain Simulation Model under Interactive Analysis. **Procedia Engineering**, v. 15, p. 2082-2086, 2011. doi:10.1016/j.proeng.2011.08.389.

LIN, Chin-Huang; TUNG, Chiu-Mei; HUANG, Chih-Tai. Elucidating the industrial cluster effect from a system dynamics perspective. **Technovation**, v. 26, n. 4, p. 473-482, 2006. doi:10.1016/j.technovation.2004.11.008.

LÓPEZ, Luis; ZÚÑIGA, Roy. Dynamics of judicial service supply chains. **Journal of Business Research**, v. 67, n. 7, p. 1447-1454, 2013. doi:10.1016/j.jbusres.2013.07.022.

LORENTZ, Harri; HILMOLA, Olli-Pekka. Confidence and supply chain disruptions: Insights into managerial decision-making from the perspective of policy. **Journal of Modelling in Management**, v. 7, n. 3, p. 328-356, 2012. doi:10.1108/17465661211283304.

LOW, Chinyao; CHEN, Ya hsueh. A model measurement system for collaborative supply chain partners. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 3, p. 180-188, 2013. doi:10.1016/j.jmsy.2012.06.003.

MAFAKHERI, Fereshteh; NASIRI, Fuzhan. Revenue Sharing Coordination in Reverse Logistics: The Case of Used Printer Cartridges. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 185-196, 2013. doi:10.1016/j.jclepro.2013.06.031.

MARQUEZ, Adolfo Crespo; BLANCHAR, Carol. A decision support system for evaluating operations investments in high-technology business. **Decision Support Systems**, v. 41, n. 2, p. 472-487, 2006. doi:10.1016/j.dss.2004.08.012.

MARQUEZ, Adolfo Crespo; BLANCHAR, Carol. The procurement of strategic parts. Analysis of a portfolio of contracts with suppliers using a system dynamics simulation model. **International Journal of Production Economics**, v. 88, n. 1, p. 29-49, 2004. doi:10.1016/S0925-5273(03)00177-4.

MARQUEZ, Adolfo Crespo; BIANCHI, Carmine; GUPTA, Jatinder ND. Operational and financial effectiveness of e-collaboration tools in supply chain integration. **European Journal of Operational Research**, v. 159, n. 2, p. 348-363, 2004. doi:10.1016/j.ejor.2003.08.020.

MARTÍNEZ-OLVERA, César. Benefits of using hybrid business models within a supply chain. **International Journal of Production Economics**, v. 120, n. 2, p. 501-511, 2009. doi:10.1016/j.ijpe.2009.04.006.

MASON-JONES, Rachel; TOWILL, Denis R. Time compression in the supply chain: information management is the vital ingredient. **Logistics Information Management**, v. 11, n. 2, p. 93-104, 1998. doi:10.1108/09576059810209964.

MELE, Fernando D.; MÉNDEZ, Carlos A.; ESPUÑA, Antonio; PUIGJANER, Luiz. A novel combined approach for supply chain modeling and analysis. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 21, p. 2207-2212, 2006. doi:10.1016/S1570-7946(06)80376-7.

MIN, Hokey; ZHOU, Gengui. Supply chain modeling: past, present and future. **Computers & Industrial Engineering**, v. 43, n. 1, p. 231-249, 2002. doi: 10.1016/S0360-8352(02)00066-9.

MINEGISHI, Shotaro; THIEL, Daniel. System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain. **Simulation Practice and Theory**, v. 8, n. 5, p. 321-339, 2000. doi:10.1016/S0928-4869(00)00026-4.

MUTINGI, Michael; MBOHWA, Charles. Fuzzy System Dynamics Simulation For Manufacturing Supply Chain Systems With Uncertain Demand. In: **Computers and Industrial Engineering**, v. 42, 2012.

NAIM, M. M. The impact of the net present value on the assessment of the dynamic performance of e-commerce enabled supply chains. **International Journal of Production Economics**, v. 104, n. 2, p. 382-393, 2006. doi:10.1016/j.ijpe.2004.11.015.

NAIM, Mohamed M.; TOWILL, Denis R. Establishing a framework for effective materials logistics management. **International Journal of Logistics Management**, v. 5, n. 1, p. 81-88, 1994. doi:10.1108/09574099410805108.

OTTO, Andreas; KOTZAB, Herbert. Does supply chain management really pay? Six perspectives to measure the performance of managing a supply chain. **European Journal of Operational Research**, v. 144, n. 2, p. 306-320, 2003. doi:10.1016/S0377-2217(02)00396-X.

ÖZBAYRAK, Mustafa; PAPADOPOULOU, Theopisti C.; AKGUN, Melek. Systems dynamics modelling of a manufacturing supply chain system. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 15, n. 10, p. 1338-1355, 2007. doi:10.1016/j.simpat.2007.09.007.

OUYANG, Yanfeng; DAGANZO, Carlos. Robust tests for the bullwhip effect in supply chains with stochastic dynamics. **European Journal of Operational Research**, v. 185, n. 1, p. 340-353, 2008. doi:10.1016/j.ejor.2006.10.046.

OVALLE, Oscar Rubiano; MARQUEZ, Adolfo Crespo. The effectiveness of using e-collaboration tools in the supply chain: an assessment study with system dynamics. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 9, n. 4, p. 151-163, 2003. doi:10.1016/S1478-4092(03)00005-0.

OVALLE, Oscar Rubiano; MARQUEZ, Adolfo Crespo. Exploring the utilization of a CONWIP system for supply chain management. A comparison with fully integrated supply chains. **International Journal of Production Economics**, v. 83, n. 2, p. 195-215, 2003b. doi:10.1016/S0925-5273(02)00328-6.

PARK, Moonseo; KIM, Woo-Young; LEE, Hyun-Soo; HAN, Sangwon. Supply chain management model for ready mixed concrete. **Automation in Construction**, v. 20, n. 1, p. 44-55, 2011. doi:10.1016/j.autcon.2010.07.005.

PENG, Min; PENG, Yi; CHEN, Hong. Post-seismic supply chain risk management: a system dynamics disruption analysis approach for inventory and logistics planning. **Computers & Operations Research**, v. 42, p. 14-24, 2013. doi:10.1016/j.cor.2013.03.003.

PERDANA, Tomy; HUSNANDAR. The Triple Helix Model for Fruits and Vegetables Supply Chain Management Development Involving Small Farmers in Order to Fulfill the Global Market Demand: A Case Study in "Value Chain Center (VCC) Universitas Padjadjaran". **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 52, p. 80-89, 2012. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.444.

POLES, Roberto. System Dynamics modelling of a production and inventory system for remanufacturing to evaluate system improvement strategies. **International Journal of Production Economics**, v. 144, n. 1, p. 189-199, 2013. doi:10.1016/j.ijpe.2013.02.003.

POTTER, Andrew; LALWANI, Chandra. Investigating the impact of demand amplification on freight transport. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 44, n. 5, p. 835-846, 2008. doi:10.1016/j.tre.2007.06.001.

RABELO, Luis; ESKANDARI, Hamidreza; SHAALAN, Tarek; HELAL, Magdy. Value chain analysis using hybrid simulation and AHP. **International Journal of Production Economics**, v. 105, n. 2, p. 536-547, 2007. doi:10.1016/j.ijpe.2006.05.011.

REI, Rui Jorge; MADERA, Peter Josef; PEDROSO, Joao Pedro. Khronos-A high-level framework for Discrete Event Simulation in Python. In **Computers & Industrial Engineering**, 2009. CIE 2009. International Conference, p. 1574-1579. IEEE, 2009. doi:10.1109/ICCIE.2009.5223762.

REINER, Gerald. Customer-oriented improvement and evaluation of supply chain processes supported by simulation models. **International Journal of Production Economics**, v. 96, n. 3, p. 381-395, 2005. doi:10.1016/j.ijpe.2004.07.004.

RYTILÄ, Jyrki S.; SPENS, Karen M. Using simulation to increase efficiency in blood supply chains. **Management Research News**, v. 29, n. 12, p. 801-819, 2006. doi:10.1108/01409170610717826.

SACHAN, Amit; SAHAY, B. S.; SHARMA, Dinesh. Developing Indian grain supply chain cost model: a system dynamics approach. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 54, n. 3, p. 187-205, 2005. doi:10.1108/17410400510584901.

SAEED, Khalid. Trend forecasting for stability in supply chains. **Journal of Business Research**, v. 61, n. 11, p. 1113-1124, 2008. doi:10.1016/j.jbusres.2007.11.005.

SAMUEL, Cherian; GONAPA, Kasiviswanadh; CHAUDHARY, P. K.; MISHRA, Ananya. Supply chain dynamics in healthcare services. **International journal of health care quality assurance**, v. 23, n. 7, p. 631-642, 2010. doi:10.1108/09526861011071562.

SHUKLA, Vinaya; NAIM, M. M. The impact of capacity constraints on supply chain dynamics. In: **Computers & Industrial Engineering, 2009. CIE 2009. International Conference on**. IEEE, p. 925-930, 2009. doi: 10.1109/ICCIE.2009.5223782.

SIDOLA, Atul; KUMAR, Pradeep; KUMAR, Dinesh. System dynamics investigation of information technology in small and medium enterprise supply chain. **Journal of Advances in Management Research**, v. 9, n. 2, p. 199-207, 2012. doi:10.1108/09727981211271940.

SPRINGER, Mark; KIM, Ilhyung. Managing the order pipeline to reduce supply chain volatility. **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 2, p. 380-392, 2010. doi:10.1016/j.ejor.2009.08.009.

TANG, Ou; MUSA, Nurmaya. Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management. **International Journal of Production Economics**, v. 133, n. 1, p. 25-34, 2011. doi:10.1016/j.ijpe.2010.06.013.

TAKO, Antuela A.; ROBINSON, Stewart. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. **Decision Support Systems**, v. 52, n. 4, p. 802-815, 2012. doi:10.1016/j.dss.2011.11.015.

TEIMOURY, E.; NEDAEI, H.; ANSARI, S.; SABBAGHI, M. A multi-objective analysis for import quota policy making in a perishable fruit and vegetable supply chain: A system dynamics approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 93, p. 37-45, 2013. doi:10.1016/j.compag.2013.01.010.

TORRES, Octavio Carranza; MALTZ, Arnold B. Understanding the Financial Consequences of the Bullwhip Effect in a Multi-Echelon Supply Chain. **Journal of Business Logistics**, v. 31, n. 1, p. 23-41, 2010. doi:10.1002/j.2158-1592.2010.tb00126.x.

TOWILL, Denis R. Time compression and supply chain management-a guided tour. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 1, n. 1, p. 15-27, 1996. doi:10.1108/13598549610799040.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British journal of management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003. doi:10.1111/1467-8551.00375.

VERWATER-LUKSZO, Zofia; CHRISTINA, Tri Susilowati. System-Dynamics modelling to improve complex inventory management in a batch-wise plant. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 20, p. 1357-1362, 2005. doi:10.1016/S1570-7946(05)80068-9.

VO, Thi Le Hoa; THIEL, Daniel. Economic simulation of a poultry supply chain facing a sanitary crisis. **British Food Journal**, v. 113, n. 8, p. 1011-1030, 2011. doi:10.1108/00070701111153760.

VLACHOS, Dimitrios; GEORGIADIS, Patroklos; IAKOVOU, Eleftherios. A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 2, p. 367-394, 2007. doi:10.1016/j.cor.2005.03.005.

WANKHADE, Lalit; DABADE, B. M. TQM with quality perception: a system dynamics approach. **The TQM Magazine**, v. 18, n. 4, p. 341-357, 2006. doi:10.1108/09544780610671020.

WIKNER, Joakim. Dynamic analysis of a production-inventory model. **Kybernetes**, v. 34, n. 6, p. 803-823, 2005. doi:10.1108/03684920510595508.

WIKNER, Joaquim; TOWIL, D. R.; NAIM, M. Smoothing supply chain dynamics. **International Journal of Production Economics**, v. 22, n. 3, p. 231-248, 1991. doi:10.1016/0925-5273(91)90099-F.

WILSON, Martha C. The impact of transportation disruptions on supply chain performance. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 43, n. 4, p. 295-320, 2007. doi:10.1016/j.tre.2005.09.008.

YUAN, Xumei; SHEN, Ling; ASHAYERI, Jalal. Dynamic simulation assessment of collaboration strategies to manage demand gap in high-tech product diffusion. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 26, n. 6, p. 647-657, 2010. doi:10.1016/j.rcim.2010.06.020.

ZHANG, Yongan; WANG, Ying; WU, Long. Research on Demand-driven Leagile Supply Chain Operation Model: A Simulation Based on AnyLogic in System Engineering. **Systems Engineering Procedia**, v. 3, p. 249-258, 2012. doi:10.1016/j.sepro.2011.11.027.

ZHOU, Li; DISNEY, Stephen; TOWILL, Denis R. A pragmatic approach to the design of bullwhip controllers. **International Journal of Production Economics**, v. 128, n. 2, p. 556-568, 2010. doi:10.1016/j.ijpe.2010.07.023.

Capítulo 3: A Utilização de Arquétipos da Dinâmica de Sistemas para o Estudo de Riscos na Gestão de Cadeias de Suprimentos

DANIEL WRITZL ZINI

RICARDO AUGUSTO CASSEL

Resumo

O aumento de complexidade na cadeia de suprimentos traz a necessidade do controle e gerenciamento de um conjunto cada vez maior de incertezas para sua gestão. Assim, tem aumentado o número de riscos com os quais os gestores devem se preocupar, sem contudo uma fundamentação causal sobre os mecanismos geradores de riscos. Este trabalho se propõe a demonstrar a compatibilidade dos arquétipos de Dinâmica de Sistemas com o estudo de riscos na Gestão de Cadeias de Suprimentos (GCS) para identificação de comportamentos geradores dos mesmos. Desta forma, realiza-se: (i) a identificação e classificação de riscos em GCS; (ii) aplicação de 12 arquétipos da Dinâmica de Sistemas a riscos de GCS. Conclui-se que os arquétipos facilitam a representação e análise de diversos riscos de GCS, possibilitando o estudo de seus mecanismos, comportamentos e variáveis envolvidas.

Palavras-chave: Riscos em Gestão de Cadeias de Suprimentos; Arquétipos; Dinâmica de Sistemas.

Abstract

The increasing supply chain complexity raises uncertainty to the supply chain management (SCM) and control. The managers need to attain more risk issues, but there's a lack on risk generating mechanisms study. We develop in this paper a link between the supply chain risks and the system dynamics archetypes, in order to reveal the compatibility of the archetypes to identify generating risk mechanisms. Therefore, first we classify supply chain risks through a literature comparison, then we identify risks in the classification for system dynamics archetypes conceptual representation. 12 archetypes were identified for several supply chain risk generating mechanisms. Conclusion supports the archetypes adequacy for dealing with the infrequent nature of varied supply chain risks.

Keywords: *Supply chain risk management; Archetypes; System dynamics.*

1. Introdução

A mitigação de riscos é considerada uma das cinco formas de criação de valor na GCS (Brandenburg, 2013). Devido a tendências mercadológicas e concorrenciais, a cadeia de suprimentos aumentou em tamanho e complexidade, assim como sua exposição a incertezas (Diabat et al., 2014). Diversos fatores influenciam no aumento da complexidade da cadeia de suprimentos, como a customização de produtos, presença de serviços e bens complementares, competição, especialização, globalização e interligações entre as cadeias de suprimentos, entre outros (Wagner; Kemmerling, 2014). Esse aumento de complexidade na cadeia de suprimentos, por outro lado, traz consigo a necessidade do controle e gerenciamento de um conjunto cada vez maior de incertezas (Heckman et al., 2015).

O estudo de riscos em cadeias de suprimentos apresentou poucos avanços na definição básica de risco (Heckman et al., 2015). Publicações têm salientado a natureza incipiente da área, assim como a necessidade de criar definições, conjuntamente a um entendimento comum acerca dos riscos e da forma de análise dos mesmos em GCS (Rangel et al., 2014; Heckman et al., 2015). Na falta de uma teoria específica para lidar com os riscos em GCS, utilizam-se conceitos de outras áreas, tais como negócios ou projetos (Heckman et al., 2015). O *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP) define que três atividades são indicadas para a gestão de riscos de negócio: identificação dos riscos, sua priorização e implementação de planos de ação (CSCMP, 2013).

A implementação consiste em analisar os riscos e gerar procedimentos e indicadores de forma a controlá-los a fim de que, em sua ocorrência, tomem-se ações planejadas de contingência (Tang; Musa, 2011). Com planos visando orientar decisões, o objeto de pesquisa é formado por ambientes futuros pouco conhecidos, onde considera-se importante destacar tanto os aspectos quantitativos quanto qualitativos para a construção de planos mais apropriados na prática gerencial de riscos em cadeias de suprimentos (Heckman et al., 2015).

A construção de planos em riscos precisa de um entendimento acerca dos mecanismos causadores dos riscos (O'Donnel, 2005). Na Dinâmica de Sistemas, que é um conceito, método e ferramenta de simulação, os mecanismos de comportamentos sociais e naturais são estudados a fim de gerar um entendimento sistêmico dos eventos de um sistema (Lin et al., 2006). Assim, a Dinâmica de Sistemas possibilita para esses mecanismos uma compreensão para mitigar os riscos, baseada no comportamento observado dos sistemas em estudo. Encontra-se dessa forma os pontos de alavancagem do sistema, com este consistindo

no conjunto de variáveis que interagem gerando os seus comportamentos, e a alavancagem sendo a busca dos resultados desejados no sistema (Größler et al., 2008).

Na Dinâmica de Sistemas, um dos conceitos trata dos arquétipos, que significam comportamentos facilmente observados na natureza e em sistemas humanos (Senge, 1994). Esses comportamentos se baseiam em interações entre variáveis, de forma a gerar efeitos conhecidos, que podem ser identificados e adaptados de uma área de conhecimento para outra (Forrester, 2008).

O objetivo deste trabalho é, portanto, adaptar os arquétipos da Dinâmica de Sistemas que tem sido utilizados em outras áreas de estudo, para o estudo em gestão de cadeias de suprimentos. Com isso, demonstrando a sua compatibilidade com o estudo de riscos na GCS, mais especificamente no entendimento dos mecanismos geradores dos riscos, a fim de auxiliar na identificação de comportamentos geradores e perpetuadores de riscos em GCS. Para tal, realiza-se: (i) a identificação de riscos através de uma classificação de riscos em GCS; (ii) a aplicação de 12 arquétipos de Dinâmica de Sistemas para os riscos de GCS.

Sendo assim, após esta introdução, este trabalho se divide em oito seções, a segunda trazendo a metodologia utilizada, a terceira explicitando o conceito de risco utilizado, a quarta compondo uma classificação de riscos em GCS e a quinta identificando riscos nessas classes. Na sequência, a seção seis apresenta uma transição para a Dinâmica de Sistemas, seguida da seção sete, com a aplicação de 12 arquétipos para os riscos de GCS. Termina-se na seção oito com uma conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

2. Metodologia

Este trabalho é de natureza exploratória, que busca preencher a lacuna conceitual existente no estudo de riscos com a utilização de arquétipos sistêmicos. Para a realização deste propósito, seguiram-se duas etapas: a primeira realizando um levantamento dos riscos em GCS de forma abrangente; e a segunda aplicando estes riscos aos conceitos de arquétipos sistêmicos de forma inédita na cadeia de suprimentos.

Assim, primeiro, para o levantamento dos riscos em GCS, 18 artigos contendo classificações de riscos em GCS foram coletados, tendo suas classes comparadas e unificadas. Dentro dessa classificação única, diversos riscos foram levantados para demonstrar sua utilização na própria identificação de cada um deles em GCS. Estes procedimentos visaram

fornecer uma base ampla de identificação de riscos em GCS, a partir da qual é possível trabalhá-los com outros conceitos, neste caso, os arquétipos sistêmicos.

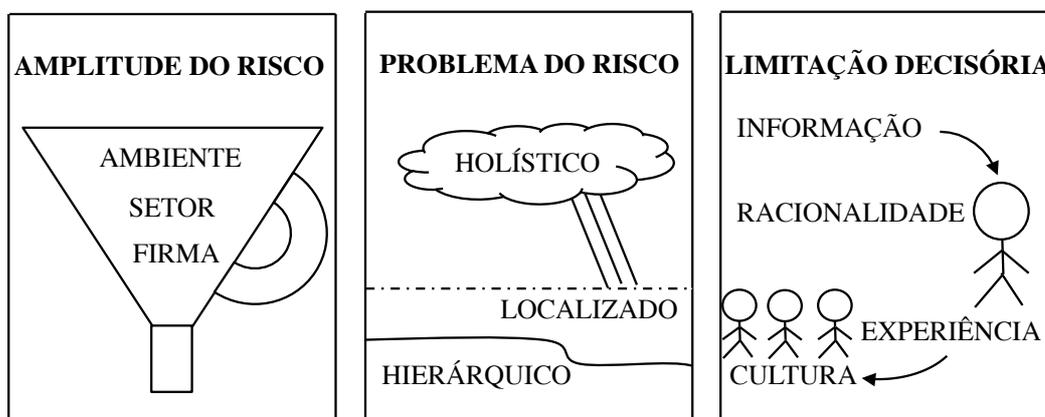
Em segundo, vários dos riscos identificados foram utilizados para representar a aplicabilidade de doze arquétipos sistêmicos, considerados mais adequados para representação de mecanismos geradores de riscos. Avalia-se qualitativamente o uso sugerido para cada um dos arquétipos, que são construídos de acordo com a compatibilidade do risco com o conceito de cada arquétipo.

3. Conceito de risco

Numericamente, um risco pode ser definido como a probabilidade de ocorrência para um evento, com um impacto associado (Blomea; Schoenherr, 2011). Estes números são utilizados para a mensuração, comparação e priorização de riscos (Rangel et al., 2014). Apesar de haver abordagens para riscos para eventos benéficos (Arrow, 1970), neste trabalho, o risco será tratado como um evento indesejado, que gera resultados incertos quanto à quantidade de prejuízos resultantes do evento de risco (Holton, 2004).

Para a identificação de riscos, pode-se utilizar diferentes métodos, tais como o mapeamento da cadeia de valor, ou estudo dos fatores dos riscos (O'Donnel, 2005). Como mostra a Figura 1, há três fatores para os riscos organizacionais: amplitude do risco, problema do risco e limitação decisória (Rao; Goldsby, 2009).

Figura 1 – Três fatores para os riscos em GCS



Fonte: Adaptado de Rao e Goldsby (2009).

A amplitude do risco no âmbito físico, onde os riscos podem exercer influência, seja afetando o ambiente mais amplo, um setor inteiro, ou apenas uma firma (Rao; Goldsby,

2009). Com relação aos outros fatores de riscos, o fator amplitude é o único excludente, ou seja, um risco não assume duas categorias ao mesmo tempo, sendo por isso também o fator mais utilizado para a construção de classificações de riscos em GCS na literatura (Singhal et al., 2011). Devido a essa característica excludente, a classificação construída na próxima seção também se utiliza do fator amplitude como base.

Por sua vez, o problema do risco refere-se à maneira como a organização lida com os riscos, o qual influencia na visão e abordagem dos riscos de GCS em uma organização (Tang; Musa, 2011). Nesse sentido, a abordagem pode ser holística, localizada ou hierárquica (Rao; Goldsby, 2009). A abordagem holística dos riscos considera a estrutura total de riscos e o entendimento das variáveis chave e relacionamentos envolvidos (O'Donnell, 2005). Por sua vez, a abordagem localizada dos problemas salienta a análise de objetivos e restrições para a resolução dos problemas (Beutel; Minner, 2012). Por fim, a abordagem hierárquica enfoca a complexidade das tarefas, com suas diversas dimensões de decisão (Bode; Wagner, 2014). Neste trabalho, se utilizou uma abordagem holística dos riscos, a qual tem a vantagem de buscar a sua visualização como partes de um todo relacionado (Behl; Ferreira, 2014).

Ademais, o fator de risco por limitação decisória envolve os aspectos cognitivos para a tomada de decisão individual e coletiva, compreendendo informação, racionalidade, experiência e cultura, com um risco podendo apresentar uma ou mais destes itens (Rao; Goldsby, 2009). No caso deste trabalho, visou-se auxiliar principalmente na redução do risco que emana do processo de busca por informação.

4. Classes de riscos em GCS

Uma forma para a identificação de riscos é através da utilização de classificações (Rangel et al., 2014). Em GCS, os riscos partem de seus respectivos fatores, afetando a cadeia de suprimentos (Manuj; Mentzer, 2008). Na Tabela 1, apresentam-se 18 autores, os quais apresentaram classificações de riscos em GCS, com seus respectivos métodos de construção.

A leitura das classificações de riscos em GCS permite verificar que estas baseiam-se em diferentes fatores. Embora os resultados finais dessas classificações demonstrem, em maior parte, formas de expressar a amplitude dos riscos de GCS, algumas classes misturam os outros fatores de riscos. Como exemplos, pode-se citar as classes de riscos estratégicos e informacionais, as quais poderiam ser afetadas por qualquer um dos outros (Harland et al., 2003; Miccucci; Pizzolato, 2008).

Tabela 1 – Classificações de Riscos em GCS e seus respectivos Métodos de Classificação

Autor da classificação	Método para construção da classificação
Svensson, 2002	<i>Survey</i>
Harland et al., 2003	Quatro estudos de caso
Jüttner et al., 2003	Revisão e entrevistas exploratórias
Cavinato, 2004	Proposição
Chopra; Sohdi, 2004	Escolha simples
Christopher; Peck, 2004	Ampliação de outra classificação
Hallikas et al., 2004	Estudos de caso
Shi, 2004	Proposição
Tang, 2006	Classificação de artigos
Wu et al., 2006	Revisão extensiva e entrevistas
Wang; Yang, 2007	<i>Survey</i>
Miccuci, 2008	Revisão e proposição
Manuj; Mentzer, 2008	14 entrevistas em grupos focados com executivos e extensa revisão
Tang; Tomlin, 2008	Explicação dos riscos mais citados
Rao; Goldsby, 2009	Síntese e adaptação do domínio amplo de riscos
Qun, 2010	Proposição
Singhal et al., 2011	Multi-classificação de artigos
Rangel et al., 2014	Revisão e proposição

Fonte: Elaboração própria.

No entanto, mesmo com os aparentes conflitos, é possível encontrar uma convergência destas classificações através da análise do conteúdo das classes. Dentro de cada classificação, as classes são definidas e exemplificadas. Estes exemplos e definições, sendo semelhantes, permitem convergir a literatura de classificações dentro de uma única classificação de riscos em GCS. Esta convergência é apresentada na Tabela 2.

Na Tabela 2, as macro classes e classes pertencem à classificação de Rao; Goldsby (2009), considerada a classificação mais abrangente por incluir uma síntese de diversas áreas do estudo dos riscos. As subclasses, por sua vez, foram criadas a partir da análise das definições nas classificações da Tabela 1, a fim de fornecer uma discriminação satisfatória para a identificação dos riscos em GCS.

Tabela 2 – Classificação de Riscos em GCS: Convergência das Classificações

Macro classe	Classe	Subclasse	Classificações
Ambiente	Desastre natural		Chopra; Sohdi, 2004; Christopher; Peck, 2004; Shi, 2004; Wu et al., 2006; Wang; Yang, 2007; Miccuci, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Qun, 2010; Rangel et al., 2014
	Flutuação macroeconômica		Christopher; Peck, 2004; Shi, 2004; Tang, 2006; Wang; Yang, 2007; Manuj; Mentzer, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Singhal et al., 2011; Rangel et al., 2014
	Regulação econômica		Harland et al., 2003; Christopher; Peck, 2004; Shi, 2004; Wu et al., 2006; Miccuci, 2008; Tang; Tomlin, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Rangel et al., 2014
	Insegurança política		Chopra; Sohdi, 2004; Shi, 2004; Christopher; Peck, 2004; Wu et al., 2006; Tang; Tomlin, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Qun, 2010; Singhal et al., 2011; Rangel et al., 2014
	Incompatibilidade social/ cultural		Wang; Yang, 2007; Manuj; Mentzer, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Rangel et al., 2014
Setor	Mercado de <i>inputs</i>	Suprimentos	Harland et al., 2003; Jüttner et al., 2003; Cavinato, 2004; Chopra; Sohdi, 2004; Christopher; Peck, 2004; Tang, 2006; Wu et al., 2006; Wang; Yang, 2007; Miccuci, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Qun, 2010; Singhal et al., 2011; Rangel et al., 2014
		Pessoal	Shi, 2004; Wu et al., 2006; Rao; Goldsby, 2009; Qun, 2010
	Mercado do produto fim	Demanda /atendimento	Harland et al., 2003; Chopra; Sohdi, 2004; Hallikas et al., 2004; Tang, 2006; Wu et al., 2006; Miccuci, 2008; Manuj; Mentzer, 2008; Tang; Tomlin, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Qun, 2010; Rangel et al., 2014
		Cliente /requerimentos	Wu et al., 2006; Wang; Yang, 2007; Miccuci, 2008; Manuj; Mentzer, 2008; Rao; Qun, 2010; Rangel et al., 2014
	Competitivo	Relaciona-mento	Svensson, 2002; Jüttner et al., 2003; Cavinato, 2004; Chopra; Sohdi, 2004; Tang, 2006; Wang; Yang, 2007; Miccuci, 2008; Manuj; Mentzer, 2008; Tang; Tomlin, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Qun, 2010; Rangel et al., 2014
		Inércia	Harland et al., 2003; Jüttner et al., 2003; Wu et al., 2006; Miccuci, 2008; Manuj; Mentzer, 2008; Rangel et al., 2014
Firma	Operacional	Produção / <i>output</i>	Harland et al., 2003; Chopra; Sohdi, 2004; Hallikas et al., 2004; Wu et al., 2006; Miccuci, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Singhal et al., 2011; Rangel et al., 2014
		Trabalho /ritmo	Harland et al., 2003; Cavinato, 2004; Chopra; Sohdi, 2004; Shi, 2004; Wu et al., 2006; Tang; Tomlin, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Rangel et al., 2014
	Responsabilidade, pesquisa e desenvolvimento	Ações jurídicas	Svensson, 2002; Harland et al., 2003; Shi, 2004; Tang, 2006; Miccuci, 2008; Rao; Goldsby, 2009
		Reputação /inovação	Harland et al., 2003; Cavinato, 2004; Wu et al., 2006; Miccuci, 2008; Tang; Tomlin, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Singhal et al., 2011
		Impacto ambiental Legal/fiscal	Shi, 2004; Wang; Yang, 2007; Manuj; Mentzer, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Qun, 2010; Singhal et al., 2011 Harland et al., 2003; Shi, 2004; Wang; Yang, 2007; Miccuci, 2008; Rangel et al., 2014
	Crédito/financeiro /custos		Harland et al., 2003; Cavinato, 2004; Shi, 2004; Hallikas et al., 2004; Tang, 2006; Wu et al., 2006; Wang; Yang, 2007; Rao; Goldsby, 2009; Rangel et al., 2014
Agência /estratégico		Harland et al., 2003; Manuj; Mentzer, 2008; Rao; Goldsby, 2009; Singhal et al., 2011; Rangel et al., 2014	

Fonte: Elaboração própria.

5. Identificação dos riscos dentro das classes

Conforme exposto anteriormente acerca do conceito, pode-se considerar que um risco é composto de dois fatores: evento prejudicial e resultados incertos (Holton, 2004). Não tendo o objetivo de ser exaustiva, a Tabela 3 identifica riscos em GCS com seus respectivos eventos e resultados, a fim de mostrar uma forma de caracterização destes na classificação construída.

A partir da Tabela 3, verifica-se que tanto os eventos quanto os resultados podem envolver variáveis intangíveis. Percebe-se também que o impacto de um risco não diz respeito apenas à intensidade do evento prejudicial, mas também aos desdobramentos necessários para contornar os prejuízos, e os eventos podem ser fruto de acumulações.

Tabela 3 – Caracterização de Riscos nas Classificações

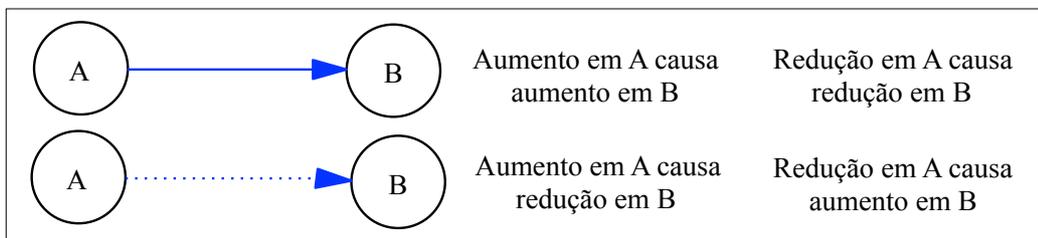
Classe/Subclasse	Riscos identificados	Evento prejudicial	Resultados incertos
Desastre natural	Furacão, avalanche	Destruição direta ou perda logística	Tempo e custos de recuperação
Flutuação macroeconômica	Câmbio, preços, valor das ações	Aumento de custos ou queda de ganhos	Sobrevivência da firma
Regulação econômica	Cotas, impostos	Impedimento produtivo	Perda de lucratividade
Instabilidade política	Golpe, novos regimes	Políticas desfavoráveis	Insegurança, adaptação
Incompatibilidade social/cultural	Produto, distribuição ou <i>marketing</i> inadequados	Pequena adesão	Readaptação da estratégia
Suprimentos	Ruptura de suprimento, má qualidade	Suspensão de atividade ou perda de valor	Tempo, custos, resposta do mercado
Pessoal	Falta de mão de obra especializada	Baixa capacidade de produção	Tempo e custos de treinamento, retenção
Demanda/atendimento	Indisponibilidade, erros de entrega, previsão	Clientes mal atendidos ou indignados	Influência sobre o mercado
Cliente/requerimentos	Substituição, mudança de requerimentos	Migração da demanda	Queima de estoques e desenvolvimento
Relacionamento	Barganha, visibilidade, oportunismo, autoria	Interação ou cooperação prejudicial	Perda de confiança, desempenho
Inércia	Perda de diferenciação	Competências perdidas	Competição por preços
Produção/ <i>output</i>	Quebras de máquina, sobrecargas	Incapacidade, inflexibilidade	Resposta dos clientes, perdas de fidelização
Trabalho/ritmo	Regras, controles, políticas inefetivos	Ineficiências, improdutividade	Imagem da falta de agilidade, burocracia
Ações jurídicas	Litígios, contratos, acidentes	Danos a empresa ou pessoa física	Indenizações, multas e encargos
Reputação	Danos do produto ou processo nos clientes	Danos sociais ou nos clientes	Reputação da organização ou marca
Impacto ambiental	Vazamento, explosão, deposição de resíduos	Prejuízos ambientais	Ambiente, reputação, encargos
Legal/fiscal	Obrigações legais, fiscalização	Descumprimento legal	Indenizações, multas e encargos
Crédito	Liquidez, crédito, dívida, venda financiada	Aumento de custos ou queda de ganhos	Valor da companhia, oportunidade
Agência	Subutilização das funções do negócio	Baixa performance da agência, desvalorização	Comprometimento de estratégia, lucros

Fonte: Elaboração própria.

6. A Dinâmica de Sistemas

Como referido anteriormente, a Dinâmica de Sistemas é um conceito, método e ferramenta de simulação (Lin et al., 2006). Como conceito, a Dinâmica de Sistemas considera que os sistemas humanos e naturais são formados por interações entre variáveis ao longo do tempo (Forrester, 1961). Estas interações são representadas na forma de ciclos fechados de relações de proporcionalidade entre as variáveis chave de um sistema de interesse (Sterman, 2000). A Figura 2 mostra essas relações para formar os *causal loop diagrams* (CLD) da área de estudo chamada pensamento sistêmico (Senge, 1994).

Figura 2 – Tipos de relação entre variáveis

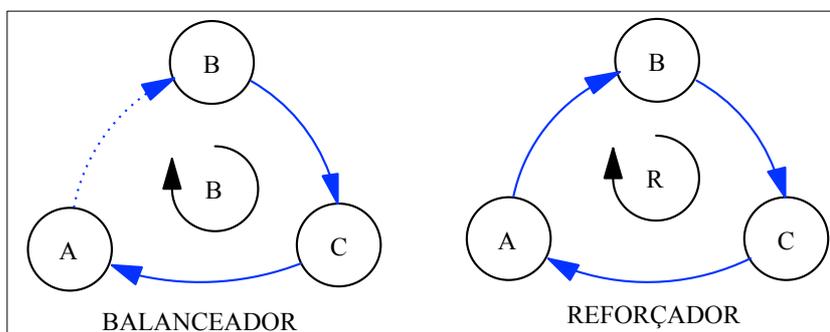


Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

Um conjunto dessas relações entre as variáveis chave de um sistema forma os comportamentos que são os enlaces de realimentação de um CLD, como mostra a Figura 3. No enlace balanceador, o aumento de uma variável causará a redução desta mesma variável. Neste comportamento, se a variável A aumenta, B reduz, também reduzindo C e novamente A. No enlace reforçador, um aumento em A produz outro aumento de A, aumentando indefinidamente. Também uma redução em A produz redução em A, reduzindo indefinidamente.

Na combinação de enlaces balanceadores e reforçadores entra o conceito de complexidade dos sistemas (Forrester, 2008). Complexidade significa que a mente humana não pode conceber as dinâmicas de interação entre os enlaces, sendo necessário ferramentas computacionais para descobrir os níveis de sensibilidade e dominância entre eles (Sterman, 2000). Devido a esta complexidade, frequentemente chega-se a resultados considerados inesperados, pois contrariam a lógica linear com uma lógica circular de causas e efeitos (Forrester, 2008). Sendo assim, a dinâmica dos sistemas precisa ser testada computacionalmente para o entendimento dos seus comportamentos, o que é feito através da ferramenta de simulação Dinâmica de Sistemas (Sterman, 2000).

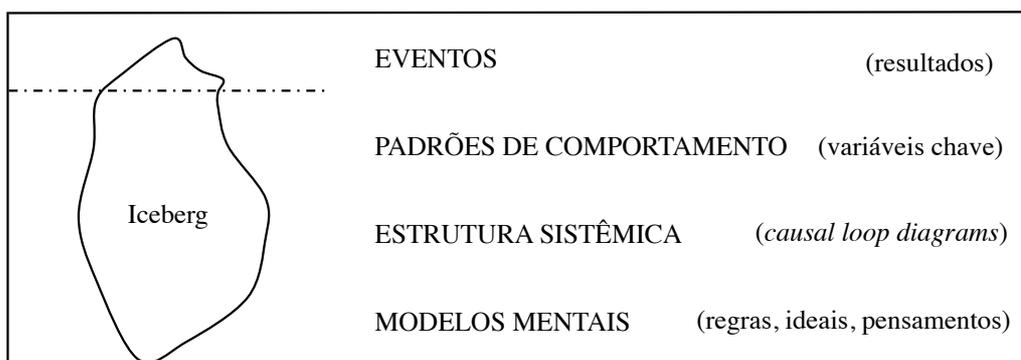
Figura 3 – Tipos de enlaces de comportamento circular



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

Diante deste cenário, a Dinâmica de Sistemas utiliza conceitualmente de quatro níveis de análise para os problemas: eventos, padrões de comportamento, estrutura sistêmica e modelos mentais (Pesut, 1999). A Figura 4 mostra as relações entre os níveis, onde os eventos são gerados pelos modelos mentais (Senge, 1994). Os modelos mentais são as regras e ideias das pessoas, que formam a estrutura sistêmica (enlaces), a qual gera padrões de comportamento percebidos nas variáveis chave, resultando nos eventos observados no tempo (Behl; Ferreira, 2014).

Figura 4 – Estrutura conceitual dos mecanismos geradores dos eventos



Fonte: Adaptado de Senge (1994).

7. Arquétipos de Dinâmica de Sistemas adaptados para os riscos de GCS

Na área de Dinâmica de Sistemas, arquétipos são padrões de comportamento categorizados formados por combinações de enlaces, cujos comportamentos já são conhecidos, reduzindo a necessidade de simulação caso mais enlaces e variáveis não sejam adicionados (LOPN, 2015). Arquétipos podem ser utilizados para facilitar o processo de simulação de Dinâmica de Sistemas na conceitualização dos sistemas a serem estudados

(Kontogiannis, 2012). Outra vantagem dos arquétipos é facilitar o consenso com linguagem e estrutura para a interpretação dos comportamentos (Akkermans, 2001).

Em uma abordagem típica Dinâmica de Sistemas no ambiente empresarial, começa-se pelo entendimento das variáveis chave do sistema para representar um problema recorrente (Akkermans et al., 1999). Nos riscos de GCS, pelo contrário, por sua natureza eventual, muitas vezes não é possível medir esta recorrência (Bogataj; Bogataj, 2007). Por esse motivo, é necessária a utilização dos arquétipos para encontrar os mecanismos geradores de eventos mesmo que estes não tenham acontecido. Analisando os mecanismos comportamentais dos riscos antes da proposição dos planos de ação, é possível realizar uma abordagem causal para os riscos.

Tabela 4 – Arquétipos utilizados para a Análise de Riscos

Arquétipo	Referência	Risco identificado	Classificação do risco
1. Enlace reforçador	Kontogiannis, 2012	Golpe, boicote	Instabilidade política, Reputação
2. Limites para o sucesso	Prusty et al., 2014	Regras inefetivas	Trabalho/ritmo
3. Sucesso ao bem sucedido	Ghashghaie et al., 2014	Desvalorização, substituição	Flutuação macroeconômica, Cliente/requerimentos
4. Crescimento e subinvestimento	Alves et al., 2014	Mau atendimento	Demanda/atendimento
5. Tragédia dos comuns	Prusty et al., 2014	Falta de mdo especializada	Pessoal
6. Adversários acidentais	LOPN, 2015	Cooperação prejudicial	Relacionamento
7. Crescimento-S excessivo com oscilação	Sterman, 2000	Inviabilidade de projeto	Crédito
8. Enlace balanceador com atraso	Kontogiannis, 2012	Descontrole do efeito chicote	Relacionamento
9. Quebra galhos que não dão certo	Gohari et al., 2013	Espiral da morte	Inércia
10. Escalada / perseguição	Rosenfeld et al., 2007	Perda de diferenciação	Inércia
11. Metas declinantes	LOPN, 2015	Má qualidade de suprimento	Suprimentos
12. Crescimento e declínio	Sterman, 2000	Esgotamento de recursos	Suprimentos

Fonte: Elaboração própria.

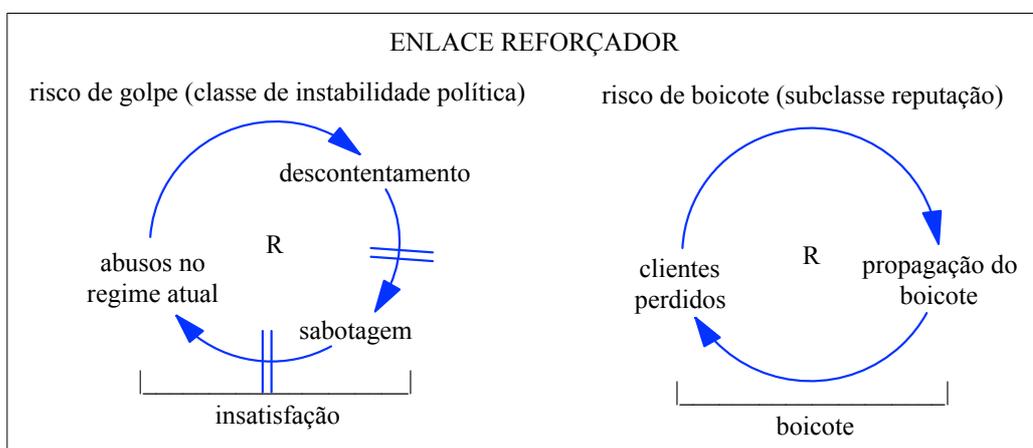
Por isso, na área de riscos, a função dos arquétipos fica sendo a busca por modelos de referência. Estes servem para verificar a proximidade de um modelo de Dinâmica de Sistemas à realidade ou à validade de um comportamento a ser representado. Nesse sentido, pode-se afirmar que uma validação conceitual passa a ser possível a partir dos arquétipos (Sterman, 2000).

A Tabela 4 mostra os 12 arquétipos utilizados nesta análise. A classificação de riscos em GCS é utilizada para encontrar riscos que podem ser representados pelos arquétipos. Essa representação implica que os mecanismos dos arquétipos podem se comportar de forma a produzir o evento de risco. Pode-se dizer que, em geral, apesar de eventuais, os riscos são gerados durante longos períodos de tempo em que condições de risco trabalham até que o evento se manifeste (Bogataj; Bogataj, 2007). A seguir, serão apresentados os arquétipos adaptados para o estudo em diversos riscos de GCS.

7.1 Enlace reforçador

O enlace reforçador tem a característica de representar um efeito repentino no tempo (Kontogiannis, 2012). Trata-se de variáveis que se influenciam mutuamente na mesma direção, causando um aumento exponencial ou declínio exponencial. Na Figura 5, demonstra-se como poderiam ser representados os mecanismos geradores de riscos na classe de instabilidade política e subclasse de reputação/boicote. Nos colchetes abaixo dos círculos causais, cada enlace recebe uma descrição do comportamento que representa.

Figura 5 – Arquétipo Enlace Reforçador



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

Na classe de instabilidade política, percebe-se que o risco de golpe tem uma característica repentina, exatamente como esperado em um enlace reforçador. Um estudo de seu mecanismo gerador poderia ser representado como uma exponencial de descontentamento, até que o golpe seja executado. De outro lado, o mesmo comportamento

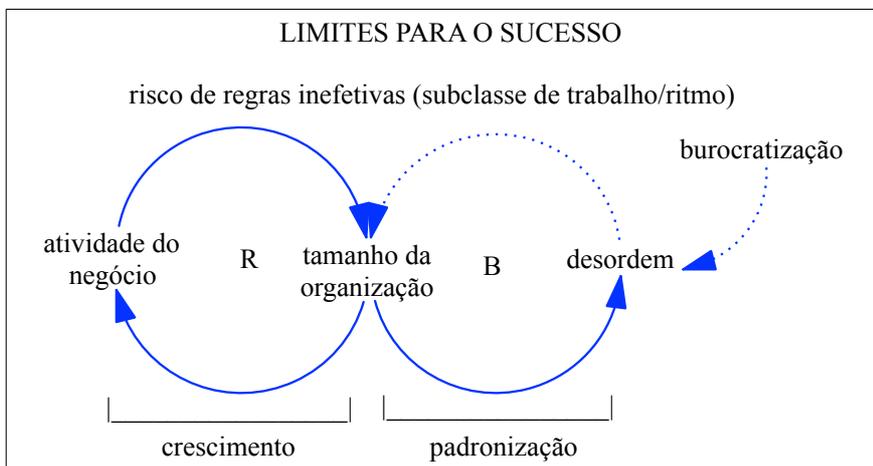
pode ser observado na geração do risco de boicote, onde mais clientes perdidos aumentam a sua propagação.

7.2 Limites para o sucesso

Limites para o sucesso a forma de referência a uma ação de crescimento que encontra o seu limite (Prusty et al., 2014). Tendo o formato de uma curva-S, envolve a atuação conjunta de dois enlaces, um com o comportamento reforçador e outro balanceador, que passa a limitar o enlace crescente após determinado nível. Na Figura 6, um risco que poderia ser gerado desta forma é representado, pertencente à subclasse de trabalho/ritmo.

Nesta subclasse, percebe-se que o risco de regras inefetivas funciona de forma a limitar o crescimento de uma organização. No caso da cadeia de suprimentos, este risco pode ser mais importante na organização da GCS ou em empresas gargalo ao longo da cadeia. Como a limitação não pode ser evitada, deve-se medir as possibilidades de forma a dimensionar adequadamente o volume de atividade pretendida no negócio, contando com estas perdas de eficiência.

Figura 6 – Arquétipo Limites para o Sucesso



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

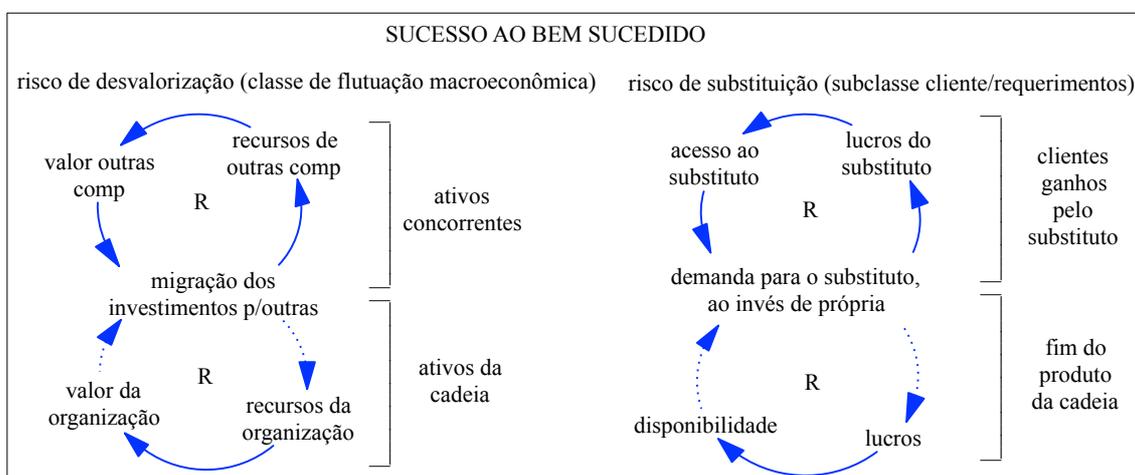
7.3 Sucesso ao bem sucedido

Sucesso ao bem sucedido refere-se a uma situação onde o sucesso de um agente é realimentado pelo insucesso de outro (Ghashghaie et al., 2014). Também chamado efeito de profecias auto-realizadoras, trata-se de dois enlaces reforçadores, trabalhando juntos como um

único enlace reforçador. Na Figura 7, esses mecanismos são representados em riscos na classe de flutuação macroeconômica e subclasse cliente/requerimentos.

Na classe de flutuação macroeconômica, verifica-se que o risco de desvalorização de ativos está inserido neste comportamento, em especial na questão acionária. Embora haja outros mecanismos para impedir quedas repentinas, a parte do mecanismo que depende das crenças dos investidores se caracteriza adequadamente ao arquétipo. Por outro lado, na subclasse cliente/requerimentos, um comportamento idêntico se encontra no risco de substituição.

Figura 7 – Arquétipo Sucesso ao bem sucedido



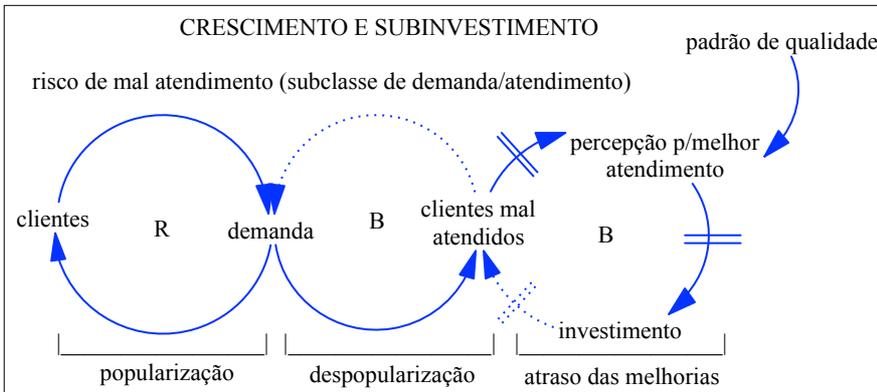
Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

7.4 Crescimento e subinvestimento

Crescimento e subinvestimento apresenta uma forma mais estruturada do arquétipo limites para o crescimento (Alves et al., 2014). Ao mesmo tempo que o sistema encontra seus limites através de um enlace reforçador e outro balanceador, um terceiro enlace de mudança dos limites entra em ação após determinado tempo de atraso. Conforme a Figura 8, este comportamento foi identificado em um risco da subclasse demanda/atendimento.

Na subclasse demanda/atendimento, verifica-se que mecanismos presentes na geração do risco de mal atendimento podem ser representados com este arquétipo. Com os traços duplos representando atraso, a capacidade para atendimento depende do volume de investimento neste quesito, a fim de que menos clientes sejam mal atendidos ao longo do tempo. Atrasos de percepção e decisão podem ser representados na estrutura.

Figura 8 – Arquétipo Crescimento e Subinvestimento

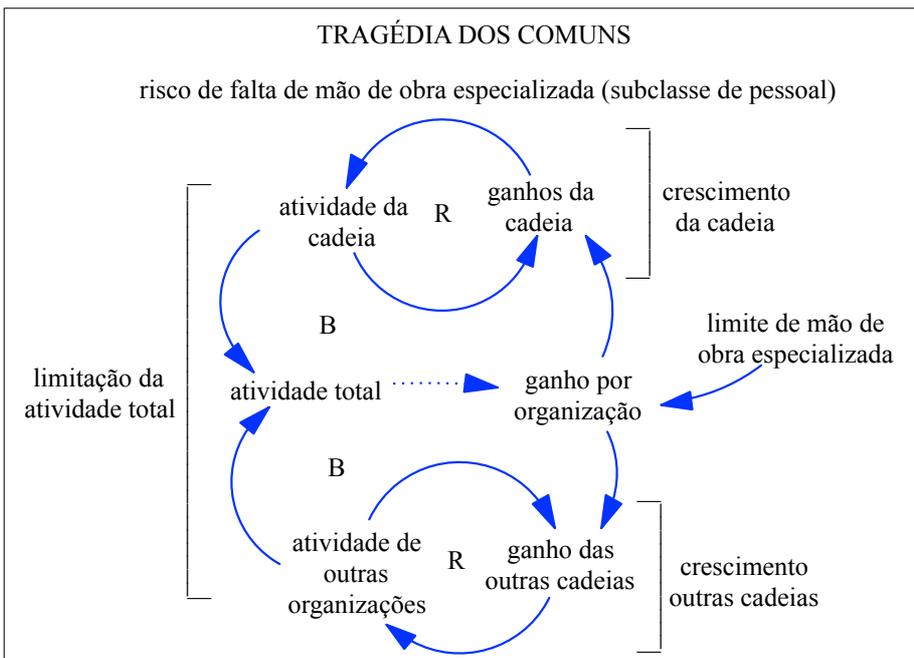


Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

7.5 Tragédia dos comuns

Tragédia dos comuns refere-se a uma situação onde a competição por um único recurso pode levar ao seu esgotamento (Prusty et al., 2014). Compõe-se de dois enlaces reforçadores, representando o crescimento de dois agentes, os quais são limitados por outros dois enlaces de balanceamento, representando a atividade total. Como mostra a Figura 9, um risco pode ser gerado com esta estrutura na subclasse de pessoal.

Figura 9 – Arquétipo Tragédia dos Comuns



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

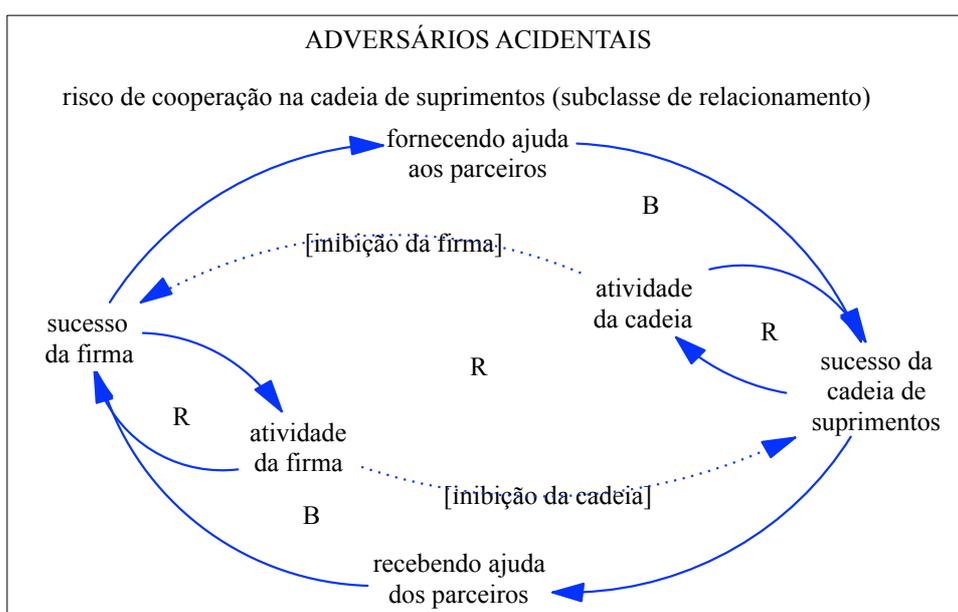
Nesta subclasse, verifica-se que o risco de falta de mão de obra especializada pode ser um limitante no crescimento de cadeias de suprimentos. Como consequência de limites como este, questões de viabilidade podem ser levantadas, bem como níveis de especialização e dependência de recursos.

7.6 Adversários acidentais

O conceito de adversários acidentais consiste da situação onde a cooperação entre agentes inibe o sucesso destes (LOPN, 2015). É composto por três enlaces reforçadores, sendo dois deles representando o crescimento de atividades dos dois agentes e outro a ajuda entre eles, mais dois enlaces balanceadores, onde o crescimento de atividades de um agente inibe o sucesso do outro. Na Figura 10, este arquétipo pode ser representado em um risco da subclasse de relacionamento.

Nesta subclasse, observa-se que o risco de cooperação na cadeia de suprimentos pode ser gerado através da estrutura de adversários acidentais. Na Figura 10, as relações que determinam a presença dos enlaces balanceadores são colocadas de uma maneira genérica, havendo necessidade de estudo da causa destes efeitos inibidores, se existirem. Pode-se pensar em diversos fatores, como o aumento da concorrência, transferência de tecnologias, conforme o caso de interesse a ser estudado.

Figura 10 – Arquétipo Adversários acidentais

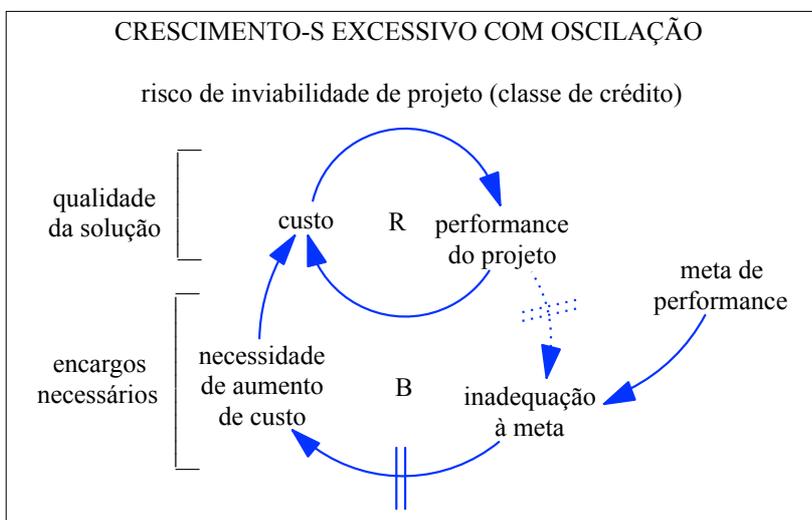


Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

7.7 Crescimento-S excessivo com oscilação

Crescimento-S excessivo com oscilação é o comportamento onde uma variável atinge um valor maior que o esperado (Sterman, 2000). Após atingir o valor, a variável passa a oscilar em torno de uma meta, em uma amplitude cada vez menor, até a estabilidade com a meta. Trata-se de um enlace reforçador, que pressiona no sentido da meta, e outro balanceador, que define o sentido do reforço gerado. Na Figura 11, um risco que pode ser representado neste mecanismo pertence à classe de crédito.

Figura 11 – Arquétipo Crescimento-S excessivo com Oscilação



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

Nesta classe, percebe-se que o risco de inviabilidade de projeto, quanto ao crescimento da quantidade de custos ao longo do tempo, pode apresentar um comportamento semelhante. Em GCS, pode-se referir à incerteza quanto aos custos de projetos de melhoria na cadeia de suprimentos.

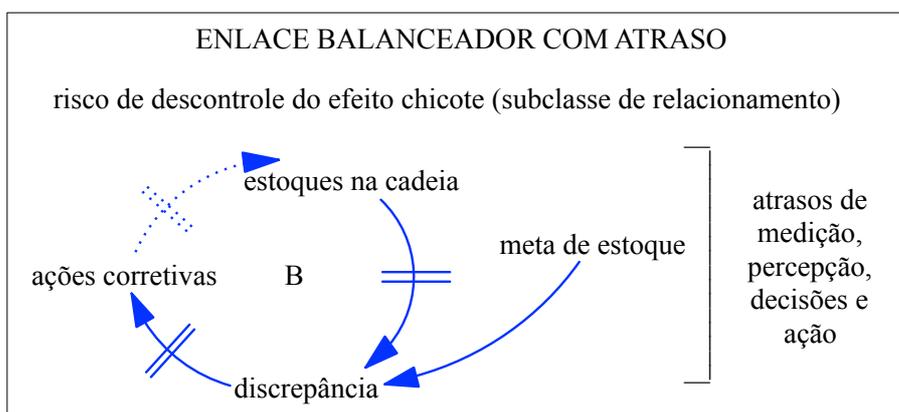
7.8 Enlace balanceador com atraso

Enlace balanceador com atraso é uma estrutura que resulta em uma oscilação com amplitude crescente (LOPN, 2015). Basta-se apenas de um enlace balanceador, o qual representa um ajuste cada vez maior devido aos erros de percepção associados aos atrasos. Na Figura 12, um risco pertencente à subclasse de relacionamento foi representado.

Nesta subclasse, verifica-se que o risco de descontrole do efeito chicote se assemelha ao referido comportamento, uma vez que cada elo da cadeia de suprimentos tende a proteger

seus processos de rupturas através do aumento de estoques. Ocorre que estes aumentos de estoques prejudicam os períodos seguintes com uma escassez de pedidos. Isso faz com que haja previsão ilusória de demanda, que não encontra respaldo no consumo do cliente final.

Figura 12 – Arquétipo Enlace balanceador com Atraso

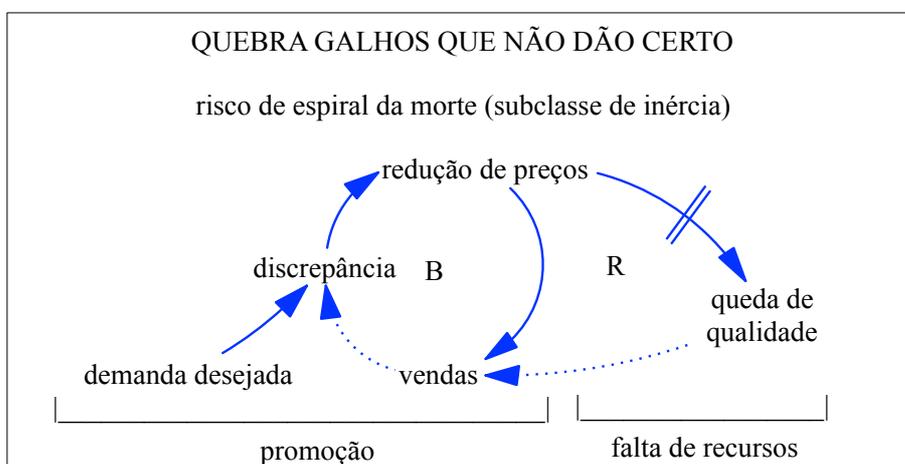


Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

7.9 Quebra galhos que não dão certo

Quebra galhos que não dão certo representa tentativas de melhoria que regridem de forma a gerar um avanço de melhoria efetiva reduzido (Gohari et al., 2013). É formado por um enlace balanceador, onde são geradas as correções, e outro enlace reforçador, onde ocorrem consequências indesejadas resultado da própria ação de correção. Na Figura 13, é representado um risco da subclasse de inércia nessa estrutura.

Figura 13 – Arquétipo Quebra galhos que não dão certo



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

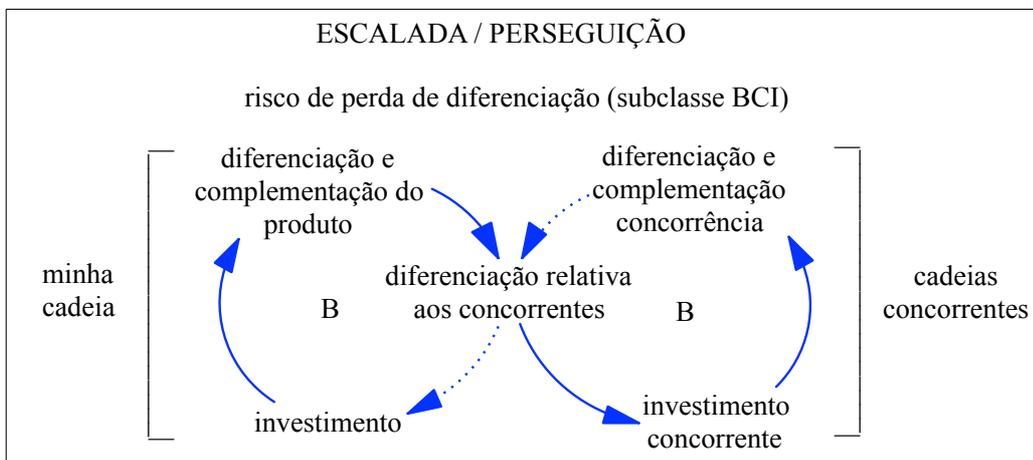
Nesta subclasse, observa-se que o risco de espiral da morte, significando quedas progressivas de ganhos e qualidade, se enquadra na estrutura referida. Neste caso, as melhorias causam quedas cada vez maiores para a organização, até a extinção da mesma. Para isto, basta a dominância estar nos valores do enlace reforçador, o que deve ser evitado pelas organizações.

7.10 Escalada / perseguição

Escalada representa ações concatenadas entre dois agentes, os quais tomam ações com base na comparação de seu estado atual com o estado do outro (Rosenfeld et al., 2007). É formado por dois enlaces balanceadores, ligados pela variável de comparação entre eles. Na Figura 14, foi representado um risco da subclasse de inércia.

Nesta, demonstra-se uma forma de utilização desse tipo de comportamento com o risco de perda de diferenciação. Os competidores continuarão se diferenciando indefinidamente, mesmo sem uma associação com os desejos encontrados no mercado, em uma exigência cada vez maior, como no enlace reforçador.

Figura 14 – Arquétipo Escalada / Perseguição



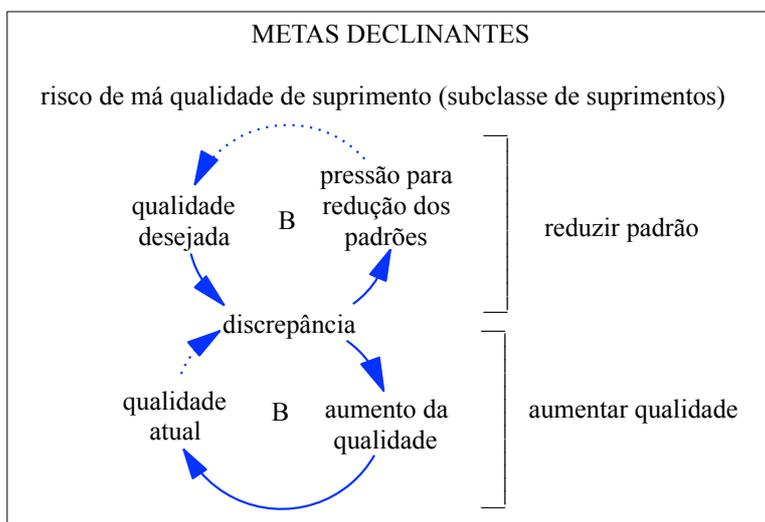
Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

7.11 Metas declinantes

O arquétipo chamado metas declinantes representa um comportamento de queda dos padrões inicialmente estabelecidos (LOPN, 2015). Trata-se de dois enlaces balanceadores, o primeiro significando a ação de busca pelo padrão, e o outro representando a pressão que gera

a sua redução. Na Figura 15, um risco que pode ser gerado desta forma é representado, pertencente à subclasse suprimentos.

Figura 15 – Arquétipo Metas declinantes



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

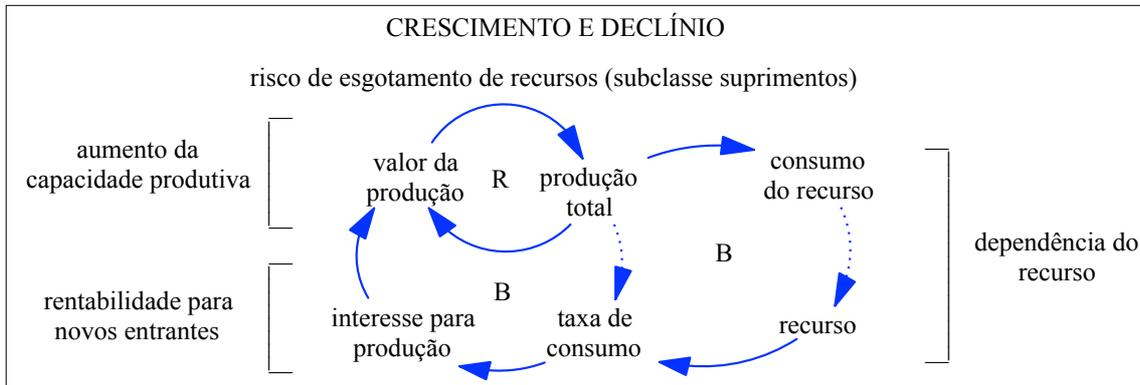
Nesta subclasse, verifica-se que o risco de má qualidade de suprimento é gerado por um comportamento de redução de padrões. Como este sistema tende para a estabilidade, onde os padrões desejados e alcançados assumem o mesmo valor, este risco deve ser calculado na ocorrência de quedas bruscas de qualidade, com os respectivos esforços para recuperação da qualidade.

7.12 Crescimento e declínio

Trata-se do declínio de uma atividade devido ao esgotamento de um recurso (Sterman, 2000). Estrutura-se através de um enlace reforçador, representando o aumento da atividade, um enlace balanceador, para representar o interesse na utilização do recurso, e outro enlace balanceador para o consumo do recurso. Na Figura 16, um risco da subclasse de suprimentos foi representado.

Nesta, verificou-se que o risco de esgotamento de recursos recai neste arquétipo. Em GCS, pode ser utilizado para simular comportamentos de recursos não renováveis dos quais a cadeia de suprimentos é mais dependente.

Figura 16 – Arquétipo Crescimento e Declínio



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

8. Conclusão

Este trabalho auxilia a compreender como a simulação de riscos em cadeias de suprimentos pode ser implementada através da visão sistêmica. Nela, os riscos são eventos que podem ser gerados ao longo do tempo, cujos mecanismos causadores compartilham das variáveis em um mesmo sistema.

Nesse contexto, tanto a identificação quanto a análise destes mecanismos necessita partir de uma visão de todo o sistema. Este estudo construiu, através de uma convergência da literatura de classificações de riscos na cadeia de suprimentos, uma nova classificação; relacionou riscos identificados nesta classificação com 12 arquétipos de Dinâmica de Sistemas, demonstrando a compatibilidade dos arquétipos de Dinâmica de Sistemas. Tal abordagem enriquece o estudo de riscos na GCS, mais especificamente no entendimento dos mecanismos geradores, para auxiliar na identificação de comportamentos geradores e perpetuadores de riscos em GCS.

A simulação com Dinâmica de Sistemas apresenta a estrutura ideal para o estudo das relações entre os riscos, tanto incluindo as variáveis quantitativas quanto qualitativas, bem como os comportamentos humanos, intrínsecos à maioria dos riscos. Portanto, este trabalho contribui tanto para a área de riscos em cadeias de suprimentos, com um apanhado teórico compreensivo dos mesmos, como no estudo direto e específico das suas inter-relações. Além disso, amplia a área de riscos em cadeias de suprimentos pela construção de teoria, fornecendo subsídios para a construção de planos de ação mais efetivos, por lidarem diretamente com os mecanismos causadores dos eventos de risco.

Estudos futuros devem enfatizar a relação entre os mecanismos geradores de risco, bem como tratar da simulação de difusores dos resultados prejudiciais. Em termos de gestão, a simulação oferece um ambiente seguro para dedução e experimentação dos riscos em cadeias de suprimentos. Por envolver dados e variáveis qualitativos, a simulação com arquétipos da Dinâmica de Sistemas propicia subsídios amplos para a construção de sistemas de controle e avaliação de riscos em GCS.

Referências

- AKKERMANS, H. Renga: A systems approach to facilitating inter-organizational network development. **System Dynamics Review**, v. 17, n. 3, p. 179–193, 2001. doi:10.1002/sdr.215.
- AKKERMANS, H.; BOGERD, P.; VOS, B. Virtuous and vicious cycles on the road towards international supply chain management. **International Journal of Operations; Production Management**, v. 19, n. 5/6, p. 565-581, 1999. doi:10.1108/01443579910260883.
- ALVES, C.; VALENÇA, G.; SANTANA, A. F. Understanding the Factors That Influence the Adoption of BPM in Two Brazilian Public Organizations. **Enterprise, Business-Process and Information Systems Modeling**, v. 175, n. 1, p. 272–286, 2014. doi:10.1007/978-3-662-43745-2_19.
- ARROW, K. **Essays in the Theory of Risk-Bearing**. Markham, Amsterdam. ISBN-10:072043047X.
- BEHL, D. V.; FERREIRA, S. Systems Thinking: An Analysis of Key Factors and Relationships. **Conference Organized by Missouri University of Science and Technology**, v. 36, p. 104–109, 2014. doi:10.1016/j.procs.2014.09.045.
- BEUTEL, A.-L.; MINNER, S. Safety stock planning under causal demand forecasting. **International Journal of Production Economics**, v. 140, n. 2, p. 637-645, 2012. doi:10.1016/j.ijpe.2011.04.017.
- BLOMEA, C.; SCHOENHERR, T. Supply chain risk management in financial crises—A multiple case-study approach. **Int. J. Production Economics journal**, v. 134, n. 1, p. 43-57, 2011. doi:10.1016/j.ijpe.2011.01.002.
- BODE, C.; WAGNER, S. M. Structural Drivers of Upstream Supply Chain Complexity and the Frequency of Supply Chain Disruptions. **Journal of Operations Management**, 2014. In Press, Accepted Manuscript. doi:10.1016/j.jom.2014.12.004.
- BOGATAJ, D.; BOGATAJ, M. Measuring the supply chain risk and vulnerability in frequency space , v. 108, p. 291–301, 2007. doi:10.1016/j.ijpe.2006.12.017.
- BRANDENBURG, D. M. M. **Quantitative Models for Value-Based Supply Chain Management: Terminology and Related Literature**. 1ed. ed. Berlin Heidelberg: Springer, v. XXIII, 2013. 219 p. ISBN 978-3-642-31304-2.

CAVINATO, J. L. Supply chain logistics risks: from the back room to the board room. **International Journal of Physical Distribution; Logistics Management**, v. 34, n. 5, p. 383-387, 2004. doi:10.1108/09600030410545427.

CHOPRA, S.; SODHI, M. S. Managing risk to avoid supply-chain breakdown. **MIT Sloan Management Review (Fall 2004)**, p. 53-61, 2004. Reprint:46109.

CHRISTOPHER, M.; PECK, H. Building the resilient supply chain. **The International Journal of Logistics Management**, v. 15, n. 2, p. 1-14, 2004. doi:10.1108/09574090410700275.

CSCMP. Supply chain and logistics terms and glossary. <http://www.cscmp.org>. Disponível em: <http://cscmp.org/sites/default/files/user_uploads/resources/downloads/glossary-2013.pdf>. Acesso em: 2015.

DIABAT, A.; KANNAN, D.; MATHIYAZHAGAN, K. Analysis of enablers for implementation of sustainable supply chain management e A textile case. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 391-403, 2014. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.081.

FORRESTER, J. W. **Industrial dynamics**. Cambridge: MIT press, 1961. ISBN 10: 0915299887.

FORRESTER, J. W. System dynamics and K-12 teachers. **Retrieved August 8 (1996)**, 2008. A lecture at the University of Virginia School of Education.

GHASHGHAIE, M.; MAROFI, S.; MAROFI, H. Using System Dynamics Method to Determine the Effect of Water Demand Priorities on Downstream Flow. **Water Resour Manage**, v. 28, n. 14, p. 5055–5072, 2014. doi:10.1007/s11269-014-0791-z.

GOHARI, A. et al. Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can Backfire. **Journal of Hydrology**, v. 491, n. 1, p. 23–39, 2013. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.03.021.

GRÖBLER, A.; THUN, J.; MILLING, P. M. System dynamics as a structural theory in operations management. **Production and operations management**, v. 17, n. 3, p. 373-384, 2008. doi:10.3401/poms.1080.0023.

HALLIKAS, J. et al. Risk management processes in supplier networks. **International Journal of Production Economics**, v. 90, n. 1, p. 47-58, 2004. doi:10.1016/j.ijpe.2004.02.007.

HARLAND, C.; BRENCHLEY, R.; WALKER, H. Risk in supply networks. **Journal of Purchasing and Supply management**, v. 9, n. 2, p. 51-62, 2003. doi:10.1016/S1478-4092(03)00004-9.

HECKMAN, I.; COMES, T.; NICKEL, S. A critical review on supply chain risk – Definition, measure and modeling. **Omega**, v. 52, p. 119-132, 2015. doi:10.1016/j.omega.2014.10.004.

HOLTON, G. Defining risk. **Financial Analysts Journal**, v. 60, n. 6, p. 19-25, 2004. doi:10.2469/faj.v60.n6.2669.

JÜTTNER, U.; PECK, H.; CHRISTOPHER, M. Supply chain risk management: outlining an agenda for future research. **International Journal of Logistics: Research and Applications**, v. 6, n. 4, p. 197-210, 2003. doi:10.1080/13675560310001627016.

KONTOGIANNIS, T. Modeling patterns of breakdown (or archetypes) of human and organizational processes in accidents using system dynamics. **Safety Science**, v. 50, n. 4, p. 931–944, 2012. doi:10.1016/j.ssci.2011.12.011.

LIN, C.-H.; TUNG, C.-M.; HUANG, C.-T. Elucidating the industrial cluster effect from a system dynamics perspective. **Technovation**, v. 26, n. 4, p. 473-482, 2006. doi:10.1016/j.technovation.2004.11.008.

LOPN. Learning Organization Practitioners' Network. <http://www.lopn.net>, 2015. Disponivel em: <http://www.lopn.net/System_Archetypes.html>. Acesso em: 2015.

MANUJ, I.; MENTZER, J. T. Global supply chain risk management strategies. **International Journal of Physical Distribution; Logistics Management**, v. 38, n. 3, p. 192-223, 2008. doi:10.1108/09600030810866986.

MICCUCI, V. C.; PIZZOLATO, N. D. Uma ferramenta gráfica de mapeamento para apoiar o gerenciamento de risco na cadeia de suprimentos. **Tese de doutorado**, Rio de Janeiro, 2008.

O'DONNELL, E. Enterprise risk management: A systems-thinking framework for the event identification phase. **International Journal of Accounting Information Systems**, v. 6, n. 3, p. 177-195, 2005. doi:10.1016/j.accinf.2005.05.002.

PESUT, D. J. Systems thinking: archetypes and interventions. **Nursing Outlook**, v. 47, p. 155, 1999. doi:10.1016/S0029-6554(99)90089-1.

PRUSTY, S. K.; MOHAPATRA, P. K. J.; MUKHERJEE, C. K. System Archetype to Understand Unintended Behavior in Indian Shrimp Industry and to Aid in Strategy Development. **Systemic Practice and Action Research**, v. 27, n. 4, p. 397–416, 2014. doi:10.1007/s11213-013-9288-6.

QUN, W. **Supply chain risk assessment and prevention**. e-Business and Information System Security (EBISS) 2nd International Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2010. doi:10.1109/EBISS.2010.5473278.

RANGEL, D. A.; DE OLIVEIRA, T. K.; LEITE, M. S. A. Supply chain risk classification: discussion and proposal. **International Journal of Production Research**, p. 1-20, 2014. doi:10.1080/00207543.2014.910620.

RAO, S.; GOLDSBY, T. J. Supply chain risks: a review and typology. **The International Journal of Logistics Management**, v. 20, n. 1, p. 97-123, 2009. doi:10.1108/09574090910954864.

ROSENFELD, S. N.; RUS, I.; CUKIER, M. Archetypal behavior in computer security. **The Journal of Systems and Software**, v. 80, n. 10, p. 1594–1606, 2007. doi:10.1016/j.jss.2007.01.046.

SENGE, P. M. **The fifth discipline: the art and practice of the learning organization**. 1st ed. ed. New York: Currency Doubleday, 1994. ISBN 0-385-26095-4.

SHI, D. A review of enterprise supply chain risk management. **Journal of systems science and systems engineering**, v. 13, n. 2, p. 219-244, 2004. doi:10.1007/s11518-006-0162-2.

SINGHAL, P.; AGARWAL, G.; MITTAL, M. L. Supply chain risk management: review, classification and future research directions. **Int. Journal of Business Science and Applied Management**, v. 6, n. 3, p. 15-42, 2011. doi: 10.4018/jisscm.2009010102.

STERMAN, J. D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. Boston: [s.n.], v. 19, 2000. 982 p. ISBN 0-07-231135-5.

SVENSSON, G. A typology of vulnerability scenarios towards suppliers and customers in supply chains based upon perceived time and relationship dependencies. **International Journal of Physical Distribution; Logistics Management**, v. 32, n. 3, p. 168-187, 2002. doi:10.1108/09600030210426511.

TANG, C. S. Perspectives in supply chain risk management. **International Journal of Production Economics**, v. 103, n. 2, p. 451-488, 2006. doi:10.1016/j.ijpe.2005.12.006.

TANG, C.; TOMLIN, B. The power of flexibility for mitigating supply chain risks. **International Journal of Production Economics**, v. 116, n. 1, p. 12-27, 2008. doi:10.1016/j.ijpe.2008.07.008.

TANG, S. O.; MUSA, N. Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management. **International Journal of Production Economics**, v. 133, n. 1, p. 25-34, 2011. doi:10.1016/j.ijpe.2010.06.013.

WAGNER, S. M.; KEMMERLING, R. Supply chain management executives incorporate upper echelons. **Journal of Purchasing; Supply Management**, v. 20, p. 156-166, 2014. doi:10.1016/j.pursup.2014.01.006.

WANG, D.; YANG, Z. **Risk Management of Global Supply Chain**. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Jinan, China: 18-21 August. 2007. doi:10.1109/ICAL.2007.4338742.

WU, T.; BLACKHURST, J.; CHIDAMBARAM, V. A model for inbound supply risk analysis. **Computers in industry**, v. 57, n. 4, p. 350-365, 2006. doi:10.1016/j.compind.2005.11.001.

Capítulo 4: Método para Análise de Riscos na Gestão de Cadeia de Suprimentos utilizando Dinâmica de Sistemas

DANIEL WRITZL ZINI

RICARDO AUGUSTO CASSEL

Resumo

Devido ao aumento de complexidade das redes organizacionais, a maior conectividade e dependência exigem um estudo que considere os riscos presentes nas dinâmicas dessas relações. Na cadeia de suprimentos, tal dependência expressa-se através de incertezas e vulnerabilidades sociais, naturais, organizacionais e econômicas. A Dinâmica de Sistemas permite não apenas uma integração de visões amplas das relações nos sistemas, mas também a simulação destas relações para evidenciar a interação de comportamentos no tempo. Neste artigo, é proposto um método para a análise de riscos no contexto de gestão da cadeia de suprimentos. Para isso, foram utilizadas três abordagens de Dinâmica de Sistemas e 12 princípios de simulação relativos ao estudo dinâmico, os quais foram adaptados para o estudo de riscos em cadeias de suprimentos. Um teste piloto do método proposto foi realizado utilizando-se de três riscos de cadeias de suprimentos. Conclui-se com uma discussão sobre a aplicabilidade do método como ferramenta estruturadora de análises dinâmicas de riscos em cadeias de suprimentos.

Palavras-chave: Riscos em Gestão de Cadeias de Suprimentos; Dinâmica de Sistemas.

Abstract

The organizational environment net complexity urges for the dynamic study of the associated connectivity, dependency and risks. In the supply chain context, the uncertainty gathers multiple dimensions of social, natural, organizational and economic vulnerabilities. The system dynamics simulation deals with behavioral interactions in order to test dependencies, being capable to merge the wide relations of systems. Here we propose a framework for supply chain risk analysis using system dynamics. For this purpose, three system dynamics methods and 12 system dynamics modeling principles were adapted to supply chain risk applications. The framework was evaluated for the dynamic study of three supply chain risks. Results endorse the framework use for a complete structured approach of dynamic analysis in supply chain management risks.

Keywords: *Supply chain risk management; Archetypes; System dynamics.*

1. Introdução

Demografia, mudanças no clima, novos hábitos da população e concentração tecnológica são algumas das forças que continuarão aumentando a complexidade dos sistemas humanos nas próximas décadas (OECD, 2003). Com uma rede cada vez mais conectada e dependente, os riscos das diversas partes dos sistemas são somados, e a possibilidade de grandes desastres devido a um maior número de influências aumenta (Linbom et al., 2015).

Como consequência do aumento de complexidade, o estudo de riscos através dos eventos passados foi considerado inadequado frente aos novos conjuntos de influências que envolvem os contextos futuros (Rinaldi et al., 2001; Calvano; John, 2004; Bruijne; Eeten, 2007). Na tentativa de gerenciar os riscos, uma das direções a serem tomadas é a adoção de novas abordagens para a gestão de riscos através de visões amplas, que incluam atitudes sociais e efeitos das percepções humanas (OECD, 2003).

A Dinâmica de Sistemas é uma ferramenta de simulação que possibilita não apenas a inclusão de variáveis humanas, mas também o teste de políticas para lidar com possíveis cenários futuros (Mazzarana; Fuchs, 2010). Apesar de diversos riscos terem sido abordados em Dinâmica de Sistemas, proposições de Dinâmica de Sistemas em riscos tem se direcionado ao estudo de sistemas específicos como a agricultura (Li et al., 2012), avaliação econômica de projetos de restauração ambiental (Crookes, Blingnaut, *et al.*, 2013), estimativa de erosão de encostas marítimas (Villatoro et al., 2014), desabamentos (Prete, 2013), projetos de TI (Stoica; Brouse, 2014), contaminação de leitos de rios (Mcknight et al., 2010), análise de cenários em avalanches (Mazzorana; Fuchs, 2010), desertificação (Ibáñez et al., 2008), segurança de TI (Rosenfeld et al., 2007), mudança de tecnologia (Musango; Brent, 2011), válvulas de retenção (Thompson; King, 2011), tolerância a falhas (Domínguez-García et al., 2008). Outras abordagens de Dinâmica de Sistemas envolveram métodos voltados ao estudo de riscos, tais como o *probabilistic risk assessment* (Mohaghegh et al., 2009) e *quantitative risk assessment* (Cox; Ricci, 2008), sem contudo incluir o horizonte da cadeia de suprimentos, e também sem construir um método para o estudo de riscos em cadeias de suprimentos com a Dinâmica de Sistemas.

Os riscos em Gestão de Cadeias de Suprimentos (GCS) revelam uma faceta especial do trabalho conjunto nas empresas encadeadas para atender um mesmo público ou seção de mercado (Hallikas et al., 2004). Na Gestão de Cadeias de Suprimentos, os riscos provêm tanto do ambiente externo como interno das firmas, buscando-se reduzir a vulnerabilidade da cadeia

como um todo (Rao; Goldsby, 2009). Na GCS, a Dinâmica de Sistemas tem sido utilizada para abordar um único risco por vez, como se verificou nos casos de ataques terroristas (Bueno-solano; Cedillo-campos, 2014), atos criminosos (Cedillo-campos et al., 2014), recuperação sísmica (Peng et al., 2014), capacidade a longo prazo (Georgiadis et al., 2006) e rupturas no transporte (Wilson, 2007). Diversos outros estudos de Dinâmica de Sistemas estudaram riscos de GCS como problemas, sem um tratamento específico destes como riscos e também sem metodologia específica para riscos em conjunto e sua dinâmica (Tako; Robinson, 2012).

Este trabalho propõe uma metodologia para estudo de riscos em GCS através da Dinâmica de Sistemas possibilitando a abordagem de mais de um risco em uma análise dinâmica. Para isto, a seção 2 traz uma revisão da dinâmica de riscos em GCS, detalhando os elementos necessários para o estudo dinâmico de riscos. Então, na seção 3, propõe-se um método para contemplar esses elementos em uma análise de riscos de GCS. A seção 4 realiza um teste piloto para o método proposto, avaliando conceitualmente como este se comportaria frente a um estudo simultâneo de três riscos de GCS, abrindo-se na seção 5 uma discussão para a aplicabilidade do método proposto. A seção 6 encerra o trabalho com uma conclusão.

2. Revisão

Conforme Sterman (2000), um estudo apropriado em Dinâmica de Sistemas deve levar em consideração 12 princípios de modelagem que são específicos para o tipo de simulação desenvolvido pela Dinâmica de Sistemas. Um resumo e contextualização destes princípios para a área de riscos em cadeias de suprimentos é apresentada na Tabela 1, onde é possível perceber a natureza diversa do estudo de riscos em relação ao estudo de problemas convencionais de modelagem em Dinâmica de Sistemas.

Esta seção detalha os pontos em que se faz necessária uma adaptação conceitual do estudo de riscos para a Dinâmica de Sistemas. Três métodos são utilizados para o embasamento conceitual de Dinâmica de Sistemas em sua transição para o estudo de riscos proposto neste trabalho:

- a) método de Sterman (Sterman, 2000), sendo um método genérico de utilização da Dinâmica de Sistemas, que serviu para a construção teórica de forma a incluir um necessário e específico rigor de simulação da Dinâmica de Sistemas;

- b) método de Cardiff (Naim; Towill, 1994), sendo um método para a modelagem em cadeias de suprimentos com Dinâmica de Sistemas, contribuiu com as necessidades genéricas para a modelagem de cadeias de suprimentos;
- c) método de Andrade (Andrade et al., 2006), sendo o que se utiliza do pensamento sistêmico juntamente com a Dinâmica de Sistemas, utilizado para incluir a contextualização do uso do pensamento sistêmico no ambiente empresarial para a preparação anterior necessária em uma análise de Dinâmica de Sistemas.

Tabela 1 – Princípios de modelagem com DS adaptados para riscos em GCS

Princípios de modelagem com DS	Aplicação dos princípios de DS para riscos em GCS
1. Resolva um problema, não um sistema	1. Resolva uma vulnerabilidade da GCS, não um sistema de suprimento
2. A modelagem deve estar presente desde o início	2. Identifique os agentes e a dinâmica dos elementos do sistema desde o início
3. Seja cético quanto à real necessidade de modelar, force a pergunta, por que precisamos disto?	3. Estabeleça o propósito e delimitações do estudo dinâmico no início
4. DS não funciona sozinha, utilize com outros métodos e ferramentas	4. Trabalhe com cenários de riscos e pensamento sistêmico durante a modelagem da DS
5. Enfoque na implementação desde o início	5. Enfoque nos planos e ações necessárias
6. A modelagem funciona melhor como processo interativo entre o cliente e o consultor	6. Relacione as múltiplas visões de uma mesma vulnerabilidade e explicita as considerações e simplificações assumidos nos modelos
7. Evite a modelagem de uma caixa preta	7. Possibilite a contestação das considerações
8. A validação é um processo contínuo de teste e construção da confiança no modelo	8. A validação em riscos de GCS depende de futuras complexidades no sistema
9. Tenha um modelo preliminar tão cedo quanto possível	9. Identifique os comportamentos esperados tão cedo quanto possível
10. Um modelo de amplos limites é mais importante que um modelo muito detalhado	10. Considere questões do ambiente, setor e organização
11. Utilize modeladores experientes, não iniciantes	11. Considere a curva de aprendizado para a implementação de uma gestão de riscos com DS
12. A implementação não termina com o projeto	12. Os planos de ação devem ser revisados conforme os desvios das considerações da análise de riscos

Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

Sendo assim, um resumo conceitual das necessidades para um estudo dinâmico de riscos é apresentada nesta seção, de forma a servir de fundamento para a construção do método proposto. A seguir, apresenta-se os conceitos envolvidos: no estudo dinâmico de riscos; diferença entre eventos de riscos e eventos em sistemas dinâmicos; resultados de riscos e resultados em sistemas dinâmicos; o uso de modelos conceituais de Dinâmica de Sistemas em riscos de GCS; a criação de modelos conceituais e simulação de Dinâmica de Sistemas em riscos de GCS; testes de riscos para modelos de Dinâmica de Sistemas em GCS; estratégias para lidar com riscos de GCS em Dinâmica de Sistemas.

2.1 O estudo dinâmico de riscos

Riscos podem ser definidos de diversas formas, como possibilidade de ganho ou perda, ou de forma mais frequente como possibilidade de perda (Rao; Goldsby, 2009). A *Organization for Economic Co-operation and Development* publicou um relatório a respeito dos riscos sistêmicos emergentes, o qual enfatizou a necessidade da criação de ferramentas para analisar os riscos globalmente e com a utilização de diversos campos de conhecimento (OECD, 2003). A percepção da necessidade de estudo dinâmico dos riscos não é nova e envolve uma investigação do ambiente mais amplo, tomando múltiplas visões parciais, com a finalidade de encontrar o sentido das partes com base no todo (White, 1995).

Dinâmica implica o quanto os níveis de intensidade de uma determinada variável podem crescer ou decrescer, sendo o propósito de um estudo dinâmico fornecer pistas sobre as causas que geram estas oscilações (Serman, 2000). Quando estuda-se riscos, apesar das abordagens que tratam com os eventos passados para validar cenários futuros, este tipo de estudo é insuficiente frente a novas complexidades dos ambientes organizacionais, sociais e naturais (Rinaldi et al., 2001; Calvano; John, 2004; Bruijne; Eeten, 2007).

Como o objetivo é a identificação de causas, o estudo dinâmico deve buscar a compreensão dos mecanismos que geram os comportamentos a serem estudados como endógenos ao sistema (Kim; Springer, 2008). Especialmente em ambientes organizacionais, é fundamental incluir os comportamentos humanos e políticas adotadas como elementos do sistema (Azadeh et al., 2014). Em conjunto, estes comportamentos formam modelos, os quais, sendo simplificações da realidade, devem conter apenas as informações necessárias para identificar as causas que geram as oscilações a serem estudadas (Serman, 2000).

2.2 Eventos de riscos e eventos de sistemas dinâmicos

Um risco pode ser caracterizado pela probabilidade de um evento, ou mesmo pela soma de eventos, que, de alguma forma, causam um prejuízo significativo e não previsto para a organização (Heckman et al., 2015). Como não se sabe o momento de sua ocorrência, existem probabilidades que aumentam ou diminuem conforme as diversas condições e influências para a ocorrência do evento de risco (Aven, 2012).

Para os sistemas dinâmicos, ao contrário do que pode sugerir o senso comum, os eventos de risco raramente são repentinos, mas são gerados de forma progressiva no tempo (Aven, 2012). Isso equivale ao fato de diversos eventos de risco estarem distantes no tempo e no

espaço, com muitas ações ou eventos tomando lugar até que o evento de risco se manifeste de forma aparentemente sem relação com as ações que o causaram (Kontogiannis, 2012). Esse fenômeno pode ser encontrado através da Dinâmica de Sistemas, sendo este um dos pilares da necessidade de um estudo dinâmico: reduzir a dificuldade de avaliação de causas e efeitos que se realimentam no tempo (Sterman, 2000).

A realimentação, por outro lado, constitui o principal elemento nos comportamentos dos sistemas (Forrester, 1961). O efeito da realimentação pode levar anos ou até mesmo décadas para completar um ciclo que resulta em um evento indesejado para o sistema, sendo difícil para os gestores uma avaliação de suas ações com os resultados distantes no tempo (Größler; Zock, 2010). Assim, é fundamental um estudo de grandes horizontes de tempo, cuja divisão permita uma visualização da dinâmica a ser estudada no sistema (Besiou et al., 2012).

2.3 Resultados de riscos e resultados de sistemas dinâmicos

Os resultados de um evento de risco, por outro lado, não são conhecidos totalmente em sua extensão, estando sujeitos não apenas à intensidade do evento, mas também a uma série de elementos, como a reação de outros agentes e condições geopolíticas (Aven, 2012). É necessário mais do que um número de impacto para a medição da gravidade de um evento de risco, como mostram os casos de doenças infecciosas em alimentos (Mineguishi; Thiel, 2000; Vo; Thiel, 2011).

Em sistemas dinâmicos, por vezes incorre-se no erro de partir diretamente para a simulação do sistema sem um adequado levantamento das variáveis chave deste sistema (Senge, 1994). Em decorrência, ocorre a falta de conexão com os problemas mais amplos que deveriam ser estudados no modelo, pois o levantamento de variáveis chave permite uma melhor identificação de influências dentro e fora do sistema, processo que pode ser melhorado através da consulta a especialistas de diversas áreas (OECD, 2003; Akkermans; Dellaert, 2005).

2.4 Uso de modelos conceituais de sistemas dinâmicos em riscos de GCS

De outra parte, existem comportamentos que já foram categorizados, cujas estruturas de causalidade são conhecidas, denominados arquétipos da Dinâmica de Sistemas e do pensamento sistêmico, os quais podem ser encontrados em livros ou sítios de comunidades de pesquisa voltadas ao aprendizado sistêmico (Senge, 1994; Sterman, 2000; LOPN, 2015).

Estes arquétipos são comportamentos de interesse com a estrutura causal pronta para adaptação, de acordo com sua adequação para o estudo dinâmico desejado (Kontogiannis, 2012).

Diversos estudos utilizaram arquétipos, alguns construindo modelos a partir destes (Prusty et al., 2014; Teimoury et al., 2013; Heaslip et al., 2012; Špicar, 2014; Rosenfeld et al., 2007), enquanto outros comparando os resultados de um modelo construído com os resultados de um arquétipo (Adamides; Pomonis, 2009; Gohari et al., 2013), ou ainda criando novos arquétipos (Aristizábal et al., 2013; Lu et al., 2012). A menção dos arquétipos utilizados em GCS por vezes é suprimida, apresentando-se apenas o modelo final construído a partir do arquétipo (Teimoury et al., 2013). Como os comportamentos apresentados nos arquétipos não são suficientes para as análises desejadas, outros comportamentos esperados devem ser incluídos no modelo, bem como as demais variáveis chave do sistema (Ghashghaie et al., 2014).

Para os riscos de GCS, a utilização de arquétipos é um passo essencial na construção de modelos dinâmicos, uma vez que propicia uma validação com base nos comportamentos que representa (Kontogiannis, 2012). Como referido anteriormente, as análises históricas para descobrir correlações e padrões em eventos de riscos não leva em consideração as influências de comportamentos futuros, ficando à mercê de dados provenientes de ambientes passados de complexidade inferior e com influências de natureza diferente (Linbom et al., 2015).

2.5 Modelos conceituais do pensamento sistêmico em riscos de GCS

As variáveis chave são conectadas através de ligações de causa e efeito formando enlaces circulares chamados *causal loop diagrams* (CLD), que são modelos conceituais dos mecanismos que determinam os principais comportamentos de um sistema a serem estudados (Perdana; Kusnandar, 2012). Como este mapa de causalidades pode ter um número elevado de variáveis e relações, sua leitura deve ser facilitada através da identificação de enlaces, os quais precisam ser numerados e identificados conforme a sua natureza reforçadora ou balanceadora (Prusty et al., 2014).

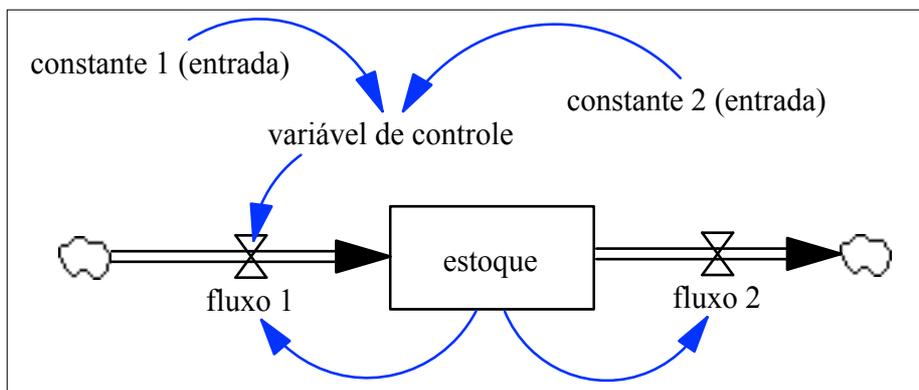
Na GCS, a utilização de CLD pode fornecer um entendimento do funcionamento dos riscos e na maneira como são relacionados, sendo este um resultado parcial que já serve de base para tomada de ações (Gohari et al., 2013). Entretanto, modelos conceituais não apresentam nenhum tipo de esclarecimento quanto à quantificação e às sensibilidades

envolvidas nos enlaces e relações entre as variáveis, sendo necessário, para isto, construir um modelo de simulação da Dinâmica de Sistemas (Sterman, 2000).

2.6 Simulação de Dinâmica de Sistemas em riscos de GCS

Os diagramas CLD servem para a construção análoga de modelos de Dinâmica de Sistemas, os quais contêm mais dois tipos de variáveis: estoques e fluxos (Gohari et al., 2013). Estoques são variáveis cumulativas, e fluxos são os diferenciais relativos aos estoques, com as demais variáveis servindo para fórmulas de controle ou entrada, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Variáveis utilizadas em diagramas de Dinâmica de Sistemas



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

Para o caso dos riscos de GCS, embora a utilização dos arquétipos auxilie no processo de validação, é necessário construir entendimento sobre as taxas e relações causais para construir a confiança no modelo. Esta, voltada a eventos que ainda não ocorreram, envolvendo um ambiente futuro, cuja complexidade ainda não é totalmente conhecida (Villatoro et al., 2014). Assim, a construção das relações no modelo dinâmico precisam ser validadas por especialistas, estudos de tendências comportamentais da sociedade, geopolítica, ciência, macro e microeconomia, envolvendo também as questões psicossociológicas relacionadas ao futuro a ser testado (Ibáñez et al., 2008). Aliadas a representações e funções das ciências *hard*, estas considerações devem basear um modelo dinâmico para riscos, em especial para os riscos em GCS. Neste caso, existe a possibilidade de múltiplas empresas saírem beneficiadas pelo conhecimento adquirido e pelas perdas evitadas na mitigação de riscos por melhores planos de ação, baseados em uma melhor qualidade das análises das

consequências temporais e comportamentais (Crookes et al., 2013; Bueno-solano; Cedillo-campos, 2014).

2.7 Testes de modelos dinâmicos para riscos de GCS

Durante a construção dos modelos CLD e de Dinâmica de Sistemas, diversos testes devem ser realizados, sempre e tão logo sejam possíveis, ainda que apenas em partes inacabadas do modelo (Sterman, 2000). O primeiro destes testes é a consistência com os propósitos almejados inicialmente para o modelo, sem reduzir ou exceder a complexidade necessária para a análise dinâmica (Naim; Towill, 1994). O segundo teste é a comparação de hipóteses dinâmicas, que são os comportamentos inferidos no sistema através de arquétipos e enlaces formados pelas variáveis chave no sistema (Sterman, 2000). O terceiro teste avalia a dinamicidade do modelo, ou seja, sua robustez em situações extremas e sua sensibilidade no intervalo de valores em que um comportamento esperado pode ser mantido (Georgiadis; Athanasiou, 2013).

Nos riscos de GCS, os testes ajudam a compor a confiança nos comportamentos futuros previstos, na certeza de que poderiam acontecer na forma e intensidade verificados (Sterman, 2000). Embora a confiança esteja baseada em percepções humanas, pode-se afirmar que esta não é apenas uma deficiência da Dinâmica de Sistemas, mas sim da natureza preditiva do estudo de riscos, o qual nem por isso deixa de ter uma relevância fundamental para a Gestão de Cadeias de Suprimentos, organizações e também para a sociedade como um todo, a fim de construir as visões de futuro, assim como as ações relacionadas (Cedillo-campos et al., 2014).

2.8 Estratégias para lidar com riscos de GCS em sistemas dinâmicos

Para o desenvolvimento de estratégias em sistemas dinâmicos, utiliza-se cenários para a representação dos diferentes comportamentos que as variáveis poderiam assumir em tempos futuros (Sterman, 2000). Uma vez entendidos os comportamentos que o sistema poderá apresentar, diversas políticas são traçadas para corrigir eventuais problemas gerados por esses comportamentos (Lorentz; Hilmola, 2012). Como esta correção envolve o diagrama sistêmico gerado a partir de uma visão multidisciplinar do todo que envolve a GCS, então estas soluções ou políticas apresentadas são interpretadas como soluções sistêmicas, que beneficiam o funcionamento e mecanismos para atingir os resultados esperados (Ovalle; Marquez, 2003).

Uma importante medição a ser feita, embora prejudicada pelo mesmo viés dos testes de modelo voltados ao futuro, é a mensuração da sensibilidade e interação das políticas (Jain et al., 2013). Sensibilidade significa os intervalos em que uma política conduz aos resultados desejados (Sterman, 2000). A interação de políticas, por sua vez, consiste na verificação da dominância dos enlaces comportamentais do sistema dinâmico, na possibilidade de que uma política incremente sinergicamente o resultado de outra política ou ocorra o efeito oposto de anulação mútua entre políticas (Peng et al., 2014).

Na GCS, a construção de estratégias pode ser considerada uma parte crítica, onde um consenso é fundamental para a implementação de ações, as quais são determinadas pela confiança construída no modelo durante o desenvolvimento do mesmo. Daí a necessidade de uma construção que envolva os diversos participantes da cadeia de suprimentos (Wilson, 2007). Por outro lado, o conhecimento adquirido no processo de análise dinâmica também é considerado um resultado satisfatório por envolver a troca de modelos mentais durante as análises, propiciando mudanças através de um entendimento mais profundo dos problemas (Gohari et al., 2013). Na criação de planos de ação, a construção de estratégias é fundamental para que a análise dinâmica seja finalizada com resultados que demonstrem um valor prático e viabilidade financeira (Mcknight et al., 2010).

3. Método Proposto

Este trabalho propõe um método para analisar riscos em GCS utilizando Dinâmica de Sistemas que se divide em sete passos, que são análogos à revisão. A Figura 2 apresenta os resultados essenciais a serem construídos em cada passo, os quais são descritos a seguir.

3.1 Primeiro: Riscos e delimitações

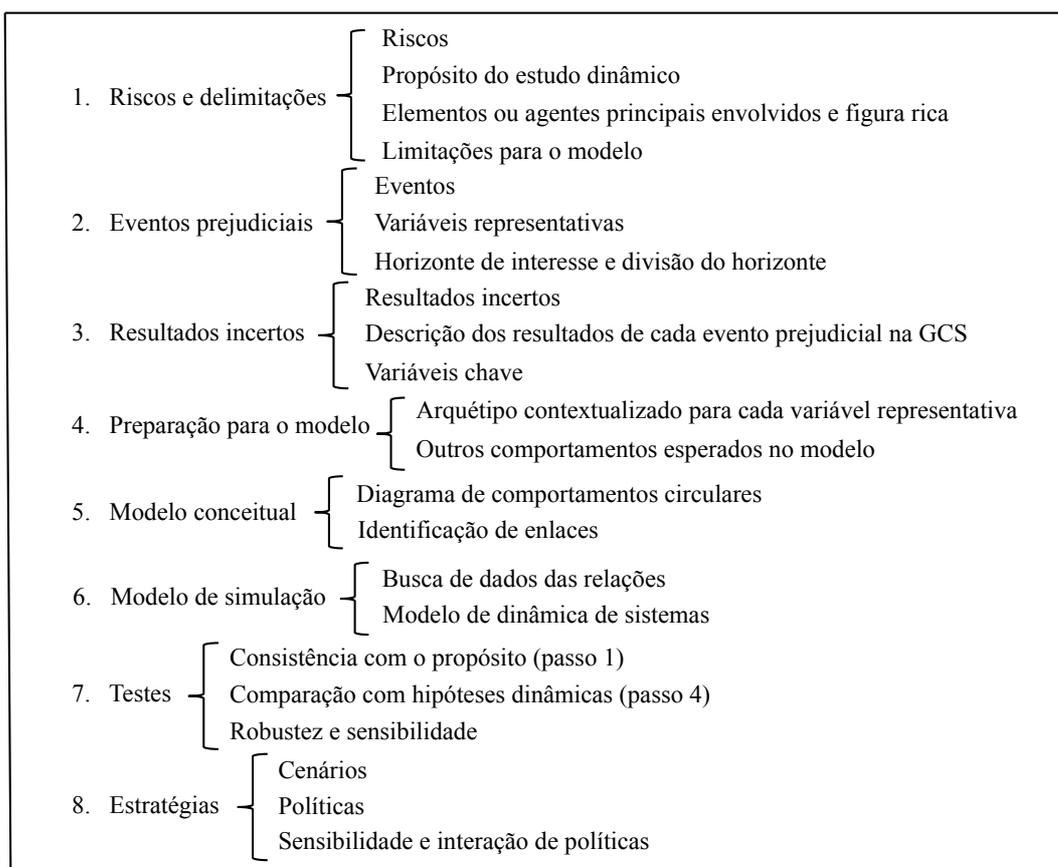
Tendo os riscos como possibilidades de perda, o estudo dinâmico de riscos proposto inicia com uma necessidade percebida acerca de eventos de riscos que uma cadeia de suprimentos pode enfrentar no futuro. A escolha de riscos pode ser baseada em tendências sociais observadas, tais como mudanças no perfil de uma faixa de mercado, setor, tendências das organizações, ou ainda do ambiente mais amplo macroeconômico.

Então, para cada risco deve ser definido o propósito do estudo dinâmico, que significa justificar as escolhas dos riscos para estudo em relação às dinâmicas envolvidas, para um início do entendimento da complexidade a ser abordada. Esta definição de propósito facilita a

identificação de elementos e agentes, que devem ser incorporados a uma Figura Rica (Pidd, 2009), a fim de que a visualização desses elementos seja imediata.

Finalizando este passo, devem ser expostas as limitações assumidas para a análise dinâmica. Estas simplificações são necessárias para viabilizar a modelagem e o processo de construção do entendimento acerca da dinâmica dos riscos de GCS que forem escolhidos.

Figura 2 – Método proposto para o estudo dinâmico dos riscos em GCS



Fonte: Elaboração própria.

3.2 Segundo: *Eventos prejudiciais*

Conforme exposto, Heckman et al. (2015) destacaram a primeira condição para a presença de um risco como a exposição a um evento prejudicial. Assim, o objetivo do passo dois é evidenciar os eventos prejudiciais dos riscos definidos no passo um. Constitui uma especificação maior da forma como serão analisados estes riscos de demanda na GCS.

Para isto, neste passo devem ser apresentados: um título descritivo de cada evento prejudicial com o seu respectivo risco; as variáveis representativas que evidenciam cada

evento prejudicial; o horizonte de interesse para que o evento possa ser observado; e a divisão deste horizonte que possibilitará acompanhar os eventos no tempo.

Desta forma, o horizonte maior deverá ser escolhido, possibilitando assim a análise de todos os eventos prejudiciais dentro de um mesmo modelo. De igual forma, a divisão que possibilita o acompanhamento destes eventos prejudiciais em conjunto será a divisão mais frequente.

3.3 Terceiro: Resultados incertos

Ainda, como visto, uma segunda condição deve ser satisfeita para que uma situação possa ser considerada de risco: incerteza dos possíveis resultados advindos do evento prejudicial (Heckman et al., 2015). Portanto, este passo avalia os resultados dos eventos prejudiciais, finalizando a definição dos riscos de GCS escolhidos para efeito da análise dinâmica proposta, identificando também as variáveis chave a partir destas descrições.

Assim, para desenvolver um entendimento sobre os resultados dos riscos, propõe-se responder, para cada risco, a seguinte pergunta: que extensão poderiam apresentar os resultados dos eventos prejudiciais? Para a resposta, uma discussão deve se formar sobre como a ocorrência de cada um dos eventos de risco afetaria a cadeia de suprimentos. Esta discussão servirá de base para a dedução das variáveis chave do modelo.

Então, com estas descrições, realiza-se a dedução das variáveis chave tendo em vista três condições: (i) se possível, apresentar significado tanto positivo quanto negativo; (ii) estar alinhada com os propósitos no primeiro passo do método; (iii) possibilitar representação gráfica, mesmo sem aparente possibilidade de quantificação.

Finalizando o passo, deve-se incluir uma Tabela com as respectivas variáveis chave, cada uma com a sua unidade de medida e risco do qual foi deduzida. Obtém-se assim, as variáveis relativas aos efeitos da incerteza para cada um dos eventos prejudiciais, com os quais deve lidar a GCS.

3.4 Quarto: Preparação para o modelo

O objetivo do quarto passo é explicitar os comportamentos relacionados diretamente com as variáveis representativas dos riscos de demanda na GCS. Neste passo, recomenda-se comparar os comportamentos encontrados nos riscos com os comportamentos dos arquétipos

da Dinâmica de Sistemas, diversos dos quais podem ser encontrados no *site* da *Learning Organization Practitioner's Network* (LOPN, 2015).

Realiza-se, então, uma série de atividades para relacionar as variáveis representativas dos eventos prejudiciais com os comportamentos conhecidos dos arquétipos. A sequência destas atividades é: (i) tomar uma variável representativa; (ii) escolher um arquétipo, a partir do artigo dois, que melhor represente o contexto desta variável, compreendendo as Figuras e resultados dos passos anteriores – riscos, dinâmicas, elementos, eventos prejudiciais e variáveis chave; (iii) adaptar o arquétipo para esta variável representativa. Repete-se o processo para cada variável representativa. Existe também a possibilidade de um arquétipo incluir mais de uma das variáveis representativas.

Por fim, deve-se avaliar a necessidade da inclusão de outros comportamentos, quando significativos aos propósitos no passo um. Desse modo, obtém-se um conjunto de comportamentos esperados e arquétipos adaptados para os riscos na análise dinâmica.

3.5 Quinto: Modelo conceitual

Em seguida, os comportamentos circulares das variáveis devem ser construídos formando o modelo de *causal loop diagram* (CLD). Tais comportamentos são representados através de ligações entre as variáveis que formam enlances circulares de causalidade, onde os diversos riscos compõem um mesmo diagrama causal.

Para a composição do diagrama causal, propõe-se a realização das atividades seguintes: (i) conectar os arquétipos através de relações entre suas variáveis, formando um único CLD; (ii) incluir os comportamentos identificados no passo quatro; (iii) incluir as variáveis chave definidas no passo três que não tenham ainda sido utilizadas. Com a criação dos novos enlances, deve-se identificar cada enlace como reforçador ou balanceador, numeração e com um título que expresse seu significado, o que finaliza o modelo conceitual CLD.

3.6 Sexto: Modelo de simulação e dados

Nesta etapa, o diagrama causal é construído e transformado em um diagrama de Dinâmica de Sistemas, com a definição das respectivas equações. Então, analogamente ao CLD, deve ser construído o diagrama de Dinâmica de Sistemas, listando-se suas equações em uma Tabela. Utiliza-se softwares especializados para o trabalho com Dinâmica de Sistemas, tais como Powersim, Vensim, Stella iThink, Simulink, Anylogic, entre outros.

Durante a construção do diagrama de Dinâmica de Sistemas e equações, dados a respeito das relações devem ser buscados. Embora a complexidade do ambiente no qual as relações entre as variáveis possam ser diferentes do sistema futuro, estes dados podem servir de base para deduções de relações entre as variáveis, com alterações de contextualização, caso necessário.

Assim, recomenda-se a utilização de ferramentas estatísticas como a regressão e outras técnicas multivariadas, bem como formulações em outros modelos para relações semelhantes. As relações também podem ser obtidas através do conhecimento técnico destas. Juntamente a essa busca de dados para compor as relações, a construção do diagrama deve ser realizada paralelamente aos testes do modelo, como mostrado no próximo passo, relativo ao conjunto de testes a serem aplicados ao modelo de Dinâmica de Sistemas.

3.7 Sétimo: Testes

Propõe-se que os testes sejam realizados durante a construção do modelo de Dinâmica de Sistemas. Este processo, além de ser indicado pela literatura (Sterman, 2000), é também facilitado devido à forma como são desenvolvidas as demais etapas deste método.

Assim, o primeiro teste a ser realizado durante a construção do modelo é o de comportamento dos arquétipos individualmente. Definem-se os valores e equações para cada variável pertencente a um arquétipo. Compara-se o comportamento apresentado ao desejado no propósito da análise dinâmica no passo um e verifica-se a adequação de comportamento das relativas variáveis representativas, sendo este o teste da consistência com propósitos.

Depois, realiza-se a conexão dos arquétipos através dos demais comportamentos, respectivas variáveis e equações. Estes outros comportamentos constituem as hipóteses dinâmicas presentes no passo quatro e seu comportamento conjunto é colocado em funcionamento. Verifica-se a ocorrência destes comportamentos da forma como foram previstos no passo quatro.

Verificados os comportamentos, executa-se a verificação de robustez em situações extremas e sensibilidade dos valores obtidos. Dessa forma, executam-se os testes para o modelo de Dinâmica de Sistemas, a fim de verificar a consistência do comportamento de suas equações em conjunto.

Para cada uma das variáveis probabilísticas deve-se realizar uma pesquisa para escolha de sua distribuição, utilizando dados históricos ou trabalhos anteriores com a variável, e

devem ser utilizadas ferramentas específicas para inferências estatísticas de seus parâmetros, tais como os testes de Kolmogorov-Smirnov (Plott; Chen, 2002).

3.8 Oitavo: Estratégias

Por fim, devem ser implementadas estratégias conforme as possibilidades observadas no sistema dinâmico dos riscos. Devem ser encontrados os pontos do sistema onde existem maiores vulnerabilidades e maior possibilidade de perpetuação, tanto quanto a manutenção de um comportamento de risco, a fim de compor soluções sistêmicas a partir do modelo.

Como o estudo de riscos envolve incertezas para grandes períodos de tempo, deve ser composta uma análise de cenários, com os que representam a ocorrência individual e coletiva dos diferentes riscos. A simulação dos cenários deve focar nas possibilidades de recuperação na ocorrência de riscos, e também atentar para as possibilidades de retardo do advento dos mesmos.

As políticas, por sua vez, devem ser organizadas na forma de recomendações do tratamento a ser empregado para aos riscos, explicitando-se também os intervalos onde as respectivas recomendações são aplicáveis. O efeito da interação das diferentes políticas deve ser apresentado através de interpretações acerca da dominância de enlaces de comportamento.

4. Avaliação do método proposto

O método proposto foi avaliado a partir de um teste piloto na análise dinâmica de três riscos de GCS. A fim de ser discutido, cada passo recebe uma divisão desta seção.

4.1 Definição dos riscos e delimitações

Os três riscos foram escolhidos com base na classificação de Rao e Goldsby (2009). As classificações envolvem três amplitudes de GCS: os que afetam o ambiente inteiro; os que afetam apenas o setor; os que afetam apenas a firma. Desta forma, com riscos de diferente magnitude, permite-se uma avaliação da flexibilidade do método proposto para a análise dinâmica em GCS. A Tabela 2 apresenta os riscos escolhidos.

Assim, escolheu-se no ambiente o risco de desastre natural por avalanche; no setor, o de insucesso; no relacionamento para o desenvolvimento de produto e na organização, o do âmbito operacional de produção/*output* com perda de clientes por inflexibilidade de customização do produto. Para ilustração do primeiro passo, o propósito de estudo dinâmico,

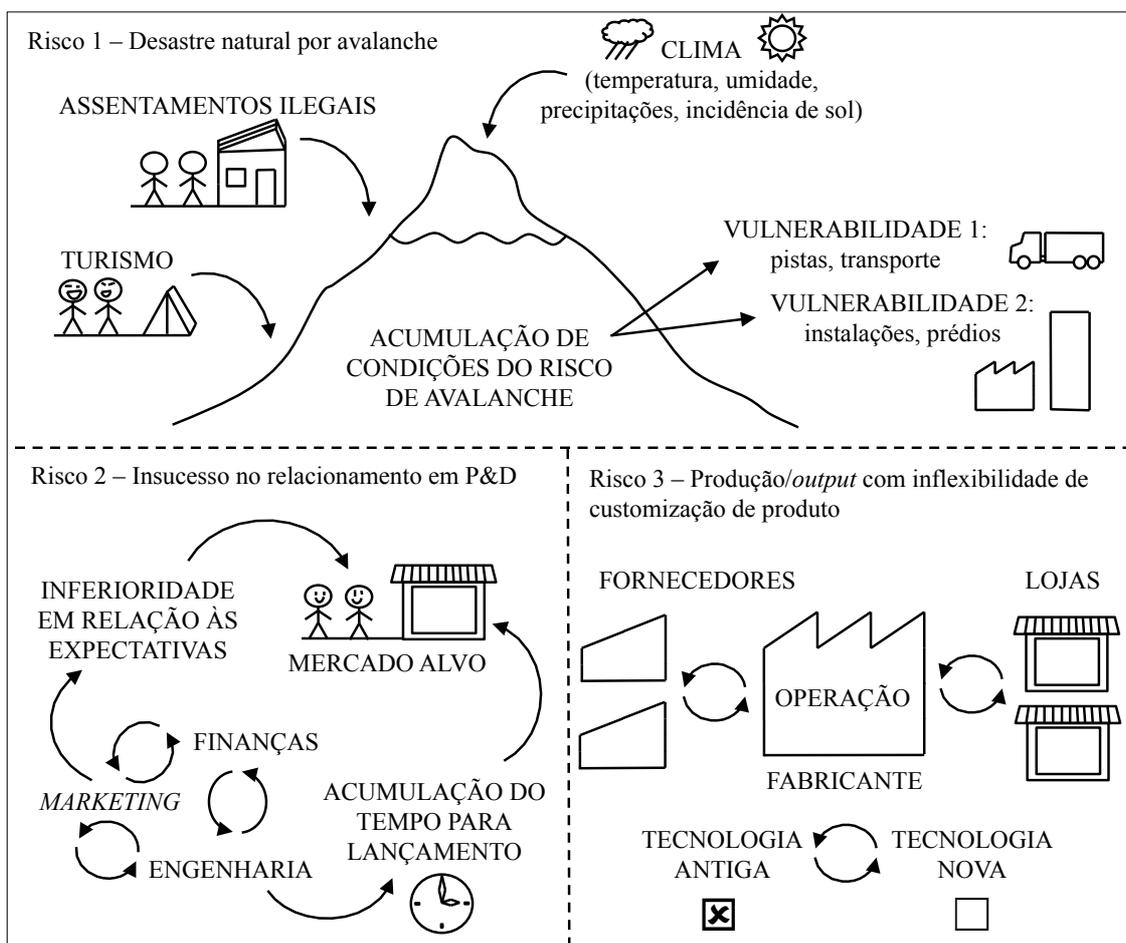
elementos, agentes principais envolvidos e limitações para a modelagem de cada risco são apresentadas na Figura 3.

Tabela 2 – Riscos escolhidos, propósito dinâmico, elementos e limitações

Riscos escolhidos	Propósito dinâmico	Elementos	Limitações
Risco 1 – Desastre natural por avalanche	Estudar a concorrência de causas para a formação de avalanches em duas vulnerabilidades da CS: transporte e instalações	Partes vulneráveis na CS; Assentamentos ilegais; Turismo na região; Oscilações do tempo (temperatura, umidade, precipitações)	Efeitos através de percentuais e valores fictícios
Risco 2 – Insucesso no relacionamento em P&D	Relacionar perda de mercado com tempo de lançamento de produto e inferioridade com relação às expectativas dos clientes	Mercado alvo (atitudes, preferências); Fabricantes; Fornecedores; Equipes de <i>marketing</i> engenharia, finanças	Expectativas percentuais e mercado homogêneo
Risco 3 – Produção/ <i>output</i> com inflexibilidade de customização de produto	Estudar enfraquecimento da CS devido a atrasos operacionais de mudança de tecnologia no fabricante e efeito do custo de troca associado	Cliente; Lojas; Fabricante; Fornecedores; Tecnologia nova e antiga;	Dependência percentual do produto

Fonte: Elaboração própria.

Figura 3 – Figura rica com os agentes e elementos associados aos respectivos riscos



Fonte: Elaboração própria.

4.2 Eventos prejudiciais

Cada risco se relaciona com um evento prejudicial, conforme a Tabela 3. As variáveis representativas são ligadas aos respectivos eventos prejudiciais e seus horizontes de interesse, para efeito deste trabalho, variam de três a vinte anos. A maior divisão de tempo considerada para observar estas variáveis no tempo foi a divisão semanal.

A escolha do horizonte de interesse depende dos objetivos e possibilidades financeiras de recuperação nas organizações onde fosse desenvolvido tal estudo. As variáveis representativas simbolizariam o dano imediato causado pelos eventos de risco.

Tabela 3 – Eventos prejudiciais, variáveis representativas e horizontes dos riscos em estudo

Riscos	Evento prejudicial	Variáveis representativas	Horizonte de interesse	Divisão do horizonte
Risco 1 – Avalanche	Ruptura e/ou danos	Bloqueio de vias e Destruição de instalações	Vinte anos	Trimestral
Risco 2 – P&D	Perda de clientes	Clientes e discrepância das expectativas dos clientes	Cinco anos	Bimestral
Risco 3 – Customização	Perda de transações	Transações perdidas	Três anos	Semanal

Fonte: Elaboração própria.

4.3 Resultados incertos e variáveis chave

A formação de uma discussão acerca dos resultados esperados estaria associada a reuniões coletivas com interessados e especialistas nos temas de interesse. Para os três riscos escolhidos, algumas das considerações que poderiam ser feitas são descritas a seguir.

A quantidade de danos causados por uma avalanche estaria associada aos custos de parada de atividades, havendo incerteza quanto ao tempo necessário para a recuperação, além do custo e do tempo de reconstrução de instalações. Além destas, haveria a incerteza quanto à segurança do capital humano durante a avalanche. Uma vez sofrida a ruptura, haveria a incerteza adicional da sobrevivência de elos na cadeia.

Por sua vez, a perda de clientes devido a problemas no desenvolvimento aumentaria a tensão entre as firmas relacionadas para o lançamento do produto dentro dos setores que trabalharam para isso, havendo incertezas quanto à confiança mútua resultante. Por outro lado, o longo horizonte poderia interferir na percepção do não atingimento de vendas, fazendo com que as perdas de clientes por atraso fosse atribuída a outras causas ao invés da ausência de customização, por estar desvinculada das ações no tempo e no espaço.

Enfim, no terceiro risco, os resultados incertos se referem ao número de transações perdidas devido à ausência de customização ou atraso para customização. Como o aumento de pedidos associado à customização é desconhecido, tendo em vista que depende da resposta dos diversos compradores, a percepção de viabilidade de novas tecnologias para a customização fica prejudicada. Por outro lado, caso este processo também envolvesse mudanças nos fornecedores, aumentaria os prazos e a percepção de aparente inviabilidade da substituição de tecnologia.

Com base nestas descrições, as variáveis deduzidas de cada risco de demanda e suas unidades são apresentadas na Tabela 4. Com isto, encerra-se o passo três.

Tabela 4 – Variáveis para cada risco a ser analisado

Riscos	Variáveis	Unidade
Risco 1 – Desastre natural por avalanche	% de atividades paradas	% da atividade
	Custo de parada de atividades	u.m. por % de atividade
	Tempo de recuperação	Semanas
	Tempo de reconstrução	Meses
	Tempo de desbloqueio de vias	Semanas
	Perdas de capital humano	Nº de pessoas
	Sobrevivência de elos	% da atividade
	Nº de assentamentos ilegais	Distribuição normal
	Turismo total na região	Distribuição normal
	Temperatura	Ciclos anuais
	Umidade	Ciclos anuais
Risco 2 – Insucesso no relacionamento em P&D	Expectativas dos clientes	Real /desejado
	Confiança mútua	Percentual
	Interferências do <i>marketing</i>	Nº de interferências
	Interferências de engenharia	Nº de interferências
	Interferências financeiras	Nº de interferências
	Gastos de projeto do produto	u.m.
	Ciclo de vendas do produto	Ciclos anuais
	Atraso no lançamento	Semanas
	Vendas nas lojas	Nº de produtos vendidos
	Características no produto (real)	Nº de características
Características desejadas	Nº de características	
Risco 3 – Produção/ <i>output</i> com inflexibilidade de customização de produto	Customização real	Percentual
	Aumento de pedidos devido a customização	Curva logarítmica
	Percepção de inviabilidade da substituição	Binária
	Custo da nova tecnologia	u.m.
	Vendas esperadas com a nova tecnologia	% sobre demanda
	Atraso de mudança tecnológica	Semanas
	Necessidade de envolver fornecedores	Binária
	Vendas nas lojas	Nº de vendas
	Pedidos nas lojas	Nº de pedidos

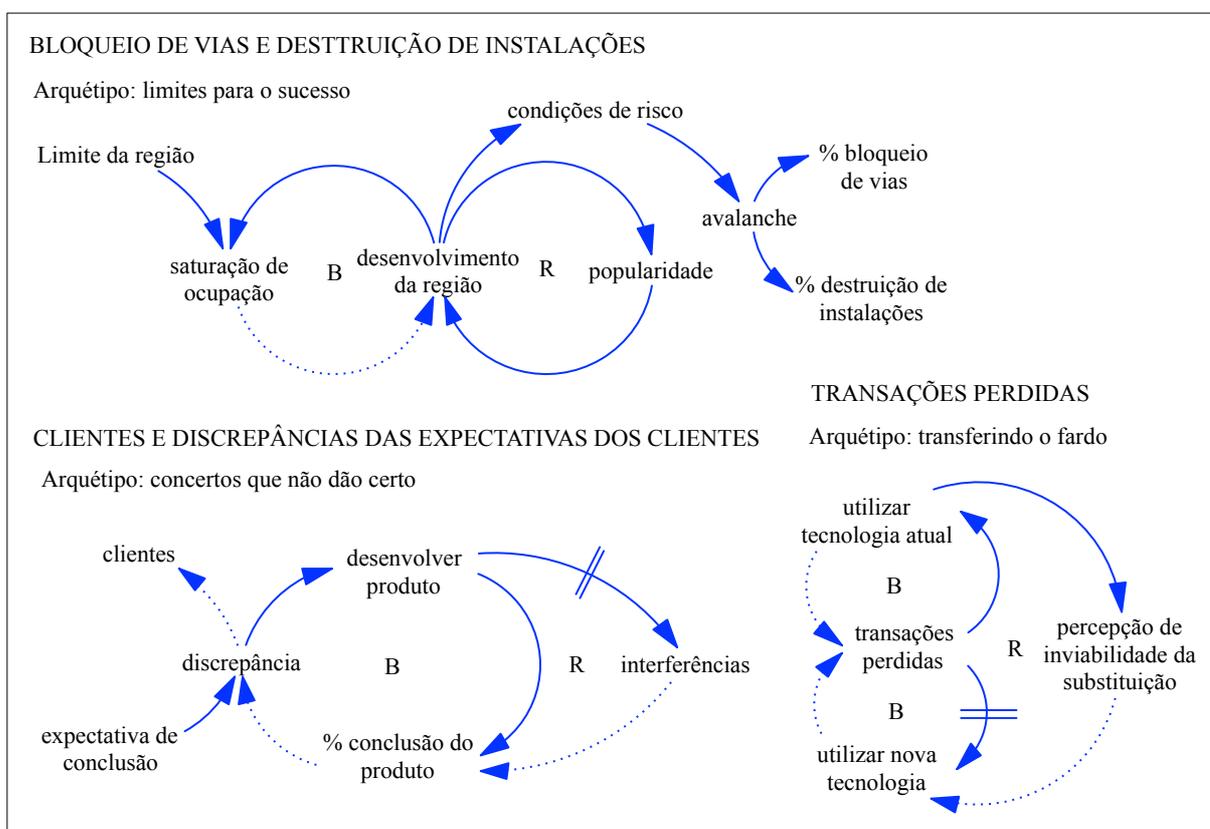
Fonte: Elaboração própria.

4.4 Preparação para o modelo: Arquétipos e comportamentos esperados

Passando para as hipóteses dinâmicas dos comportamentos no estudo dinâmico, o quarto passo do método proposto permitiria uma definição dos comportamentos esperados anterior ao desenvolvimento do modelo. Em cada risco, as variáveis representativas foram associadas a arquétipos conforme exposto a seguir.

Para as variáveis no risco um, bloqueio de vias e destruição de instalações, foi escolhido o arquétipo Limites para o Sucesso (LOPN, 2015), uma vez que este pode representar os limites para o desenvolvimento de uma região. O desenvolvimento, por sua vez, influi diretamente na composição de condições de risco para a avalanche, gerando alterações de clima na temperatura e umidade local, aumento no turismo e assentamentos. Eventualmente, essas condições concorrem para o evento de avalanche, gerando o bloqueio de um certo percentual de vias da CS e possível destruição de um certo percentual das instalações, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Arquétipos de Dinâmica de Sistemas adaptados aos riscos de GCS na análise



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

No risco dois, por sua vez, as variáveis clientes e discrepâncias nas expectativas dos clientes são consideradas para o arquétipo Concertos que Não Dão Certo (LOPN, 2015), na medida em que se desenvolve um impasse entre setores das firmas para a conclusão do desenvolvimento do produto. Este mesmo impasse pode ser observado na expectativa do tempo de conclusão, como mostra a Figura 4, e na expectativa de características esperadas para o produto a ser lançado.

No terceiro risco, a ocasião de transações perdidas devido à defasagem tecnológica aumenta o uso da tecnologia atual na tentativa de recuperar as perdas através do aumento de escala, que é mais rápido que a adoção da nova tecnologia. Por outro lado, esse aumento de escala também gera custos, atrasando a implantação da nova tecnologia pela redução de recursos e pela percepção de inviabilidade da substituição de tecnologia aumenta.

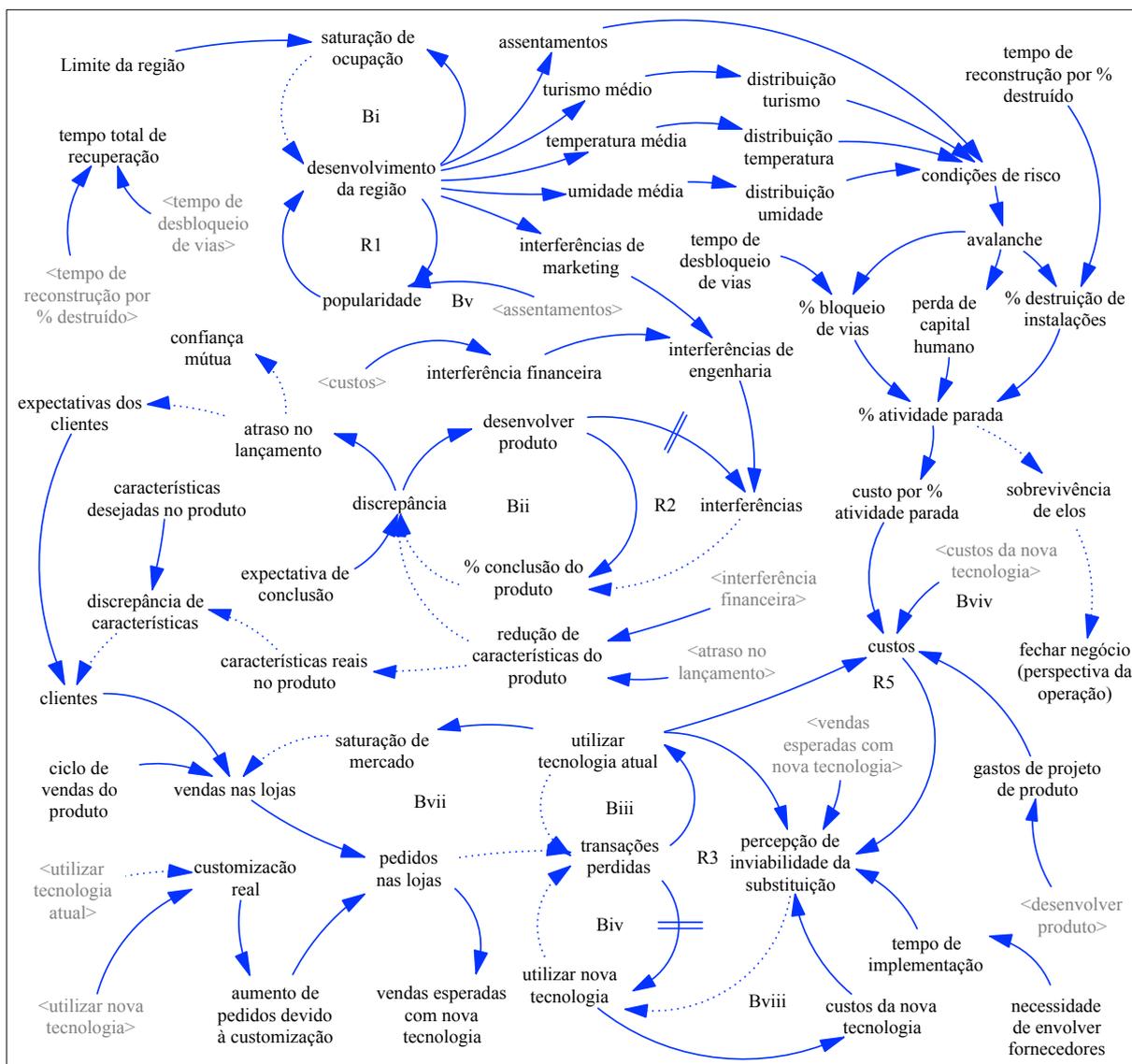
4.5 Modelos conceituais

Visando demonstrar a possibilidade de análise conjunta de riscos no método proposto, o modelo CLD foi construído (Figura 5). Percebe-se que, mesmo em se tratando de riscos de diferentes níveis de influência, ambiental, setorial e organizacional, não houve impedimento à presença de mútuas causalidades e comportamentos de realimentação entre esses riscos.

Na Figura 5, os arquétipos estão diagramados juntamente com outros comportamentos presentes no contexto: fechamento do negócio em determinado nível de estrago; reconstrução, tempo e custos relacionados; redução da confiança devido a atrasos de lançamento; interferência financeira associada a certo nível de gastos do projeto; reduções nas características do produto reduziriam a discrepância para a sua finalização; lojas perdendo clientes reduzem pedidos; mudança nos fornecedores para a mudança de tecnologia aumentaria a percepção de inviabilidade da nova tecnologia.

A identificação sugerida para os enlaces relativos ao conjunto de comportamentos do modelo é apresentada na Tabela 5, contendo nomes e representações da função de cada enlace comportamental. Este ponto já permite uma análise ampla dos problemas relacionados aos riscos escolhidos, como pode ser verificado no conjunto de comportamentos do sistema.

Figura 5 – O modelo CLD poderia ser construído com um total de 59 variáveis



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

O modelo de simulação, por sua vez, seria inteiramente baseado no modelo CLD, podendo ser adicionadas variáveis auxiliares conforme a necessidade. Verifica-se que a simulação de diversos dos comportamentos identificados demandaria a modelagem de atitudes pontuais dos gestores e times de trabalho ao longo da GCS. É necessária a composição de conjuntos específicos de atitudes humanas para a construção do modelo de simulação de riscos com Dinâmica de Sistemas.

Tabela 5 – Enlaces identificados no CLD

Enlace	Descrição
R1	Crescimento do desenvolvimento e popularidade da região
R2	Consequências inesperadas na atividade do desenvolvimento de produto
R3	Ganhos de escala com a tecnologia atual aumentam a percepção de inviabilidade de mudança
R4	Gastos com desenvolvimento de produto também aumentam esta percepção de inviabilidade
R5	Custos com aumento de escala na tecnologia atual aumentam a inviabilidade
Bi	O crescimento e desenvolvimento da região tem um limite de saturação da ocupação
Bii	Comportamento que busca a finalização no desenvolvimento do produto
Biii	Aumento de transações através da produção em escala
Biv	Atraso da solução efetiva de troca de tecnologia
Bv	Diminuição da popularidade da região devido aos assentamentos ilegais
Bvi	Atrasos no lançamento de produto devido a interferências financeiras
Bvii	Saturação do mercado devido à escala e redução de vendas nas lojas
Bviii	Concorrência dos custos de nova tecnologia na percepção de inviabilidade da substituição

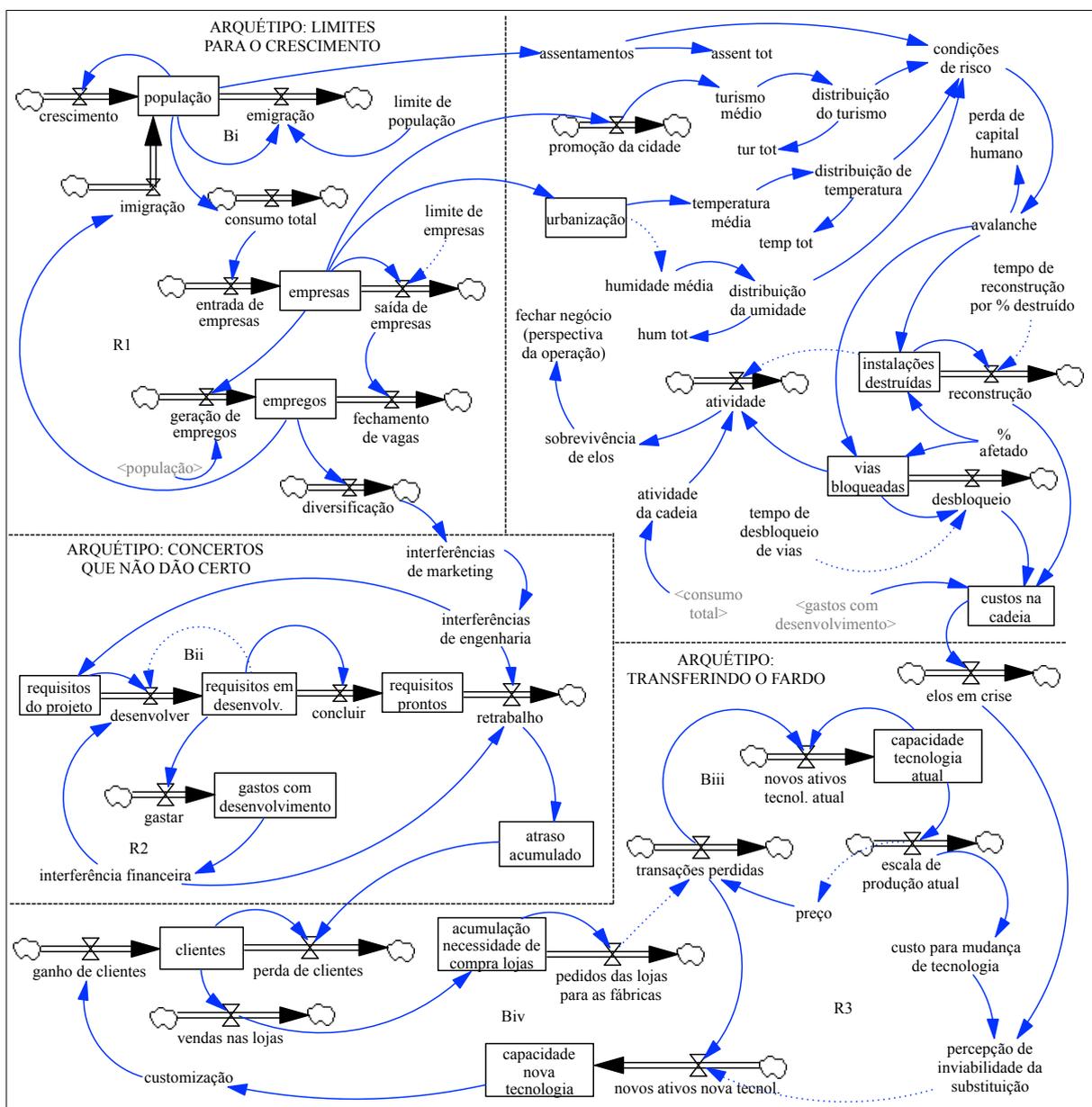
Fonte: Elaboração própria.

4.6 Modelo de simulação

Tanto na passagem dos arquétipos para o modelo conceitual, como na transição do modelo conceitual para o modelo de simulação, para ambos existem adaptações que devem ser realizadas, podendo reduzir ou aumentar o número de variáveis necessárias ao entendimento e representação dos enlaces desejados compondo o modelo. No caso do modelo conceitual na Figura 5, as relações principais do mesmo precisaram de mais variáveis para a devida transição entre unidades das variáveis, bem como para a explicação mais detalhada dos comportamentos. A Figura 6 apresenta o modelo de Dinâmica de Sistemas.

A busca de dados consistiu em encontrar relações demográficas, de consumo, empresas e emprego, de forma a ajustar as suas relações de grandeza e proporcionalidade. Regressões de diversas Tabelas do *site* do Ipea (IPEADATA, 2015) permitiram verificar que os comportamentos estavam factíveis para o crescimento de uma cidade nos EUA. Informações técnicas e estatísticas em diversas regiões de avalanches em diferentes países possibilitaram o estabelecimento de frequências aproximadas para as avalanches para efeitos do modelo conceitual, ajustadas conforme distribuições de probabilidades das causas para a sua ocorrência.

Figura 6 – Modelo de Dinâmica de Sistemas com os respectivos arquétipos e principais relações em um total de 75 variáveis



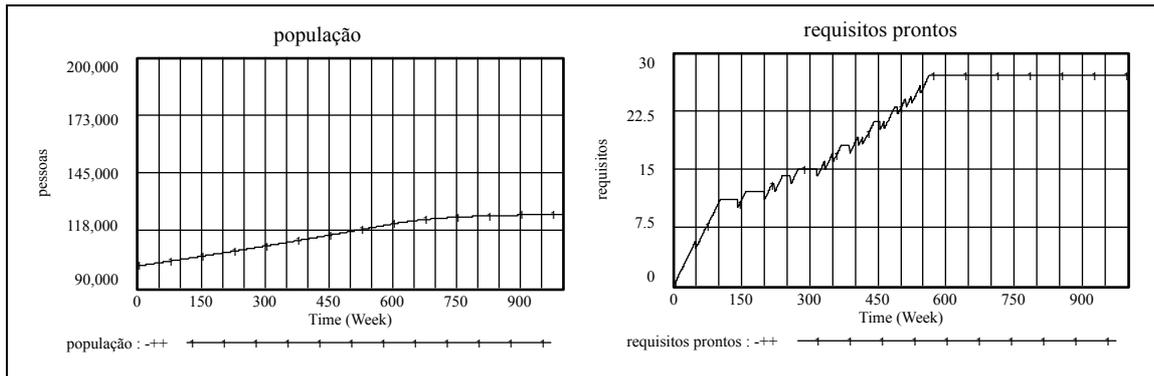
Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

4.7 Testes

Em relação à consistência com os propósitos inicialmente definidos, observa-se que o modelo contempla os pontos mencionados em suas relações. Para o risco de avalanche, é possível observar a concorrência de causas e resultados. O risco em desenvolvimento conjunto relaciona a perda de clientes através dos atrasos e o que até em customização através de nova tecnologia mostra o fortalecimento da cadeia em seus elos finais.

Como os testes deveriam passar pela simulação dos arquétipos, alguns resultados de simulação foram apresentados na Figura 7. Estes comportamentos devem ser alterados conforme a realidade da região e conjunto de organizações em na análise dinâmica de riscos empregada.

Figura 7 – Comportamentos que poderiam ser observados nos arquétipos



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

Quanto à robustez e sensibilidade, o modelo é bastante sensível aos limites presentes após as variáveis baseadas em distribuições de probabilidades. Estas ocorrem principalmente em comportamentos ambientais, para as causas de catástrofes, além de comportamentos humanos, com probabilidades de diversificação e interferência. A maior parte das constantes de transição de unidades podem ser alteradas, desde que dentro da mesma ordem de grandeza. A obtenção das variáveis probabilísticas do modelo é apresentada na tabela 6.

Tabela 6 – Obtenção de distribuições para as variáveis probabilísticas

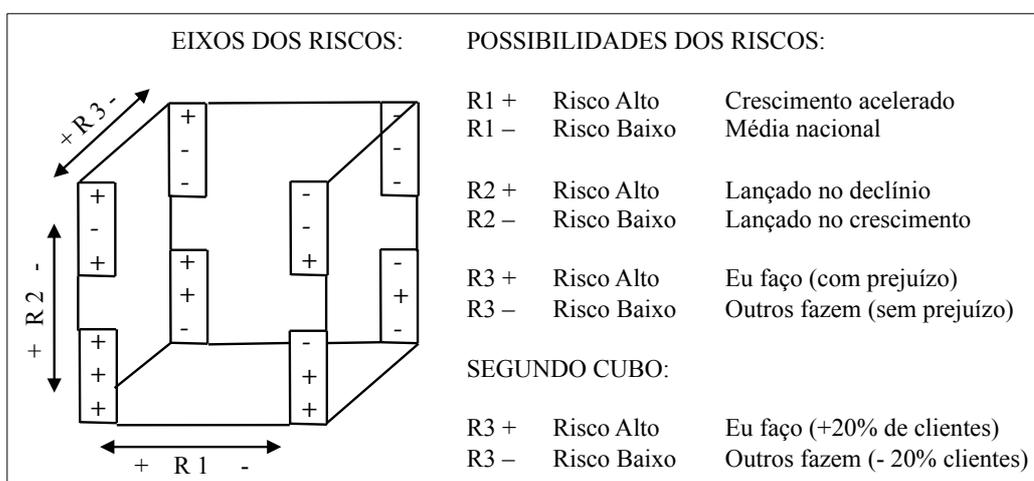
Variável	Nº	Probabilidade de	Distribuição	Teste / Obtenção
% afetado	(01)	destruição da avalanche	Normal	Sem teste: a destruição é muito particular às condições em uma área (Tracy, 2001)
avulchamento	(08)	ocorrência da avalanche	Normal	
distribuição umidade	(21)	umidade alta	Normal	Antretter et al., 2010
distribuição temperatura	(22)	temperatura alta	Normal	Antretter et al., 2010
distribuição turismo	(23)	acidentes em turismo	Lognormal	Miguéns; Mendes, 2008
diversificação	(24)	inovação para o produto	Normal	Determinação empírica
interferências de engenharia	(44)	alterações no produto	Normal	
novos ativos nova tecnol	(48)	decisão de compra	Normal	
novos ativos tecnol atual	(49)	decisão de compra	Normal	
perda de capital humano	(52)	mortes	Normal	Evento com incidência pequena ou nula
vendas nas lojas	(74)	vendas na semana	Normal	Wu; Tsai, 2001

Fonte: Elaboração própria.

4.8 Estratégias

Os cenários que poderiam se dar na ocorrência individual e coletiva dos riscos com maior ou menor severidade formam um cubo com oito arestas, que são as possibilidades pareadas dos riscos em conjunto, que são rodadas intercaladamente, de acordo com a figura 7. As maiores vulnerabilidades do sistema seriam a evolução das condições climáticas, atrasos envolvidos com o desenvolvimento e perdas de clientes pelas duas vias: falta de customização e atraso na disponibilização do novo produto.

Figura 8 – Cenários intercalando a gravidade de ocorrência dos diferentes riscos



Fonte: Elaboração própria.

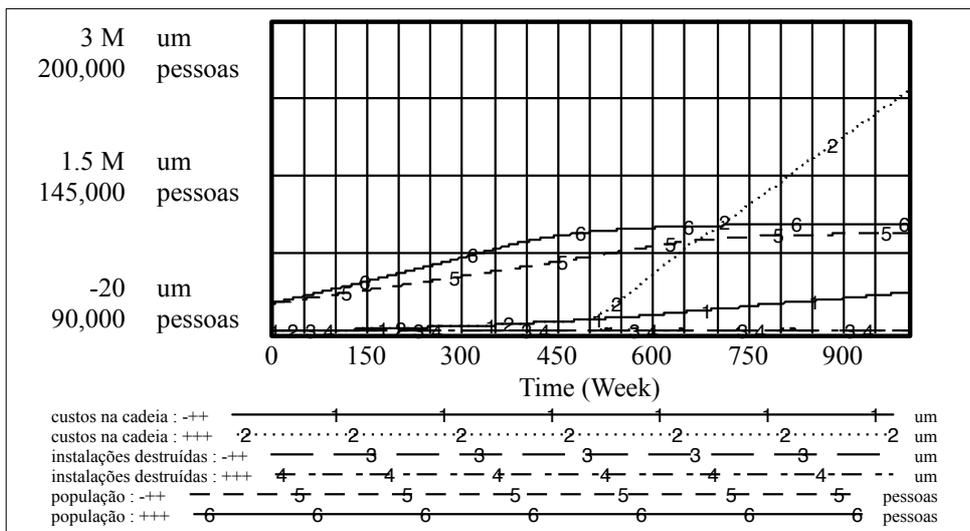
Como mostram os comportamentos na figura 8, um acréscimo populacional levemente acelerado resulta em grandes aumentos em custos na cadeia. O risco que provém do ambiente tem natureza mais devastadora neste caso, não sendo seus efeitos muito alterados pelos demais riscos, independentemente das estratégias e cenários nos mesmos. Conclui-se que riscos de alto impacto devem ter espaço proeminente de análise buscando-se a remoção de instalações em áreas onde há manifestação de risco mais provável.

A exemplo do aumento inesperado de custos com a população, espera-se que o modelo mostre resultados de quantificação dos riscos. O cenário em que o risco 2 é reduzido, ou seja, com o produto lançado com antecedência, há uma redução de cerca de 50% nos custos de desenvolvimento, influenciando positivamente também na mitigação do 3.

Para o risco 3, os cenários internos a este não provocam grandes alterações na média de clientes, mesmo esta sendo realimentada, quando da adoção tardia de tecnologia. Por outro lado, quando esta é implantada mais cedo no período, os cenários do segundo cubo podem

levar a situações extremas na carteira de clientes da cadeia. No caso de a tecnologia implantada ser efetiva para o aumento de clientes, o acréscimo ocorreu em mais de 30%. Já no caso de a implantação for por outras cadeias de suprimentos, a base de clientes passa a decrescer consideravelmente, após um período de breve estabilidade, colocando em cheque a viabilidade do produto para a cadeia de suprimentos.

Figura 9 – Aumento de custos devido ao aumento populacional acelerado



Fonte: Elaboração própria. Software Vensim®.

Em percentuais menores de efeito da nova tecnologia, a recuperação desses itens pode ser realizada através de um maior ganho de clientes pela maior customização ou escala de produção, embora esta promova uma maior redução de faturamento e transações perdidas no longo prazo. Os pedidos nas lojas para as fábricas e o preço concorrem para um melhor ajuste na tecnologia, na medida em que decisões são tomadas para a customização. Além destas estratégias, a descrição completa dos dados e resultados do modelo pode ser encontrada nos apêndices I e II.

5. Aplicabilidade do Método Proposto

Em uma situação real de gestão de cadeias de suprimentos, a necessidade mais emergente deve ser colocada antes na análise. Da mesma forma, os indicadores, onde o método proposto de análise de riscos utilizando a dinâmica de sistemas seria fundamental para uma quantificação dos próprios indicadores e seus valores almejados. Também o

desenvolvimento de situações, comportamentos e tendências atuais podem ser trabalhadas de forma a fornecer um entendimento maior de seus efeitos através do método.

Em termos de soluções sistêmicas, pode-se trabalhar os mais diversos riscos de gestão de cadeias de suprimentos com o propósito de redução de perdas; com redução de probabilidades e estudo da duração de eventos; redução da velocidade das perdas; melhoria do tempo até a detecção de problemas; e redução da frequência e exposição aos riscos de interesse. É importante também que se realizem reuniões periódicas para possibilitar a construção do conhecimento, não apenas dentro do modelo, mas principalmente no pensamento da equipe de trabalho, a qual deve compor um time suficientemente multifuncional e conhecedor dos diferentes elementos envolvidos na análise de risco, assim como suas relações com a cadeia de suprimentos.

6. Conclusão

O método proposto permite a discussão das propriedades dinâmicas envolvidas nos riscos em sistemas de cadeias de suprimentos. Providencia uma forma estruturada de aplicar os princípios de simulação específicos à Dinâmica de Sistemas para o estudo de riscos nessas cadeias, através de uma evidenciação dos principais conceitos envolvidos na análise dinâmica de riscos em GCS, em harmonia com técnicas de cenários e outras ferramentas estatísticas.

Dentro do método proposto, a modelagem através de arquétipos funciona como um facilitador do processo de testes do modelo, assim como da análise de futuro dos riscos de GCS. Nesta construção, o processo de testes fica dividido conforme os arquétipos envolvidos, permitindo o desenvolvimento gradual do entendimento e confiança no modelo. Foi realizado um teste piloto para avaliação da aplicabilidade do método proposto, mostrando-se que o mesmo contempla os requisitos para uma análise dinâmica e causal de múltiplos riscos.

A análise de riscos compreende as relações entre comportamentos associados aos diferentes riscos. A causalidade entre os riscos de GCS é evidente, sendo necessário formas de análise que considerem estas causalidades. Ao invés do estudo isolado de cada fator, a análise de riscos demanda a criação de um quadro maior, onde resultados futuros possam ser testados. A simulação de Dinâmica de Sistemas se mostra adequada para a análise de riscos, envolvendo conhecimentos de diferentes áreas de estudo, as quais se conectam sob uma mesma ótica de causas circulares para afetar a cadeia de suprimentos, promovendo um entendimento sistêmico em seus diferentes âmbitos, seja através do ambiente, setor ou firma.

Referências

- ADAMIDES, E. D.; POMONIS, N. The co-evolution of product, production and supply chain decisions and the emergence of manufacturing strategy. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 2, p. 301-312, 2009. doi:10.1016/j.ijpe.2006.11.025.
- AKKERMANS, H.; DELLAERT, N. The rediscovery of industrial dynamics: the contribution of system dynamics to supply chain management in a dynamic and fragmented world. **System Dynamics Review**, v. 21, n. 3, p. 173-186, 2005. doi:10.1002/sdr.317.
- ANDRADE, A. L. et al. **Pensamento Sistêmico - Caderno de Campo**. Porto Alegre: Bookman, 2006. ISBN 978-85-60031-73-3.
- ANTRETTTER, Florian; Karagiozids, Achilles; Holm, Andreas; Glass, Samuel. Interior temperature and relative humidity distributions in mixed-humid and cold climates as building simulation boundary conditions. In: **Proceedings: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference, Paper**. 2010.
- ARISTIZÁBAL, M. et al. Medición del valor co-creado por medio de arquetipos sistémicos y lógica difusa. **Revista Politécnica**, v. 9, n. 17, p. 47-58, 2013. ISSN:1900-2351.
- AVEN, T. The risk concept—historical and recent development trends. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 99, p. 33–44, 2012. doi:10.1016/j.res.2011.11.006.
- AZADEH, A. et al. An integrated artificial neural network and system dynamics approach in support of the viable system model to enhance industrial intelligence: the case of a large broiler industry. **Systems Research and Behavioral Science**, v. 31, n. 2, p. 236-257, 2014. doi:10.1002/sres.2199.
- BESIOU, M.; GEORGIADIS, P.; VAN WASSENHOVE, L. N. Official recycling and scavengers: Symbiotic or conflicting? **European journal of operational research**, v. 218, n. 2, p. 563-576, 2012. doi:10.2139/ssrn.1685277.
- BRUIJNE, W. D.; EETEN, M. V. Systems that should have failed: critical infrastructure protection in an institutionally fragmented environment. **Journal of Contingencies and Crisis Management**, v. 15, n. 1, p. 18-29, 2007. doi:10.1111/j.1468-5973.2007.00501.x.
- BUENO-SOLANO, A.; CEDILLO-CAMPOS, M. G. Dynamic impact on global supply chains performance of disruptions propagation produced by terrorist acts. **Transportation Research Part E**, v. 61, p. 1-12, 2014. doi:10.1016/j.tre.2013.09.005.
- CALVANO, C. N.; JOHN, P. Systems engineering in an age of complexity. **Systems Engineering**, v. 7, n. 1, p. 25–34, 2004. doi:10.1109/EMR.2004.25134.
- CEDILLO-CAMPOS, M. G. et al. Supply chain disruptions propagation caused by criminal acts. **Journal of Applied Research and Technology**, v. 12, p. 684-694, 2014. doi:10.13140/2.1.4126.2408.
- COX, L. A.; RICCI, P. F. Causal regulations vs. political will : Why human zoonotic infections increase despite precautionary bans on animal antibiotics. **Environment International**, v. 34, p. 459-475, 2008. doi:10.1016/j.envint.2007.10.010.

CROOKES, D. J. et al. System dynamic modelling to assess economic viability and risk trade-offs for ecological restoration in South Africa. **Journal of Environmental Management**, v. 120, p. 138-147, 2013. doi:10.1016/j.jenvman.2013.02.001.

DOMÍNGUEZ-GARCÍA, A. D. et al. An integrated methodology for the dynamic performance and reliability evaluation of fault-tolerant systems. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 93, p. 1628-1649, 2008. doi:10.1016/j.ress.2008.01.007.

OECD. Emerging systemic risks in the 21st century: an agenda for action. **Paris: Organization for Economic Cooperation and Development, OECD**, 2003.

FORRESTER, J. W. **Industrial dynamics**. Cambridge: MIT press, 1961. ISBN 10: 0915299887.

GEORGIADIS, P.; ATHANASIOU, E. Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing. **European Journal of Operational Research**, v. 225, n. 1, p. 44-58, 2013. doi:10.1016/j.ejor.2012.09.021.

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D.; TAGARAS, G. The impact of product lifecycle on capacity planning of closed-loop supply chains with remanufacturing. **Production and Operations management**, v. 15, n. 4, p. 514-527, 2006. doi:10.1111/j.1937-5956.2006.tb00160.x.

GHASHGHAIE, M.; MAROFI, S.; MAROFI, H. Using system dynamics method to determine the effect of water demand priorities on downstream flow. **Water Resour Manage**, v. 28, p. 5055-5072, 2014. doi:10.1007/s11269-014-0791-z.

GOHARI, A. et al. Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can Backfire. **Journal of Hydrology**, v. 491, n. 1, p. 23–39, 2013. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.03.021.

GRÖBLER, A.; ZOCK, A. Supporting long-term workforce planning with a dynamic aging chain model: A case study from the service industry. **Human Resource Management**, v. 49, n. 5, p. 829-848, 2010. doi:10.1002/hrm.20382.

HALLIKAS, J. et al. Risk management processes in supplier networks. **International Journal of Production Economics**, v. 90, n. 1, p. 47-58, 2004. doi:10.1016/j.ijpe.2004.02.007.

HEASLIP, G.; SHARIF, A. M.; ALTHONAYAN, A. Employing a systems-based perspective to the identification of inter-relationships within humanitarian logistics. **International Journal of Production Economics**, v. 139, p. 377-392, 2012. doi:10.1016/j.ijpe.2012.05.022.

HECKMAN, I.; COMES, T.; NICKEL, S. A critical review on supply chain risk – Definition, measure and modeling. **Omega**, v. 52, p. 119-132, 2015. doi:10.1016/j.omega.2014.10.004.

IBÁÑEZ, J.; VALDERRAMA, J. M.; PUIGDEFÁBREGAS, J. Assessing desertification risk using system stability condition analysis. **Ecological Modelling**, v. 213, p. 180–190, 2008. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.11.017.

IPEADATA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Macroeconômico, regional e social, 2015. Disponível em: <<http://ipeadata.gov.br>>. Acesso em: 2015.

JAIN, S. et al. A Hierarchical Approach for Evaluating Energy Trade-offs in Supply Chains. **International Journal of Production Economics**, v. 146, n. 2, p. 411-422, 2013. doi:10.1016/j.ijpe.2013.03.015.

KIM, I.; SPRINGER, M. Measuring endogenous supply chain volatility: Beyond the bullwhip effect. **European Journal of Operational Research**, v. 189, n. 1, p. 172-193, 2008. doi:10.1016/j.ejor.2007.05.012.

KONTOGIANNIS, T. Modeling patterns of breakdown (or archetypes) of human and organizational processes in accidents using system dynamics. **Safety Science**, v. 50, n. 4, p. 931-944, 2012. doi:10.1016/j.ssci.2011.12.011.

LI, F. J. et al. A system dynamics model for analyzing the eco-agriculture system with policy recommendations. **Ecological Modelling**, v. 227, p. 34-45, 2012. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.12.005.

LINBOM, H. et al. The capability concept – On how to define and describe capability in relation to risk, vulnerability and resilience, v. 135, p. 45-54, 2015. doi:10.1016/j.res.2014.11.007.

LOPN. Learning Organization Practitioners' Network. 2015. Disponível em: <http://www.lopn.net/System_Archetypes.html>. Acesso em: 2015.

LORENTZ, H.; HILMOLA, O.-P. Confidence and supply chain disruptions: Insights into managerial decision-making from the perspective of policy. **Journal of Modelling in Management**, v. 7, n. 3, p. 328-356, 2012. doi:10.1108/17465661211283304.

LU, Y.; ZHANG, S.; LI, X. A hazard analysis-based approach to improve the landing safety of a bwb remotely piloted vehicle. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 25, p. 846-853, 2012. doi:10.1016/S1000-9361(11)60454-8.

MAZZARANA, B.; FUCHS, S. Fuzzy formative scenario analysis for woody material transport related risks in mountain torrents. **Environmental Modelling; Software**, v. 25, n. 10, p. 1208-1224, 2010. doi:10.1016/j.envsoft.2010.03.030.

MAZZORANA, B.; FUCHS, S. Fuzzy formative scenario analysis for woody material transport related risks in mountain torrents. **Environmental Modelling; Software**, v. 25, p. 1208-1224, 2010. doi:10.1016/j.envsoft.2010.03.030.

MCKNIGHT, U. S. et al. An integrated model for assessing the risk of TCE groundwater contamination to human receptors and surface water ecosystems. **Ecological Engineering**, v. 36, p. 1126-1137, 2010. doi:10.1016/j.ecoleng.2010.01.004.

MIGUÉNS, J. I. L.; MENDES, J. F. F. Travel and tourism: Into a complex network. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 387, n. 12, p. 2963-2971, 2008. doi:10.1016/j.physa.2008.01.058.

MINEGUISHI, S.; THIEL, D. System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain. **Simulation Practice and Theory**, v. 8, n. 5, p. 321-339, 2000. doi:10.1016/S0928-4869(00)00026-4.

- MOHAGHEGH, Z.; KAZEMI, R.; MOSLEH, A. Incorporating organizational factors into probabilistic risk assessment (PRA) of complex socio-technical systems : A hybrid technique formalization. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, p. 1000-1018, 2009. doi:10.1016/j.ress.2008.11.006.
- MUSANGO, J. K.; BRENT, A. C. A conceptual framework for energy technology sustainability assessment. **Energy for Sustainable Development**, v. 15, p. 84-91, 2011. doi:10.1016/j.esd.2010.10.005.
- NAIM, M. M.; TOWILL, D. R. Establishing a framework for effective materials logistics management. **International Journal of Logistics Management**, v. 5, n. 1, p. 81-88, 1994. doi:10.1108/09574099410805108.
- OVALLE, O. R.; MARQUEZ, A. C. The effectiveness of using e-collaboration tools in the supply chain: an assessment study with system dynamics. **Journal of Purchasing and Supply Management**, v. 9, n. 4, p. 151-163, 2003. doi:10.1016/S1478-4092(03)00005-0.
- PENG, M.; PENG, Y.; CHEN, H. Post-seismic supply chain risk management: A system dynamics disruption analysis approach for inventory and logistics planning. **Computers; Operations Research**, v. 42, p. 14-24, 2014. doi:10.1016/j.cor.2013.03.003.
- PERDANA, T.; KUSNANDAR. The Triple Helix Model for Fruits and Vegetables Supply Chain Management Development Involving Small Farmers in Order to Fulfill the Global Market Demand: A Case Study in "Value Chain Center (VCC) Universitas Padjadjaran". **Procedia - Social and Behavioral Sciences. 10th Triple Helix Conference 2012**, v. 52, p. 80-89, 2012. doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.444.
- PLOTT, Charles R.; CHEN, Kay-Yut. Information aggregation mechanisms: Concept, design and implementation for a sales forecasting problem. **California Institute of Technology: Social Science Working Paper**, v. 1131, March, 2002.
- PRETI, F. Forest protection and protection forest : Tree root degradation over hydrological shallow landslides triggering. **Ecological Engineering**, v. 61P, p. 633-645, 2013. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.11.009.
- PRUSTY, S. K.; MOHAPATRA, P. K. J.; MUKHERJEE, C. K. System archetype to understand unintended behavior in indian shrimp industry and to aid in strategy development. **Systemic Practice and Action Research**, v. 27, p. 397-416, 2014. doi:10.1007/s11213-013-9288-6.
- RAO, S.; GOLDSBY, T. J. Supply chain risks: a review and typology. **The International Journal of Logistics Management**, v. 20, n. 1, p. 97-123, 2009. doi:10.1108/09574090910954864.
- RINALDI, S. M.; PEERENBOOM, J. P.; KELLY, T. K. Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 7, p. 25-34, 2001. doi:10.1109/37.969131.
- ROSENFELD, S. N.; RUS, I.; CUKIER, M. Archetypal behavior in computer security. **The Journal of Systems and Software**, v. 80, p. 1594-1606, 2007. doi:10.1016/j.jss.2007.01.046.

SENGE, P. M. **The fifth discipline: the art and practice of the learning organization**. 1st ed. ed. New York: Currency Doubleday, 1994. ISBN 0-385-26095-4.

ŠPICAR, R. System dynamics archetypes in capacity planning. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 1350-1355, 2014. doi:10.1016/j.proeng.2014.03.128.

STERMAN, J. D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. Boston: [s.n.], v. 19, 2000. 982 p. ISBN 0-07-231135-5.

STOICA, R.; BROUSE, P. An adaptive and preemptive theory for improving systemic IT project failure trends ("AdaPIT" theory). **Procedia Computer Science**, v. 28, p. 247-256, 2014. doi:10.1016/j.procs.2014.03.031.

TAKO, A.; ROBINSON, S. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. **Decision Support Systems**, 52, n. 4, 2012. 802-815. doi:10.1016/j.dss.2011.11.015.

TEIMOURY, E. et al. A multi-objective analysis for import quota policy making in a perishable fruit and vegetable supply chain: A system dynamics approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, 93, 2013. 37-45. doi:10.1016/j.compag.2013.01.010.

THOMPSON, C.; KING, R. Compression system check-valve failure hazards. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 24, p. 722-735, 2011. doi:10.1016/j.jlp.2011.04.008.

TRACY, Leah. GIS in avalanche hazard management. **Iceland Meteorological Office**, 2001.

VILLATORO, M. et al. An approach to assess flooding and erosion risk for open beaches in a changing climate. **Coastal Engineering**, v. 87, p. 50-76, 2014. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.11.009.

VO, T. L. H.; THIEL, D. Economic simulation of a poultry supply chain facing a sanitary crisis. **British Food Journal**, 113, n. 8, 2011. 1011-1030. doi:10.1108/00070701111153760.

WHITE, D. Application of systems thinking to risk management: a review of the literature. **Management Decision**, v. 33, n. 10, p. 35-45, 1995. doi:10.1108/EUM000000003918.

WILSON, M. C. The impact of transportation disruptions on supply chain performance. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 43, n. 4, 2007. 295-320. doi:10.1016/j.tre.2005.09.008.

WU, Jon-Wuu; TSAI, Hui-Yin. Mixture inventory model with back orders and lost sales for variable lead time demand with the mixtures of normal distribution. **International Journal of Systems Science**, v. 32, n. 2, p. 259-268, 2001. doi:10.1080/00207720121523.

Capítulo 5: Conclusão

Esta dissertação tem a importância da criação de um método que vincula os assuntos de simulação da Dinâmica de Sistemas com a análise de riscos em cadeias de suprimentos. Para isso, foram desenvolvidos três artigos, com um objetivo geral de mostrar como uma análise de riscos na gestão de cadeia de suprimentos pode ser realizada através da Dinâmica de Sistemas, o qual também foi avaliado em um exercício conceitual de como poderia ser aplicado em análises de cadeias de suprimentos.

No primeiro artigo, uma revisão sistemática foi feita com 114 artigos contendo as palavras-chave “*system dynamics*” e “*supply chain*”. Estes foram separados e analisados em cinco categorias, envolvendo uma conceitualização da Dinâmica de Sistemas na Gestão de Cadeias de Suprimentos, comparação com outras ferramentas e duas sínteses das linhas de pesquisa. Apresenta, também, trabalhos com aplicações de simulação em sistemas reais e avaliações de aplicação teórica, nas quais o estudo de riscos apresentou um papel importante, embora pouco explorado. Neste caso, ocorre apenas com determinados riscos individualmente, sem a preocupação de relacionar comportamentos de diferentes riscos na gestão da cadeia de suprimentos, o qual, no entanto, mostra-se uma preocupação real.

O segundo artigo contribuiu com relação a dois assuntos na cadeia de suprimentos: uma classificação de riscos e uma demonstração do estudo de arquétipos em riscos da gestão da cadeia de suprimentos. A classificação de riscos em cadeias de suprimentos foi construída com base nas definições e classes de outras 18, constituindo uma convergência dessas classificações em uma nova, a qual é útil para a identificação, estudo e análise de riscos em cadeias de suprimentos. Na segunda contribuição, 12 arquétipos da Dinâmica de Sistemas e pensamento sistêmico foram adaptados a riscos em cadeias de suprimentos, onde demonstrou-se a compatibilidade da utilização dos arquétipos para auxiliar no entendimento dos mecanismos sistêmicos que geram estes riscos.

No artigo três, realizou-se a adaptação de métodos de Dinâmica de Sistemas e pensamento sistêmico para a construção de uma metodologia de Dinâmica de Sistemas em análise de riscos na Gestão de Cadeias de Suprimentos. Utilizou-se 12 princípios de simulação de Dinâmica de Sistemas, dois métodos de Dinâmica de Sistemas no âmbito empresarial, um deles incluindo o pensamento sistêmico, e também outro método de Dinâmica de Sistemas voltado ao estudo de cadeias de suprimentos, os quais foram adaptados conceitualmente para o estudo de riscos em cadeias de suprimentos. Uma avaliação conceitual do método proposto demonstra que o mesmo se mostra adequado para a análise sistêmica de

riscos, trazendo etapas que permitem a coleta de informações importantes da dinâmica e mecanismos geradores dos comportamentos de risco na Gestão de Cadeias de Suprimentos ao longo do tempo.

Assim, desenvolveu-se esta dissertação com o tema de simulação de Dinâmica de Sistemas na análise de riscos em cadeias de suprimentos, visando fornecer uma ampla compreensão da literatura envolvida, técnicas e conceitos associados, desenvolvendo um método com um conjunto de passos que permite o estudo de vulnerabilidades em cadeias de suprimentos com as causalidades entre os riscos.

O estudo de riscos em cadeias de suprimentos precisa considerar as causalidades mútuas existentes. É necessário pensar globalmente para construir um nível de entendimento adequado às complexidades emergentes dos sistemas mutuamente dependentes das organizações.

A Dinâmica de Sistemas, utilizando-se de uma visão ampla que provém do pensamento sistêmico, pode ser utilizada de forma a permitir análises causais entre os ambientes social, ambiental e econômico, juntamente aos riscos que os envolvem. Na Gestão de Cadeias de Suprimentos, é possível verificar uma compatibilidade pertinente com a simulação de Dinâmica de Sistemas, em virtude da possibilidade do teste de amplos horizontes em ações cujos acertos podem significar a sobrevivência de firmas e conjuntos de empresas.

Há destaque para o uso de arquétipos que ainda são pouco disseminados para o estudo de riscos, mas de grande importância para facilitar o processo de identificação dos mecanismos causadores de riscos na gestão da cadeia de suprimentos. Os arquétipos sistêmicos podem ser utilizados como ponto de partida para a análise dinâmica de riscos, facilitando o processo de construção do entendimento acerca dos mecanismos geradores de riscos em cadeias de suprimentos, no qual demonstraram uma importante compatibilidade.

O estudo holístico dos riscos que afetam a cadeia de suprimentos auxilia na gestão da própria cadeia, através da identificação das complexidades nesses sistemas, no estudo e compreensão dessas relações que se desenvolvem ao longo do tempo, com efeitos e interações no sistema natural, econômico e social. O pensamento sistêmico tem a função de minimizar os problemas de aprendizado e entendimento, tanto no ambiente escolar, como acadêmico e organizacional. Para que este aprendizado seja possível, parte-se do princípio que os elementos dos sistemas apresentam significado somente se descritos através de suas conexões e trocas.

Assim, nesta concepção, percebe-se que é necessário o desenvolvimento de uma visão de todo para um ajuste adequado de políticas com mecanismos sistêmicos que consideram suas implicações tangíveis ao longo do tempo. Na cadeia de suprimentos, significa transformar a visão de uma organização para atender aos interesses maiores em cooperação com outras organizações e benefício maior da sociedade em que está inserida.

Trabalhos futuros

Na revisão sistemática, não foram abordados artigos de pensamento sistêmico na gestão de cadeia de suprimentos, mas apenas artigos do assunto de Dinâmica de Sistemas. No pensamento sistêmico, complementarmente à Dinâmica de Sistemas, poderia ser feita outra revisão no que tange à gestão de cadeia de suprimentos. Seria mostrado um panorama destes estudos, o qual haveria exposição de um maior número de assuntos que podem ser abordados pela Dinâmica de Sistemas, com a vantagem de trazerem análises causais que servem de subsídio à criação de modelos em Dinâmica de Sistemas.

Para o artigo dois, foi realizada uma análise de compatibilidade conceitual, sem teste em aplicação de sistema real de gestão na cadeia de suprimentos. Para trabalhos futuros, os arquétipos adaptados a riscos podem ser especificados com dados e estruturas de simulação da Dinâmica de Sistemas, bem como analisados em partes da cadeia de suprimentos, tais como distribuição ou cadeia *upstream*, ou ainda em adaptações e simulação para indústrias e segmentos específicos de mercado com suas respectivas cadeias de suprimentos. Não foram adaptados todos os arquétipos de Dinâmica de Sistemas, mas apenas os 12 considerados mais adequados, embora a adaptação de outros arquétipos também seja possível. Outros arquétipos são encontrados no livro de Senge (Senge, 1994), Sterman (Sterman, 2000), em outros artigos (Kontogiannis, 2012), ou em *sites* como o *Learning Organization Practitioner's Network* (LOPN, 2015).

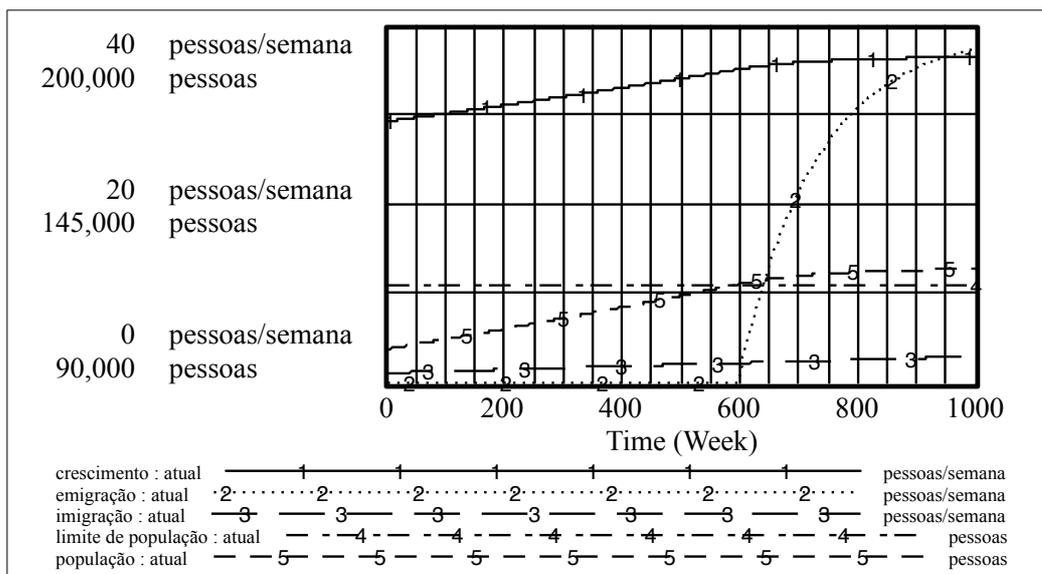
No artigo três, o método construído restringiu a análise dinâmica e causal de riscos aos conceitos e métodos relativos à Dinâmica de Sistemas. A avaliação do método é empírica e limitada com respeito à natureza do estudo dos riscos, onde se lida com acontecimentos futuros e imprevistos, podendo ser realizada a contextualização do método proposto para diferentes ambientes organizacionais de cadeias de suprimentos.

Por ser uma ferramenta híbrida, a Dinâmica de Sistemas permite a incorporação das diversas outras ferramentas e métodos de análise de riscos. Pode ser agregada a outras abordagens qualitativas e quantitativas, bem como com abordagens estocásticas e

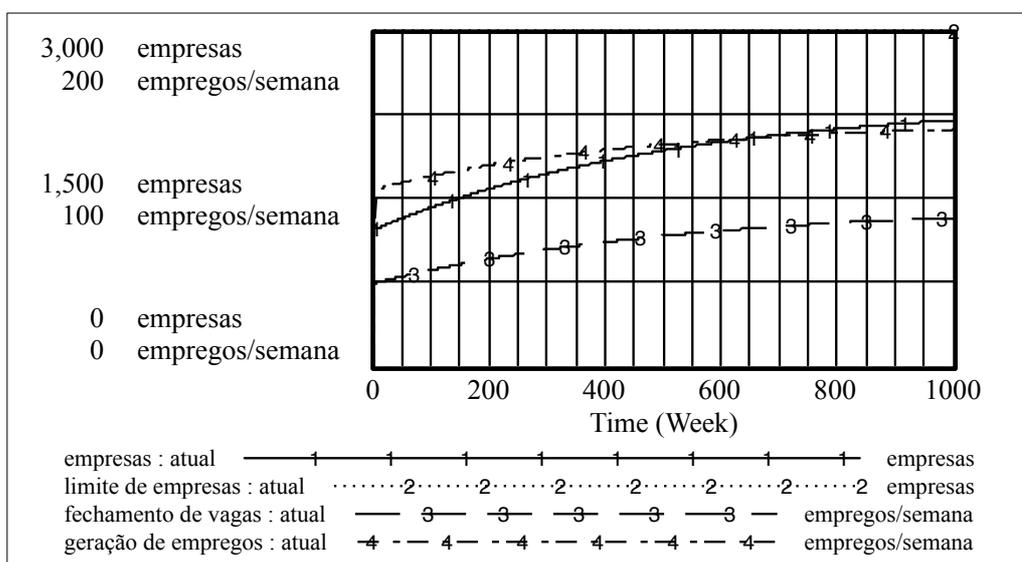
determinísticas no contexto de gestão de cadeias de suprimentos, que poderão ser incorporadas em sua metodologia para a análise de riscos. Ainda, é possível a criação de sistemáticas incorporando a dinâmica de sistemas como parte de um ferramental para o tratamento de riscos em diferentes modelos para a gestão de cadeias de suprimentos.

Apêndice I – Descrição dos Resultados do Modelo

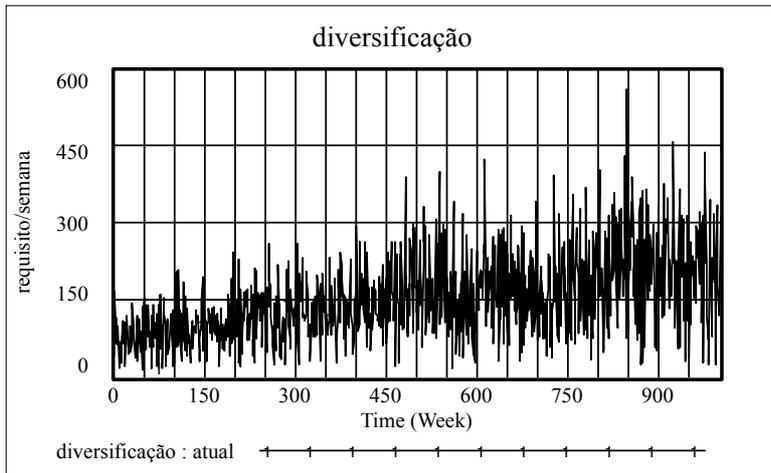
O comportamento de curva S descrito pelo crescimento da cidade em 20 anos se limita em um valor que foi considerado o limite de pessoas para a cidade, a partir do qual começa a haver emigração. Esse início da emigração faz com que a população passe a estabilizar-se para gerar o comportamento S.



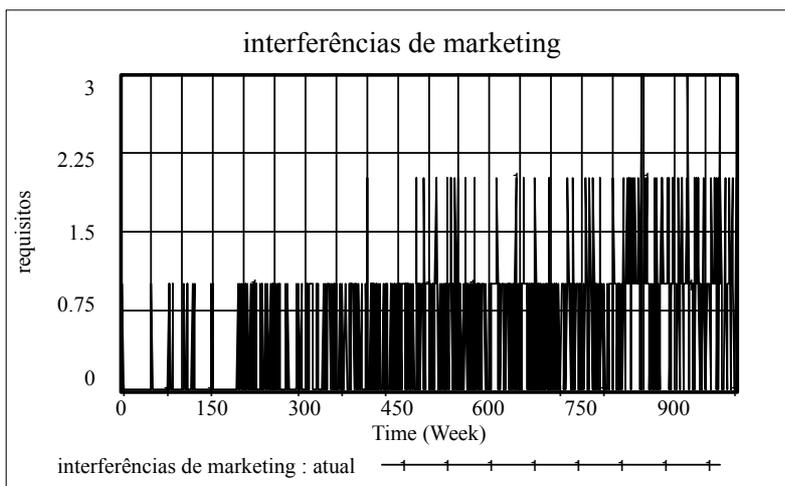
A quantidade de empresas, criação e fechamento de vagas, por sua vez, apresentam comportamento de estabilização, conforme o limite de empresas para a região vai sendo atingido. O limite no contingente de empresas se deve tanto à concorrência quanto à estabilização de crescimento da população local.



Com sua média associada ao número de trabalhadores, a diversificação ocorre probabilisticamente, representando um somatório de todas as inovações dentro das empresas realizado por um percentual reduzido de trabalhadores a cada semana. Ainda que o percentual de trabalhadores que inova seja bem pequeno, o somatório de inovações em toda a cidade fica alto passados os 20 anos.

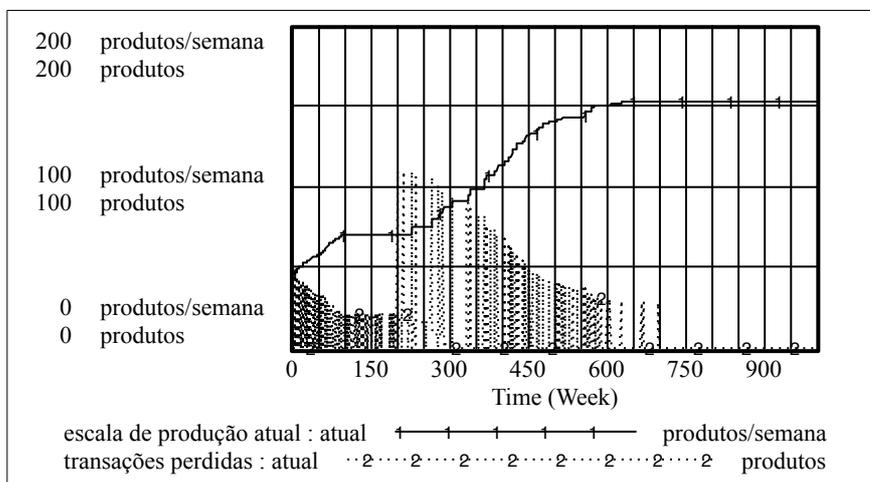


Algumas destas diversificações, por sua vez, dizem respeito à cadeia de suprimentos considerada, devendo ser incorporadas aos seus produtos e serviços, consideradas as interferências de *marketing*. Estas, sendo necessidades de modificação, eventualmente acabam se transformando em interferências de engenharia de produto.



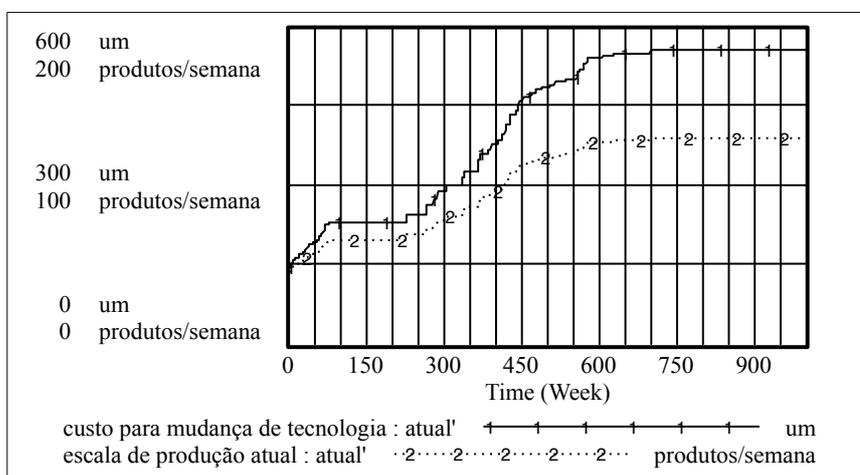
Com algumas interferências de *marketing* sendo aceitas para incorporações ao desenvolvimento de produto, os requisitos no projeto seguem crescendo e sendo

medida em que novos ativos são adquiridos para aumento de capacidade de produção do ponto de vista fabril.

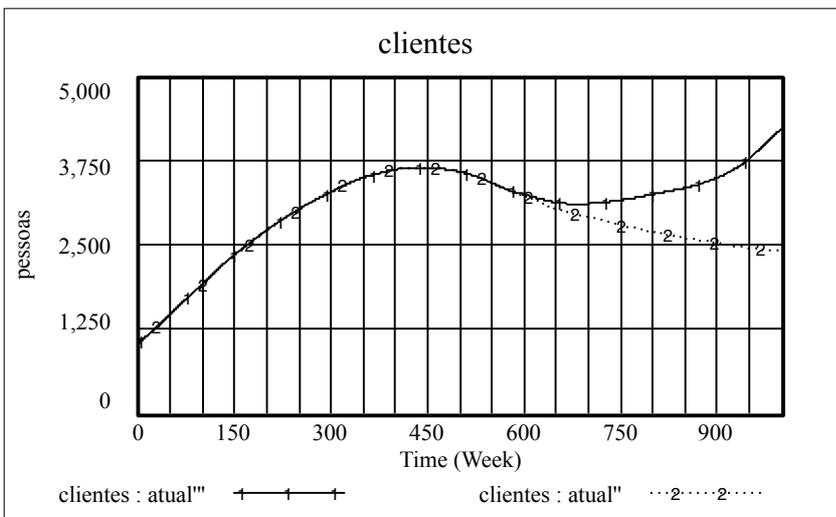


Caso a queda no preço seja considerada como facilitador da compra, é esperado que as transações perdidas aumentem no início do período, e depois reduzam mais rapidamente. No entanto, isto não acontece, apenas o percentual das transações perdidas se reduz e a capacidade final é levemente inferior. Os valores das transações perdidas ficam mais achatados, confirmando a eficácia de curto prazo da política de aumento de ativos.

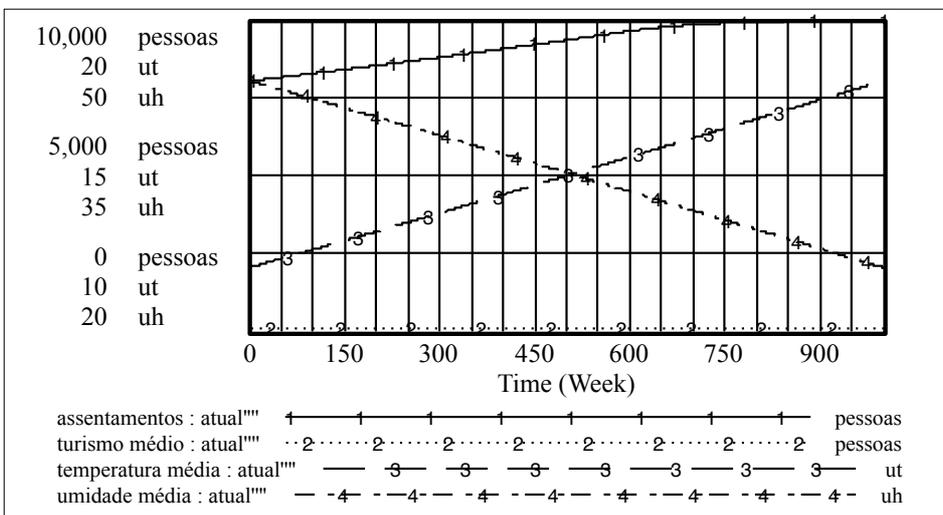
Por outro lado, para a política de substituição dos ativos, considerou-se uma relação exponencial de custos para a mudança de tecnologia, representando a mudança de hábitos e equipamentos utilizados pelo capital humano. Com o crescimento do custo de mudança, a percepção de inviabilidade da substituição também aumenta, sendo necessária uma decisão contrária aos resultados imediatos do sistema para que esta troca seja feita.



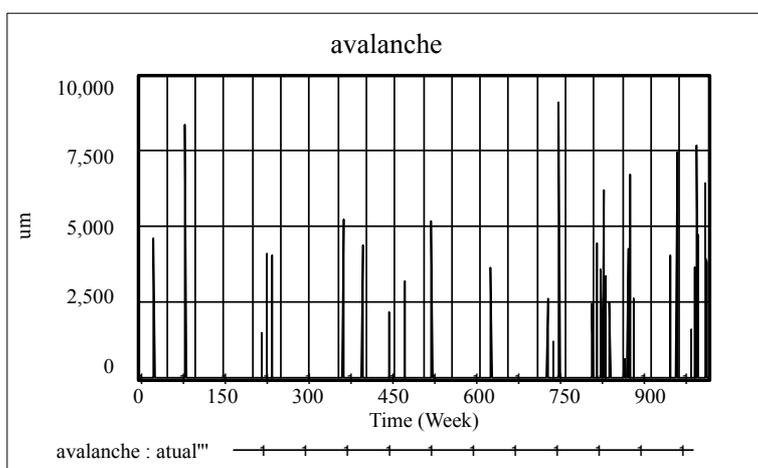
Caso em certo momento seja realizada a decisão de troca de tecnologia, então, haverá um acréscimo no ganho de clientes devido a características de maior customização no produto fabricado. Considera-se que o crescimento da customização no produto gera linearmente um aumento no ganho de clientes por semana. A depender da resposta, podem haver diferentes comportamentos no ganho de clientes, seja por uma suavização do decréscimo na curva 2 do gráfico abaixo, seja em um acréscimo substancial de clientes na curva 1.



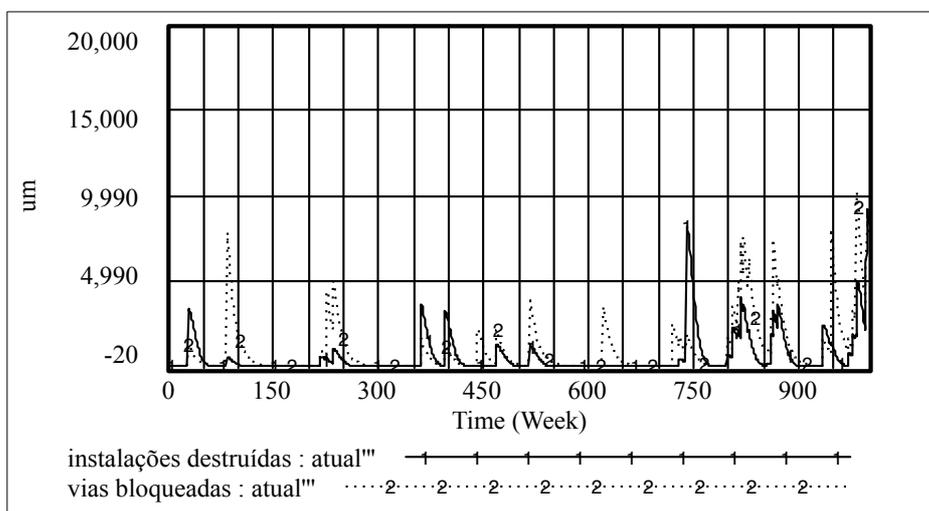
Para incluir neste gráfico o comportamento das avalanches, deve-se começar novamente pelo primeiro assunto abordado, que tratou dos efeitos do crescimento da cidade, mas desenvolvê-lo no que tange a alterações no clima da região. O desenvolvimento dos fatores considerados para o risco de avalanche têm os comportamentos abaixo, sendo eles os assentamentos, turismo médio, umidade média e temperatura média da região.



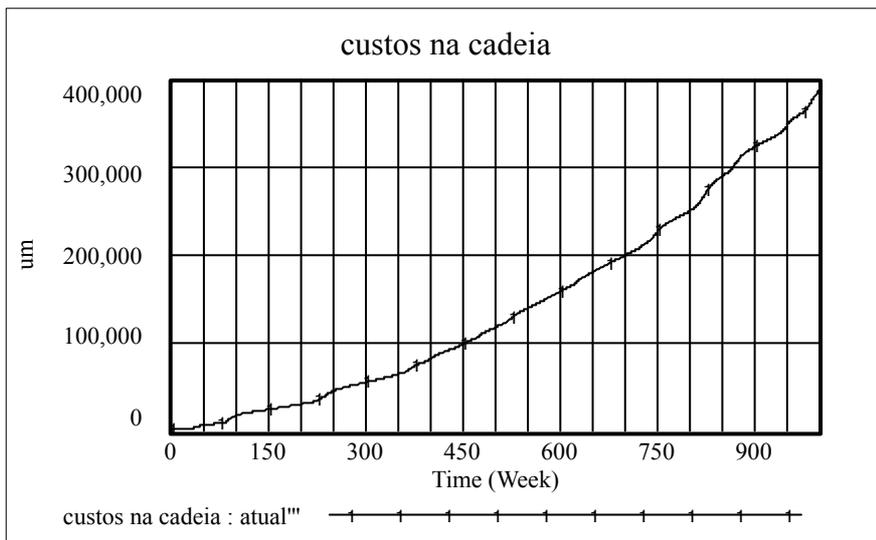
Para cada uma destas condições há uma distribuição de probabilidade normal para determinar a ocorrência de uma situação de avalanche, caso determinados valores sejam atingidos ou ultrapassados, tais como um máximo de temperatura, pessoas em turismo e umidade alta para precipitações. Estes dados provêm de informações técnicas e de regiões de avalanches. Uma vez acontecendo, a gravidade da avalanche também depende de uma distribuição normal. O resultado desta ocorrência em 20 anos se encontra no gráfico abaixo. São mostrados diretamente os valores das perdas totais causadas na cadeia de suprimentos.



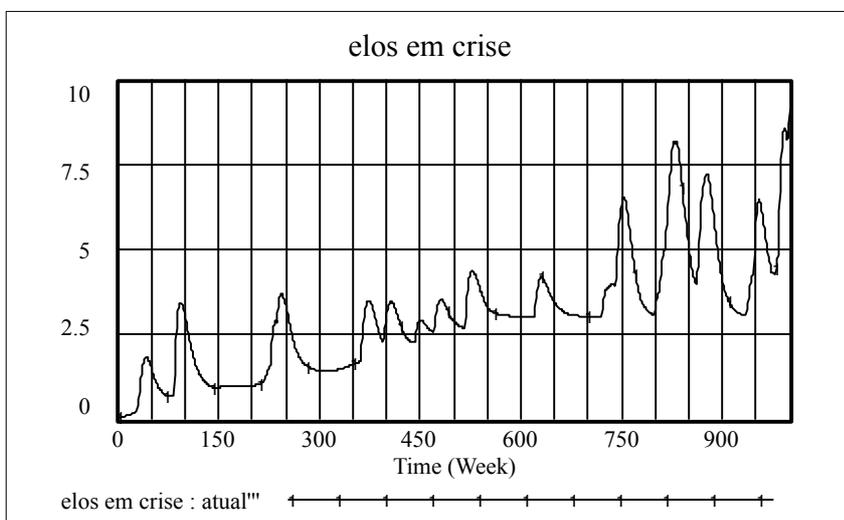
A respectiva destruição nas vias ou prédios também baseou-se em distribuição normal, com um percentual de perdas financeiras. Os valores assumidos pela variável avalanche, que indicam o nível de perda financeira, são recebidos instantaneamente nos estoques de perdas em vias ou prédios, havendo um atraso para a sua recuperação de funcionalidade, a qual faz com que os valores das perdas sempre retornem ao valor nulo, após o tempo de reconstrução.



Como os custos para estas reconstruções não se perdem, então criou-se uma variável cumulativa para contabilizar estes valores, chamada custos na cadeia, a qual também incluiu os gastos com desenvolvimento de produto.



O crescimento destes custos faz com que eles entrem em crise, ou mesmo fechem suas operações. No caso dos elos em crise, considera-se um atraso até que os mesmos se recuperem parcial ou totalmente. Conectando-se com a política de não substituição de tecnologia na firma, a crise nos componentes da cadeia de suprimentos fortalece a percepção de inviabilidade da substituição dentro da firma, atrasando, ou mesmo impedindo totalmente a decisão por novos ativos da nova tecnologia.



Apêndice II – Dados do modelo

(01) "% afetado"=RANDOM NORMAL(0 , 1 , 0.3 , 0.25 , 0)

Units: **undefined**

Percentual de estrago para as vias ou construções relativas à cadeia de suprimentos. É mais comum a interrupção de vias que a destruição de construções.

(02) acumulação necessidade de compra lojas= INTEG (vendas nas lojas-pedidos das lojas para as fábricas,1)

Units: produtos

(03) assent tot=IF THEN ELSE(assentamentos>9999 , 1 , 0)

Units: pessoas

(04) assentamentos=população*0.08

Units: pessoas

Um percentual das imigrações vai para assentamentos não regularizados.

(05) atividade=atividade da cadeia-(instalações destruídas+vias bloqueadas)

Units: um/semana

(06) atividade da cadeia=consumo total*0.008+10000

Units: um

O aumento do consumo total aumenta a atividade média da cadeia a partir de 100.

(07) atraso acumulado= INTEG (retrabalho*2,0)

Units: semanas

Número acumulado de semanas em que houveram alterações de projeto além do previsto. Em média, cada retrabalho aumenta o projeto em duas semanas.

(08) avalanche=condições de risco*RANDOM NORMAL(200 , 400000 , 4000 , 2000 , 0)

Units: um

Para efeitos deste modelo, a gravidade de ocorrência da avalanche será medida em unidades monetárias de prejuízo para a cadeia de suprimentos, as quais podem variar de um mínimo de 200 u.m., no caso de prejuízos apenas para o sistema de transportes, ou até 400.000 u.m., para perdas maiores. A avalanche média fica avaliada em 4.000 u.m. em um período, e desvio de 2.000.

(09) capacidade nova tecnologia= INTEG ("novos ativos nova tecnol.",0)

Units: **undefined**

(10) capacidade tecnologia atual= INTEG ("novos ativos tecnol. atual",50)

Units: ativos

Inicialmente há capacidade para a produção de 50 unidades dos produtos com a tecnologia e customização correspondente atuais.

(11) $\text{clientes} = \text{INTEG}(\text{ganho de clientes} - \text{perda de clientes}, 1000)$

Units: pessoas

Há mil clientes em potencial inicialmente.

(12) $\text{concluir} = \text{IF THEN ELSE}(\text{"requisitos em desenvolv."} > 0, 0.5/4, 0)$

Units: requisitos/semana

Desenvolve-se 50% de um requisito por semana.

(13) $\text{condições de risco} = \text{IF THEN ELSE}(\text{assentamentos} > 9999 : \text{OR} : \text{distribuição da umidade} > 92 : \text{OR} : \text{distribuição de temperatura} > 24 : \text{OR} : \text{distribuição do turismo} > 40, 1, 0)$

Units: **undefined**

A condição do risco é sinônimo de sua ocorrência. Considera-se no modelo que a avalanche acontece através da ocorrência alternativa de três possíveis condições, de aumento de assentamentos, umidade alta, temperatura baixa, ou alto volume de pessoas em turismo.

(14) $\text{consumo total} = \text{população} * 50$

Units: um

Consumo semanal de bens e serviços pela população em unidades monetárias.

Considerou-se um aumento linear de consumo com relação à população.

(15) $\text{crescimento} = \text{população} * 14 * (1 / (4 * 12000))$

Units: pessoas/semana

Média nacional de natalidade no Brasil de 14 por mil.

(16) $\text{custo para mudança de tecnologia} = (\text{escala de produção atual})^{(1.3)}$

Units: um

(17) $\text{customização} = \text{capacidade nova tecnologia} / 2$

Units: **undefined**

A nova tecnologia permite uma customização quatro vezes maior que a tecnologia antiga.

(18) $\text{custos na cadeia} = \text{INTEG}(\text{desbloqueio} + \text{reconstrução} + \text{gastos com desenvolvimento}, 0)$

Units: um

Somatório acumulado dos diversos custos.

(19) $\text{desbloqueio} = \text{IF THEN ELSE}(\text{vias bloqueadas} > 0, \text{DELAY1}(\text{vias bloqueadas} * 0.08, \text{tempo de desbloqueio de vias}), 0)$

Units: um/semana

Mesma capacidade da cidade para o desbloqueio de vias, limitado em recursos empregados a cada semana.

(20) desenvolver=IF THEN ELSE(requisitos do projeto>0:AND:"requisitos em desenvolv."<=0:AND:interferência financeira<>1 , 2 , 0)

Units: requisitos/semana

No modelo, são desenvolvidos dois requisitos por vez.

(21) distribuição da umidade=RANDOM NORMAL(0 , 100 , umidade média , 20 , 0)

Units: uh

A umidade relativa do ar pode variar de zero a 100 u.u., e seu desvio considerado na cidade é de 20 u.u..

(22) distribuição de temperatura=RANDOM NORMAL(-10 , 25 , temperatura média,5 ,0)

Units: ut

Desvio padrão de 5 u.t., mínimo de -10 u.t. e máximo de 25 u.t.

(23) distribuição do turismo=RANDOM NORMAL(0 , 70 , turismo médio , 10 , 0)

Units: pessoas

Máximo de 70 turistas em uma semana, mínimo zero, e desvio de 10.

(24) diversificação=empregos*RANDOM NORMAL(0.001/4 , 0.08/4 , 0.01/4 0.005/4 ,0)

Units: requisito/semana

A ação de diversificação nos produtos e serviços oferecidos para a cidade depende da capacidade de trabalho utilizada, representada no modelo pela mão de obra empregada. Um percentual de trabalhadores são os responsáveis pela inovação a cada mês. Do total de trabalhadores, 1% inovam em média a cada mês com um novo requisito significativo que os clientes procuram.

(25) elos em crise=(custos na cadeia-DELAY1(custos na cadeia,2*4))/1000

Units: **undefined**

Os elos entram em crise conforme o crescimento dos custos associados aos riscos considerados, mas se recuperam em questão de dois meses.

(26) emigração=IF THEN ELSE(população>limite de população, 0.008*(população-limite de população),0)

Units: pessoas/semana

O crescimento da região começa a ser estabilizado através da imigração.

(27) empregos= INTEG (geração de empregos-fechamento de vagas,30000)

Units: empregos

Inicialmente, considera-se que a cidade apresenta 30% de sua população como sendo economicamente ativa.

(28) $\text{empresas} = \text{INTEG}(\text{entrada de empresas-saída de empresas}, 1200)$

Units: empresas

Inicia-se com 1200 empresas na cidade.

(29) $\text{entrada de empresas} = 0.3 * \text{LN}(\text{consumo total})$

Units: empresas/semana

As empresas são criadas ao encontro do poder de consumo do público em geral.

(30) $\text{escala de produção atual} = \text{capacidade tecnologia atual} * 0.9$

Units: produtos/semana

Trabalha-se a 90% de capacidade com a tecnologia atual.

(31) $\text{fechamento de vagas} = \text{saída de empresas} * 20$

Units: empregos/semana

Cada empresa que se retira descrece a oferta de emprego em uma média de 20 vagas.

(32) $\text{"fechar negócio (perspectiva da operação)} = \text{INTEG}(\text{IF THEN ELSE}(\text{sobrevivência de elos} > 2.17e-005, 1, 0), 0)$

Units: **undefined**

Em determinado nível do risco de sobrevivência as empresas da cadeia de suprimentos não resistem, e entram em falência.

(33) $\text{FINAL TIME} = 1000$

Units: Week

The final time for the simulation.

(34) $\text{ganho de clientes} = 9 + \text{customização}$

Units: pessoas/semana

Considera-se que 5 novas pessoas ficam sabendo do produto a cada semana.

(35) $\text{gastar} = \text{"requisitos em desenvolv."}$

Units: um/semana

(36) $\text{gastos com desenvolvimento} = \text{INTEG}(\text{gastar}, 0)$

Units: um

(37) $\text{geração de empregos} = \text{IF THEN ELSE}(\text{RAMP}(0.2/1000, 0, 1000) * \text{população} < \text{empresas}^{(1/2)} * 3, \text{RAMP}(0.2/1000, 0, 1000) * \text{população}, \text{empresas}^{(1/2)} * 3)$

Units: empregos/semana

A oferta de vagas novas por parte das empresas conforme o crescimento da população economicamente ativa, considerado de 0.3 a 0.5 em vinte anos.

(38) $hum\ tot = IF\ THEN\ ELSE(distribuição\ da\ umidade > 92, 1, 0)$

Units: uh

(39) $umidade\ média = 50 - urbanização * (3/0.1)$

Units: uh

A umidade média da cidade decresce 3 u.u. a cada 10% de área urbanizada. A umidade média inicial é de 50 u.u. A umidade gera as precipitações, as quais criam uma camada de cristais lisos sob a neve, aumentando as condições de risco de avalanche.

(40) $imigração = empregos / 30000$

Units: pessoas/semana

(41) INITIAL TIME = 0

Units: Week

The initial time for the simulation.

(42) $instalações\ destruídas = INTEG (" \% \text{afetado} " * avalanche - reconstrução, 0)$

Units: um

O percentual afetado se refere à construção.

(43) $interferência\ financeira =$

$IF\ THEN\ ELSE(gastos\ com\ desenvolvimento \geq 370, STEP(1,1), 0)$

Units: **undefined**

Interferência financeira ficou representando a viabilidade limite para o lançamento do projeto, onde o mesmo será lançado independentemente do grau de conclusão.

(44) $interferências\ de\ engenharia = IF\ THEN\ ELSE(RANDOM\ NORMAL(0,1, 0.5, 0.05, 0) > 0.6 : OR : interferências\ de\ marketing > 2, 1, 0)$

Units: requisitos

Algumas das interferências de marketing são aprovadas e passam a ser interferências de engenharia no desenvolvimento de produtos.

(45) $interferências\ de\ marketing = INTEGER(diversificação * 0.007)$

Units: requisitos

A interferência de marketing acontece quando é percebido um aumento significativo de diversificações em relação ao acréscimo de requisitos ao perfil de consumo da população em um período.

(46) $limite\ de\ empresas = 3000$

Units: empresas

Quantidade de atividade econômica na qual as variáveis para ocorrência do risco de avalanche começam a se manifestar.

(47) limite de população=120000

Units: pessoas

Limite no qual o interesse de ocupação da região começa a estabilizar-se.

(48) "novos ativos nova tecnol."=IF THEN ELSE(percepção de inviabilidade da substituição>750,IF THEN ELSE(RANDOM NORMAL(0 , 1 , 0.5 , 0.1 , 0)>0.5 :AND:transações perdidas>0:AND:capacidade nova tecnologia<=200, INTEGER(transações perdidas/20) ,0), 0)

Units: ativos/semana

Em um certo nível de transações perdidas, as fábricas se vêem obrigadas a trocar a tecnologia de produção, pois os ganhos de escala e preço não compensam mais os prejuízos no modelo. É possível colocar em funcionamento uma unidade do ativo por semana.

(49) "novos ativos tecnol. atual"=IF THEN ELSE(RANDOM NORMAL(0 , 1 , 0.5 , 0.1 , 0)>0.5 :AND:transações perdidas>0:AND:capacidade tecnologia atual<=200, INTEGER(transações perdidas/20) ,0)

Units: ativos/semana

Aumento de ativos com probabilidade da decisão e a presença de transações perdidas no período. A capacidade de produção cresce para 20 produtos por ativo.

(50) pedidos das lojas para as fábricas=IF THEN ELSE(acumulação necessidade de compra lojas>=120,90*INTEGER(acumulação necessidade de compra lojas/120),0)

Units: produtos/semana

A necessidade de compra é suprida através de lotes contendo 90 unidades do produto, as quais são distribuídas na rede.

(51) percepção de inviabilidade da substituição=elos em crise*50+custo para mudança de tecnologia

Units: **undefined**

(52) perda de capital humano=IF THEN ELSE(avalanche > 7000 , RANDOM NORMAL(0 , 90 , 5 , 4 , 0) , 0)

Units: pessoas

A depender da dimensão da avalanche, vidas são perdidas. Considera-se no modelo que apenas avalanches de grande porte fazem vítimas fatais.

(53) perda de clientes=IF THEN ELSE(atraso acumulado>2:AND:clientes>=0,atraso acumulado*0.4,0)

Units: pessoas/semana

Cada semana acumulada de retrabalho faz com que a taxa de perda de clientes aumente de maneira sutil, mas crescente, significando o poder de influência da adesão por outras alternativas ao produto a ser lançado. As perdas continuam a aumentar cumulativamente a cada período.

(54) população= INTEG (crescimento+imigração-emigração,100000)

Units: pessoas

100.000 habitantes inicialmente na cidade.

(55) preço= (1/escala de produção atual)*800+7

Units: **undefined**

Quanto maior a escala de produção, menor o preço.

(56) promoção da cidade= (empresas)^(1.003)

Units: um

A promoção da cidade em unidades monetárias é proporcional exponencialmente ao número de empresas na cidade.

(57) reconstrução=IF THEN ELSE(instalações destruídas>0, DELAY1(instalações destruídas

*0.08 , "tempo de reconstrução por % destruído"), 0)

Units: um/semana

2000 unidades monetárias são reconstruídas no patrimônio a cada semana.

(58) requisitos do projeto= INTEG (interferências de engenharia*2-desenvolver,10)

Units: requisitos

Inicialmente 10 requisitos. Cada interferência de engenharia gera dois novos requisitos, um significando o retrabalho de um requisito anterior, outro representando a adaptação de um novo requisito ao projeto de desenvolvimento de produto na cadeia.

(59) "requisitos em desenvolv."= INTEG (desenvolver-concluir,0)

Units: requisitos

(60) requisitos prontos= INTEG (concluir-retrabalho,0)

Units: requisitos

Um projeto de desenvolvimento de produto pode continuar com os ajustes de requisitos indefinidamente, caso não seja escolhido um ponto de corte.

(61) $\text{retrabalho} = \text{IF THEN ELSE}(\text{interferências de engenharia} > 0 : \text{AND} : \text{interferência financeira} < 1, \text{interferências de engenharia}, 0)$

Units: requisitos/semana

No modelo, para cada interferência de engenharia há perda de um dos requisitos já desenvolvidos.

(62) $\text{saída de empresas} = \text{IF THEN ELSE}(\text{empresas} < \text{limite de empresas}, \text{empresas} * 0.002, \text{empresas} * 0.002 + 0.0008 * (\text{empresas} - \text{limite de empresas}))$

Units: empresas/semana

A quantidade de empresas se regula através da concorrência.

(63) $\text{SAVEPER} = \text{TIME STEP}$

Units: Week [0,?]

The frequency with which output is stored.

(64) $\text{sobrevivência de elos} = 1 / \text{atividade}$

Units: **undefined**

O risco de sobrevivência das empresas nos elos aumenta tanto quanto as oscilações nas atividades, de maneira que maiores quedas proporcionam maiores riscos de sobrevivência

(65) $\text{temp tot} = \text{IF THEN ELSE}(\text{distribuição de temperatura} > 24, 1, 0)$

Units: ut

(66) $\text{temperatura média} = \text{urbanização} * (1/0.1) + 10$

Units: ut

A temperatura média da cidade cresce 1 u.t. a cada 10% de área urbanizada. A temperatura média inicial é de 10 u.t.

(67) $\text{tempo de desbloqueio de vias} = 1$

Units: semanas

Uma semana

(68) $\text{"tempo de reconstrução por \% destruído"} = 4$

Units: semanas

Tempo de quatro semanas.

(69) $\text{TIME STEP} = 1$

Units: Week [0,?]

The time step for the simulation.

(70) $\text{transações perdidas} = \text{IF THEN ELSE}(\text{pedidos das lojas para as fábricas} > \text{escala de produção atual}, (\text{pedidos das lojas para as fábricas} - \text{escala de produção atual}) * (\text{preço}/25), 0)$

Units: produtos

Com pedidos maiores que a escala, existe perda de transações que poderiam ter sido realizadas. Se a escala for maior que o pedido, então não existe perda de transação.

Desconsidera-se o estoque como um custo significativo.

$$(71) \quad \text{tur tot} = \text{IF THEN ELSE}(\text{distribuição do turismo} > 40, 1, 0)$$

Units: pessoas

$$(72) \quad \text{turismo médio} = \text{promoção da cidade} * (1/100)$$

Units: pessoas

Uma pessoa visitante para cada 100 unidades monetárias investidas na promoção da cidade pelas empresas.

$$(73) \quad \text{urbanização} = \text{INTEG}(\text{LN}(\text{empresas}^{(8e-005)}), 0.2)$$

Units: área urbanizada

A área inicial urbanizada corresponde a 20% da área ocupada pela cidade. Com a urbanização, esta área também aumenta de maneira linear. Considera-se que a urbanização decorrente da instalação de empresas é imediata para efeitos do modelo, por isso uma ligação direta entre estoques.

$$(74) \quad \text{vendas nas lojas} = \text{INTEGER}(\text{clientes} * \text{RANDOM NORMAL}(2, 21, 7, 3, 0) * 4/1000)$$

Units: vendas/semana

As vendas por semana são proporcionais ao número de clientes frequentadores dos espaços considerados. Média de 0.7% do total de clientes que conhecem o produto e mantêm a intenção de compra retornam a cada semana.

$$(75) \quad \text{vias bloqueadas} = \text{INTEG}((1 - \% \text{afetado}) * \text{avalanche-desbloqueio}, 0)$$

Units: um

O complemento do % afetado assume um valor maior de estrago para as vias.